

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)

2338/3

(Број захтева)

30.12.2013.године

(Датум)

З А Х Т Е В**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:

БРАНКА (МИЛУТИН) КОКОТОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **БРАНКО (МИЛУТИН) КОКОТОВИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ

Универзитет је дана 06.06.2011. год. својим актом под бр. 06-6078/21-11 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **БРАНКА (МИЛУТИН) КОКОТОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 27.12.2012. године, одлуком факултета под бр. 2446/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Милош Главоњић</u>	<u>Редовни професор</u>	<u>Производно машинство</u>	<u>Машински факултет Београд</u>
2. <u>Др Љубодраг Тановић</u>	<u>Редовни професор</u>	<u>Производно машинство</u>	<u>Машински факултет Београд</u>
3. <u>Др Павао Бојанић</u>	<u>Ред.проф. у пензији</u>	<u>Производно машинство</u>	<u>Машински факултет Београд</u>
4. <u>Др Драган Милутиновић</u>	<u>Редовни професор</u>	<u>Производно машинство</u>	<u>Машински факултет Београд</u>
		<u>Машине алатке,</u> <u>флексибилни</u> <u>технолошки системи и</u> <u>аутоматизација</u>	
5. <u>Др Милан Зељковић</u>	<u>Редовни професор</u>	<u>поступака пројектовања</u>	<u>ФТН Нови Сад</u>

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 28.11.2013. 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: 2338/2

Датум: 28.11.2013. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању („Сл. гласник РС“ бр. 76/05,100/07,97/08,44/10,93/12 и 89/13) и чл. 63. Статута Машинског факултета, а на основу извештаја Комисије у саставу: проф.др Милош Главоњић, ментор, проф.др Љубодраг Тановић, др Павао Бојанић, ред.проф. М.Ф. у пензији, проф.др Драган Милутиновић и проф.др Милан Зељковић, ФТН Нови Сад о оцени докторске дисертације „Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему“ докторанта мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 28.11.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ“** докторанта **мр БРАНКА КОКОТОВИЋА**, 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

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији
Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 2446/2 од 27. 12. 2012. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** под насловом

ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ

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 је Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду поднео захтев број 629/1 од 13. априла 2011. године да му се одобри израда докторске дисертације под насловом **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** и именује Комисија за подношење извештаја о прихватању предложене теме ове докторске дисертације. Катедра за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду размотрила је овај захтев и Наставно-научном већу предложила чланове Комисије и Ментора у својој Одлуци број 629/2 од 19. априла 2011. године. Комисија и Ментор су именовани одлуком Наставно-научног већа број 629/3 од 28. априла 2011. године.

Комисија је Наставно-научном већу 10. маја 2011. године поднела свој Извештај о прихватању теме број 629/4 са предлогом да се **мр Бранку Кокотовићу, дипл.инж.маш.** одобри израда докторске дисертације под предложеним насловом и да се за ментора именује **проф. др Милош Главоњић**. Наставно-научно веће је прихватило предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** докторанта **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** и за ментора именovalo **проф. др Милоша Главоњића** својом одлуком број 629/5 од 12. маја 2011. године. На основу дате сагласности Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној 06. јуна 2011. године, Декан Машинског факултета Универзитета у Београду донео је Закључак број 2090/1 од 23. јуна 2011. године да се одобрава израда докторске дисертације докторанта **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** под насловом **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему**, ментор: **проф. др Милош Главоњић**.

Ментор је 14. децембра 2012. године обавестио Наставно-научно веће и Катедру за производно машинство да је Кандидат **мр Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш.** завршио своју докторску дисертацију и предложио да се именује Комисија за оцену и одбрану ове дисертације. Катедра за производно машинство је размотрила овај Извештај на својој седници одржаној 18. децембра 2012. године и Наставно-научном већу предложила да се за оцену и одбрану ове дисертације именује Комисија у саставу: проф. др Милош Главоњић, ментор, проф. др Љубодраг Тановић, др Павао Бојанић, редовни професор Машинског факултета у пензији, проф. др Драган Милутиновић и проф. др Милан Зељковић са Факултета техничких наука из Новог Сада. Извештај Ментора и овај предлог Катедре упућени су Наставно-научном већу 21. децембра 2012. године под бројем 2446/1.

На основу извештаја Ментора и предлога Катедре за производно машинство Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду именovalo нас је за чланове Комисије за оцену и одбрану дисертације под насловом **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** својом одлуком број 2446/2 од 27. децембра 2012. године.

Кандидат **мр Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш.** је на Машинском факултету Универзитета у Београду **08. фебруара 1994. године** одбранио магистарски рад под насловом **Развој методе концепцијског пројектовања вишенамених технолошких система на бази теорије ћелијских аутомата.**

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** припада области техничких наука, а од њих машинству и ужој научној области Производно машинство. Ментор је **проф. др Милош Главоњић**, чија је ужа научна област Производно машинство, а у оквиру ње машине алатке и обрадни системи. Ментор у овој области има пет објављених радова и два рада у штампи и то већином у истакнутим и водећим међународним часописима.

1.3. Биографски подаци о Кандидату

Бранко Кокотовић је рођен у Земуну 3. јануара 1964. године. Основну школу је завршио у Земуну. Прве две године средњег образовања стекао у Првој земунској гимназији. Средњошколско образовање је наставио у ОЦ “Петар Драпшин” у Београду, где је и матурирао са одличним успехом 1982. године и стекао звање “Техничар за механичко испитивање материјала”. Војни рок је служио у ЈНА 1982/1983. године у Ајдовшчини и Випави (у данашњој Републици Словенији).

На Машински факултет Универзитета у Београду уписао се школске 1983/1984. године. Дипломирао је 28. новембра 1989. године на смеру за Производно машинство (усмерење: Производна кибернетика) са просечном оценом 8.93 (осам и 93/100). Дипломски рад је урадио из предмета Технологија машиноградње (ментор: проф. др Милисав Калајџић) и исти одбранио са оценом 10. Магистарску тезу под називом “Развој метода концепцијског пројектовања вишенамених технолошких система на бази теорије ћелијских аутомата”, рађену под менторством проф. др Владимира Милачића, одбранио је 8. фебруара 1994. године.

Од 20. фебруара 1990. године до 8. септембра 2013. године био је запослен на Машинском факултету Универзитета у Београду, на Катедри за производно машинство: прво као асистент приправник (до 1. јула 1994. године), а затим као асистент (до 9. септембра 2012.

године). На истој Катедри потом је радио од 10. септембра 2012. године до 31. децембра 2012. године као сарадник у лабораторији – магистар, а од 1. јануара 2013. године до 8. септембра 2013. године као виши технички сарадник лабораторије. Од 9. септембра 2013. године до данас запослен је у Иновационом центру Машинског факултета у Београду д.о.о.

Кроз усавршавање и кроз рад на више научних и стручних пројеката из области производног машинства, био је аутор и коаутор већег броја радова, првенствено на научно-стручним скуповима, а мање у часописима. Коаутор је три техничка решења и већег броја експерименталних инсталација, првенствено намењених унапређењу наставе и актуелним истраживањима.

Као асистент на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду учествовао је у извођењу наставе на предметима Машине алатке, Технологија машинске обраде, Машине алатке и работи нове генерације и Машине алатке М.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** има следећих седам поглавља:

1. Увод (на 17 страна, са 2 слике и једном табелом),
2. Методи предиковања тренутних вредности компонената силе глодања, засновани на симулацији (на 68 страна, са 54 слике и 13 табела),
3. Развијене процедуре предиковања репрезентативних вредности силе глодања дуж програмиране путање алата (на 108 страна, са 83 слике и 10 табела),
4. Методи оптимизације програмиране брзине помоћног кретања по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања (на 40 страна, са 27 слика и 3 табеле),
5. Развијене процедуре оптимизације брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања (на 38 страна, са 36 слика и 4 табеле),
6. Закључак (на 13 страна) и
7. Литература (на 8 страна, са 149 референци).

Докторска дисертација има укупно 292 стране текста са 202 слике и 31 табелом. У првом поглављу уведени су и концизно описани појмови виртуелног обрадног система и обраде глодањем у њему. Потом су у два пара поглавља наведени методи, па описане самостално развијене процедуре за имплементацију тих метода у обради глодањем у виртуелном обрадном систему за следеће две теме:

- (i) Предиковање тренутних и репрезентативних вредности компонената силе глодања, у поглављима 2. и 3. и
- (ii) Оптимизација програмиране брзине помоћног кретања по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања, у поглављима 4. и 5.

Појам репрезентативне силе глодања односи се на неку компоненту и/или на неки збир компонената и/или на неку специфичну пројекцију силе глодања, издвојену из тренутних вредности, у референтном временском интервалу, која може да се користи за постављање критеријума за оптимизацију програмиране брзине помоћног кретања у програму за обраду глодањем. Помоћу репрезентативне силе глодања се за посматрани процес обраде на погодан и увек на исти начин врши његова планирана оптимизација.

Дисертација је тиме уређена у два пара дугих и исцрпних порука, у којима се описује припрема обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. Прва порука у овим паровима је брижљиво уређена систематизација метода, а друга је приказ резултата, до којих је Кандидат, **мр Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш**, дошао у самосталној разради тих метода у процедурама за предиковање тренутних и репрезентативних вредности компонената силе глодања, у првом пару поглавља и у процедурама за оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, у другом пару поглавља.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу су најављена истраживања представљена у овој дисертацији, уз навођење полазних хипотеза. Такође је дефинисан домен истраживања у односу на ширу научно стручну област симулације и оптимизације процеса обраде. Потом је укратко описано виртуелно обрадно окружење, у којем се врши симулација обраде глодањем. То је виртуелни обрадни систем за који се, у овој дисертацији, припремају програми за обраду глодањем са оптимизованим брзинама помоћних кретања по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања.

Као кључни доприноси дисертације овде су издвојене развијене процедуре за предиковање сила глодања дуж програмиране путање и за оптимизацију брзине помоћног кретања дуж путање, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања на датом нивоу. Такве процедуре подразумевају значајан допринос у развоју софтверског окружења за пројектовање технологије за нумерички управљане машине алатке (НУМА). Значај предиковања сила при обради одабраним режимом, уз могућност поновног програмирања те обраде, која ће резултовати ограничењем силе, произилази из чињенице да сила резања преставља процесну променљиву којом су у великој мери одређени атрибути квалитета обрађених делова, као и понашања обрадног система у току обраде.

Полазним хипотезама су најављени модели, који ће бити примењени у развоју поменутих процедура. За предиковање сила при задатим условима, основу представља макромеханички модел сила резања на елементарним деловима сечива, насталим дискретизацијом резног дела глодала. Поузданост процедуре се остварује анализом компонената силе у коначном броју дискретних тренутака при симулацији његовог обртања и датим условима обраде. Потреба за реконструкцијом контактне површи обратка и омотача алата у променљивим условима, какви важе у општем случају обраде дуж програмиране путање, налаже потребу формирања процедуре која ће укључити и модел обратка и користити програм обраде као улаз. Другом хипотезом је најављена примена неког од апроксимативних метода интерпретације просторног распореда запремине обратка. Такав приступ у највећој мери одређује потребне функције појединих модула у укупној процедури предиковања сила. Оптимизација брзина помоћног кретања дуж програмиране путање, по критеријуму одржавања задатог нивоа изабране компоненте силе глодања се, у највећој мери, ослања на процедуру предиковања сила. То је формулисано у трећој полазној хипотези.

Потреба развоја поменутих процедура, таквих да се могу имплементирати у виду одговарајућих програма, један је од битних функционалних захтева. Њиме је изражена потреба да такве процедуре буду интегрисане у софтверска окружења за аутоматско пројектовање технологије за НУМА. Тако је дата, у најсажетијем облику, најава резултата истраживања по поглављима и најава експеримената, којима су ти резултати верификовани.

Потом је уведен појам виртуелног обрадног окружења у којем су процедуре, развијане у оквиру ове дисертације, идентификоване као функције система виртуелне машине алатке (Virtual Machine Tool - VMT). Комплексни модел VMT има за циљ да се процес, пре своје

физичке реализације у реалном свету, симулира што реалистичније у виртуелном свету, кроз рачунарску симулацију, која би што верније одсликала реално производно окружење. Ближе дефинисано, разматране процедуре су део језгра виртуелног обрадног окружења, као скупа модела, како физичких уређаја, тако и процеса, карактеристичних за један обрадни систем. Поред функција којима се остварују реалистичне предикције излаза процеса, подразумевају се и функције оптимизације његових параметара, сагласно постављеним критеријумима.

Као основ за разраду поменутих процедура изабран је приступ инспирисан референтном архитектуром интелигентних система за управљање у реалном времену. У том смислу дефинисана је хијерархијска структура укупног процеса обраде. Разматране процедуре се везују за одређене нивое такве структуре. Поред уобичајених структура података (константе и листе атрибута) уведен је и појам мапе, којим се интерпретира просторни распоред атрибута одређеног ентитета у процесу обраде. У оваквом приступу смисао модула за сензорско процесирање добијају модели, којима се остварује предиковање процесних променљивих, чиме се процес обраде поуздано препознаје у свим развијеним процедурама.

У другом поглављу су описани методи предиковања тренутних вредности компонената силе глодања, засновани на симулацији процеса обраде глодањем. Основни модел предиковања тренутних вредности сила глодања подразумева дискретизацију резног дела глодала дисковима коначне дебљине, уз идентификацију елементарних сечива таквих дискова. Симулација се односи на коначан број угаоних позиција алата при његовом обртању. Током симулације се прате тренутне позиције елементарних сечива, идентификује се њихов захват са материјалом обратка (на основу задатог улазног и излазног угла захвата), уз израчунавање дебљине струготине захваћене појединим сечивима. Силе резања на елементарном сечиву су пропорционалне пресеку захваћене струготине и дужини сечива, са факторима пропорционалности изражених у виду специфичних сила резања. При обради равним вретенастом глодалом специфичне силе су константне за сва елементарна сечива алата. Векторски збир свих сила са тренутно активних сечива, пројектован на осе координатног система алата, даје тренутне вредности компонената силе глодања при датој угадној позицији глодала. Такве вредности на симулираном опсегу, унутар једног обрта алата, дају профил тренутних вредности појединих компонената силе и обртног момента. Издвајањем минималне, максималне и средње вредности унутар профила сила израчунавају се репрезентативне вредности појединих компонената силе и момента глодања.

У овом поглављу је дат и преглед познатих метода експерименталне идентификације специфичних сила резања. Сагласно једном од њих (директни метод, у литератури познат и као механистички), уз оригиналну поставку експеримента, идентификоване су специфичне силе резања за материјал обратка и материјал и резну геометрију алата, какви су коришћени у свим експериментима у овој дисертацији.

У развоју процедуре предиковања сила, такав основни модел је унапређен модификовањем појединих њених корака у складу са параметрима из ове три групе утицајних фактора: сложенији облици мапе захвата, радијално бацање резног дела глодала и кривина програмиране путање. Представљена процедура је имплементирана у програмском окружењу Matlab[®], у виду модула који је коришћен у наредним поглављима.

У оквиру овог поглавља представљена је и развијена експериментална инсталација, подешена према хоризонталном обрадном центру, који је у Заводу за машине алатке Машинског факултета Универзитета у Београду коришћен за све обављене експерименте. Тако је у оквиру овог поглавља та инсталација са успехом коришћена за идентификацију специфичних сила глодања и за верификацију развијене процедуре предиковања самих сила у обради глодањем вретенастим глодалима.

Развијена процедура предиковања тренутних вредности компонената силе глодања и одговарајућа програмска имплементација, као и скуп идентификованих специфичних сила, проверавани су кроз експерименте са обрадом глодањем, при различитим условима. Различитост услова је остварена обрадом при различитом мапама захвата и за различите вредности параметара: називни пречник глодала, број зуба глодала, параметри радијалног бацања резног дела и корак по зубу.

У низу обављених експеримената поређени су профили предикованих тренутних вредности двеју компонената силе на пуном обрту алата у односу на изоловане делове временског записа одговарајућих сигнала са динамометра. Експериментима је потврђена висока тачност предикованих сила, како квалитативна, тако и квантитативна.

У *трећем поглављу* су приказане самостално развијене процедуре предиковања репрезентативних вредности силе глодања дуж програмиране путање алата. Пажња је усмерена на две класе захвата двоосне обраде (2D) равним вретенастим глодалом. Тако се једна процедура односи на оне захвате грубе обраде, у којима је услед сложенијег облика припремка мапу захвата немогуће представити са три параметра (улазни и излазни угао захвата и дубина резања). Друга процедура се односи на захвате завршне обраде раванских контура при константној дубини глодања. У оба случаја циљ је исти: формирати записе предикованих репрезентативних вредности компонената силе глодања дуж програмиране путање. Оваква интерпретација је названа мапа сила. Она представља врло квалитетну повратну спрегу у процесу пројектовања технологије за НУМА.

Обе процедуре имају модуларне структуре и заједнички им је један број функционаних модула. Овде се првенствено мисли на модул којим се остварује специфична интерпретација реченица програма са описом делова путање алата, као и на модул за дискретизацију програмиране путање изабраним инкрементом и формирање одговарајућих фрејмова атрибута. Обе процедуре користе исти модул за предиковање тренутних вредности и издвајање репрезентативних вредности компонената силе глодања за дате услове обраде, какви важе у разматраној тачки путање. Кључна разлика је у оном делу укупне процедуре, којим се остварује реконструкција мапе захвата у тачки програмиране путање, у нумеричком облику прилагођеном структури улазних података модула за предиковање тренутних вредности сила у процесу обраде глодањем.

У првом случају се то остварује развијеним алгоритмом, којим се процесира модел обратка, сагласно атрибутима профила глодала, његовој тренутној позицији на дискретизованој путањи и тренутном правцу вектора брзине помоћног кретања. У овом поглављу је коришћен модел обратка у виду Z-мапе. Развијени су модули укупне процедуре, којима се од STL модела припремка формира његова Z-мапа. Развијени су и функционални модули, потребни за ажурирање мапе обратка, током напредовања програма.

У другом случају се атрибути тренутне мапе захвата реконструишу према процедури која, поред постпроцесираног програма обраде, подразумева знатно једноставнију структуру улазних података. Тај скуп чине: пречник глодала за завршну обраду, пречник глодала коришћеног у претходном пролазу и пројектовани бочни додатак за обраду, са којим је програмирана претходна обрада контуре. По природи овог захвата је дубина глодања дуж целе контуре константна, а тренутна ширина глодања је дефинисана предобрадом. Уведена је класификација карактеристичних режима у завршној обради раванских контура. Процесирање узастопних елемената описа путање подразумева активирање адекватних правила за израчунавање углова захвата у прелазним режимима. Уведен је систем од 54 правила којима се, поред углова захвата у тачкама дискретизованог елемента путање, генеришу и евентуални почетни услови за наредни корак процедуре предиковања сила.

Имплементација развијених процедура је остварена у програмском окружењу Matlab®. За потребе верификације процедура, описаних у овом поглављу, формирана је одговарајућа експериментална инсталација. Она садржи све елементе, као и инсталација описана у претходном поглављу, уз додатак компонената којима је, поред силе глодања дуж два координатна правца, омогућена и симултана аквизиција сигнала позиције двеју серво оса машине алатке, које су активне у току обраде у овом експерименту. Таквом инсталацијом и одговарајућом обрадом временских записа омогућено је конструисање мапе сила над програмираном путањом за сваки од експеримената.

Обе развијене процедуре, описане у овом поглављу, експериментално су верификоване са укупно 5 експеримената (са 3 експеримента за случај грубе обраде и модел обратка у виду Z-мапе и са 2 експеримента за случај завршне обаде раванских контура при константној дубини резања). Поузданост остварених предикција је доказана упоредним приказима репрезентативних вредности сила, предикованих и експериментално одређених, како у временском домену, тако и облику мапа сила и дуж путање алата.

У четвртој поглављу су описани методи оптимизације програмиране брзине помоћног кретања по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања. Оптимизација је представљена у виду процедуре која се одвија у три карактеристичне фазе. Те три фазе су дискретизација иницијално програмиране путање алата, адаптација брзине у тачкама дискретизоване путање и оптимизација, у ужем смислу, програмиране брзине помоћног кретања дуж путање. Под адаптацијом се подразумева алгоритам који обезбеђује кориговање брзине помоћног кретања, дефинисане у иницијалној верзији програма обраде, на начин да се оствари задати ниво репрезентивне вредности изабране компоненете силе глодања.

Извршена је класификација метода на којима су засноване процедуре *off-line* адаптације брзине помоћног кретања, који су описани у литератури, или су примењени у комерцијалним програмским пакетима за пројектовање технологије обраде на нумерички управљаним машинама алаткама (Computer Aided Manufacturnig – CAM). Илустративним примерима, кроз симулацију, показан је ограничен домет оних метода који користе индиректан приступ (методи засновани на одржању производности), у односу на директне методе, који подразумевају предиковане тренутне вредности компонената силе глодања.

Затим је описан процес *off-line* оптимизације брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, који је дефинисан као процедура сажимања елементарних делова путање, насталих њеном дискретизацијом, најчешће униформном. Редискретизованим елементима путање се придружује одређена константна вредност брзине, с обзиром на њене израчунате вредности у фази адаптације и с обзиром на ограничења, која се односе на допуштена убрзања-успорења оса машине. Скупом експеримената, обављених на обрадном центру, илустроване су ограничене могућности машине алатке у погледу остварења програмираних брзина помоћног кретања у условима малих дужина програмираних делова путање и при великим променама вредности брзине помоћног кретања између узастопних елемената такве путање.

У петом поглављу су приказане самостално развијене процедуре за *off-line* оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања. Развијене су и приказане две такве процедуре. У обе је примењен исти метод адаптације брзине у тачкама дискретизоване путање, заснован на предиковању тренутних вредности силе, кроз симулацију, за услове обраде у таквим тачкама. Два представљена приступа се међусобно разликују и по примењеним процедурама предиковања сила (модел обратка у виду Z-мапе и модел примерен завршним обрадама раванских контура). У оба случаја је примењен исти директни метод адаптације, какав је познат у литератури, а који подразумева линеарну везу корака по зубу и силе глодања. Адаптација се обавља у два корака, у свакој тачки униформно дискретизоване путање.

Два представљена приступа у off-line оптимизацији брзине разликују се по критеријумима на основу којих се остварује редискретизација путање алата и израчунавање брзина, које ће бити придружене новонасталим елементима за опис путање.

Први пример се односи на завршну обраду раванске контуре, при константној величини номиналног бочног додатка, формираног у претходном пролазу и при константној дубини глодања. Примењена процедура редискретизације се заснива на праћењу промене брзина, израчунатих кроз адаптацију у узастопним тачкама дискретизоване путање.

Други пример се односи на грубу обраду глодањем раванске контуре изабране тако да се дуж путање остварују интензивне промене облика и површине мапе захвата. Примењена процедура редискретизације путање подразумева свођење брзина, израчунатих кроз процес адаптације, на вредности линеарне скале са изабраном величином инкремента.

Кориговане верзије програма обраде су, за оба примера, формиране на основу резултата остварених примењеним процедурама оптимизације брзине. Експериментална верификација представљених процедура реализована је кроз директно или индиректно формирање временских записа изабраних компонената силе глодања при обради по коригованим верзијама програма. Добијени временски записи, као и репрезентативне вредности, издвојене из тих записа, у односу на задате нивое изабраних компонената силе, указују на поузданост процедура оптимизације брзине помоћног кретања, представљених у овом поглављу.

У Закључку је дат осврт на резултате истраживања описане у дисертацији, по појединим поглављима. Такође је назначена могућа примена остварених резултата. Уз констатацију да су развијеним процедурама остварене реалне претпоставке за њихову практичну примену у системима за аутоматско пројектовање технологије за нумерички управљане машине алатке (НУМА), наведена су и основна ограничења. Једно од битних ограничења представља примењени модел крутих тела, којима су моделирани елементи обрадног система, што развијене процедуре чини неподесним у технологији обраде танкозидних делова, или при обради глодалима са великим препустом. Као недостатак је и поменута потреба спровођења експерименталне идентификације специфичних сила резања за све различите материјале обрадака и разноликост резне геометрије глодала.

У закључку су наведени и очекивани правци даљих истраживања. Између осталог, наглашена је потреба подизања ефикасности представљених процедура предиковања сила и оптимизације брзина помоћног кретања дуж програмиране путање. Један од начина је развој модела за репрезентативне силе глодања, који њихове вредности повезује са атрибутима површи обратка, захваћене глодалом и то у тачкама дискретизоване путање. Таквим приступом би била елиминисана симулација тренутних вредности сила у свакој посматраној тачки путање, као најзахтевнији део процедуре у погледу потребног рачунарског времена.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Дисертација **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** представља једну савремену интерпретацију обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. За потребе комплетирања те интерпретације прво је било потребно одабрати метод за идентификацију сила резања у обради глодањем и њега применити у самостално развијеној процедури за предиковање сила у обради глодањем задатим режимом обраде. Затим је требало одабрати адекватан метод за оптимизацију процеса обраде и тај метод применити у самостално развијеним процедурама за

оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања. Следи осврт на савременост и оригиналност:

Савременост дисертације се огледа у изради, примени и верификацији процедура за off-line оптимизацију обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. Виртуелни обрадни системи данас представљају једну од парадигми обрадног система у такозваном четвртом таласу иновација у производном машинству, поменутом у првом поглављу дисертације. Тај талас је описан као смена генерација ресурса за пројектовање производа и технологија и за управљање обрадним системима. Основна тема у тој смени генерација је оптимизација и верификација програма за нумерички управљане машине алатке, како би се производња добара могла распоредити на велике мреже ресурса.

Оригиналност дисертације се огледа у самостално одабраним и имплементираним методима за предиковање сила у обради глодањем и за off-line оптимизацију брзине помоћног кретања по критеријуму одржања константне репрезентативне вредности силе глодања. За потребе предиковања сила вршени су самостално планирани експерименти за идентификацију специфичних сила глодања, као параметара одабраних механистичких модела сила у обради глодањем, који су у дисертацији сврстани у групу директних метода. За идентификацију параметара ових модела коришћене су средње вредности измерених сила на пуном обрту алата. Ток мерене компоненте силе глодања за пун обрт алата издвајан је из записа помоћу посебног окидачког сигнала, који је генерисан после сваког пуног обрта главног вретена. За потребе оптимизације брзине помоћног кретања, као критеријум је одабрано одржање репрезентативне вредности силе глодања. Анализом је показано да производност, као критеријум за оптимизацију, није довољно добра. Процедуре оптимизације су такође верификоване самостално планираним и обављеним експериментима, помоћу којих је могуће измерити силе глодања и приказати их као дијаграме и над програмираном путањом алата.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Кандидат је припреме за израду ове дисертације био извршио и пре добијања сагласности Универзитета за њену израду. Следи осврт на референтну и коришћену литературу.

Осврт на референтну литературу. За обраду парова тема (i)методи и процедуре за предиковање сила у обради глодањем и (ii)методи и процедуре за оптимизацију брзине помоћног кретања у обради глодањем постоје две групе референтне литературе. Прву групу чини литература о класичном предиковању сила у обради резањем и о техноекономској оптимизацији процеса обраде глодањем по критеријуму минимизације главних времена и трошкова обраде. У другој групи је литература о модерној примени механистичких модела процеса обраде у предиковању сила резања и о off-line оптимизацији брзине помоћног кретања по критеријуму одржавања константне репрезентативне вредности силе глодања. Може се сматрати да је литература референтна ако потиче из референтних установа, или, ако су то појединачне референце, верификоване довољном цитираношћу. Примери референтних установа су: (i)NIST (National Institute of Standards and Technology) из САД, за референтни модел интелигентне машине алатке, за референтни модел управљања отворене архитектуре и, посредно, за објектно програмирање машина алатки, (ii)CIRP (College International Pour La Recherche En Productique) са седиштем у Паризу, за виртуелне обрадне системе, виртуелне процесе обраде, оптимизацију обрадног система, обраду резањем и машине алатке уопште и (iii)UBC (The University of British Columbia, Faculty of Applied Science, Department of Mechanical Engineering) из Канаде, за виртуелне обрадне системе, механистичке моделе процеса обраде резањем и виртуелне системе управљања машина алатки.

Осврт на коришћену литературу. У седмом поглављу је дат списак коришћене литературе са укупно 149 референци. Може се видети да је међу коришћеном литературом и референтна, за предиковање сила у процесу обраде и за оптимизацију самих процеса обраде, посебно по критеријуму одржавања константне репрезентативне силе глодања. Истовремено, коришћена литература обухвата и класичне и модерне теме у обради глодањем.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему може се посматрати као једна комплексна симулација процеса обраде глодањем, који се том приликом може интерпретирати, анализирати, усавршавати и испитивати, како би се то радило и за реални процес. У тој симулацији покрећу се модели за ажурирање геометрије припремка, за предиковање сила резања, за праћење тренутних и репрезентативних сила резања, за оцену стабилности обрадног система, за процену тачности обраде итд. Ради тога је потребно више адекватних научних метода, да би започета симулација била резултативна. Следе опис главних примењених метода и оцена њихове адекватности за ову дисертацију.

Опис примењених метода. Како главни део дисертације има два пара дугих поглавља, уређених тако да се у првом поглављу у сваком пару дају резултати спроведене анализе постављене теме, а у другом поглављу резултати синтезе, као самостално развијене процедуре, којима се комплетира разрада постављене теме, то значи да су примењени самостално конципирани методи анализе и синтезе за сваку од тих тема. Анализа је у оба пара поглавља обухватила дефинисање и класификовање уведених појмова и приказе њихових својстава. База за то је било: проучавање брижљиво одабране литературе, примена раније стечених сопствених искустава и експерименталне пробе за потврђивање полазних хипотеза. Главна постављена тема у првом пару поглавља је предиковање тренутних вредности сила у обради глодањем, а у другом пару поглавља је то off-line оптимизација брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, уз одржање репрезентативних вредности силе глодања као критеријума. Синтеза је у оба пара поглавља обухватила самосталан развој и верификацију поузданих симулационих модела, потребних за комплетирање обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. У првом пару поглавља симулационим моделима се предикую све компоненте силе глодања на примеру обраде глодањем вретенастим глодалом, а у другом се врши off-line оптимизација процеса обраде глодањем, кориговањем програмиране брзине помоћног кретања, тако да одабране репрезентативне силе глодања буду константне. Тиме се постиже задовољавајућа тачност обраде. Главно радно окружење за ове методе је Matlab[®]. Друга група примењених метода садржи методе планирања и извођења експеримената са глодањем, у којима се прате: силе глодања, релативна кретања алата у односу на обрадак и пуни обрти алата. Радно окружење за ове методе чине LabVIEW[®] и Matlab[®]. Трећа група примењених метода садржи методе за пројектовање припремка и реконструкцију готовог дела, за ажурирање мапе захвата обраде глодањем и за реконструкцију обрађене површи. Радно окружење за ове методе чини CAD/CAM систем, у којем је пројектована оригинална технологија обраде глодањем и форматизована као G код и из којег се модел обратка може преузети у формату STL.

Оцена адекватности примењених метода. Дисертација је урађена у текућум четвртом таласу иновација у производном машинству, названом и сменом генерација ресурса за пројектовање производа, пројектовање технологија машинске обраде са програмирањем нумерички управљаних машина алатки и за уређивање пословања и рада обрадних система. Успешна верификација добијених резултата у таквом окружењу потврђује и адекватност примењених метода за истраживања и симулацију обраде глодањем.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати ове дисертације могу се сврстати у две групе. Прва група резултата односи се на предиковање сила у обради глодањем. То су процедуре за идентификацију специфичних сила резања, за предиковање сила глодања дуж програмиране путање у припремку описаном помоћу Z-мапе и за предиковање сила глодања дуж програмиране путање алата за завршну обраду раванских контура. Идентификација специфичних сила се врши једнократно за нови пар материјала обратка и врсту и геометрију алата. Друга група резултата се односи на off-line оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање алата, како у грубој

тако и у завршној обради глодањем. У првом случају се врши груба обрада, када је припремак описан помоћу Z-мапе, а у другом се геометрија припремаке реконструише помоћу путања алата из претходне обраде, јер се врши завршна обрада равanske контуре. У сваком од ових случајева полази се од програма (G кода), који се, по потреби, допуњује и специфичним постпроцесорским подацима, које уобичајени постпроцесори не уносе у програм, јер нису неопходни за одвијање програмираног процеса обраде. За прву групу резултата планирани су и обављени експерименти серија означених са P100 и P200, а за другу групу експерименти серија S801 и S802. Основна намена тих експеримената била је верификација самостално развијених процедура, као група резултата. И само планирање, припрему и извођење експеримената Кандидат је обавио самостално, на обрадном центру, помоћу модерних мерних средстава, што се такође може сматрати важним резултатом ове дисертације. Успешно верификоване развијене процедуре истовремено представљају и експерименталну потврду применљивости остварених резултата.

3.5. Оцена достигнутих способности Кандидата за самостални научни рад

Кандидат је и пре израде ове дисертације предано учествовао у профилисању лабораторијског рада на предметима на којима је био ангажован на извођењу наставе. Годинама је био активан у програмирању нумерички управљаних машина алатки, прво ручним програмирањем, за стицање искустава, а онда и помоћу CAD/CAM система. Машине су биле: обрадни центри, нумерички управљани стругови и ерозимати. Формати програма су били типа G кода. Тако је стекао сасвим довољно искуство, које треба да буде својствено технологу машинске обраде на нумерички управљаним машинама алаткама и лаборанту у лабораторији за машине алатке. Ранијим планирањем и извођењем разних експеримената, својствених испитивању обрадних система, а посебно самосталним планирањем серија експеримената за развој и верификацију развијених процедура за предиковање сила у обради глодањем и за off-line оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање, по одабраним критеријумима, стекао је сасвим довољно искуство за експериментални рад у лабораторијским и индустријским условима. На основу тога је и предложио план истраживања за потребе ове дисертације, а добијени резултати и структура саме дисертације, у којој су ти резултати приказани, квалификују Кандидата за самостални научни рад, али и за планирање и организацију таквог рада.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Планирани су били следећи научни (N) и стручни (S) доприноси: N0-Савремени модел виртуелног обрадног система, N1-Ефикасан интерпретер G кода, N2-Метод за идентификацију сила у обради глодањем и N3-Метод за off-line оптимизацију процеса обраде глодањем у виртуелном обрадном систему, S0-Процедура за верификацију оптимизације процеса обраде глодањем, S1-Планови експеримената и сами експерименти за потребе ефикасне идентификације сила резања у обради глодањем, S2-Модел тренутног пресека струготине у обради вишесечним алатом и S3-Метод за оцену очекиване храпавости обрађене површине после обраде по коригованом програму. Овај план је реализован кроз пет научних доприноса (**D**): процедура експерименталне идентификације специфичних сила резања (**D1**), две процедуре за предиковања сила глодања дуж програмиране путање (**D2,D3**) и две за off-line оптимизацију програмиране брзине помоћног кретања (**D4,D5**). Повезивање и коришћење опреме за експериментисања и за аквизицију и обраду експерименталних података такође је оригиналан допринос ове дисертације и еквивалентан је планираном доприносу S1. Он је истовремено био и експериментална база за свих пет одабраних главних доприноса (**D1-D5**). Следе прикази тих одабраних пет научних доприноса ове дисертације.

(D1) Процедура експерименталне идентификације специфичних сила резања. За комплетирање коришћеног механистичког модела процеса обраде глодањем потребне су специфичне силе резања у обради глодањем обрадака од одабраног материјала и за коришћени алат. Примењен је директни метод за идентификацију специфичних сила, на основу серије захвата обраде жљеба вретенастим глодалом, са различитим корацима по зупцу. Помоћу система за аквизицију података формирани су записи двају компонената силе глодања: $(F_x(t), F_y(t))$. Уз ове записе генерише се и окидачки сигнал, који је намењен за издвајање дијаграма сила за тачно један обрт алата. За те издвојене делове записа сила одређују се средње вредности те две силе на пуном обрту алата. Затим се приступа идентификацији специфичних сила резања помоћу управо одређених средњих вредности сила директним методом. Он је детаљно описан у одељку 2.2.2. Добијене специфичне силе резања важе за све обраде делова направљених од испитиваног материјала и алата који имају исту геометрију као и алат коришћен у идентификацији. Битна својства ове процедуре су:

- Користе се средње вредности измерених сила, па није потребна синхронизација записа сила и обртања алата, јер се не користе тренутне вредности сила глодања.
- Метод идентификације је директан, па се не врше пробе ортогоналним и косим резањем, на стругу или рендисаљци, него директно глодањем на обрадном центру алата који се касније користи и за саму обраду у експериментима.
- Врши се обрада жљебова на посебно припремљеним пробним деловима, на којима се у експериментима, по потреби, може елиминисати утицај ивичних сила, да би се добиле праве вредности специфичних сила резања.

Ово све процедуру **D1** чини првим верификованим научним доприносом дисертације.

(D2) Процедура предиковања сила глодања дуж програмиране путање, заснована на симулацији тренутних вредности и на моделу Z-мапе обратка. Описана је у одељку 3.2, а као метод је постављена у одељку 2.3. За приказ је одабрана обрада глодањем вретенастим глодалом дуж програмиране путање у равни $z = \text{const}$. Појам програмирана путања овде се користи да се прецизира да је путања позната. Процедуром су обухваћени: модел обратка, дискретизовани модел алата, модел програмиране путање и модел за симулацију тренутних вредности сила на пуном обрту дискретизованог алата. Процедура је развијена у окружењу Matlab[®] под називом *Sim_Path*. Има модуларну структуру. Њу чине: интерпретер, истовремено и форматер програма (G кода), затим модул за дискретизацију путање алата, модул за реконструкцију мапе захвата алата и обратка у свакој одабраној тачки путање, модул за трансформацију координата мапе захвата, зато што се у целој симулацији користе два координатна система (непокретни систем програма-обратка и покретни систем алата), модул за симулацију сила глодања за дефинисану мапу захвата на пуном обрту алата и пар модула за ажурирања Z-мапе обратка. Битна својства ове процедуре су:

- Модел припремка се формира посебно у коришћеном CAD/CAM систему, зато што се не може реконструисати помоћу G кода.
- Преузима се модел припремка у формату STL и генерише његова Z-мапа, омогућавајући и њену адекватну визуелизацију.
- Декодира се путања дефинисана у преузетом G коду и подаци о њој форматују према потребама процедуре.
- Врши се дискретизација путање ради добијања позиција у којима треба израчунавати силе, које се појављују у процесу глодања.
- Генерише се мапа сваког захвата која се односи на додир полуобима глодала и дела Z-мапе, који треба уклонити као струготину.
- Израчунавају се силе глодања за овако дефинисану грубу обраду.

Овако структурисану процедуру **D2** Кандидат је сам конципирао, применио у одабраним случајевима обраде, па извршио и њену експерименталну верификацију серијом експеримената означеном са P100 и описаном у одељку 3.4.4. То ову процедуру чини другим верификованим научним доприносом дисертације.

(D3) Процедура предиковања сила глодања дуж програмиране путање алата за завршну обраду раванских контура. Описана је у одељку 3.3, а као метод је постављена у одељку 2.3. За приказ је одабрана завршна обрада глодањем вретенастим глодалом контуре у равни $z = \text{const}$. За опис припремка се не користи Z-мапа зато што је дубина резања константа и зато што се додатак за обраду реконструише помоћу анализе претходне обраде, односно, израде припремка за завршну обраду ове контуре. Процедура је развијена у окружењу Matlab® под називом *Sim_finish*. Има модуларну структуру. Њу чине: интерпретер, истовремено и форматер програма (G кода), модул за дискретизацију путање алата и модул за симулацију сила глодања на једном пуном обрту алата. Оваква контурна обрада применљива је и за честе обраде џепова. Битна својства ове процедуре су:

- Има успостављена правила за израчунавање углова захвата у одабраним тачкама путање.
- Може да се прати контура која има и линијске и лучне делове.
- Користи се прилагођени постпроцесор да би се добио G код са постпроцесорским подацима који се, у уобичајеним постпроцесорима, не уносе у програм.
- Формира се специфична структура података за сваки захват посебно, да би опис путање био униформан, а предиковање сила ефективније.

Овако структурисану процедуру **D3** Кандидат је сам конципирао, применио у одабраним случајевима обраде, па извршио и њену експерименталну верификацију серијом експеримената означеном са P200 и описаном у одељку 3.4.5. То ову процедуру чини трећим верификованим научним доприносом дисертације.

(D4) Процедура за оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање алата, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања и на моделу Z-мапе обратка. После анализе могућих метода за адаптацију брзине помоћног кретања у тачки програмиране путање у одељку 4.1, као критеријум за оптимизацију одабрана је предикована репрезентативна вредност силе глодања. Остали анализирани критеријуми су специфични детаљи на програмираној путањи, поизводност, или нека комбинација ових критеријума. За сваки од њих дата је поставка са илустративним примерима примене. За ову процедуру критеријум је одржање константне резултујуће силе F_{xy} . То је својствено грубој обради вретенастим глодалом, када се и припремак интерпретира својом Z-мапом. У припреми за примену ове процедуре потребно је прописати граничну вредност одабране репрезентативне силе глодања и граничне вредности корака по зупцу. У off-line оптимизацији се врши кориговање полазног G кода и то се спроводи поступно. Прво се у два корака врши адаптација брзине помоћног кретања, а онда се врши оптимизација ради прилагођавања адаптиране брзине специфичним детаљима на програмираној путањи и перформансама оса коришћене машине, у односу на убрзавања и успоравања у току планирања и праћења програмиране путање. Оптимизација се обично односи на сажимање делова дискретизоване путање. Она се врши у следећа три корака:

- Филтрирање брзина помоћног кретања придружених тачкама дискретизоване путање, док је примењивана процедура адаптације те брзине.
- Свођење тако добијених вредности брзина на скалу дискретних вредности брзине, са изабраним инкрементом и сажимање узастопних тачака дискретизоване путање, дефинисане једном реченицом полазног програма, на сегменте са константном брзином помоћног кретања на одабраној скали дискретних вредности брзине.
- Спровођење додатног корака редискретизације путање, да би се елиминисале потребе за неостваривим убрзавањима, односно успоравањима.

Битна својства ове процедуре су:

- Врши се униформна дискретизација програмиране путање алата.
- Спроводи се адаптација програмиране брзине помоћног кретања у свим тачкама дискретизоване програмиране путање, описана у одељку 4.1.3.
- Оптимизација брзине помоћног кретања врши се дуж програмиране путање, па се спроводи формирање коригованог програма обраде.

Овако структурисану процедуру **D4** Кандидат је сам конципирао, применио у одабраним случајевима обраде, па извршио и њену експерименталну верификацију серијом експеримената означеном са S802 и описаном у одељку 5.2. То ову процедуру чини четвртим верификованим научним доприносом дисертације.

(D5) Процедура за оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање алата, по критеријуму одржања репрезентативне вредности силе глодања и за завршну обраду раванских контура. У односу на претходну процедуру, овој је својствено следеће:

- Као критеријум за off-line оптимизацију брзине помоћног кретања дуж програмиране путање одабрано је одржање максималног интензитета силе F_y . По конвенцији за координатне системе, то је сила у правцу нормале на обрађену површ, свакако у покретном координатном систему (x, y, z) алата. Како је предмет ове процедуре завршна (контурна) обрада раванске контуре у равни $z = \text{const}$, одабрана је компонента силе која има највећи утицај на тачност тако обрађене контуре.
- Предиковање сила се врши по процедури описаној у одељку 3.3, а овде описаној као Процедура предиковања сила глодања дуж програмиране путање алата за завршну обраду раванских контура.
- У току оптимизације брзине помоћног кретања сажимају се дискретизовани елементи путање на основу дозвољене промене већ адаптираних брзина помоћног кретања на униформно дискретизованој путањи.

Овако структурисану процедуру **D5** Кандидат је сам конципирао, применио у одабраним случајевима обраде, па извршио и њену експерименталну верификацију серијом експеримената означеном са S801 и описаном у одељку 5.1. То ову процедуру чини петим верификованим научним доприносом дисертације.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У обради глодањем обрада глодачким главама обично се врши на робусним машинама, па је интересантније вршити оптимизацију процеса обраде вретенастим глодалима, поготову када је машина вишеосна. Ограничавање репрезентативних сила глодања тада програме за обраду чини изводљивијим на више различитих машина и у разним технолошким системима. Примењена off-line оптимизација процеса обраде глодањем од користи је када је на располагању само G код, а жели се да планирана обрада буде довољно тачно процењена у погледу очекиваних сила у процесу, трајања обраде, оствариве тачности итд. Могућност увођења ексцентрицитета на резном делу глодала у предиковање сила, а тиме и у оптимизацију процеса, развијене процедуре чини довољно поузданим чак и ако се унапред не зна како ће алат бити припремљен, па се за ексцентрицитет узме вредност која се оцењује на основу дозвољених одступања мера и облика алата и њихових држача. Метод са експерименталним верификацијама свих развијених процедура предложени приступ оптимизацији процеса обраде глодањем чини изразито робусним. Даља разрада овог метода била би јако корисна када би се бар њен део уградио у неки CAD/CAM систем и тако више приближио већ описаном четвртм таласу иновација у производном машинству.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио један рад, са делом резултата добијених у овој дисертацији, који се односе на предиковање сила у обради глодањем. То је:

Категорија M23:

1. **Kokotović, B.**, Glavonjić, M.: Predicting of Milling Forces in Virtual Manufacturing System, Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Vol. 20, No. 6, Article No. **TV-20130715120327**, to be published towards the end of **December 2013**. (IF(2012)= **0.601**, ISSN: **1330-3651**). *Потврда о пријему и категоризацији рада налази се у прилогу овог Извештаја.*

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** представља савремен и оригиналан научни допринос, којим се може комплетирати један модерни виртуелни обрадни систем за обраду глодањем. На оригиналан начин је имплементиран механистички модел процеса обраде глодањем. Комплетиране су рачунско-експерименталне процедуре за предиковање сила и за off-line оптимизацију обраде глодањем по критеријуму одржања константне вредности одабране репрезентативне силе глодања. Доследна примена комбинованог рачунско-експерименталног метода рада све добијене резултате чини директно применљивим у пракси. Кандидат је до сада стекао довољно искуства да сложену обраду глодањем може самостално формализовати помоћу симулационих модела, али и процедура, које вреди уврстити у неки CAD/CAM систем и тако их користити до појаве најављене нове генерације система за програмирање нумерички управљаних машина алатки на бази стандарда STEP-NC.

На основу прегледа дисертације и разговора са Кандидатом Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом **Обрада глодањем у виртуелном обрадном систему** Кандидата **мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.** прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Милош Главоњић, ментор,
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Проф. др Љубодраг Тановић,
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
др Павао Бојанић,
редовни професор у пензији,
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Проф. др Драган Милутиновић,
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Проф. др Милан Зељковић,
Факултет техничких наука, Нови Сад

У Београду и Новом Саду
21. новембра 2013. године

To:

Your ref.:

Our ref.: AA- TV-20130715120327

Slavonski Brod, 19-09-2013

Subject: **Acceptance of Article**
Article No. **TV-20130715120327**
Title: **PREDICTING OF MILLING FORCES IN VIRTUAL MANUFACTURING SYSTEM**
Author/s: **Branko Kokotović, Miloš Glavonjić**

Dear authors!

Your article (mentioned above) has been accepted for publication in the journal Tehnički vjesnik/Technical Gazette (ISSN 1330-3651), **Vol. 20 No. 6** to be published towards the end of **December 2013**. The article is classified as **original scientific paper**.

Attached is the Copyright Transfer Agreement with Payment Data. Please read carefully the enclosed Copyright Transfer Agreement with Payment Data and if you agree with the given terms fill in the necessary data, sign the form, keep a copy for yourself and send the original to our address by regular mail (also e-mail a copy to tehnvj@sfsb.hr or send a fax to +385 35 446 446).

When we have received the Copyright Transfer Agreement, your article will be published in the Journal.

Yours sincerely,

Editor-in-Chief:
Prof.dr. Pero Raos



Enclosed documents:

- Copyright Transfer Agreement and Payment Data

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 2338/3
Датум: 28.11.2013. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 128. Закона о високом образовању и члана 63. Статута Машинског факултета број 1876/1 од 04.10.2013. године, Наставно-научно веће на седници одржаној 28.11.2013. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео мр БРАНКО КОКОТОВИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „**ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ**“

II Универзитет је дана 06.06.2011. године, својим актом број 06-6078/21-11 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

1. **Kokotović, B.**, Glavonjić, M.: Predicting of Milling Forces in Virtual Manufacturing System, Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Vol. 20, No. 6, Article No. **TV-20130715120327**, to be published towards the end of **December 2013**. (IF(2012)= **0.601**, ISSN: **1330-3651**).

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић