

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)

763/5

(Број захтева)

22.05.2016. године

(Датум)

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

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

ЗОРАНА (ЖИВОЈИН) ДИМИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ЗОРАН (ЖИВОЈИН) ДИМИЋ** уписан на Докторске студије 2008 године.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ

Универзитет је дана 27.02.2012. год. својим актом под бр. 06-17338/14-12 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ЗОРАН (ЖИВОЈИН) ДИМИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 07.04.2016. године, одлуком факултета под бр. 763/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Драган Милутиновић	Ред.проф	Производно машинство	Машински факултет Београд
2. Др Љубодраг Тановић	Ред.проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
3. Др Милош Главоњић	Ред.проф. у пензији	Производно машинство	Машински факултет Београд
4. Др Вељко Поткоњак	Ред.проф.	Електротехника и роботика	ЕТФ Београд
5. Др Владимир Квргић	Виши научни сарадник	Производно машинство и роботика	Лола институт Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 21.04.2016. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф.др Радивоје Митровић

- 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: 763/4
Датум: 21.04.2016. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Драган Милутиновић, ред. проф., ментор, др Љубодраг Тановић, ред. проф., др Милош Главоњић, ред. проф. М.Ф. у пензији, др Вељко Поткоњак, ред. проф. ЕТФ Београд и др Владимир Квргић, виши научни сарадник, Лола институт Београд, о оцени докторске дисертације „Управљачки систем отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду“ студента докторских студија **Зорана Димића, дипл.инж.ел.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 21.04.2016. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ“** студента **ЗОРАНА ДИМИЋА, дипл.инж. ел.**

Докторску дисертацију и реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

Предмет: **Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Зорана Димића, дипл. инж. ел.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 763/2 од 07.04.2016.год. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Зорана Димића, дипл. инж. ел., под насловом:

„УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ”

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат је пријавио тему докторске дисертације под називом: „УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ” и за ментора је предложио проф. др Драгана Милутиновића. На основу пријаве кандидата, ННВ МФБгд. је одлуком бр. 3059/2 од 15.12.2011. год. прихватило предлог и именovalo Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Драган Милутиновић, ред. проф. (ментор), др Мирослав Пилиповић, ред. проф., др Милош Главоњић, ред. проф., др Вељко Поткоњак, ред. проф., др Владимир Квргић, научни сарадник. На основу извештаја Комисије и одлуке ННВ МФБгд. поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (захтев бр. 165/2 од 26.01.2012. год.) које је на седници одржаној 27.02.2012. год. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Зорана Димића, дипл. инж. ел. (одлука бр. 06-17338/14-12 од 27.02.2012. год), а на основу чега је 05.03.2012. год. Декан Машинског факултета у Београду донео закључак бр. 420/1 о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Драгана Милутиновића.

На основу извештаја проф. др Драгана Милутиновића, ментора, да је докторанд Зоран Димић завршио докторску дисертацију под називом „УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ”, као и предлога Катедре за производно машинство, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 763/2 од 07.04.2016. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: др Драган Милутиновић, ред. проф., др Љубодраг Тановић, ред. проф., др Милош Главоњић, ред. проф. у пензији, др Вељко Поткоњак, ред. проф., др Владимир Квргић, виши научни сарадник.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Производно машинство. Израдом докторске дисертације

руководио је др Драган Милутиновић, редовни професор на Катедри за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Зоран Димић, дипл. инж. ел. је рођен у Београду, 8.октобра 1968. године. Основну школу је завршио у Београду, као и средњу електротехничку школу „Никола Тесла“. Дипломирао је на смеру Електроника, Електротехничког факултета Универзитета у Београду 29.9.2001 год. Дипломски рад је урадио из предмета Импулсна и дигитална електроника (ментор проф. др Дејан Живковић) и исти одбранио са оценом 10.

Од 25.маја 2000. до 8.августа 2007. године је био запослен као инжењер на пословима развоја софтвера за управљање робота и машина са паралелном кинематиком у Фабрици робота и алата Лола система. Од 9.августа 2007. године до данас је запослен у Лола институту д.о.о. као истраживач и руководилац програма развоја управљачких система за роботе и машине алатке.

Докторске студије на Машинском факултету у Београду је уписао школске 2008/2009 године. На лични захтев, по решењу бр. 9/9061 од 26.06.2014. год. одобрен му је продужетак рока за завршетак докторских студија за два семестра, а на захтев ментора проф. др Драгана Милутиновића, по решењу бр. 1127/2 од 25.06.2015. год. за још два семестра. Разлог продужењу рока за завршетак докторских студија је непредвиђено велико кашњење испоруке хардверских компонената за израду експерименталног прототипа управљачког система отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду, који је био неопходан за верификацију остварених теоријских резултата докторске дисертације.

Током истраживачког рада у Лола институту и као студент докторских студија је учествовао у већем броју научних и стручних пројеката из области индустријских робота и машина алатки, који су се односили на системе управљања и програмирања отворене архитектуре за роботе и машине алатке. Самостално или као коаутор је објавио већи број радова на домаћим и међународним скуповима и у домаћим и међународним часописима. Такође је коаутор и већег броја техничких решења у оквиру пројеката које је финансирао Министарство просвете, науке и технолошког развоја.

За постигнуте научне и стручне резултате је два пута, 2005. и 2010. године, награђиван годишњим наградама Привредне коморе Београда за техничка решења и унапређења, а 2006. године је награђен Наградом града Београда за област наука-проналазаштво. Као члан истраживачког тима, 2011. године је награђен Наградом за најбољу технолошку иновацију и освојено четврто место у укупном пласману.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Зорана Димића, дипл. инж. ел., под називом „УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ“ изложена је на 202 странице и садржи 140 једначина, 121 слику, 8 табела и 90 коришћених референтних литературних извора. Докторску дисертацију чине следећих седам поглавља и списак литературе:

1. Уводна разматрања
2. Вишеосна обрада роботима
3. Генерализовани приступ кинематичког моделирања елементарне ћелије за обраду на бази робота вертикалне зглобне конфигурације
4. Развој метода пројектовања управљачког система отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду
5. Верификација експерименталног система управљања и програмирања реконфигурабилних обрадних ћелија развијеног на бази софтвера *EMC2*
6. Експериментална верификација функција и перформанси основних компонената за реализацију реконфигурабилног управљачког система на бази *OROCOS-a*
7. Закључак
8. Литература

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу текста докторске дисертације дате су основне информације о потреби и значају примене робота у вишеосној обради глодањем делова од мекших материјала ниже и

средње класе тачности са сложеним естетским и функционалним површинама. Полазећи од основних проблема који представљају главне ограничавајуће факторе за примену робота у обради, дат је списак полазних хипотеза као и основни циљеви и доприноси предметне дисертације. Наводи се да је применом реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре, развијених према предложеној методологији, могуће управљање реконфигурабилних роботских ћелија за обраду са програмирањем у G-коду, чиме је, за поменути класу задатака, омогућено директно коришћење постојећих CAD/CAM система за 5-осне машине алатке.

У другом поглављу је представљено актуелно стање истраживања и развоја у области обраде роботима. Препознати су основни проблеми у примени робота за вишеосну обраду сложених делова, који се односе на комплексност програмирања и незадовољавајућу крутост, односно попустљивост структуре робота. Представљене су технике програмирања робота за обраду које се ослањају на постојеће програмске језике и одговарајуће транслаторе програма обраде. Приказани су савремени роботи реномираних произвођача који се користе за обраду. Освртом на традиционалне технике програмирања робота за обраду и анализом актуелних пројеката у овој области, указано је на потребу и актуелност истраживања и развоја реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре роботских ћелија за обраду са програмирањем у G-коду. Као основа за развој генерализованог приступа кинематичког моделирања, представљен је концепт реконфигурабилне ћелије за вишеосну обраду на бази робота вертикалне зглобне конфигурације, из кога је изведена структура елементарне обрадне ћелије на бази робота која укључује робот, обрадну јединицу (моторно вретено) са одговарајућим интерфејсима и радни сто. Елементарна обрадна ћелија је конфигурисана тако да емулира различите 5-осне вертикалне и хоризонталне машине алатке код којих се оријентација алата остварује његовим ротацијама.

Као основа развоју реконфигурабилног система управљања роботских ћелија за обраду са програмирањем у G-коду, у трећем поглављу је детаљно показан приступ генерализованог кинематичког моделирања структура елементарне обрадне ћелије на бази робота. Полазећи од геометријских модела структура елементарне ћелије на бази робота са 5 и 6 степени слободе, које емулирају 5-осне машине алатке, поставком одговарајућих координатних система робота и координатних система емулираних 5-осних машина алатки, створени су предуслови за дефинисање унутрашњих и спољашњих координата робота, односно емулираних 5-осних машина алатки. С обзиром да се у дисертацији разматра више конфигурација елементарних обрадних ћелија на бази робота, на одговарајући начин су представљени вектори унутрашњих координата за све разматране случајеве робота са 5 и 6 степени слободе, као и углови оријентација алата са припадајућим матрицама ротација за све разматране случајеве емулираних 5-осних машина алатки. Потом су дата решења директног и инверзног кинематичког проблема елементарних ћелија на бази робота као емулираних 5-осних машина алатки, за све разматране случајеве. На крају трећег поглавља је приказана метода анализе радног простора елементарних ћелија на бази робота са 5 и 6 степени слободе, као емулираних 5-осних машина алатки. Као пример је дата анализа радног простора елементарне ћелије за обраду на бази робота која емулира 5-осну вертикалну глодалицу конфигурације (X, Y, Z, A, B) за случајеве 3-осне и 5-осне обраде.

У четвртном поглављу су представљене две методе развоја реконфигурабилних управљачких система роботских ћелија за обраду. Како се развој управљачких система у овој дисертацији базира на данас доступним хардверским и софтверским решењима отворене архитектуре, најпре је дата општа класификација управљачких система отворене архитектуре за машине алатке и роботе, који могу бити делимично или потпуно отворени, у хардверском и/или софтверском смислу.

Прва постављена метода, која се базира на примени готових хардверских и софтверских решења, примењена је током развоја реконфигурабилног управљачког система потпуно отворене архитектуре, коришћењем софтвера отворене архитектуре EMC2 (*Enhanced Machine Controller* верзија 2) и одговарајућег PC хардвера. Развијени су софтверски кинематички модули, на основу претходно добијених генерализованих решења инверзне и директне кинематике, и дефинисане различите конфигурације управљачког система за све разматране случајеве елементарне обрадне ћелије на бази робота. Посебна пажња је посвећена развоју виртуелних обрадних ћелија, као основних алата за *off-line* симулацију програма обраде на датој конфигурацији обрадне ћелије.

Друга метода развоја реконфигурабилног управљачког система, која подразумева примену софтверских алата и технологија отворене архитектуре уз развој алгоритама и

софтверских функција управљања, приказана је у наставку четвртог поглавља. Полазећи од платформски независног развоја алгоритама и функција управљања, преко поставке платформски независне структуре реконфигурабилног управљачког система, постављене су основе за имплементацију софтверских компонената и конфигурисање управљачког система. Одабиром *OROCOS (Open RObot COntrol Software)* софтверских алата, односно софтверског окружења које дефинише оквире у којима се извршавају претходно развијене функције, уз одговарајуће апликативне интерфејсе за размену информација, створени су услови за дефинисање управљачке конфигурације, односно могућности конфигурисања/реконфигурисања управљачког система. Применом расположивих софтверских технологија и алата отворене архитектуре, креиране су софтверске компоненте као носиоци претходно развијених управљачких функција са особинама: (i) портабилности - могућности извршавања на различитим хардверским платформама и оперативним системима, (ii) дистрибутивности - извршавање софтверских компонената једног софтверског система на више хардверских платформи, (iii) конфигурабилности - могућности промене конфигурације одговарајуће софтверске компоненте пре и у току извршавања и (iv) реконфигурабилности - могућности укључивања/искључивања одговарајућих софтверских компонената у систем када је то захтевано. Уз развијени подсистем за *off-line* програмирање и виртуелну симулацију, на бази савремених графичких софтверских библиотека, у овом поглављу је представљен део резултата, који у наредним фазама развоја треба да буду заокружени комплетним развојем G-код компилатора, имплементацијом *STEP-NC* стандарда, као и *on-line* метода компензације статичких грешака обраде, на бази интелигентних алгоритама модификације путање мерењем сила резања.

У циљу систематизације поступака иницијалног конфигурисања и измене управљачке конфигурације, како пре покретања, тако и током активног стања роботске ћелије, постављена је морфолошка метода за конфигурисање и реконфигурисање управљачког система. Применом одговарајућих дијаграма за моделирање динамичких процеса и успостављених релација између софтверских и хардверских компонената управљања, дефинисане су активности систем-интегратора, односно корисника, у процесу конфигурисања/реконфигурисања управљачког система.

Верификација развијеног експерименталног система управљања и програмирања реконфигурабилних обрадних ћелија на бази робота, применом *EMC2* софтвера и одговарајућег хардвера, дата је у петом поглављу. Током извођења експеримената, потврђене су могућности реконфигурисања експерименталног управљачког система обрадних ћелија на бази робота у циљу емулирања различитих 5-осних машина алатки. Експерименти су обухватили 3-осне и 5-осне обраде на различитим типовима емулираних 5-осних вертикалних и хоризонталних машина алатки одабраних типова радних предмета од мекших материјала, ниже и средње класе тачности: (i) тест радни предмети са аналитичким и слободним (енг. *freeform*) површинама слични радним предметима који се користе за испитивање 5-осних машина алатки, (ii) радни предмети са сложеним (аналитичким и *freeform*) функционалним површинама и (iii) радни предмети са сложеним естетским површинама. Већи број обрађених радних предмета је потврдио функционалност имплементираних кинематичких алгоритама, у одговарајућим конфигурацијама управљачког система обрадних ћелија на бази робота, чиме је верификован развијени систем управљања и програмирања на бази G-кода. Обрадом посебно пројектованог тест пробног дела, који захтева вишестрану обраду у једном базирању, демонстриране су могућности реконфигурисања роботске ћелије емулирањем различитих 5-осних машина алатки у току једног задатка, без физичких интервенција.

У шестом поглављу је приказана експериментална верификација функционалности и перформанси реализованих основних софтверских компонената потребних за елементарну конфигурацију управљачког система на бази *OROCOS-a*. Конфигурисани прототип елементарне конфигурације управљачког система је подвргнут тестирању функција и перформанси, најпре на одговарајућем тест лабораторијском систему са 3 аналогна серво погона, посебно развијеном за ове потребе. Затим је управљачки систем тестиран на реалном роботу, одговарајућим тест програмима, извршавањем сложених програмираних вишеосних кретања. Тестирања су показала да је усвојени приступ развоју управљачког система на бази *OROCOS-a* дао очекиване резултате у погледу функција и перформанси развијеног експерименталног прототипа.

У седмом поглављу, у закључку, је дат осврт на остварене резултате. Истакнут је значај развоја генерализованог приступа кинематичког моделирања као основе за развој реконфигурабилног система управљања, који омогућава динамичко реконфигурисање робота, односно емулирање и хоризонталне и вертикалне 5-осне машине алатке у току једног задатка. Као главне предности постављених метода и развијених система управљања, у односу на

постојеће, наведене су могућности програмирања роботских ћелија за обраду у G-коду, применом постојећих CAD/CAM система, што омогућава директну применљивост обрадне ћелије на бази робота од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији. На крају овог поглавља је указано и на даље правце истраживања и развоја у овој области.

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

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Ова дисертација је урађена у оквиру истраживања везаних за пројекте из програма технолошког развоја са тематиком која је данас актуелна у свету. Истраживања су се односила на вишеосну обраду роботима делова од мекших материјала ниже и средње класе тачности са сложеним естетским и функционалним површинама и покривала су два кључна проблема у овој области. Први се односио на комплексност програмирања робота за обраду, а други на развој алгоритама компензације грешака насталих услед незадовољавајуће крутости робота која се директно одражава на тачност обраде. Кључни резултат ових истраживања, у којима је кандидат учествовао, је био развој реконфигурабилног система управљања роботских ћелија за обраду са програмирањем у G-коду. Главне теме истраживања у области развоја реконфигурабилних управљачких система роботских ћелија за обраду, које су данас актуелне и у свету, су обухваћене и у овој дисертацији кроз: методу конфигурисања различитих структура обрадних ћелија на бази робота, методу генерализованог кинематичког моделирања тако структурисаних роботских ћелија, методу пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене готових хардверских и софтверских система отворене архитектуре и методу пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене софтверских алата и хардверских технологија отворене архитектуре уз развој алгоритама управљања. Добијени резултати ових истраживања су оригинални, објављени су у међународним часописима и на међународним конференцијама и цитирани су од истраживача водећих истраживачких центара у свету.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради дисертације је коришћена литература чији је списак дат у поглављу 8. Делом су то цитиране референце, а другим делом библиографија радова који су кандидату били доступни за време израде дисертације. Анализом списка коришћене литературе може се закључити да је кандидат располагао већином доступне референтне литературе и да ју је проучио у току израде дисертације. Дисертација је рађена упоредо са порастом броја објављених радова о примени робота у вишеосној обради, тако да је Кандидат извршио анализу програма истраживања водећих центара и произвођача робота у свету, а онда понудио и свој допринос развоју реконфигурабилног управљачког система роботских ћелија за обраду. Учешћем у објављивању резултата свог рада, самостално и као коаутор, показао је да је своје истраживање у оквиру израде докторске дисертације добро позиционирао и планирао.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање је засновано на уобичајеним методама које се користе за пројектовање модуларних, реконфигурабилних и мултифункционалних обрадних система, методама кинематичког моделирања робота вертикалне зглобне конгурације са 5 и 6 степени слободе, методама управљања и програмирања машина алатки и робота. Коришћена је и метода развоја виртуелних обрадних система на бази софтверских библиотека отворене архитектуре, у циљу симулације и верификације програма обраде, метода пројектовања објектно оријентисаног софтвера, метода конфигурисања модуларних рачунарских система на бази отворене PC архитектуре, методе софтверске и хардверске имплементације кинематичких и динамичких модела серијских робота, методе подешавања и испитивања серво система, методе испитивања робота, као и CAD/CAM системи за пројектовање технологије обраде.

3.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултати ове дисертације су: метода конфигурисања различитих структура ћелија за обраду на бази робота, метода генерализованог кинематичког моделирања тако структурисаних роботских ћелија, метода пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене готових хардверских и софтверских система отворене архитектуре, метода пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене софтверских

алата и хардверских технологија отворене архитектуре уз развој алгоритама управљања, морфолошка метода за конфигурисање управљачког система према захтевима корисника. Сви ови резултати су практично реализовани кроз развој два прототипа управљачких система и верификовани извођењем више експеримената обраде на конфигурисаним обрадним ћелијама на бази робота. Експерименталном верификацијом су, поред могућности обраде, демонстриране особине реконфигурабилности реализованог система, односно конфигурабилности на бази развијених и расположивих софтверских и хардверских компонената.

Могућност програмирања обраде у G-коду роботску обрадну ћелију, управљану развијеним реконфигурабилним управљачким системом, чини директно применљивом од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и примени постојећих CAD/CAM система за програмирање 5-осних машина алатки.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

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

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Полазне основе за дефинисање садржаја и циљева ове дисертације су били резултати претходних вишегодишњих истраживања у области индустријских робота и машина алатки у којима је учествовао и кандидат.

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

- Методу конфигурисања различитих структура ћелија за обраду на бази робота вертикалне зглобне конфигурације са 5 и 6 степени слободе;
- Методу генерализованог кинематичког моделирања ћелија за обраду на бази робота које емулирају различите 5-осне вертикалне и хоризонталне машине алатке;
- Методу пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене готових хардверских и софтверских система отворене архитектуре са програмирањем у G-коду;
- Методу пројектовања реконфигурабилних управљачких система на бази примене софтверских алата и хардверских технологија отворене архитектуре уз развој алгоритама управљања са могућношћу програмирања у G-коду.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Развијена метода генерализованог кинематичког моделирања реконфигурабилних ћелија за обраду на бази робота је представљала основу за развој метода пројектовања реконфигурабилног управљачког система отворене архитектуре. Полазећи од идеје да реконфигурабилне ћелије за обраду на бази робота могу да емулирају различите хоризонталне и вертикалне 5-осне машине алатке и да се програмирају у G-коду, у дисертацији су постављене две методе пројектовања реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре. Обе методе пројектовања су верификоване кроз развој експерименталних прототипова управљачких система који су имплементирани на расположивим роботима. Тестирање експерименталних прототипова реконфигурабилних управљачких система, имплементираних на расположивим роботима, је вршено вишеосном обрадом делова са сложеним функционалним и естетским површинама. Овим је показано да роботи за обраду могу бити директно применљиви од стране програмера и оператера који имају искуства у CNC технологији и примени постојећих CAD/CAM система за програмирање 5-осних машина алатки. Развој ових експерименталних прототипова управљачких система је водио кандидата кроз решавање већег броја практичних проблема али и научних изазова. Неке од тих изазова кандидат је више пута само поменуо у овој дисертацији знајући да ове резултате треба стално дограђивати да би се пратили даљи правци у развоју реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду.

4.3. Верификација научних доприноса

Докторанд Зоран Димић је кроз усавршавање и рад на више научних и стручних пројеката био аутор и коаутор преко 50 радова на домаћим и међународним скуповима и часописима. Коаутор је осам Техничка решења.

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

M21 Научни радови у врхунском међународном часопису

- [1] Kvrđić, V., Dimić, Z., Cvijanović, V., Vidaković, J., Kablar, N., **A control algorithm for improving the accuracy of five-axis machine tools**, International Journal of Production Research, Volume 52, Issue 10, 2014, pp. 2983-2998, doi: 10.1080/00207543.2013.858194. (IF=1.477)(ISSN 0268-3768)

M22 Научни рад у истакнутом међународном часопису

- [1] V. Kvrđić, Z. Dimić, V. Cvijanović, D. Ilić, M. Bućan, **A Control Algorithm for a Vertical 5-Axis Turning Centre**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 61, Numbers 5-8, pp. 569-584, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3737-0, (IF=1.205) (ISSN 0268-3768)
- [2] Milutinović, D., Glavonjić, M., Slavković, N., Dimić, Z., Zivanović, S., Kokotović, B., Tanović, Lj., **Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 53, Numbers 9-12, pp. 1217-1229, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2888-8. (IF=1.103) (ISSN 0268-3768)
- [3] Glavonjić, M., Milutinović, D., Zivanović, S., Dimić, Z., Kvrđić V., **Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 46, Numbers 1-4, pp. 51-60, 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2070-3, (IF=1.071) (ISSN 0268-3768)

M23 Рад у часопису међународног значаја

- [1] Dimić Z, Milutinović D, Zivanović S, Kvrđić V, **Virtual environment in control and programming system for reconfigurable machining robot**, Tehnical Gazette, Vol. 23/No. 6, 2016, to be published to the end of October 2016., DOI: 10.17559/TV-20150210133556 (IF=0.579) (ISSN 1330-3651). Потврда о пријему и категоризацији рада налази се у прилогу Извештаја.
- [2] Ferenc, G., Dimić, Z., Lutovac, M., Vidaković, J., Kvrđić, V., **Open Architecture Platforms for the Control of Robotic Systems and a Proposed Reference Architecture Model**, Transactions of Famena, vol. 37 br. 1, pp. 89-100, 2013, (IF=0.233) (ISSN 1333-1124)

M51 Рад у водећем часопису националног значаја

- [1] Zivanović, S., Glavonjić, M., Dimić, Z., **Methodology for Configuring Desktop 3-axis Parallel Kinematic Machine**, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions, Volume 37, No 3 (2009), pp. 107-115, 2009, (ISSN 1451-2092,)

M33 Радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини

- [1] Milutinović, D., Glavonjić, M., Slavković, N., Zivanović, S., Kokotović, B., Dimić, Z., **Compliance analysis of 5-axis vertical articulated machining robot**, 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, ISBN 978-960-98780-4-3, pp. 411-422, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, 3.-5. October, 2011.
- [2] Milutinović, D., Glavonjić, M., Slavković, N., Dimić, Z., Zivanović, S., Kokotović, B., **Machining robot with low-cost control and programming system**, 4th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, ISBN 978-960-98780-4-3, pp. 387-396, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, 3.-5. October, 2011.

- [3] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Kokotovic, B., Milutinovic, M., Zivanovic, S., Dimic, Z., **Machining robot controlled and programmed as a machine tool**, 10th Anniversary international conference on accomplishments in electrical and mechanical engineering and information technology DEMI 2011, Proceedings, pp. 863-872, Faculty of Mechanical Engineering, Banjaluka, 26.-28. May, 2011.

M63 Радови саопштени на скуповима националног значаја, штампани у целини

- [1] Milutinović, D., Dimić, Z., Živanović, S., Slavković, N., **Upravljanje i programiranje 6-osnog robota za obradu kao horizontalne i/ili vertikalne 5-osne mašine alatke**, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.96-3.103, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [2] Dimić, Z., Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Kvrgić, V., **Upravljački sistem otvorene arhitekture za upravljanje troosne mašine sa paralelnom kinematikom**, 37. JUPITER konferencija, 33. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-724-9, str.3.7-3.19, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2011.
- [3] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Slavkovic, N., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Dimic, Z., **Compliance modeling and identification of 5-axis vertical articulated robot for machining applications**, 34th International Conference on Production Engineering, Proceedings, ISBN 978-86-6055-019-6, pp. 381-384, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Production, IT and Management, Nis, 28.-30. September, 2011.
- [4] Milutinović, D., Glavonjić, M., Slavković, N., Dimić, Z., Živanović, S., Kokotović, B., Tanović, Lj., **Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu**, 36. JUPITER konferencija, 32. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-696-9, str. 3.11-3.21, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2010.
- [5] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N., **Razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota**, XXXIII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7083-662-4, str. 151-155, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd, 2009.
- [6] Dimic, Z., Zivanovic, S., Vasic, M., Cvijanovic, V., Krosnjara, A., **Virtual simulator for five axis vertical turning center in python graphical environment integrated with open architecture control system**, Proceedings of the 10th International Scientific Conference on Flexible Technologies, ISBN: 978-86-7892-223-7, pp. 94-97, Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, October 9-10, 2009
- [7] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrgić, V., **Koncept razvoja CNC upravljanja za mašine alatke specifične konfiguracije na bazi EMC softvera**, 34. JUPITER konferencija, 30. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-628-0, str.3.19-3.26, Mašinski fakultet, Beograd, jun 2008.
- [8] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., **Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota**, 32. Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, ISBN 978-86-7892-132-2, str.369-372, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, septembar 2008.

M81 Техничко решење

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

M82 Техничко решење

- [1] Vladimir Kvrgić, Zoran Dimić, Marija Milićević, Vojkan Cvijanović, Dragomir Ilić, Aleksandra Ž. Pavasović, **Upravljačka jedinica otvorene arhitekture za upravljanje mašinama alatkama i robotima**, Lola institut, Beograd, 2009.
- [2] Goran Ferenc, Zoran Dimić, Vladimir Kvrgić, Vojkan Cvijanović, **Sistem za upravljanje industrijskim robotima realizovan primenom savremenih softverskih alata za rad u realnom vremenu**, Lola institut, Beograd, januar 2014.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом „УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ“ кандидата Зорана Димића, дипл. инж. ел., представља оригиналан научно-истраживачки рад високог ранга у области производног машинства у коме је аутор дао значајан допринос развоју реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду, као и решавању низа важних теоријских и практичних проблема везаних за развој метода генерализованог кинематичког моделирања обрадних ћелија на бази робота и метода пројектовања реконфигурабилних управљачких система отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду. Комисија такође сматра да је кандидат кроз дисертацију показао висок ниво стручног и теоријског знања које ће му омогућити успешан будући самостални научно-истраживачки рад.

На основу прегледа и оцене докторске дисертације кандидата

Зорана Димића, дипл. инж. ел.

са темом

Управљачки систем отворене архитектуре реконфигурабилних роботских ћелија за обраду,

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

Сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета у Београду Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Реферат прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути реферат на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

С поштовањем,

Чланови Комисије:

У Београду, 15.04.2016. године

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

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

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

Др Вељко Поткоњак, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

Др Владимир Квргић, виши научни сарадник
Лола институт, Београд

To:

Your ref.:

Our ref.: AA-TV-20150210133556

Slavonski Brod, 21-09-2015

Subject: **Acceptance of Article**

Article ID: **TV-20150210133556**

DOI Number^{*)}: **10.17559/TV-20150210133556**

Title: **VIRTUAL ENVIRONMENT IN CONTROL AND PROGRAMMING SYSTEM FOR RECONFIGURABLE MACHINING ROBOT**

Author/s: **Zoran Dimic, Dragan Milutinovic, Sasa Zivanovic, Vladimir Kvrjic**

Dear authors!

Your article (mentioned above) has been accepted for publication in the journal Tehnički vjesnik/Technical Gazette (Print: ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339), Vol. 23/No. 6 to be published towards the end of **December 2016**. The article is classified as **preliminary note**. The Journal indexed in Web of Science (Science Citation Index Expanded), Journal Citation Reports (IF = 0,579 for 2014), Scopus, INSPEC, Compendex, Geo Abstracts etc.

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:763/5
Датум: 21.04.2016. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 21.04.2016. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ РЕКОНФИГУРАБИЛНИХ РОБОТСКИХ ЋЕЛИЈА ЗА ОБРАДУ“** студента **ЗОРАНА ДИМИЋА**, дипл. инж. ел.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 06-17338/14-12, од 27.02.2012. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. Dimic Z, Milutinovic D, Zivanovic S, Kvirgic V, **Virtual environment in control and programming system for reconfigurable machining robot**, Technical Gazette, Vol. 23/No. 6, 2016, to be published to the end of October 2016., DOI: 10.17559/TV-20150210133556 (**IF=0.579**) (ISSN 1330-3651). Потврда о пријему и категоризацији рада налази се у прилогу Извештаја.

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за производно машинство и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић