

**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**

**Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву**

Доситејева 19  
Краљево, 36 000

Факултет за машинство и грађевинарство  
у Краљеву

Универзитета у Крагујевцу,

Број: 833

Датум: 01.07.2016 год.

Краљево, Доситејева 19.

### **НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** *Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Александре Петровић, дипл. инж. маш.***

На предлог Наставно - научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, Одлука број 605/7 од 17.5.2016., као и Одлуке број IV-04-43313 од 15.6.2016. год., Стручног већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Александре Петровић, дипл. маш. инж.**, под насловом:

#### **"ОПТИМИЗАЦИЈА ПУТАЊЕ ГЛОДАЛА ПРИ КОНТУРНОЈ ОБРАДИ ВЕЛИКИМ БРЗИНАМА РЕЗАЊА"**

На основу увида у приложену докторску дисертацију, Извештаја о подобности кандидата и теме докторске дисертације која је одобрена за израду Одлуком Факултета за машинство и грађевинарство, бр. 643/3 од 28.5.2013. године и Одлуком Стручног већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу број 332/9 од 12.06.2013. године и Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно - научног већи следећи

#### **ИЗВЕШТАЈ**

##### **1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

Докторска дисертација кандидата, **Александре Петровић, дипл. инж. маш.**, под називом: **"Оптимизација путање глодала при контурној обради великим брзинама резања "** је

резултат научно – истраживачког рада кандидата, који представља значајан допринос у области производног машинства и пројектовања модерних технологија обраде метала резањем.

У савременом пројектовању технолошких процеса за обрадне системе са CNC управљањем, применом САМ система, инжењерске активности подразумевају дефинисање редоследа технолошких операција, избор геометрије алата и одређивање елемената режима резања, док се путања алата аутоматски генерише на основу изабране стратегије обраде, преузимањем параметара геометријског модела обратка из CAD система. При избору стратегије, пројектанти CNC технологије имају више опција према геометријском критеријуму, који није једнозначан и не задовољава све потребне технолошке захтеве оптималне путање алата при контурној обради великим брзинама резања. Пошто свака од могућих путања алата има различите техноекономске показатеље, основни значај докторске дисертације јесте у развијеном моделу избора оптималне путање, на бази дефинисаних критеријума промене дубине резања дуж путање алата, смера глодања при захвату алата са обратком, укупне дужине путање алата, времена резања и интензитета силе резања. На овај начин је потпуно елиминисан утицај искуства пројектанта технологије на техноекономске показатеље процеса контурног глодања, који је до сада увек био у значајној мери присутан код примене савремених САМ система.

Главни допринос докторске дисертације кандидата Александре Петровић дипл. инж. маш., јесте у моделирању сила резања, брзина резања и динамичке стабилности процеса резања при контурном глодању, успостављању аналитичких корелација између геометријских и технолошких параметара, као и у развоју јединственог концепта декомпоновања блокова NC програма и развој програмског система са виртуелним концептом базе технолошких података, која омогућује континуално израчунавање главних фактора обраде у свакој тачки путање алата у реалном времену. На тај начин се поуздано може утврдити која ће стратегија обраде бити најадекватнија са становишта показатеља квалитета обрадног процеса, што је фундаментални допринос докторске дисертације, како теорији тако и пракси пројектовања обрадних процеса.

Значај докторске дисертације у области моделирања зоне резања, као и допринос науци о обради метала резањем се огледа у успостављеним мултифункционалним зависностима сила резања, брзина главног и брзина помоћних кретања, коришћењем проширених аналитичких израза са геометријским елементима путање алата. Извршена је идентификација варијабилних параметара процеса резања (дубина резања, ширина резања и угао захвата) и дефинисана њихова зависност од позиције алата на путањи у односу на обрадак. Практичан значај дисертације је тиме већи, што се данас углавном пројектовање технологија заснива на примени САМ система и све већем коришћењу CNC машина алатки и нових материјала за резне алате намењених веома великим брзинама резања.

Докторска дисертација представља допринос и у области примене савремених информатичких технологија у решавању сложених инжењерских проблема, упоредних аналитичко - експерименталних истраживања у циљу симулационе верификације добијених резултата од ширег значаја за научну област производног машинства.

## **2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Александре Петровић, дипл. инж. маш., резултат оригиналног научног рада кандидата. Обрађена тема је веома актуелна и значајна за развој науке о обради метала резањем на нумерички управљаним машинама алаткама, као и у области пројектовања високо продуктивних технолошких процеса применом савремених CAD/CAM система. Имајући у виду широк интердисциплинарни спектар обухваћених научних дисциплина у оквиру докторске дисертације, оригинални научни рад кандидата има и шири значај за област производног машинства.

Кандидат је детаљно и студиозно обрадио тему, при чему је користио релевантна сазнања везана за моделирање сила резања при обимном глодању, моделирање зоне захвата и профила брзине помоћног кретања као најутицајнијих технолошких параметара на динамичку стабилност и производност обрадног процеса. Кандидат је на оригиналан начин спровео структурну анализу геометријских и технолошких података генерисаних у NC програму, који помоћу рачунарско-управљачког система симултано управља погонским системима NC машине алатке и тако обезбеђује кретање алата по програмираној путањи, а на основу претходно дефинисане контуре обратка. Успостављена корелација између сила резања, брзина резања и геометријског модела алата и обратка са генерисаним подацима у структури NC програма, омогућила је реализацију главне идеје да се од мноштва могућих путања алата изабере оптимална путања са становишта продуктивности обрадног процеса и минималне варијације сила резања, што омогућује највећу постојаност алата и стабилност обрадног процеса.

Оригиналан научни рад се огледа и у начину моделирања обратка и алата, вишеслојној архитектури и структури технолошке базе података, која се аутоматски генерише и пресликава из једне форме у другу, применом оригинално развијеног програмског система који прати све геометријске елементе, брзине резања и силе резања у свакој тачки дуж програмиране путање алата у захвату са материјалом обратка. Начин израчунавања елемената процеса резања при обимном глодању, према међусобном положају обратка и алата у свакој позицији путање приказан је аналитичким изразима, а такође и алгоритамски кроз приказ пседокодова.

При елиминисању неодређености више различитих путања алата за обраду једне исте контуре обратка, које се могу добити коришћењем савремених CAD/CAM система,

примењене су савремене методе вишекритеријумског одлучивања, што такође значајно доприноси оригиналности научног рада кандидата у оквиру дисертације.

Поред теоријских истраживања, кандидат је спровео и обимна верификациона испитивања користећи најмодерније рачунарске методе прорачуна, симулације, визуелизације и практичне верификације резултата истраживања. Применом широког спектра теоријских знања и искустава из области производног машинства, савремених информатичких технологија, CAD/CAM система и NC програмирања машина алатки, кандидат је показао веома високу способност за самостално бављење научно – истраживачким радом.

### **3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Александра Петровић, дипл. инж. маш., рођена је 16. 11. 1972. године у Зеници. Дипломирала је 2000. године на Машинском факултету у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу, на смеру за производно машинство са оценом 9 (девет) и просечном оценом у току студирања 8,18 (осам и 18/100).

Као асистент-приправник радила је од 2003. – 2009. године на Машинском факултету у Краљеву на Катедри за производне технологије Машинског факултета у Краљеву. На магистарске студије на Машинском факултету у Краљеву уписала се 2002. године. Положила је све испите на магистарским студијама, и према решењу број 907/1 од 05.12.2008. године, уписала се 2009. године на другу годину докторских студија Машинског факултета у Краљеву. На студијском програму Производно машинство, смер Интегрисано пројектовање производа и процеса, положила је све испите према наставном плану и програму докторских студија. Од 2010. године ради у звању асистента за ужу научну област производно машинство на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву.

Као аутор и коаутор објавила је 1 рад у међународном часопису и већи број радова на домаћим и међународним конференцијама као и у домаћим часописима из области производног машинства. Коаутор је једног техничког решења. Учествовала је и у реализацији 4 пројекта из програма технолошког развоја која су финансирана од стране Министарства за просвету и науку као и на пројектима за потребе привреде. У наставку су приказани само најважнији радови, који садрже резултате истраживања у области докторске дисертације.

#### **Рад у међународном часопису – [M23]**

1. **Petrovic A, Lukic Lj, Ivanovic S, Pavlovic A, Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, (2016), doi: 10.1177/0954406216648715, ISSN: 09544062**

### **Рад на међународном скупу штампан у целини – [М33]**

1. **Aleksandra Petrović**, Ljubomir Lukić, Mišo Bjelić, Marina Pljakić: Optimal Tool Path Modeling in Contour Milling Process, 35th International Conference on Production engineering, Kraljevo - Kopaonik 25 – 28 September 2013, pp. 263-271, ISBN 978-86-82631-69-9
2. Zvonko Petrović, Ljubomir Lukić, Mirko Đapić, **Aleksandra Petrović**: Development Of The Program to Prepare Tool Sets in Flexible Manufacturing System, 35th International Conference on Production engineering, Kraljevo - Kopaonik 25 – 28 September 2013, pp. 271-277, ISBN 978-86-82631-69-9
3. Ljubomir Lukić, Mirko Djapić, **Aleksandra Petrović**, Veda Kilibarda: New Concept of Multi-Agent CAPP System in Intelligent Manufacturing Systems, Proceedings of the 8th International Conference Heavy Machinery HM 2014, Zlatibor, 24-26.06.2014, pp. B 7-12, ISBN 978-86-82631-74-3
4. **Aleksandra Petrović**, Ljubomir Lukić, Marina Pljakić: Machining Parameters Influence on Cutting Force Used for Tool Path Optimizafzion in End Milling, Proceedings of the 8th International Conference Heavy Machinery HM 2014, Zlatibor, 24-26.06.2014, pp. B 19-25, ISBN 978-86-82631-74-3
5. **Aleksandra Petrović**, Slobodan Ivanović, Ljubomir Lukić: Generating Parameters From the NC Code Needed for Defining the Optimal Tool Path - Proceedings of the 12th International Scientific Conference MMA 2015 "Flexible Technologies", Novi Sad, 25-26.09.2015, pp. 157-160, ISBN: 978-86-7892-722-5.

### **Рад у часопису националног значаја – [М33]**

1. **Aleksandra Petrović**, Slobodan Ivanović, Ljubomir Lukić: NC Tool Path and Its Influence on Cutting Force in Peripheral Milling Analyses, IMK-14 – Research & Development in Heavy Machinery -- Journal of Institute IMK "14. oktobar" Krusevac and Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, vol. 21(2015)4, pp 41-46, UDC: 621, ISSN 0354-6829
2. Slobodan Ivanović, **Aleksandra Petrović**, Ljubomir Lukić : Matrix Blank Description as Part of Module for Machining Parameters Generation along the Tool Path for Peripheral Milling - IMK-14 Research&Development In Heavy Machinery - Journal of Institute IMK "14. oktobar" Krusevac and Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, vol. 21, 4/2015, pp 119-125, UDC: 621, ISSN: 0354-6829

#### 4. Оцена о испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата, Александре Петровић, дипл. инж. маш., под називом: **"Оптимизација путање глодала при контурној обради великим брзинама резања"** написана је на 235 страна, при чему је цитирана литература наведена у 99 библиографских јединица. Докторска дисертација приказана је кроз осам поглавља:

1. Увод
2. Силе и стабилност процеса резања
3. Моделирање зоне захвата, профила брзине помоћног кретања и производности обраде
4. NC путања алата
5. Програмски систем за одређивање елемената и фактора обраде дуж путање алата
6. Верификација програмског система за одређивање елемената и фактора обраде дуж путање алата
7. Примена програмског система за одређивање елемената и фактора обраде дуж путање алата
8. Закључак

Литература

Прилог

У првом, уводном поглављу, дат је опис проблема који се истражује, наведена је мотивација за израду дисертације, истакнути су основни циљеви рада, дат је преглед места проблема у области истраживања и сажет приказ свих поглавља рада.

Друго поглавље је посвећено анализи и систематизацији постојећих модела сила резања при обради обимним глодањем. Дат је и осврт на проблем стабилности процеса обраде и методе за спречавање појаве штетних вибрација при процесу обраде.

За моделирање зоне захвата користе се различите методе које су описане и анализиране у трећем поглављу. Постојећи модели за описивање промене брзине помоћног кретања и производности обраде дуж путање алата, такође су приказани у овом делу рада.

Анализа генерисања NC програма, различите стратегије за дефинисање путање алата и специфичности различитих путања за обраду високобрзинским глодањем, дати су у четвртном поглављу. Посебан осврт је дат на генерисање NC програма применом CAM система са свим предностима и недостацима.

У петом поглављу је описан програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата. Оно садржи: анализу података из NC програма, трансформацију тих података и њихово учитавање у програм Matlab, геометријски опис припремка и алата у Matlab-у, генерисање положаја алата дуж путање у односу на обратак, одређивање контакта алата и обратка, ажурирање обратка, прорачун елемената зоне захвата алата и обратка, прорачун профила брзине помоћног кретања и сила резања дуж путање алата. У овом поглављу су приказани све корелационе зависности, аналитички изрази и алгоритми на основу којих је дефинисан модел оптимизације путање алата при контурном глодању великим брзинама резања.

Верификација развијеног програма према примерима доступним у литератури приказана је у шестом поглављу.

На примеру NC програма, генерисаних у два CAM система и једним ручно написаним програмом, за обраду исте контуре, показане су могућности развијеног програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата. Упоредивањем различитих путања алата, по различитим критеријумима, у седмом поглављу су приказане могућности избора најадекватније путање алата.

У закључку је указано на правце будућег истраживања и истакнути су кључни резултати остварени у раду.

На крају дисертације дат је преглед коришћене литературе и прилог у коме су приказани дијаграми промене елемената и фактора обраде дуж путање алата за различите путање алата при обради исте унутрашње контуре.

На основу свега наведеног, Комисија закључује да су у потпуности испуњени очекивани резултати наведени у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације, број 332/9 од 12.6.2013. године и да је испоштован оквирни садржај рада наведен у поменутом Извештају.

## **5. Научни резултати докторске дисертације**

Кандидат је кроз докторску дисертацију извршио детаљну анализу остварених резултата у области феноменолошких појава које утичу на оптерећење алата у зони резања и које опредељују стратегију путање алата при контурном глодању. Као резултат сопствених истраживања, кандидат је остварио значајне научне резултате који су презентирани у оквиру докторске дисертације, од којих се наводе најзначајнији:

- Развијен је проширени аналитички модел динамичке силе резања при обимном глодању, где су обухваћени сви утицајни фактори и презентовано више метода за

дефинисање коефицијената силе резања и успостављена корелација утицаја силе резања на стабилност обрадног процеса.

- Развијен је оригинални модел одређивања зоне захвата сечива алата са материјалом обратка при обимном глодању у сваком временском тренутку комбинацијом дискретизованих метода и метода заснованих на моделирању телима и дефинисан је модел профила брзине помоћног кретања дуж дисконтинуалне путање алата.
- Дефинисана је NC контурна путања алата за обраду великим брзинама резања са минимизацијом варирања брзине помоћног кретања применом метода непрекидних путања, укључујући кинематичко-динамичке и енергијске карактеристике NC машина алатки.
- Развијен је и софтверски имплементиран оригиналан програмски систем за праћење елемената и главних фактора обраде дуж путање алата при контурном глодању великим брзинама резања, који технолошке, кинематичке и геометријске податке из блокова NC програма аутоматски трансформише у табеле релационе базе технолошких података. Програмски систем омогућава да се израчунавају сви параметри кретања алата који су потребни за аутоматско генерисање путање и начина кретања алата током контурног глодања. Геометрија припремка се задаје у облику *bitmap* слике на основу које се припремак матрично описује. Према подацима из NC програма матрично се описују и алати. На бази трансформисаних података о кретању алата из NC програма и матричног описа припремка и алата, генерише се међусобни положај алата у односу на припремак дуж путање. Затим се прерачунава матрица обратка у сваком положају алата на путањи и израчунавају се елементи процеса резања, на основу којих се могу пратити промене дубине и ширине резања и угла захвата током процеса резања у свакој тачки путање алата. На основу података о правцу и промени правца кретања алата и на основу програмираних вредности корака, одређен је профил корака и трапезоидни профил брзине помоћног кретања дуж путање алата. Применом развијеног програмског система пројектанти NC технологије могу да провере адекватност путање алата генерисане неким комерцијалним CAM пакетом или мануелно програмиране путање према стандардним NC кодовима. Генерисањем путање и ажурирањем обратка може се проверити да ли ће технолошки облик бити у потпуности обрађен и да ли је добијена жељена геометрија. Анализом резултата елемената и фактора обраде дуж путање алата може се утврдити да ли генерисана путања испуњава технолошке захтеве обраде. Такође, у случају недоумица око избора опција које нуде CAM пакети, у почетној фази пројектовања NC технологије може се изабрати неколико могућих стратегија обраде. Провером алтернативних решења програмом за праћење елемената и фактора обраде може се установити које решење је најприхватљивије у зависности од захтева који су приоритетни.
- Развијен је модел, као секундарни научни допринос из програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, који служи за анализу утицаја димензија глодала и режима резања на стратегију обраде. Варирањем ових величина може се



формирати више сложених путања алата, тако би за сваки различит пречник глодала могло да се анализира више различитих номиналних дубина резања, а за сваку дубину резања неколико различитих опција путања алата, како би се дошло до оптималног решења.

- Посебан научни допринос остварених резултата у оквиру докторске дисертације је могућност примене развијеног модела дефинисања оптималне путање алата на обратцима неправилног облика. До сада су методе моделирања зоне захвата углавном развијане за призматичне обратке, док методологија која је развијена у оквиру ове докторске дисертације за препознавање припремка као растеризоване слике, ствара могућност примене на комплекснијим геометријским и просторно сложеним облицима припремка добијеним неком претходном методом обраде обликовањем.
- Развијени су критеријуми за оцену адекватности путање алата у односу на контуру обратка, према више различитих технолошких аспеката и применом метода вишекритеријумског одлучивања дефинисана оптимална путања алата при контурном глодању великим брзинама резања.

Развијени модели се могу успешно применити и при обради дрвета и других конструкционих машинских материјала у циљу оптимизације обрадних процеса током обраде сложених контурних површина.

## **6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Остварени резултати у оквиру докторске дисертације на моделирању сила у зони резања при обимном глодању и анализа утицаја елемената режима обраде на стабилност обрадног процеса се могу применити и на друге врсте обраде глодањем, што је веома значајна примена у области теорије обраде метала великим брзинама резања. Такође је важна могућност шире примене модела за описивање законитости промене брзине помоћног кретања у зависности од геометријских релација позиције алата у односу на обрадак. Веома су корисни резултати који су приказани у области структурне анализе NC програма, функционалних и процедуралних зависности при генерисању NC путање алата, који у значајној мери користе унапређењу CNC технологија и метода пројектовања технолошких процеса.

Примена резултата докторске дисертације у инжењерској пракси је вишеструка, а посебно је значајна примена развијене методологије трансформације структурних параметара NC програма и аутоматског генерисања података потребних за прорачун и симулацију кретања алата при контурном глодању. Поред тога, имплементација оригиналног програмског система за праћење главних фактора обраде дуж путање алата и параметаризација свих потребних величина за одређивање оптималне путање алата има веома велики практични значај. Применом развијеног програмског система и метода вишекритеријумског одлучивања пројектанти CNC технологије имају потпуно поуздан

начин да утврде која путања алата обезбеђује минималне силе резања, највећу постојаност алата, минимално хабање сечива, највећу динамичку стабилност NC машине алатке или најкраће време обраде, што је од изузетне важности при пројектовању технолошких процеса у индустријској пракси.

## **7. Начин презентирања резултата научној јавности**

Део резултата из ове дисертације је већ презентован објављивањем радова у међународним и националним научним часописима као и на међународним научним конференцијама.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације представљају користан и обиман материјал за публикување у међународним и националним научним часописима као и на међународним и националним конференцијама које се баве проблемима обраде метала резањем, развоја модерних метода пројектовања CNC технологија, примене CAD/CAM система, NC програмирањем машина алатки и оптимизацијом обрадних процеса.

## **8. Закључак и предлог Комисије**

На основу увида у резултате истраживања презентоване у докторској дисертацији и на основу свега претходно наведеног Комисија доноси следећи

### **ЗАКЉУЧАК**

Докторска дисертација кандидата Александре Петровић, дипл. инж. маш., у потпуности је реализована сагласно плану истраживања и постављеним хипотезама. Дисертација представља оригиналан резултат вишегодишњег научно – истраживачког рада кандидата уз коришћење савремених метода као и савремене научне и стручне литературе. Кандидат је показао висок степен стручног знања као и способност и зрелост за самосталан научно – истраживачки рад.

Докторска дисертација кандидата Александре Петровић, дипл. инж. маш., по квалитету, обиму и резултатима истраживања задовољава све формалне и суштинске услове одређене Законом о високом образовању и прописима Универзитета у Крагујевцу и Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву.

На основу свега наведеног, предлагемо Наставно – научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и Већу за техничко – технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, да прихвате докторску дисертацију кандидата Александре Петровић, дипл. маш. инж. под насловом:

**" ОПТИМИЗАЦИЈА ПУТАЊЕ ГЛОДАЛА ПРИ КОНТУРНОЈ ОБРАДИ ВЕЛИКИМ БРЗИНАМА РЕЗАЊА "**

као успешно урађену и да позову кандидата на усмену јавну одбрану дисертације.

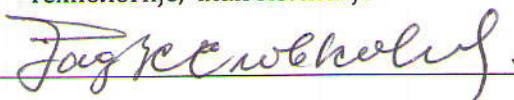
У Краљеву,  
јун, 2016. године

**ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

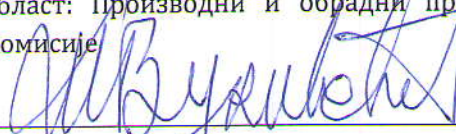
1. **др Илија Ћосић**, редовни професор – емеритус, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, ужа научна област: Производни системи, организација и менаџмент, председник Комисије



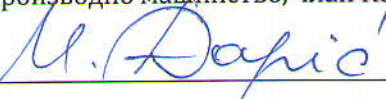
2. **др Радомир Славковић**, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производне технологије, члан Комисије



3. **др Миомир Вукићевић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производни и обрадни процеси, члан Комисије



4. **др Мирко Ђапић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство, члан Комисије



5. **др Милан Коларевић**, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство, члан Комисије

