

Наставно-научном већу
Машинског факултета
Универзитета у Београду

Предмет: Извештај Комисије за подношење извештаја
о прихватању теме докторске дисертације
мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш.
по одлуци Наставно-научног већа
број 629/3 од 28. 04. 2011. године.

На основу пријаве за израду докторске дисертације мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш. број 629/1 од 13. 04. 2011. године, сагласности Катедре за производно машинство број 629/2 од 19. 04. 2011. године и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 629/3 од 28. 04. 2011. године именовани смо за чланове Комисије за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације докторанта мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш. На основу увида у документацију коју је докторант, мр Бранко Кокотовић, дипл.инж.маш, приложио уз свој захтев за израду докторске дисертације, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ
о прихватању теме докторске дисертације
под насловом
ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1. Општи биографски подаци

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 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 (Словенија).

Машински факултет у Београду уписао је 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.

Од 20. фебруара 1990. године, до данас, ради на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду, као асистент приправник (од 1990. до 1994. године) и као асистент (од 1994. године до данас).

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, намењених унапређењу наставе и актуелним истраживањима.

Тренутно ради као асистент на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду на предметима Машине алатке, Технологија машинске обраде, Машине алатке и работи нове генерације и Машине алатке М.

1.2 Подаци о магистратури

Тема: Развој методе концепцијског пројектовања вишенаменских технолошких система на бази теорије ћелијских аутомата.

Област: Флексибилне производне технологије и роботика.

Ментор: др Владимир Р. Милачић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду.

Факултет: Универзитет у Београду, Машински факултет.

Датум одбране: 08. фебруар 1994. године.

1.3 Списак објављених радова и других релевантних резултата и активности које опредељују афинитет кандидата за рад на предложеној теми

Радови су разврстани у следећих 10 група:

1.3.1 Списак научних радова у часописима националног значаја

1. Puzović R, Kokotović B, Prediction of thrust force and torque in tapping operations using computer simulation, FME Transactions Vol. 34, pp. 1-5, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2006.
2. Лечић М, Кокотовић Б, Милосављевић А, Чанрак Ђ, Петронић С, Побољшање квалитета завареног споја код анемометарских сонди са загрејаним влакнима, Енергија Економија Екологија, Лист савеза енергетичара, бр. 4, година XII, стр. 075-079, Београд, децембра 2010.

1.3.2 Списак радова саопштених на научно-стручним скуповима националног значаја, штампаних у целини

1. Милачић В, Путник Г, Кокотовић Б, Основи пројектовања флексибилних технолошких система, 16. ЈУПИТЕР конференција, 9. Југословенски симпозијум СИМ у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала, Зборник радова, стр. 147-159, Цавтат, 1990.
2. Миљковић З, Милутиновић Д, Кокотовић Б, Тачност трајекторије код индустријских робота, 17. ЈУПИТЕР конференција, 13. југословенски симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 45-52, Копаоник, 1991.
3. Путник Г, Кокотовић Б, Пројектант Технологије–експерт систем, тренутно стање и правци развоја, 18. ЈУПИТЕР конференција, 11. југословенски симпозијум ЦИМ у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала, Зборник радова, стр. 95-101, Копаоник, 1992.
4. Путник Г, Кокотовић Б, База знања за пројектовање технолошких процеса у Пројектант–експерт систему, 18. ЈУПИТЕР конференција, 21. југословенски симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала, Зборник радова, стр. 41-45, Копаоник, 1992.
5. Путник Г, Кокотовић Б, Репрезентационе класе за представљање знања, XX ЈУПИТЕР конференција, 22. југословенски симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала, Зборник радова, стр. 107-112, Београд 1994.
6. Путник Г, Кокотовић Б, Димензија концепта знања и комплексност узорка за учење у процесима индуктивног учења, XX ЈУПИТЕР конференција, 13. југословенски симпозијум ЦИМ у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала, Зборник радова, стр. 115-120, Београд 1994.
7. Кокотовић Б, Склоп главног вретена као подструктура адаптивно управљане машине алатке, 23. ЈУПИТЕР конференција, 19. симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 323-328, Београд, 1997.

1.3.3 Списак радова саопштених на научно-стручним скуповима са међународним учешћем, штампаних у целини

1. Кокотовић Б, Прилог методологији избора котрљајних вођица тешких машина алатки, Први међународни научно-стручни скуп ТЕШКА МАШИНОГРАДЊА, Зборник радова, књига 3, стр. 120-125, Крушевац – Врњачка Бања, 1993.

2. Кокотовић Б, Узелац Б, Тановић Љ, Главоњић М, Калајџић М, Идентификација динамике обрадног система, V међународна научно-стручна конференција ММА'94, Зборник радова, књига 1, стр. 309-314, Нови Сад, 1994.
3. Калајџић М, Главоњић М, Тановић Љ, Кокотовић Б, Узелац Б, Модел процеса глодања, V међународна научно-стручна конференција ММА'94, Зборник радова, књига 1, стр. 285-290, Нови Сад, 1994.
4. Главоњић М, Калајџић М, Тановић Љ, Кокотовић Б, Узелац Б, Модел структуре машине алатке, V међународна научно-стручна конференција ММА'94, Зборник радова, књига 2, стр. 187-192, Нови Сад, 1994.
5. Милачић В, Кокотовић Б, Елементи теорије вештачког живота у концепцијском пројектовању производа, V међународна научно-стручна конференција ММА'94, Зборник радова, књига 2, стр. 407-412, Нови Сад, 1994.
6. Васић И, Кокотовић Б, Калајџић М, Динамичка стабилност при чеоном глодању, 21. ЈУПИТЕР конференција, 17. симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 3.245-3.250, Београд, 1995.
7. Кокотовић Б, Узелац Б, РС – Аквизициони модули у надзору алата у ФТС, 21. ЈУПИТЕР конференција, 17. симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 3.263-3.268, Београд, 1995.
8. Miljković Z, Kokotović B, Intelligent Control of Autonomous Manufacturing Systems, Proceedings of the 26th International Conference on Production Engineering, pp. 825-830, Budva, YU, 1996.
9. Бердић Д, Кокотовић Б, Спасић Ж, УППС-2 Управљање производно пословним активностима за СИМ предузеће, 22. ЈУПИТЕР конференција, 24. симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала, Зборник радова, стр. 4.7-4.12, Београд, 1996.
10. Кокотовић Б, Поповић М, Калајџић М, Методологија комплексног испитивања хидрауличке пресе за угаоно савијање лима, 25. ЈУПИТЕР конференција, 19. симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 3.229-3.336, Београд, 1999.
11. Tanović Lj, Puzović R, Kokotović B, Jovićić M, Research in the area of working by drilling and cutting of screw threads, 4th International Conference Heavy Machinery, HM'02, Proceedings, pp. D29-D32, Kraljevo, June 2002.
12. Кокотовић Б, Унапређење тестова кружне интерполације на НУМА помоћу TDBB-уређаја, 29. ЈУПИТЕР конференција, Зборник радова, стр. 3.60-3.64, Београд, фебруара 2003.
13. Кокотовић Б, Лукић Љ, Калајџић М, Хидростатичке вођице на тешким машинама алаткама, 8. Међународна конференција ММА'03 Флексибилне технологије, Зборник радова, стр. 39-40, Нови Сад, јуна 2003.
14. Кокотовић Б, Практични аспекти коришћења сигнала струје сервомотора у надзору процеса обраде, 30. ЈУПИТЕР конференција, 26. Симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр. 3.83-3.86, Београд, 2004.
15. Лечић М, Кокотовић Б, Чантрак Ђ, Уређаји за позиционирање и репарацију сонди са загрејаним влакнима за изучавање турбулентног вихорног струјања у цеви, 34. ЈУПИТЕР конференције са међународним учешћем, Зборник радова, стр. 3.7-3.12, Београд, јун 2008.
16. Кокотовић Б, Алгоритам за откривање уласка линеарног динамичког система у нестабилно подручје, 34. ЈУПИТЕР конференција са међународним учешћем, 30. симпозијум НУ-РОБОТИ-ФТС, Зборник радова, стр.3.118-3.125, Београд, јун 2008.

1.3.4 Списак радова саопштених на научно-стручним скуповима међународног значаја, штампаних у целини

1. Milačić V, Kokotović B, AL Approach in Design Process Modelling, The first World Congress on Intelligent Manufacturing, Processes & Systems, Proceedings, Vol. 1, pp.180-189, Mayaguez/San Juan, Puerto Rico, 1995.

2. Miljković Z, Kokotović B, Intelligent Control of Autonomous Mobile Robot Using Neural Networks, International AMSE Conference "Systems, Analysis, Control & Design - SYS '95", Proceedings, Vol .1, pp. 197-206, Brno, Czech Republic, 1995.
3. Kokotović B, Possible Benefits of the Implementation of Main Spindle Preloading Adaptive Control, CSS'96- AMSE Conference, Proceedings, Vol. 2, pp. 252-256, Brno Czech Republic, 1996.
4. Popović M, Kokotović B, Kalajdžić M, Methodology for complex testing of hydraulic press brakes, The Third International Conference Heavy Machinery-HM'99, Proceedings, pp. 3.37-3.42, Kraljevo, 28-30. October 1999.
5. Kokotović B, Puzović R, Tanović Lj, Kalajdžić M, Model of thrust force and torque in tapping operations, The Fifth International Scientific Conference Heavy Machinery-HM'05, Proceedings, pp. II A.63 -II A.66, Kraljevo, June 2005.

1.3.5 Списак радова саопштених на научно-стручним скуповима међународног значаја, штампаних у изводу

1. Lečić M, Kokotović B, Milosavljević A, Čantrak D. Influence of the platinum alloy microstructure on the optimum characteristics of the precise anemometers, Постеп S.B.42 на страни 122 Зборника абстраката, YUCOMAT 2008 - Programme and The Book of Abstracts, Tenth YUCOMAT 2008 Conference, Herceg Novi, 2008.

1.3.6 Списак уџбеника

1. Калајџић М, Тановић Љ, Бабић Б, Гавоњих М, Миљковић З, Пузовић Р, Кокотовић Б, и други, Технологија обраде резањем, Приручник, Машински факултет Универзитета у Београду, 1998, 2001, 2004,..., 2008.

1.3.7 Списак техничких решења урађених на Машинском факултету Универзитета у Београду

1. 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. Аутори: Милутиновић Д, Главоњић М, Славковић Н, Димић З, Кокотовић Б, Живановић С, 2009/2010.
2. Универзални уређај за репарацију сонди са загрејним влакнима. Аутори: Лечић М, Кокотовић Б, Чантрак Ђ, 2008.
3. Ласерско-индуктивни мерни систем за мерење дебљине и скенирање текстуре гумираног корда на линијама за каландрирање у индустрији прераде еластомера. Аутори: Петровић Б. П, Илић Б, Јаковљевић Ж, Кокотовић Б, Пилиповић М, 2007.

1.3.8 Учешће у домаћим научним пројектима

1. Флексибилни технолошки системи (ФТС) у индустрији прераде метала (С.6.0574). Руководилац пројекта: проф. др Милисав Калајџић, Машински факултет, Београд, 1993.
2. Интелигентни технолошки системи и фабрике будућности, (С.5.03.66.234). Руководилац пројекта: проф. др Павао Бојанић, Машински факултет, Београд, 1994-1996.
3. Флексибилни технолошки системи и флексибилна аутоматизација у индустрији прераде метала (С.5.03.65.293). Руководилац пројекта: проф. др Милисав Калајџић, Машински факултет, Београд, 1994-1996.
4. Тешке CNC машине алатке и обрадни центри (0176). Руководилац пројекта: проф. др Љубомир Лукић, ЛОЛА Институт, Београд, 2001-2004.
5. Технологија производње урезника од савремених алатних материјала (0032Б). Руководилац пројекта: проф. др Љубодрог Тановић, Машински факултет, Београд, 2001-2004.

6. Развој метода аутоматизованог пројектовања обрадних система и процеса (МИС.3.02.0127Б). Руководилац пројекта: проф. др Милисав Калајџић, Машински факултет, Београд, 2001-2004.
7. Имплементација аутоматизованог пројектовања обрадних система и процеса у индустрији прераде метала (ТР6319Б). Руководилац пројекта: проф. др Милисав Калајџић, Машински факултет, Београд, 2005-2008.
8. Развој нове генерације високопродуктивних CNC машина алатки (ТР6332Б). Руководилац пројекта: др Мирко Бућан, ЛОЛА Институт, Београд, 2005-2008.
9. Развој технологија вишеосне обраде за потребе домаће индустрије (ТР14034). Руководилац пројекта: проф. др Љубодраг Тановић, Машински факултет, Београд, 2008-2010.

1.3.9 Учешће у домаћим стручним пројектима

1. Бојанић П, Милачић В,..., Кокотовић Б. и други, Идејни технолошки пројекат фабрике резервних делова и опреме за рударство, металургију и неорганску технологију. Рађено за РТБ-ФОД Бор, Извештај бр. 01-950654-ППС-62-01-01.3/1992, Машински факултет, Београд, 1992.
2. Милачић В,..., Манески Т, Кокотовић Б. Испитивање геометријске и радне тачности генерално ремонтваних специјалних стругова (UGB-WOT-Rafamet) за обраду точкова железничких возила. Рађено за ЈЖ ЗОВС– Секцију одржавања Сомбор, 1993.
3. Милачић В,..., Манески Т, Кокотовић Б. Испитивање геометријске и радне тачности генерално ремонтваних специјалних стругова (UGB-WOT- Rafamet) за обраду точкова железничких возила. Рађено за ЈЖ ЗОВС – Секција одржавања Земун, 1995.
4. Калајџић М, Кокотовић Б. Поповић М, Комплексно испитивање хидрауличке пресе за угаоно савијање лима ПСТ40/2000. Пројекат рађен за "Јелшинград – ФАМ" Бања Лука, Машински факултет, Београд, 2000.
5. Калајџић М, Тановић Љ, Кокотовић Б. Ковљенић Б, Технолошки пројекат радионице за подподну обраду точкова трамваја. Рађено за ГСП Београд, 2003.
6. Пројектовање CNC технологије и израда компонената алата за бризгање термопласта и осталих машинских делова за фирме: "BWC Dispomedic" Београд, "Уна ортопедија" Београд, Институт "ИХТМ" Београд", Институт "Михајло Пупин" Београд, "PROROAD" Београд, "АМЦД-ортопедија" Београд, "МИ-ЈО" Земун, "Исхрана " Смедерево, 1998 – 2011.

1.3.10 Учешће у изради учила

1. Кокотовић Б. Ивановић Р, Вишенаменски једнокомпонентни динамометар са мерним тракама, М2000. Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2000.
2. Кокотовић Б. Вукадиновић Р, Инсталација за надзор улаза и излаза серво регулационих петљи на обрадном центру LOLA HBG80, Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2001.
3. Кокотовић Б. Нешић Н, Уређај за подешавање предњег нишана аутоматске пушке М70 и М70А. Рађено за Војну академију, Школу резервних официра, Београд-Жарково, 2002.
4. Кокотовић Б. Главоњић М, Технолошки модул за брзу израду прототипова рељефа заснован на примени конвенционалне CNC машине алатке, Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2003.
5. Кокотовић Б. Главоњић М, Инсталација за експерименталну идентификацију процеса фазонског савијања лима, Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2007.

6. Главоњић М, Кокотовић Б, Инсталација за реализацију теста кружне интерполације CNC машина алатки, Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2004. и 2009.
7. Кокотовић Б, Модул главног кретања за верификацију путање алата (за троосну машину са паралелном кинематиком рп-101), Универзитет у Београду, Машински факултет, Завод за машине алатке, 2009.

1.4 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

За примену предложених научних метода и давање очекиваног научног и стручног доприноса у овој дисертацији докторант има следеће квалификације:

- Вештину за испитивање обрадних и сличних машинских система, стечену у разним испитивањима у којима је учествовао. За неке од њих је и дао резултате тих испитивања у својим радовима, наведеним у одељку 1.3.
- Искуство у испитивању обрадљивости, стечено учествовањем у разним експериментима за испитивања обрадљивости. За неке од њих је и дао резултате тих испитивања у својим радовима, наведеним у одељку 1.3.
- Знања потребна за програмирање нумерички управљаних обрадних центара и стругова, стечена у вишегодишњем пројектовању разних CNC технологија, поменутом у одељку 1.3.9.
- Знања о концепцијама обрадних система, о интелигентним технолошким системима, експертним системима, симулацији процеса обраде, верификацији програма за нумерички управљане машине и друга, која је стицао у току реализације више пројеката, наведених у одељцима 1.3.8 и 1.3.9. Део тих знања показао је у својим радовима, наведеним у одељку 1.3.

Ове и квалификације које још има, докторанту ће бити од користи приликом синтезе виртуелног обрадног система у којем ће се одвијати истраживање у овој дисертацији, идентификације сила у обради глодањем и проба и верификације метода за off-line оптимизацију процеса обраде глодањем, што чини главни део очекиваног научног доприноса ове дисертације. То докторанта квалификује за успешан и ефикасан теоријски и експериментални рад на предложеној теми.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Осврт на релевантне библиографске изворе и остварене резултате

Тема ове дисертације актуелна је и данас. Може се наћи доста референци у водећим међународним часописима који ову тему обрађују, доприносећи тако успостављању и имплементацији појма науке о дигиталној производној технологији. Завидне резултате у овој науци имају школе у САД, Канади, Енглеској, Немачкој, Кини, Јужној Кореји, Новом Зеланду итд. Водећи истраживачи ову тему проучавају и у оквиру међународне организације за производно машинство (CIRP). У овој дисертацији се подразумева да је виртуелни обрадни систем (Virtual Machine Tool, или, Virtual Machining System) систем модела машине алатке, алата, прибора, обратка и процеса обраде, који добијени програм за обраду може извршавати и обезбедити довољно информација о изводљивости те обраде, стабилности процеса, динамичкоенергетском билансу обрадног система, термичком билансу, очекиваном квалитету обраде итд. Отуда предмет ове дисертације нису визуелне интерпретације обраде резањем, какве су својствене методима виртуелне стварности (Virtual Reality), него технолошке. Обично се истраживања обраде у виртуелном обрадном систему врше у међународној кооперацији и мултидисциплинарно, па су често њихови коаутори из разних земаља. Може се закључити да свака од ових школа има своје методе за идентификацију сила у обради глодањем, off-line оптимизацију процеса обраде резањем, оцену геометрије обрађене површине, процену тачности и слично, сагласно свом моделу виртуелног обрадног система и својој традицији. Слични резултати се очекују од докторанта и у овој дисертацији, имајући у виду традицију Катедре за производно машинство у истраживању обрадних система, расположиве ресурсе за наставак тих истраживања и његову намеру да овоме дода и свој допринос.

2.2 Приказ предмета истраживања и хипотетичких ставова о проблему који се истражује

Истраживања, која су планирана у оквиру предложене дисертације, односе се на домен технологије машинске обраде и то на технологију обраде глодањем, једне од најраспрострањенијих технологија обраде скидањем струготине, првенствено у металопрерађивачкој индустрији.

У ужем смислу, планирана истраживања су усмерена на развој поузданог аналитичког и симулационог модела, за анализу и оптимизацију пројектоване технологије обраде делова глодањем, чија се реализација остварује на нумерички управљаним машинама алаткама са уобичајеном брзоходношћу.

Планирана истраживања, у оквиру предложене теме дисертације по садржају се могу сврстати у неколико актуелних истраживачких праваца на глобалном нивоу, а који се односе на развој нове генерације обрадних система, који би требало да одговоре све сложенијим захтевима, које намеће савремена индустрија. Овде се првенствено мисли на истраживачки правац који је последњих година означен као виртуелни процес обраде, или виртуелни обрадни систем (Virtual Machine Tool - VMT). Њихова суштина је да се процес обраде, пре своје реализације у реалном обрадном систему, симулира што реалистичније у виртуелном обрадном систему. То се врши кроз рачунарску симулацију која треба да што верније одслика реално производно окружење. Основни циљ оваквог приступа је да се добију реалистичне предикције излаза обрадног процеса, првенствено у смислу својстава обрађеног дела, али и у смислу потребног обима ангажовања ресурса, ради оптимизације режима обраде.

У основи виртуелног обрадног система је његово језгро, које подразумева скуп модела, како физичких уређаја, тако и процеса, карактеристичних за један обрадни систем. Модели, који би чинили ово језгро, могу бити: модел обратка, модел алата, модел машине алатке (њене статике, динамике, серво погона, геометријске тачности итд.), модел сила резања, модел подрхтавања, модел температура у зони резања, модел грешака обраде и други. Поред језгра, на мета нивоу, у структури виртуелног обрадног система је и функционална целина која се обично назива његово софтверско окружење. Њиме је означен скуп комплексних функционалних блокова који су у основи алгоритми коришћења модела из језгра, а који, као излаз, треба да обезбеде што потпунију слику понашања ентитета обрадног система у симулираном дискретном тренутку обраде, са становишта сила резања, запреминске и/или површинске производности, температура, вибрација, грешака обраде итд.

2.3 Циљеви истраживања

Рачунарска симулација, као део софтверског окружења виртуелног обрадног система, има као први циљ да за пројектовану технологију обраде дела, која је садржана у G коду (излазу из неког од комерцијалних пакета за CAM), пружи увид у ефекте процеса обраде и његове излазе.

Даљи домет се односи на модификацију пројектоване технологије, кроз оптимизацију G кода, у смислу подешавања елемената режима обраде: брзине резања, корака, дубине резања, а понекад и реконструкцију програмиране путање алата. Уобичајено је да су критеријуми оптимизације: одржавање константне силе и/или момента резања, задржавање процеса обраде у стабилном подручју (избегавање појаве подрхтавања) и задржавање геометријских грешака обраде унутар захтеваних толеранција.

Од поменутих ефеката, који прате процес обраде глодањем, у овој дисертацији се планира да се посебна пажња усмери на силе резања, како у смислу њихове предикције, тако и у смислу оптимизације процеса са становишта одржавања сила резања на жељеном нивоу. Овакав избор теме истраживања подстакнут је енормним значајем, који силе резања имају на ефекте обраде и квалитет обрађених делова. Може се рећи да је, још увек, уобичајена пракса да се програмирање обраде на нумерички управљаним машинама, када је реч о режиму обраде резањем (дубина

резања, корак, број обрта вретена) заснива на препорученим вредностима, најчешће садржаним у бази података САМ система, у чијем се окружењу програмира та обрада. Јасно и поуздано предвиђање сила резања се таквим избором не може постићи. У том смислу је избор режима обраде најчешће препуштен технологу и његовом искуству. Агресивније стратегије, неретко, као резултат дају обрађене делове са мерама изван прописаних толеранција, неповратно оштећене обрађене делове, оштећен или поломљен алат, што све заједно води повећању трошкова и прекидима у раду. Приступ, који је вођен пренаглашеним опрезом, с друге стране, води непотребно дугом времену обраде и нерационалном коришћењу ресурса машине и алата.

Међутим, и истраживања заснована на концепту виртуелног обрадног система, на моделима, на којима је он заснован и симулацијама, које се унутар овог система врше, не могу дати прецизну слику реалног процеса обраде. У ширем контексту, од нове генерације нумерички управљаних машина алатки се очекује да поседује функције компензације грешака, надзора и адаптивног управљања у реалном времену. Остварење ових функција представља комплементаран концепт виртуелном обрадном систему. Како је калибрација модела процеса обраде уобичајена када се успоставља виртуелни обрадни систем, свакако ће то бити циљ и ове дисертације. Очекује се да метод за off-line оптимизацију процеса обраде глодањем, као главни научни допринос, буде заснован на квалитетном моделу сила у обради глодањем, као другом научном доприносу. Тај модел сила треба да буде подвргнут оваквој, завршној калибрацији.

Очекивана научна сазнања у овој дисертацији су:

- Како комплетирати једну модерну интерпретацију виртуелног обрадног система и употребити је за оптимизацију процеса обраде глодањем.
- Како саставити поуздане моделе процеса обраде, машине алатке, обрађене површине и других елемената виртуелног обрадног система.
- Како вршити оптимизацију обраде глодањем у виртуелним обрадним системима нове генерације, који ће се програмирати другачијим форматима информација о производу у односу на данашње итд.

3. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

3.1 Чињенице и појаве које се проучавају

За комплетирање виртуелног обрадног система потребно је оформити систем модела процеса обраде, машине алатке, алата, прибора и обратка. Симулација таквог система обухвата нешто од следећег: анимацију, којом се показује кинематичко одвијање процеса обраде, праћење показатеља стабилности у току обраде, оцену тачности обраде и квалитета обрађене површине итд. У овој дисертацији планиран је следећи хибридни приступ: off-line оптимизација процеса обраде врши се у виртуелном обрадном систему, у којем се користи само кинематички модел машине алатке, а завршна верификација и коришћење такве технологије врши се на стварној машини. Та машина је хоризонтални обрадни центар у Заводу за машине алатке, са припадајућом опремом. Тако ће се ово истраживање базирати на сталној дуалности стварних објеката (физичких јединица обрадног система) и виртуелног (модела тих јединица и модела спрега тих модела). На тај начин ће се у систем за симулацију обрадних система уводити и његов хардвер, дајући резултатима ове дисертације и значајну стручну вредност. Ово је квалитативно другачије од честе кинематичке симулације, оптимизације и верификације програма (на пример, као помоћу софтвера VERICUT фирме CGTech), јер укључује и моделе процеса обраде, обратка и обрађене површине. За састављање модела процеса обраде могу да се користе аналитички, експериментални, емпиријски и нумерички методи. У овој дисертацији ће се састављати и користити модели процеса глодања коришћењем емпиријских метода (mechanistic methods), који су детерминистички по својој природи. Планирани су и калибрациони експерименти помоћу којих ће се ови модели процеса усавршити тако да на нов начин уведу процес обраде глодањем у виртуелни обрадни систем. На основу тога је одабрана главна тема истраживања: off-line оптимизација процеса обраде

глодањем. Као критеријум за off-line оптимизацију могу да користе: запреминска производност, површинска производност, правилност путање алата у односу на очекивано понашање сервосистема машине, посебно у обради већим брзинама, тачност обраде, храпавост обрађене површине, снага резања, силе резања итд. Сви добијени резултати ће се показати на примеру програмирања нумерички управљаних глодалица фиксне архитектуре управљања помоћу стандардног G кода (уведеног класичним стандардима RS274D и ISO6983). За њега ће се направити интерпретер, а онда и адекватан програм за реконструкцију програмиране технологије, зато што се у овом формату програма о обратку не чувају прецизни подаци о његовој геометрији, материјалу, толеранцијама, потребном квалитету обраде и сличном. Потом ће се дати осврт на применљивост добијених резултата на системе са управљањем отворене архитектуре, какви већ постоје на машинама у Заводу за машине алатке, а онда и на обрадне системе са програмирањем типа STEP-NC (по стандардима ISO14649 и ISO10303, AP238), за које се не користи G код као формат програма. На крају ће се оценити допринос ове дисертације истраживању флексибилних интелигентних машина алатки као једне од следећих генерације ресурса за интелигентне технолошке системе.

3.2 Полазне хипотезе

Одабране су следеће четири хипотезе, са којима се започиње истраживање у овој дисертацији:

Прва хипотеза. Макромеханички модел сила резања представља добру основу за развој модула виртуелног обрадног система, за анализу (предикцију) сила резања и off-line оптимизацију процеса обраде глодањем по критеријуму одржавања константне сила резања током обраде.

Друга хипотеза. Апроксимативни методи, који се користе и за визуелни приказ обраде и за интерпретацију запремине обратка (пројекција на непокретном омотачу алата (Z-map), пројекција на омотачу путање сечива (ME Z-map), осмограна структура (octree), дубински елементи правоугаоног пресека (dixel) и слични) добра су полазна основа за развој алгорита за оцењивање битних тренутних обележја захвата алата (глодала) и обратка у карактеристичним тачкама путање алата. Овим методима такође је могуће приказати и промену геометрије припремка током оптимизације процеса обраде глодањем. То се користи за израчунавање пресека струготине на новој путањи.

Трећа хипотеза. Могућ је развој модела који успоставља корелацију изабраног скупа геометријских обележја захвата, уз уважавање параметра који се односе на геометрију алата и корак, са тренутним вредностима репрезентативних компонената силе резања. Такав модел може бити основа за поуздану и ефикасну предикцију сила резања у условима произвољног облика припремка (обратка) и произвољног облика програмиране путање алата.

Четврта хипотеза. Могућ је развој модела за off-line оптимизацију програмиране обраде глодањем, заснованог на симулацији и поменутом моделу силе резања, за који је функција циља одржавање силе резања на задатом нивоу, што се постиже променом брзине помоћног кретања на прописаним сегментима програмиране путање.

4. НАУЧНИ МЕТОДИ ИСТРАЖИВАЊА

4.1 Општи научни методи који ће бити примењени у истраживању

У припреми за израду ове дисертације докторант је већ извршио припрему ресурса тако да се са успехом могу применити следећи општи научни методи:

- Методи планирања експеримената, аквизиције и дигиталне обраде сигнала.
- Методи нумеричке анализе и идентификације процеса обраде глодањем.
- Методи компјутерске графике за симулацију виртуелних технолошких система.
- Специфични методи симулације виртуелних обрадних система.
- CAD/CAM за пројектовање машинских делова и технологија за њихову израду.
- Методи за емпиријску идентификацију параметара у моделима сила резања.
- Аналитички методи за предикцију сила резања у произвољној конфигурацији захвата алат-обрадк, засновани на CAD симулацији уклањања материјала обратка алатом, при кретању алата по програмираној путањи.

4.2 Могући специфични научни методи који могу бити предмет истраживања

За планирани нови метод за идентификацију сила у обради глодањем покушаће се да се развије адекватна експериментална база помоћу које би се такав нови метод одвијао као пројектовање помоћу експериментисања.

Планирани софтвер сам по себи има адекватне нумеричке методе и они ће се овде користити кави јесу. Докторанту остаје могућност да адекватном и оригиналном експерименталном базом комплетира скуп метода помоћу којих ће моћи да сва планирана истраживања успешно приведе крају у расположивом времену.

5. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

5.1 Очекивани научни резултати

Планиран је један научни резултат (означен са N0), који ће потицати из генералног истраживања виртуелних обрадних система за обраду резањем и три (означена са N1, N2 и N3), који ће потицати из оптимизације процеса обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. Радни наслови тих резултата су следећи:

- N0, Савремени модел виртуелног обрадног система. У оквиру њега ће се вршити сва истраживања у овој дисертацији.
- N1, Ефикасан интерпретер G кода. Користиће се за декодирање технологије у програму који треба оптимизовати, а онда и за генерисање коригованог програма у формату који је прилагођен машини на којој ће се вршити експериментална верификација добијених резултата. Имаће и модул за препознавање технологије.
- N2, Метод за идентификацију сила у обради глодањем. Користиће се за састављање модела сила у обради глодањем по којима ће се вршити оптимизација технологија. Планирано је да овај метод буде оригиналан и ефикасан.
- N3, Метод за off-line оптимизацију процеса обраде глодањем у виртуелном обрадном систему. Ово је главни резултат дисертације. Користиће се за завршно прописивање оптималне брзине помоћног кретања у оптимизованој технологији обраде глодањем. Критеријум за оптимизацију су силе глодања.

5.2 Очекивани стручни резултати

Планиран је један стручни резултат (означен са S0), који ће потицати из генералног истраживања процедура за експерименталну верификацију научних резултата ове дисертације и три (означена са S1, S2 и S3), који ће већином потицати из експериментисања у оквиру израде ове дисертације. Радни наслови тих резултата су следећи:

- S0, Процедура за верификацију оптимизације процеса обраде глодањем.
- S1, Планови експеримената и сами експерименти за потребе ефикасне идентификације сила резања у обради глодањем. Свакако ће се испитивати ортогонално и косо резање и успоставити метод за каснију идентификацију косог резања помоћу података о ортогоналном.
- S2, Модел тренутног пресека струготине у обради вишесечним алатом. Користиће се за одређивање граница у којима се материјал претвара у струготину по преузетом програму, а онда и за израчунавање сила резања.
- S3, Метод за оцену очекиване храпавости обрађене површине после обраде по коригованом програму. Користиће се за оцену и других елемената квалитета обраде као што је тачност, помоћу процењених сила и познатих крутости елемената обрадног система.

Сваки од ових резултата биће верификован експериментима, који ће се вршити у Заводу за машине алатке Машинског факултета. За те експерименте расположиво је: један хоризонтални обрадни центар са потребним алатима, приборима и припремцима, систем за аквизицију и обраду експерименталних података, прве апликације у одабраним програмским окружењима за пројектовање производа, технологија и оптимизације, које су коришћене за полазну проверу постављених хипотеза, референтна литература итд.

6. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

6.1 Приказ планиране технологије рада на дисертацији

План истраживања у овој дисертацији може се дефинисати кроз следеће активности и њихове важније резулте:

- (1) Комплетирање концепта виртуелног обрадног система у којем ће се вршити истраживање. На основу прегледа достигнућа у овој области, нађених у референтној литератури, саставиће се систем модела који ће чинити језгро овог виртуелног обрадног система.
- (2) Извођење низа експеримената са ортогоналним резањем једносечним алатом, у изабраним материјалима обратка, уз обраду резултата ради идентификације главних параметара макромеханике процеса ортогоналног резања. Ови експерименти се изводе да би се поставили, а онда и проверавали основни изрази макромеханике ортогоналног резања и упоредили са изразима познатих из литературе. Крајњи резултат ове идентификације треба да буду параметри модела ортогоналног резања, који ће се користити у наредним фазама рада.
- (3) Извођење низа експеримената са косим резањем једносечним алатом, у изабраним материјалима обратка, уз обраду резултата ради идентификације главних параметара макромеханике процеса косог резања и проверу хипотезе о трансформацији резултата ортогоналног на косо резање. Ови експерименти треба да послуже за потврђивање поменутих трансформација, које су познате у литератури, зато што се планира њихово коришћење у наредним фазама рада.
- (4) Извођење низа експеримената обраде глодањем, којима треба да се тестира хипотеза о применљивости резултата тестова са ортогоналним резањем на дискретне делове сечива алата и одређивање укупне силе резања, при обради алатом сложене резне геометрије. Ови експерименти допуњавају претходне. Упоредном анализом резултата симулације и измерених сила у овим новим експериментима треба да се добију коначна правила за прерачунавање сила у ортогоналном резању на силе у произвољном косом.
- (5) Развој модела који описује зависност компонената силе глодања од макрогеометријских параметара алата, параметара резне геометрије алата, брзине помоћног кретања и изабраних геометријских обележја површи која дефинишу захват алата и обратка. Планирано је да се модел успостави обучавањем на коначном скупу узорака. За верификацију овог модела вршиће се упоредна анализа резултата предиктованих компонената силе глодања на пуном обрту алата и то применом овако развијеног модела и мерењем сила при обради обратка репрезентативног облика, на обрадном центру, или на некој другој нумерички управљаној глодалици.
- (6) Састављање поузданих модела за оптимизацију технолошког програма обраде глодањем, са становишта одржавања константне силе резања. Направиће се преглед достигнућа која се односе на развијене моделе за предикцију сила при обради резањем, која се изводи на нумерички управљаним машинама алаткама и на примену тих модела у оптимизацији процеса обраде.
- (7) Развој алгоритма за симулацију обраде глодањем, заснованог на коришћењу дискретизоване представе геометрије обратка и функција које се односе на реконструкцију путање алата, садржане у полазном G коду. Тако ће се вршити ажурирање геометрије обратка током симулације процеса обраде и издвајати битна обележја конфигурације захвата алата и обратка у оним тачкама путање алата, које су репрезентативне са становишта сила глодања. Тежиште је на издвајању битних геометријских обележја захвата и на примени развијеног модела силе резања, а не на визуализацији процеса уклањања материјала током обраде. Планирано је да се у већ развијени модел сила резања имплементира правило по којем се задатој путањи алата придружују предиктоване компоненте силе глодања. То ће се посматрати и као прототип дела корисничког интерфејса, какав се очекује на машинама алаткама нове генерације. Практична примена оваквог алгоритма, уз

пратећу базу података, треба да буде коришћена за евалуацију технологије обраде пројектоване у окружењу одабраног САМ система. У оквиру ове активности планира се и систем анализа могуће примене алгоритма за израчунавање сила на различите типове захвата обраде годанем, с обзиром на ограничења која намеће изабрани приступ у моделирању сила глодања. Верификација овог модела сила подразумева поређење њиме добијених резултата и резултата добијених мерењем сила резања у експериментима са обрадом машинских делова репрезентативне геометрије, на обрадном центру.

- (8) Развој алгоритма и програмска имплементација система за оптимизацију задатог програма обраде, са становишта ограничења сила резања, заснованог на off-line адаптивном подешавању брзине помоћног кретања дуж сегмената путање алата. Дефинисаће се критеријуми за дискретизацију путање алата и критеријуми за њихово сажимање након оптимизације. Планира се верификација кроз упоредну анализу сила резања, дуж путање алата, добијених кроз поменути модел симулације и мерењем, у реалном процесу, за изабрани репрезентативни облик припремка и путању алата, за случај неадаптираних и адаптираних брзина помоћног кретања. Практична примена методологије, која се овде уводи, је унапређење технологије обраде пројектоване унутар САМ програмског окружења, ради подизања квалитета излаза из процеса глодања. Како се оптимално подручје процеса обично налази уз границу дозвољене силе резања, то се њеним одржавањем на потребном нивоу у великој мери доприноси остварењу максимума производности, уз смањивање ризика од лома алата и уз свођење могућих грешака обраде на прихватљив ниво.

Експериментима би се провериле неке од хипотеза, које су већ дуже времена прихваћене у истраживачким центрима широм света. Како се наредне целине предложеног рада у великој мери ослањају на ове хипотезе, сматра се пожељним њихова верификација, првенствено у погледу интервала поверења, с обзиром на идеализације које су садржане у њима. Као један од основних захтева, који се поставља пред наведене моделе, чији је развој планиран, јесте њихова ефикасност, која треба да се огледа у минимуму потребних информација и времена њиховог процесирања, уз постизање довољног нивоа квалитета предикције сила резања и оптимизације која се на њима заснива. То би требало да допринесе извеснијој имплементацији ових модела.

Очекује се да би експерименталне инсталације, поред намене у функцији предложене дисертације, могла бити коришћене и у унапређивању наставе на групи предмета Катедре за производно машинство, као и у предстојећим научно-истраживачким пројектима Центра за нове технологије Машинског факултета.

6.2 Преглед поглавља која се планирају

У њима треба да буду приказане припреме за добијање главних научних и стручних резултата дисертације, потом дати описи тих резултата, па процена њихове могуће примене и закључак. Планирају се следећа поглавља:

- Увод. Треба да садржи приказ стања истраживања у свету и посебан осврт на концепције виртуелног обрадног система.
- Концепција виртуелног обрадног система у којем је реализована ова дисертација.
- Стручни резултати дисертације. Садржи детаљне описе добијених резултата типова S0, S1, S2 и S3.
- Научни резултати дисертације. Садржи детаљне описе добијених резултата типова N0, N1, N2 и N3.
- Прилог са изводима из расположиве документације, направљене у току рада на овој дисертацији.
- Закључак.

Комплектирање ових поглавља вршиће се по плану истраживања датом у одељку 6.1.

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Осврт на подобност теме. Имајући у виду реалне проблеме, који прате производно окружење, с једне стране и тренд савремених истраживања, с друге стране, а који се односе на унапређење технологије обраде глодањем на нумерички управљаним машинама алаткама, може се закључити да је предложена тема актуелна и добро осмишљена. Примена модела и алгоритама, чији се развој предвиђа у оквиру предложене дисертације, може да допринесе постизању следећих техноекономских ефеката, првенствено у оним производним капацитетима у којима је технологија обрада глодањем заступљена у значајној мери: подизање производности, смањење броја дефектних делова и оштећења алата, подизање квалитета обрађених делова, скраћивање времена обраде и, коначно, постизање конкурентније цене производа.

Осврт на подобност кандидата. Докторант је магистар техничких наука, има радове у области предложене дисертације, има искуство у планирању и извођењу експеримената са обрадним системима, извршио је потребне пробе и провере полазних хипотеза и припремио експерименталну базу за несметано одвијање планираних истраживања.

Предлог теме, научне области и ментора. На основу пријаве за израду докторске дисертације докторанта мр Бранка Кокотовића, дипл.инж.маш. број 629/1 од 13. 04. 2011. године, Комисија је у оцењивању испуњености услова кандидата и научне заснованости теме ове докторске дисертације закључила да кандидат испуњава све законске и друге услове за рад на докторској дисертацији и да је предложена тема адекватна за израду докторске дисертације. Комисија зато предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да докторанту

мр **Бранку Кокотовићу**, дипл.инж.маш.

одобри израду докторске дисертације под насловом

ОБРАДА ГЛОДАЊЕМ У ВИРТУЕЛНОМ ОБРАДНОМ СИСТЕМУ.

у научној области **Машинство.**

За ментора за рад на овој дисертацији предлаже се **др Милош Главоњић**, ред. проф. на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду.

Чланови Комисије:

(проф. др Милош Главоњић, ментор)

(проф. др Љубодраг Тановић)

(проф. др Павао Бојанић)

(проф. др Драган Милутиновић)

(проф. др Милан Зељковић, ФТН Нови Сад)