

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Бр. 01-1/3695

16.10. 2019 год.

КРАГУЈЕВАЦ

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА**

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж.

Одлуком Већа за Техничко - технолошке науке, Универзитета у Крагујевцу, број **IV-04-937/7** од **11.10.2017.** године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. под насловом:

**РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И
АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и Извештаја о подобности кандидата и теме за докторску дисертацију која је одобрена за израду одлуком Факултета инжењерских наука у Крагујевцу бр. **01-1/2942-12** од **27.08.2015.** године, а на основу Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

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

Докторска дисертација кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. под насловом „РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА“ представља резултат самосталног научно-истраживачког рада кандидата у актуелној научној области производног машинства и представља значајан допринос истраживања модерних производних технологија, метрологије и реверзног инжењерства при обради метала резањем. Имајући у виду широк спектар истраживачких области и добијених резултата, може се рећи да ова дисертација има значајан научни допринос на националном нивоу, при чему одређени број елемената, приступа и резултата има општи научни значај.

Производња делова помоћу CNC машина алатки једна је од најчешће коришћених обрада у савременим производним системима и последица је потребе да се скрати време припреме и обраде и остваре квалитет и функционални и естетски захтеви. Производи постају све сложенији и њихова толеранција облика и положаја све ужа, а ефикасност и прецизност процеса производње постаје све битнија. Тачност израде дела је условљена постојањем геометријских одступања тачности облика и положаја површина и тачности димензија услед статичких и динамичких оптерећења елемената обрадног процеса, термичке дилатације елемената структуре машине,

тачности машине, и др. Као последица тога, ствара се резултујућа просторна грешка положаја између резног алата и обратка. Дакле, од кључног значаја је смањење одступања у систему алат-предмет обраде у циљу повећања тачности обраде.

Значај докторске дисертације, као и допринос науци у области обрадних система се огледа у развоју унапређеног математичког модела процеса обраде глодањем, значајним резултатима експерименталних истраживања утицаја фактора обраде на тачност обраде и квалитет обрађене површине, развоју модела за примену савремене опреме за координатну метрологију и реверзно инжењерство и развоју система за генерисање и регенерисање *NC* кода.

Основни допринос докторске дисертације кандидата Драгана Лазаревића је развој модела за интеграцију свих елемената, почев од пројектовања производа, примене обрадних и мерних система, система за рачунарску идентификацију тачности (нетачности) обраде и генерисања и регенерисања *NC* кода у јединствен систем намењен за аутоматску регенерацију *NC* кода. Обимним експерименталним истраживањима су добијени резултати и корелативне зависностима са високим коефицијентом корелације многих улазних параметара обраде и параметара тачности обраде и квалитета обрађене површине. На овај начин је показано и доказано да се проблеми појаве нетачности обраде могу решавати на два начина. Први начин подразумева регенерисања *NC* кода корекцијом путање алата уз задржавање одговарајућих осталих услова обраде. Овај начин се користи код корекције нетачности израде дела (поправке) у појединачној производњи (нпр. алати за израду делова од пластичних маса). Такође, овај начин се може користити и код израде новог дела у серијској производњи, када је потребно да се добије готов део са захтеваним квалитетом. Међутим, није могуће увек користити овакав начин регенерисања *NC* кода јер корекција путање у условима веће промене дубине резања захтева и промену осталих параметара резања. Други начин подразумева регенерисања *NC* кода променом параметара обраде (брзине резања, брзине помоћног кретања, метода и стратегије обраде и др.) уз задржавање непромењене путање алата. Значај примене оваквог начина регенерисања *NC* кода је првенствено код серијске производње јер се не мења путања алата.

Интензиван развој у области координатне метрологије је допринео да она постане стандард за индустријску димензионалну метрологију са могућношћу мерења велике тачности. Даљи развој, довео је до појаве безконтактних метода мерења и 3D скенирања, које су још увек знатно мање тачности, али постају све присутнији у индустријском мерењу. Систематизацијом информација на једном месту о координатној метрологији, примени савремених безконтактних мерних уређаја, реверзном инжењерству, контроли подржаном рачунаром и генерисању *NC* кода дисертација је добила на великом значају и актуелности. За очекивање је да се у области интегрисаних интелигентних система *CAD/CAM/CAI* у наредном периоду начине значајни помаци и ови системи учине доступним индустријској пракси.

Резултати и закључци ове дисертације отварају много праваца за даља истраживања и за унапређење постојећих и предложених решења.

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

Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. под насловом „РЕГЕНЕРИСАЊЕ *NC* КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА“ пред-

ставља резултат оригиналног научног рада. Обрађена тема је веома актуелна и значајна за развој науке у области производног машинства, а посебно области обраде метала резањем, метрологије, савремених *CNC* обрадних система, реверзног инжењерства, интелигентних *CAD/CAM/CAI* система.

Кандидат је извршио критичку анализу и систематизацију постојећих знања, искустава и научних резултата бројних научних и стручних радова великог броја истраживача у свету који се односе на област истраживања ове докторске дисертације и придружио их релевантним областима.

Кандидат је реализовао веома обимна експериментална истраживања уз примену савремене производне и мерне опреме и коришћење савремених софтвера из области мерења, реверзног инжењерства и генерисања *NC* кода. Успостављене корелативне зависности су омогућиле реализацију идеје формирања базе података која би представљала основу интелигентног система за регенерисање *NC* кода.

Оригиналност научног рада, истраживања и резултата остварених у оквиру ове дисертације огледа се, између осталог, у следећим елементима:

- Кандидат је развио сопствени унапређени математички модел процеса обраде вретенастим глодалом и тиме успео да математички опише сложена кретања резних елемената алата и добијену топографију површине. Математички модел је верификован експерименталним испитивањима.
- Добијени су многобројни резултати експерименталних истраживања утицаја фактора обраде на тачност обраде и квалитет обрађене површине и дефинисане су одговарајуће корелативне зависности.
- Дефинисана је методологија испитивања тачности обраде и квалитета обрађене површине применом савремене опреме за координатну метрологију и безконтактно скенирање.
- Дефинисана је методологија генерисања површине из добијених датотека облака тачака. Најпре су развијени алгоритми за пре-процесирање и процесирање облака тачака у програму *CATIA*, а затим је извршен поступак генерисања површине из облака тачака у програмима *CATIA* и *GOM Inspect*. Кандидат је самостално на оригиналан начин применом софтвера *MatLAB*, такође реализовао поступак генерисања површине из облака тачака.
- Анализом експерименталних истраживања добијене тачности обраде у условима који одговарају претпостављеној корекцији *NC* кода (регенерисаном *NC* коду) дефинисани су параметри за унапређење система за генерисање и регенерисање *NC* кода.
- Развијен је и анализиран модел за управљање улазним параметрима процеса обраде са аспекта решавања проблема регенерисања *NC* кода у циљу повећања тачности обраде и квалитета обрађене површине. Модел је заснован на интеграцији *CAD/CAT* захтева пројектованог дела и базе података о условима обраде, излазним параметрима процеса обраде и квалитета обраде, *CAM* система за генерисање *NC* кода, примени координатне метрологије, примени реверзног инжењерства за генерисање површина на основу облака тачака готовог дела и примени *CAI* система, односно одговарајућих софтвера за мерење и контролу тачности.

3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одговарајућој научној области

Драган Лазаревић је рођен 3. октобра 1974. године у Зубином Поточу, АП Косово и Метохија, Република Србија. Ожењен је и има двоје малолетне деце. Живи са породицом у Косовској Митровици.

Основно образовање стекао је у школи „Јован Цвијић“ у Зубином Поточу, док је средњу школу, машински техничар, завршио у средњој школи „Григорије Божовић“, такође у Зубином Поточу, школске 1992/1993. Школске 1993/94 уписао се на Машински факултет у Приштини као редован студент (петогодишњег трајања - еквивалентан ниво мастер академских студија другог нивоа). Дипломирао је 2000. године одбравивши дипломски рад из области Пројектовања термотехничких инсталација на тему: „Прорачунски део главног машинског пројекта напојних система термоенергетског постројења“, чији је ментор проф. др Дамњан Радосављевић. Школске 2010/11 уписао је докторске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, на студијском програму: Машинско инжењерство, модул: Производно машинство. Све испите на докторским студијама положио је закључно са 25.06.2015. год. са просечном оценом испита 9.83 (девет и 83/100). Одлуком Стручног Већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, Наставно - научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, дана 17.9.2015. године, донело је одлуку о одобрењу израде његове докторске дисертације под насловом „Регенерисање NC кода применом 3D идентификације и анализе геометријских одступања“.

Професионалну каријеру започео је школске 2000/2001. год. као професор машинске групе предмета у средњој школи „Григорије Божовић“ у Зубином Поточу. Стручни испит за наставника теоријске наставе из групе машинских предмета положио је 2003. године. У школи је изводио наставу из предмета Машински елементи, Основи конструисања, Отпорност материјала, Рачунари и програмирање, Компјутерска графика, Моделирање машинских елемената и конструкција и др. Од школске 2008/2009 истовремено постаје сарадник - асистент у настави Високе техничке школе струковних студија у Звечану. Учествује у извођењу вежби из предмета: Рачунари и програмирање, Компјутерска графика, Рачунаром подржано пројектовање *CAD1*, Рачунаром подржано пројектовање *CAD2* и Програмирање нумеричких машина алатки. Радни однос на место сарадник - асистент на Факултету техничких наука Универзитета у Приштини са седиштем у Косовској Митровици са пуним радним временом је засновао 15.05.2016. године, где и сада ради. Изводи вежбе, из предмета: Нацртна геометрија, Основи машинства, Транспортни уређаји, Пројектовање дизалица, Механизација претовара и др.

Драган Лазаревић, је као аутор или коаутор публиковао 21 рад у научно - стручним часописима и на међународним научно - стручним скуповима. Три рада су у часописима на SCI листи категорије M23, 14 радова су саопштена на међународним скуповима штампана у целини категорије M33, један рад у часопису од националног значаја категорија M52, један рад у часопису од националног значаја, категорије M53 и три рада су саопштена на скупова од националног значаја штампана у целини категорије M63.

Рад у међународном часопису - категорија M23

1. Lazarević D., Nedić B., Marušić V., Mišić M., Šarkoćević Ž.: *Regenerating the NC code in order to improve the surface quality*, Tehnički vjesnik Vol. 24 / No. 2 (2017), pp. 355-362 ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (online) DOI: 10.17559/TV-20161018122324

- Jović S., Lazarević D., Vulović A.: *Analyzing of the sensitivity of chip formation during machining process*, Sensor Review (SR), Vol. 38, Issue 1, pp. 1-6, 2017, ISSN 0260-2288, DOI: 10.1108/SR-06-2017-0120

Саопштење са међународног скупа штампано у целини - категорија М33

- Lazarević D., Nedić B., Mišić M., Šarkoćević Ž.: *Inspection technologies and devices in industrial application*, 1st International conference on Quality of Life, Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, 9-10 June 2016, pp. 311-338, ISBN 978-86-6335-033-5
- Lazarević D., Nedić B.: *Measurement technologies and machining errors*, 12th International Scientific Conference on Flexible Technologies - MMA 2015, Proceedings, pp. 47-50, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, department for Production Engineering, Novi Sad, SEPTEMBER 25-26, 2015. ISBN 978-86-7892-722-5
- Lazarević D., Nedić B., Radovanović M.: *5-Axis Machine Tools, Configurations, Accuracy and Model of Geometric Errors*, The 3rd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century, Nis, Serbia, 2015, 17-18. September 2015, pp. 363-366, ISBN 978-86-6055-072-1
- Lazarević D., Misić M., Sarkoćević Z., Lekić Z., Stojčetić B.: *Computer-aided inspection planning systems for OMI and CMMs*, 9th International Quality Conference, Kragujevac, June 5th 2015, p. 311-316, ISBN: 978-86-6335-015-1
- Lazarević D., Misić M., Sarkoćević Z., Lekić Z., Stojčetić B.: *Specification of geometric tolerances, review the recent development*, 9th International Quality Conference, Kragujevac, June 5th 2015, p. 317-324, ISBN: 978-86-6335-015-1
- Stojčetić B., Šarkoćević Ž., Lazarević D., Marjanović D.: *Application of the pareto analysis in project management*, 9th International Quality Conference, Kragujevac, June 5th 2015, p. 655-658, ISBN: 978-86-6335-015-1
- Lazarević D., Misić M., Stojčetić B.: *3D mesh segmentation for cad applications*, 8th International Quality Conference, Kragujevac, May 23rd 2014, p. 617-630, ISBN: 978-86-6335-004-5
- Lazarević D., Misić M., Stojčetić B.: *Computation analysis with curved shapes*, 8th International Quality Conference, Kragujevac, May 23rd 2014, p. 675-686, ISBN: 978-86-6335-004-5
- Lazarević D., Misić M., Čirković B.: *Image segmentation as a classification task in computer applications*, 8th International Quality Conference, Kragujevac, May 23rd 2014, p. 803-816, ISBN: 978-86-6335-004-5
- Stojčetić B., Misić M., Sarkoćević Z., Lazarević D., Zubac D.: *Managing of risks and quality in projects*, 8th International Quality Conference, Kragujevac, May 23rd 2014, p. 51-58, ISBN: 978-86-6335-004-5
- Stojčetić B., Lazarević D., Prlinčević B., Stajčić D., Miletić S.: *Project management: cost, time and quality*, 8th International Quality Conference, Kragujevac, May 23rd 2014, p. 345-350, ISBN: 978-86-6335-004-5
- Stojčetić B., Velinov V., D. Lazarević: *Energy sector in serbia – coal and renewables*, The 46th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, 2014, p. 445-448, ISBN: 978-86-6305-026-6

15. Lazarevic D., Eric M., Misic M.: *The development of digital factory in today's world*, 7th International Quality Conference, Kragujevac, May 24rd 2013, p. 165-180, ISBN: 978-86-86663-94-8
16. Šarkoćević Ž., Arsić M., Jović S., Lazarević D.: *Methods of reliability assessment of damaged pipeline corrosio*, Serbian Scientific Society Symposium Nonlinear Dynamics Milutin Milanković Multidisciplinary and Interdisciplinary Applications SNDMIA 2012 Belgrade, October 1–5, 2012. Booklet of Abstracts pp. 176, ISBN 978-86-7746-344-1

Рад у часопису националног значаја - категорија М52

17. Šarkoćević Ž., Arsić M., Mišić M., Lazarević D., Stojčević B.: *Korozija zaštitnih cevi (Corrosion protective tube)*, Crnogorsko drustvo za koroziju, zastitu materijala i zastitu zivotne sredine, Časopis: Zaštita materijala i životne sredine (2014), broj 2, UDK 621.643.2:551.3.053, 103-107, Naučni rad, CIP - Каталогизација у публикацији Централна народна библиотека Црне Горе, Цетиње UDK 620.1:502, ISSN 1800-9573, COBISS.CG-ID 20193296, Podgorica, Decembar 2014

Рад у часопису националног значаја - категорија М53

18. Dedić J., Lazarević D., Nedić B., Mišić M., Šarkoćević Ž.: *Development of the mathematical model for surface topography quality determination at the end milling process*, International Journal for Quality Research 11(2), 241 – 257 ISSN 1800-6450, 2017.

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини - категорија М63

19. Lazarević D., Nedić B., Mišić M., Šarkoćević Ž.: *Uticaj širine rezanja na tačnost obrade glodanjem vretenastim glodalom*, 40 Jupiter konferencija, p. 1-6, Београд, 2016. ISBN: 978-86-7083-893-2
20. Lazarevic D., Misic M., Cirkovic B.: *Postojeće tehnike za segmentaciju slike*, 41 nacionalna konferencija o kvalitetu, 9 nacionalna konferencija o kvalitetu zivota, p. 26 -1 - 26-11, Kragujevac, 2014, ISBN: 978-86-6335-004-5
21. Lazarevic D., Eric M., Misic M.: *Modeli, projektovanje i prednosti digitalne fabrike*, 40 nacionalna konferencija o kvalitetu, 8 nacionalna konferencija o kvalitetu zivota, A-241-248, Kragujevac, 2013, ISBN: 978-86-86663-94-8

Стручно усавршавање

Похађао је и завршио следеће курсеве (поседује сертификате):

- Основна информатичка обука (*PS and hardware, Windows, Office*), „Aleksandar“ Косовска Митровица, 2001.
- Визуелно програмирање и примена - програмирање робота, у организацији Политехничке школе из Крагујевца, 2008.
- Употреба мултимедијалних средстава у настави, у организацији Агенције за образовање и посредовање „Филиповић“ ФБ-Софт, 2010.
- Водич за васпитаче, у организацији Техничке школе „Дрво арт“ из Београда, 2010.
- Поседује диплому завршеног курса енглеског језика, који у Косовској Митровици организује *Centre for foreign languages - ANGLIA, nivo Pre Intermediate I*, 2012.

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

Докторска дисертација кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. под насловом „РЕГЕНЕРИСАЊЕ *NC* КОДА ПРИМЕНОМ *3D* ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА“ одговара по обиму и садржају прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука и Већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. По квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација.

Резултати истраживања су у писаном делу докторске дисертације изложени на укупно 239 страна. У раду је приказано 211 графичких илустрација, 23 табеле и цитирана су 268 библиографска податка. Излагање је сврстано у 13 поглавља (којима претходе: садржај, предговор, резиме на српском и енглеском језику и списак коришћених скраћеница на енглеском језику), при чему су литературни подаци посебно дати на крају дисертације:

1. Увод
2. Геометријско димензионисање и толерисање
3. Рачунаром подржано толерисање
4. Координатна метрологија и координатне мерне машине
5. Реверзно инжењерство, *3D* дигитализација, скенери
6. Рачунаром подржано мерење
7. Квалитет обраде
8. Генерисање површине глодањем
9. *CNC* програмирање и регенерисање *NC* кода
10. Експерименти, резултати и анализа
11. Генерисање површине, мерење одступања и анализа
12. Развој модела за регенерисање *NC* кода
13. Закључак

Литература

У уводном поглављу разматрани су мотивација, циљеви и проблем истраживања и приказана је структура дисертације са описом појединих поглавља. Дате су теоријске основе система за оцену тачности *CNC* обраде глодањем и корекције путање или промене параметара обраде у циљу повећања тачности обраде и квалитета обрађене површине.

Друго поглавље садржи теоријске основе и карактеристике геометријског димензионисања и толерисања. У овом поглављу су приказани основни и додатни симболи, термини, стандарди и дефиниције које се примењују приликом геометријског димензионисања и толерисања. У складу са ISO 1101:2012 стандардом, кроз примере су приказани поступци толерисања облика и положаја са начином приказивања толеранцијског оквира и референтног елемента на цртежу дела. Дате су дефиниције и основна објашњења *2D* и *3D* зоне толеранције за конкретне примере геометријског одступања.

У трећем поглављу је описана потреба познавања интеграције рачунаром подржаних захтева пројектовања у области производње, монтаже и мерења, при чему је неопходно учинити да информације о толеранцијама буду читљиве помоћи рачунара. Прегледом обимне литературе анализиран је и приказан начин моделирања толеранције који су у употреби код алата за моделирање и то моделирање мануелним графиконима,

параметарско моделирање, моделирање изведеном геометријом и моделирање мултиваријантним регионима. Набројани су и упоређени неки од доступних комерцијалних алата за моделирање толеранције. На основу наведеног примера, описани су поступци спецификације, доделе и анализе геометријске толеранције.

Напредак технологије у области координатне метрологије је допринео да она постане стандард за индустријску димензионалну метрологију са могућношћу мерења високих прецизности. Поглавље 4 садржи информације о основним појмовима везаним за координатну метрологију, мерној несигурности, тачности и прецизности. Наведени су и описани постојећи типови координатних мерних машина, подручје њихове примене, тачност и одговарајући стандарди. Детаљно су описане контактне, оптичке и ласерске сонде и сензори које користе. Описане су стратегије мерења на мерној машини, дата је дефиниција мерне несигурности и наведени су фактори који утичу на мерну несигурност. Такође су наведени софтвери који су примењени на мерним машинама и поступци апроксимације који се користе при мерењу.

Даљи развој, посебно у области метрологије, довео је до појаве безконтактних метода мерења и 3D скенирања, које су још увек знатно мање тачности, али свакодневно постају све присутнији у индустријском мерењу. Поглавље 5 проучава поступке реверзног инжењерства: 3D дигитализацију, пре-процесирање и реконструкцију површине из облака тачака. Наведени су основни термини, појмови и дефиниције 3D дигитализације, као што су тачност, прецизност, резолуција, као и брзина дигитализације. Дате су предности и недостаци уређаја са контактним и неконтактним поступком детекције површине. У овом поглављу велики део је посвећен опису метода 3D дигитализације и то: фотограметријских метода, метода пројекције светла, дигитализације ласерским скенером, теодолитом, као и рачунарском рендгентском томографијом. Дат је и упоредни преглед са предностима, недостацима и применом уређаја за 3D дигитализацију. Други део овог поглавља даје обимне информације о типовима облака тачака и њиховим карактеристикама (густина узорковања, шум, тачке ван опсега, недостатак података и сл.). Детаљно су описане методе пре-процесирања (филтрирање и редуковање тачака) и сегментације облака тачака засноване на ивици или расту региона. Реконструкција површине из облака тачака могућа је на основу кривих попречног пресека или на основу полигона. Кроз примере приказани су поступци децимације, редукације броја полигона, корекције ивица и попуњавања шупљина мреже. Описан је поступак *Delaunay*-еве триангулације, као и поступак креирања *Voronoi*-евог дијаграма. На крају је дат математички опис кривих (кубних, *Bezier*-ових, *B-Spline* и *NURBS*) линија и параметарских површина које се користе приликом реконструкције површине из облака тачака.

Поглавље 6 се бави анализом система рачунаром подржаног мерења. Применом одговарајућег софтвера се врши поређење одступања тачака добијених мерним уређајем са површина физичког дела од његовог 3D CAD модела. Најпре су наведени основни поступци мерења и то: мерење на машини (истовремено и квазиистовремено) и мерење ван машине (применом посебног мерног уређаја у близини машине алатке или у лабораторији за мерење). Затим је детаљно описан поступак мерења на машини који интегрише поступке пројектовања, обраде и мерења дела. Описани су системи за рачунаром подржано мерење и дат свеобухватан хијерархијски преглед литературе везане за системе за мерење на мерној машини контактним и безконтактним сензорима. Дат је преглед доступних комерцијалних софтвера за мерење који користе ове мерне машине. Детаљно је описан софтвер за мерење *PC DMIS*, наведене су карактеристике постојећих верзија овог софтвера, предности, подршке *CAD* формата и приказан је извештај мерења. Такође је дат опис софтвера за контактну мерење *GOM Inspect*, његов

развој и карактеристике, подршке *CAD* формата, као и могућности процесирања и реконструкције облака тачака. Приказан је извештај мерења *GOM Inspect-a*.

Утицајни параметри на тачност, односно грешке обраде су класификовани у параметре геометрије алата, технолошке параметре, параметре материјала предмета обраде и параметре стратегије обраде и описани у седмом поглављу. Наведени су извори грешке обраде (која је последица угиба алата, елемената машине, стезног прибора и предмета обраде, грешака израде и хабања алата, грешака позиционирања и сл.) и њихова међузависност. Грешке обраде, које карактеришу квалитет генерисане површине су сврстане у грешке димензија (дужинске грешке), грешке облика и положаја површина (раванске и просторне) и грешке храпавости површине (грешке топографије). На примерима су приказане грешке равности, цилиндричности, паралелности, управности, угловности и грешка положаја, тј. локације осе. Посебно су описане грешке храпавости површине, при чему је на крају овог поглавља приказана зависност (циклоидне) путање зуба глодала и храпавости површине код истосмерног и супротносмерног обимног глодања.

Формирање топографије површине код обраде обимним глодањем вретенастим глодалом, уз претпоставку да су остали елементи машине апсолутно крути, је у директној вези са постављањем и стежањем глодала, радијалним одступањем зуба, угибом глодала услед отпора резања, динамике система, хабања зуба глодала и др. У поглављу 8 изведен је математички модел који описује површинску топографију узимајући у обзир грешку стежања глодала и (радијално) одступање мера зуба. Модел је заснован на параметарским једначинама са циклоидним путањама сечива зуба алата које је извео *Martellotti* при чему су узети у обзир грешка стежања глодала (паралелна помереност и нагнутост осе глодала у односу на осу обртања алата). Развијени модел у овом делу дисертације је оригинални модел при чему је најпре изведен модел идеалне путање зуба, на основу пречника глодала, броја зуба и корака у функцији угла ротације. Затим су у модел уведени утицај грешака постављања алата (паралелне померености и нагнутости осе глодала) и радијална одступања зуба. Модел је развијен преко матрица транслације, закошености и ротације референтних координатних система модела. Приказан је и пример појаве хетерогености *band-a* храпавости генерисане површине.

Поглавље 9 садржи информације о принципима *CNC* програмирања, поступцима корекције (регенерисања) *NC* кода и поступцима компензације грешака обраде. Описани су поступци ручног програмирања и програмирања помоћу рачунара. Наведени су комерцијални софтвери за програмирање *CNC* обраде и описани *CAM* системи преко дефиниција, функција, генерисања *NC* кода, оптимизације путање алата, израчунавања времена обраде и симулације обрадног процеса. Истакнут је значај базе података (алата, прибора, параметара обраде и сл.) *CAM* система. Поступак генерисања *NC* кода је описан применом софтвера *FeatureCAM* (овај софтвер је коришћен приликом експерименталних истраживања) заснованог на типским елементима и знању. Након креирања модела припремака, приказан је поступак генерисања *NC* кода аутоматским избором параметара обраде, који овај софтвер нуди. Такође је описан и поступак генерисања *NC* кода корисничким уносом параметара обраде (броја обртаја и корака). Затим су наведени основни модели компензације грешке корекцијом *NC* кода, а дат је и преглед литературе везане за компензацију.

У поглављу 10 су приказани резултати обимних експерименталних испитивања. Истраживан је утицај технолошких параметара обраде, стратегије резања као и нетачности постављања глодала на квалитет обраде. На основу резултата мерења успостављене су одговарајуће корелативне зависности. Обрада је вршена на *CNC* глодалима, а за алате су коришћена вретенаста глодала од различитих материјала и са

различитом геометријом. Сви обрађивани делови су мерени на савременом мерној опреми: координатној мерној машини и оптичким мерним системима АТОС.

Многобројним експерименталним испитивањима истраживан је утицај параметара услова обраде (ширине резања, брзине резања, брзине помоћног кретања, геометрије алата, материјала алата, методе обраде: истосмерно и супротносмерно глодање) на тачност обраде (димензионална одступања, одступања од равности, управности и паралелност) и квалитет обрађене површине. Добијени су резултати који указују на високу корелативну зависност између измерених величина и параметара услова обраде.

Посебним експерименталним испитивањима анализиран је утицај нетачности постављања глодала и радијалних одступања зуба глодала на топографију површине. На основу резултата експерименталних истраживања у различитим условима обраде уз унапред задате нетачности постављања алата извршена је провера математичког модела развијеног у осмом поглављу. Уношењем реалних измерених вредности нетачности постављања глодала и радијалног одступања зуба глодала показано је постојање велике подударности параметара топографије добијене површине и вредности добијених математичким моделирањем. На овај начин је показано да се адекватним математичким моделом може описати реални процес обраде глодањем и да се на основу података добијених претходним мерењем геометријске тачности (нетачности) постављања глодала на машини може предвидети квалитет обрађене површине са веома великом поузданошћу.

У циљу завршне обраде, добијања потребне тачности димензија и облика дела или дораве у циљу поправке нетачно остварених димензија, обрада се врши са веома малим дубинама глодања. Због тога су вршена посебна експерименталним испитивања утицаја дубине резања. Резултати ових испитивања су показала да до одношења материјала са предмета обраде долази како код веома малих дубина резања тако и при обради која се изводи са истом путањом алата као у претходном пролазу у коме је вршена обрада (у овом случају дубина резања би требало да је једнака нули). Такође, показана је знатна разлика код истосмерног и супротносмерног глодања. Добијени резултати имају изузетан значај јер указују на могуће правце корекције *NC* кода. Потребне тачности димензија и облика новог дела или дораве у циљу поправке нетачно остварених димензија се могу остварити:

- променом параметара услова обраде глодањем (промена режима),
- променом стратегије обраде (истосмерно или супротносмерно) и
- променом путање алата.

Генерисање површина, мерење одступања и анализа резултата, на основу скенирања делова оптичким мерним системима АТОС дати су у поглављу 11. У овом поглављу описан је детаљно поступак добијања података о димензионој тачности и тачности облика на основу *3D* скенирања делова, добијених *STL* датотета облака тачака, генерисања површина на основу облака тачака (пре-процесирања и процесирања) применом различитих софтвера и мерења димензионалних и геометријских одступања од полазног *CAD* модела. Извршено је поређење резултата мерења тачности обраде на основу облака тачака добијених помоћу координатне мерне машине и оптичких мерних система АТОС применом софтвера *PC DMIS* и *GOM Inspect*. Резултати истраживања и развијена метода мерења применом безконтактних мерних система представљају значајан допринос изучаваној области и указују на правац даљих истраживања не само кандидата већ многобројних тимова стручњака са циљем развоја система са већом прецизношћу мерења и система који би били намењени индустрији.

У оквиру поглавља 12 развијен је и анализиран модел за управљање улазним параметрима процеса обраде са аспекта решавања проблема регенерисања *NC* кода у циљу повећања тачности обраде и квалитета обрађене површине. Модел полази од *CAD/CAT* захтева пројектованог дела и база података са информацијама о условима обраде, излазним параметрима процеса обраде и тачности обраде (грешкама обраде). Применом *CAM* система генерише се *NC* код. Након израде дела врши се мерење применом координатне метрологије, а применом реверзног инжењерства генерисање површина на основу облака тачака готовог дела. Применом одговарајућих софтвера врши се мерење, односно контрола тачности (примена *CAI* системи). Добијена одступања (грешке обраде) и подаци из базе података се у следећем кораку користе за генерисање новог *NC* кода. Све нове информације до којих се долази током обраде и контроле квалитета се смештају у базе података.

У закључку (поглављу 13) су истакнути кључни резултати остварени у раду и указано је на правце будућих истраживања.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат Драган Лазаревић, дипл. маш. инж. је у оквиру докторске дисертације извршио систематизацију и анализу постојећих знања и искустава у области технологије обраде глодањем, моделирања процеса обраде резањем, *CNC* технологија, координатне метрологије, реверзног инжењерства, примене софтвера за контролу тачности обраде и квалитета обрађене површине и др. Кандидат је остварио значајне научне резултате од којих се наводе најзначајнији:

- Развијен је унапређени математички модел процеса обраде вретенастим глодалом којим су обухваћени сви релевантни параметри процеса обраде, геометрије алата и нетачности постављања алата. Математичким моделом су описана сложена кретања резних елемената алата и симулирана топографија обрађене површине. Математички модел је у потпуности верификован експерименталним испитивањима.
- Успостављене су корелативне зависности између услова обраде (брзине резања, брзине помоћног кретања, дубине и ширине глодања) и тачности обраде и квалитета обрађене површине за услове истосмерног и супротносметног глодања са алатима од различитих материјала (брзорезни челик и тврди метал) и са различитом геометријом.
- Дефинисана је методологија контроле квалитета обраде применом савремене производне и мерне опреме и створене основе за развој интелигентних *CAD/CAM/CAI* система.
- Реализовано је софтверско решење за поступак генерисања површине из облака тачака применом софтвера *MatLAB*.
- Посебан научни допринос остварених резултата у дисертацији представља развијени модел којим је извршена интеграција *CAD/CAT*, база података, *CAM* система за генерисање *NC* кода, координатне метрологије, реверзног инжењерства и *CAI* система у функцији аутоматизације генерисања и регенерисања *NC* кода.

6. Примењивост и корисност резултата у теорији и пракси

У научно-теоријском смислу докторска дисертација кандидата Драгана

Лазаревића, дипл. маш. инж. под насловом „РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА“ даје низ значајних резултата који су изузетно корисни у теорији и пракси. Кроз научно-истраживачки рад на овој дисертацији кандидат даје одговоре на многа питања и отвара низ нових праваца истраживања у области производног машинства, метрологије, реверзног инжењерства, CNC технологија и других области.

У теоријском смислу, дисертације даје многа општа објашњења ради потпуног разумевања основних појмова. Велики значај теоријског дела ове дисертације је и у томе што су приказана најновија сазнања из ове области која се односе на примену савремених обрадних система, рачунаром подржаних мерних система и лабораторијске опреме. Применљивост ових резултата се може сагледати у следећем:

- Систематизована су најновија теоријска знања и резултати истраживања из многих области релевантних да се од захтева производа исказаног 3D моделом применом CAD/CAT, CAM, RE, CAI и др. технологија дође до коначног производа са потребним квалитетом.
- Успостављене су многобројне корелативне зависности између услова обраде и параметара тачности обраде и квалитета обрађене површине, што је веома значајно у области теорије обраде метала резањем.
- Развијен је и верификован сопствени унапређени математички модел процеса обраде вретенастим глодалом који описује сложена кретања резних елемената алата и генерисану топографију површине. Овај модел је веома значајан са теоријског аспекта јер представља основу за развој математичких модела за симулацију процеса других обрада и њихових топографија површине, симулацију механичких и термичких оптерећења алата и предмета обраде и др.
- Створене су теоријске основе за даљу интеграцију CAD/CAT пројектовања дела и одговарајућих база података, CAM система за генерисање NC кода, координатне метрологије, реверзног инжењерства, CAI система у функцији контроле и CNC производње дела.

Примена резултата остварених докторском дисертацијом у инжењерској пракси је вишеструка. Дисертација даје могућност решавања низа проблема:

- Избор одговарајућих услова обраде на основу корелативних зависности у функцији постизања потребне тачности обраде и квалитета обрађене површине.
- Испитивање и мерење тачности обраде и квалитета обрађене површине применом савремене мерне опреме са контактним и безконтактним сензорима за мерење.
- Значајнију примену програма CATIA и GOM Inspect за пре-процесирање и процесирање облака тачака и генерисања површине и мерење тачности применом програма PC DMIS и GOM Inspect.
- Боље сагледавање полазних параметара за генерисање NC кода са циљем остваривања захтеваног квалитета обраде и начина за регенерисање NC кода,
- Развијен и анализиран модел заснован на интеграцији CAD/CAT система и одговарајућих база података, CAM система, координатне метрологије, реверзног инжењерства и CAI система, представља веома добру основу за инжењерски приступ развоју мерних и софтверских апликација за индустријску примену.

7. Начин презентирања резултата научној јавности

Део резултата произашлих из рада на овој дисертације је већ публикован и верификован објављивањем у међународним и националним научним часописима, као и на међународним и националним научно-стручним конференцијама.

Практични аспекти реализованог научно-истраживачког рада и резултати развоја и реализације конкретног решења представљени су домаћој стручној јавности делом кроз реализацију пројекта TP35034, Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за практичну примену, даља истраживања и верификацију резултата, као и за презентацију на научним скуповима и објављивање радова у међународним и домаћим научним часописима, као и наставак истраживања у наведеним областима.

На основу свега изложеног Комисија доноси следећи:

ЗАКЉУЧАК

Докторска дисертација кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. у потпуности, како по обиму тако и по квалитету, одговара одобреној теми дисертације, одлуком бр. **01-1/2942-12** од **27.08.2015.** године од стране Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Докторска дисертације је резултат оригиналног научног рада у широј области производног машинства, а посебно области обраде метала резањем, савремених обрадних система, метрологије као и области интелигентних CAD/CAM система и управљања обрадним процесима и представља значајан научни и стручни допринос у оквиру поменутих области.

Разматрана научна тема је веома актуелна због значаја који убрзани развој савремених обрадних система, координатне метрологије, безконтактних оптичких, ласерских и других сензора, софтвера за 3D идентификацију и процесирање сложених површина и контролу имају у данашње време, а добијени резултати представљају научни допринос у области развоја интелигентних CAD/CAM/CAI система. Презентирани модел у дисертацији обухвата: 3D модел дела са рачунаром подржаним толерисањем, предвиђање тачности обраде, генерисање NC кода и израду дела, 3D идентификацију дела добијеног CNC обрадом применом генерисаног NC кода, процесирање облака тачака и генерисање површина дела, мерење одступања и корекцију NC кода у циљу добијања захтеваног квалитета обраде и представља оригиналан и јединствен модел коме предстоји даљи развој и имплементација у интелигентне индустријске обрадне системе.

Кандидат је у приказу истраживања користио уобичајену и стандардизовану стручну терминологију, а структура докторске дисертације и методологија излагања су у складу са универзитетским нормама.

Значајан део резултата ове дисертације кандидат је верификован публикавањем више радова на домаћим и међународним конференцијама, као и у националним и међународним часописима.

На основу свега изложеног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације, једногласно је закључила да докторска дисертација, под насловом:

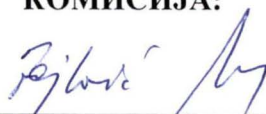
**РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И
АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА**

кандидата Драгана Лазаревића, дипл. маш. инж. по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава стручне, научне и законске критеријуме за израду докторске дисертације, па са задовољством предлаже Наставно-научном већу Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, да на основу овог Извештаја, докторску дисертацију прихвати као веома успешну и да кандидата позове на јавну усмену одбрану.

У Крагујевцу

13.10.2017.

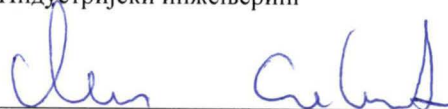
КОМИСИЈА:



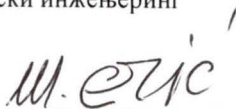
др Милан Зељковић, редовни професор
Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Ужа научна област: Машине алатке, флексибилни
технолошки системи и аутоматизација поступака пројектовања



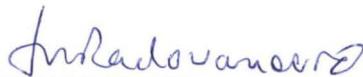
др Горан Девеџић, редовни професор, Председник
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Производно машинство,
Индустријски инжењеринг



др Миладин Стефановић, редовни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Производно машинство,
Индустријски инжењеринг



др Милан Ерић, ванредни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Ужа научна област: Производно машинство,



др Мирослав Радовановић, редовни професор
Машински факултет, Универзитет у Нишу
Ужа научна област: Производни системи и технологије