

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)

717/4

(Број захтева)

22.06..2010. 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:

САШЕ (ТОМИСЛАВ) ЖИВАНОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **САША (ТОМИСЛАВ) ЖИВАНОВИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ

Универзитет је дана 21.04.2003. год. својим актом под бр. 33/2 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **САШЕ (ТОМИСЛАВ) ЖИВАНОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 06.05.2010. године, одлуком факултета под бр. 717/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Милош Главоњић</u>	Редовни проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
2. <u>Др Љубодраг Тановић</u>	Редовни проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
3. <u>Др Павао Бојанић</u>	Редовни проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
4. <u>Др Драган Милутиновић</u>	Редовни проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
5. <u>Др Милан Зељковић</u>	Редовни проф.	Производно машинство	Факултет техничких наука Нови Сад

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 20.05.2010. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Мированчевић

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: 717/4
Датум: 26.05.2010.
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и извештаја Комисије у саставу: проф.др Милош Главоњић, ментор, проф.др Љубодраг Тановић, проф.др Павао Бојанић, проф.др Драган Милутиновић, проф.др Милан Зељковић, ФТН Нови Сад, о оцени докторске дисертације „Конфигурисање нових машина алатки“ докторанта мр Саше Живановића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 20.05.2010. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцenu и одбрану докторске дисертације **„КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ“** докторанта **мр САШЕ ЖИВАНОВИЋА**, дипл.инж.маш.

Одобрава се одбрана докторске дисертације пошто се докторска дисертација са извештајем Комисије за оцenu и одбрану ставља на увид јавности у трајању од 30 дана и уколико не буде примедби на докторску дисертацију и извештај Комисије за оцenu и одбрану, доставља се Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду да да сагласност на извештај о урађеној докторској дисертацији.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације
кандидата мр Саше Т. Живановића

На основу одлуке Наставно-научног већа број 717/2 од 06. 05. 2010. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације мр Саше Т. Живановића, дипл. инж. маш. под насловом

“КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ”.

После детаљног проучавања приложене докторске дисертације подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1 Наслов и обим дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Саше Т. Живановића, дипл. инж. маш, под насловом “Конфигурисање нових машина алатки”, садржи 146 страна са 135 слика и 6 таблица. Дисертација има податке о Ментору и Комисији за оцену и одбрану, Предговор, Садржај, Апстракт на српском и енглеском језику, Номенклатуру, осам поглавља, Литературу са списком од 207 референци, Биографију Кандидата и четири прилога у електронском облику на укупно 87 страна, од којих четврти прилог садржи додатке за сва поглавља.

1.2 Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат мр Саша Живановић дипл. маш. инж. је 11. новембра 2002. године Наставно-научном већу Машинског факултета поднео молбу број 1231/1 да му се одобри израда докторске дисертације под насловом "Конфигурисање нових машина алатки". На основу тога и на предлог Катедре за производно машинство број 181/2 од 06. 02. 2003. године именована је Комисија за припрему извештаја о испуњености услова кандидата и о научној заснованости теме. Та Комисија је установила да кандидат испуњава услове за израду дисертације и да је предложена тема научно заснована у домену актуелних тема у области производног машинства, па је сачинила извештај број 181/1 и упутила га Наставно-научном већу 06. фебруара 2003. године са предлогом да се мр Саше Т. Живановићу одобри израда докторске дисертације под насловом "Конфигурисање нових машина алатки". За ментора је предложен др Милош Главоњић, ванредни професор. Стручно веће за машинске, саобраћајне и организационе науке Универзитета у Београду дало је сагласност на научну заснованост теме и именовање ментора на својој седници одржаној 21. 04. 2003. године, о чему је Наставно-научно веће Машинског факултета обавештено на својој седници одржаној 24. 04. 2003. године. На основу тога је Наставно-научно веће Машинског факултета одобрило израду ове докторске дисертације својом одлуком број 684/1 од 07. маја 2003. године. Кандидату је два пута одобрено продужење рока за израду докторске дисертације, оба пута уз сагласност Катедре за производно машинство и ментора. Прво продужење је одобрено до 07. 05. 2009. године одлуком Наставно-научног већа број 529/2 од 15. 05. 2008. године, а друго до 07. 05. 2010. године одлуком Већа број 441/2 од 07. 05. 2009. године.

1.3 Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација кандидата мр Саше Живановића дипл. маш инж, под насловом "Конфигурисање нових машина алатки", припада техничким наукама и то научној области производно машинство, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

1.4 Биографски подаци о кандидату

Саша Живановић је рођен 10. 12. 1969. године у Параћину. Средњу школу је завршио у Параћину, после чега је уписао Машински факултет у Београду. Одслужио је војни рок. Дипломирао је на Катедри за производно машинство 17. 02. 1995. године са просечном оценом у току студија 9.11 и оценом 10 на дипломском испиту, на тему: "Методи конципирања флексибилних технолошких модула". По дипломирању наставља школовање на последипломским студијама и заснива радни однос на Машинском факултету у Београду најпре као сарадник, а потом и као асистент-приправник на предметима Технологија машиноградње и Машине алатке. Магистарску тезу под насловом "Технолошки модул са паралелним механизмом" одбранио је 24. 07. 2000. године на Машинском факултету у Београду. У звање асистента први пут је изабран 01. 01. 2001. године за предмете Машине алатке и Технологија машиноградње. Други пут је у звање асистента изабран 01. 01. 2005. године. И сада је у звању асистента, јер је по трећи пут изабран у то звање 02. 01. 2009. године. Сада учествује у извођењу наставе на Машинском факултету у Београду на предметима: Машине алатке, Технологија машиноградње, Технологија машинске обраде, Индустрijски роботи, Машина алатки и робота нове генерације и Технологија бродоградње. Учествовао је у изради више учила која се користе у извођењу наставе на предметима Катедре за производно машинство. Непрекидно је био организатор вежби и испита за предмет Машине алатке. За овај предмет одржава и сајтове који се користе за потребе извођења наставе. Учествовао је на више научно-истраживачких пројеката који су реализовани у Институту за производно машинство и компјутерски интегрисане технологије Машинског факултета. На основу резултата током истраживачког рада објављивао је радове које је са успехом саопштавао на скуповима и симпозијумима. Учествовао је у реализацији пројекта МИС.3.02.0101.Б Троосне паралелне машине у циклусу финансирања од 2002. до 2004. године. Главни резултат овог пројекта била је Троосна машина са паралелном кинематиком рп101, која је награђена Првом наградом Сајма технике у Београду 2004. године за нова техничка достигнућа, Годишњом наградом Привредне коморе Београда за 2003/04, као техничко унапређење, Гранд при наградом на изложби Проналазаштво 2005 и Наградом града Београда за 2005. годину за област науке - проналазаштво. У тој машини је први пут уграђен патентирани паралелни механизам који је послужио као основа и за конфигурисање стоне машине са паралелном кинематиком у оквиру верификације методологије конфигурисања нових машина алатки, развијене у овој дисертацији. У периоду од 2004. до 2005. године учествовао је у реализацији међународног научног пројекта Еурека Е!3239 РаKiCUT са партнерима из Грчке. Учествовао је и у реализацији пројекта ТР6309Б Петоосне паралелне машине из програма Технолошког развоја. Сада учествује у реализацији пројекта ТР14034 Развој технологија вишеосне обраде сложених алата за потребе домаће индустрије. Учествојући у реализацији сваког од тих пројеката кандидат је стицао потребна знања и вештине потребне за израду дисертације и за самостални истраживачки рад.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Структура и садржај дисертације

Докторску дисертацију чине следећа поглавља:

1. Увод
2. Интерпретација метода за конфигурисање машина алатки
3. Нова машина алатка
4. Методологија конфигурисања нових машина алатки
5. Методи испитивања и верификације нове машине алатке
6. Развој стоне троосне машине са паралелном кинематиком
7. Прогноза даљег развоја машина алатки
8. Закључак
9. Литература
10. Прилог (четири прилога у електронском облику)

2.2 Кратак приказ поглавља

Сва поглавља имају свој основни део, који је у штампаном делу дисертације и шире изводе, који су дати у електронском облику у прилозима. Овај приказ се односи на поглавља у целини.

Поглавље 1. Увод. Прво је дат осврт на кооперацију пројеката, софтвера, фирми и презентација остварених резултата у оквиру које је урађена и ова дисертација, указујући на континуитет те кооперације од 2002. године до данас. Поновљене су полазне хипотезе, из времена када је започета израда дисертације, а онда и планирани циљеви. Потом је дата структура дисертације у којој се види на која се поглавља односе прва три прилога, који су у електронском облику и да је четврти прилог комплет додатака свим поглављима. Структура је концизно описана указујући на једну могућу интерпретацију мреже ресурса у којој је урађена ова дисертација. На крају су наведени основни резултати ове дисертације: (i) методологија за конфигурисање нових машина алатки, (ii) виртуелне стоне машине и то једна троосна и једна хибридна петоосна, (iii) методологија развојног испитивања машина са паралелном кинематиком и (iv) едукациона стона троосна машина са паралелном кинематиком.

Поглавље 2. Интерпретација метода за конфигурисање машина алатки. Ово је прво од два припремна поглавља за комплетирање методологије конфигурисања нових машина алатки, која је предмет четвртог поглавља. Прво су дати основни појмови о машинама алаткама. Потом је урађена анализа метода за конфигурисање, укључујући дефинисање и класификацију овог појма, приказ модуларног приступа у конфигурисању, приказ принципа фамилије и сличности у конфигурисању, приказ top-down приступа и опис коришћења веб организације конфигурисања. Потом је описано функционално моделирање применом IDEF0 дијаграма, јер је оно одабрано за приказивање процедура конфигурисања нових машина алатки. Посебан осврт је дат на модуларни принцип: наглашена је еквиваленција овог принципа и метода морфолошких матрица у анализи и синтези техничких система, а онда је илустрована примена графова у приказу једног модуларног система.

Поглавље 3. Нова машина алатка. Ово је друго припремно поглавље за комплетирање методологије конфигурисања нових машина алатки. Прво је дефинисан појам нове машине алатке користећи формализам морфолошког простора, који је уобичајен у праћењу догађаја на такозваној спирали развоја у индустрији. На тој спирали се узајамно прате три типска догађаја: нови производ, нова технологија за тај производ, нова машина алатка за ту технологију. Одабрано је неколико димензија морфолошког простора по којима се прати развој машина алатки на тој спирали развоја: кинематика, генерације и флексибилност. По тим димензијама су издвојене машине алатке са паралелном кинематиком, реконфигурабилне машине алатке, интелигентне машине алатке и мултифункционалне машине алатке. За предмет даљих истраживања одабране су машине алатке са паралелном кинематиком. И реконфигурабилне машине алатке, по дефиницији, имају свој конфигуратор. Међутим, он је наменски за ову врсту машина и представља само проширење модуларног система, па није узет као узор за развој сопственог метода конфигурисања нових машина алатки у овој дисертацији. Тако је предмет ове дисертације остала нова машина алатка, не као сваки резултат неког конфигурисања, него као иновација у морфолошком простору свих познатих машина алатки.

Поглавље 4. Методологија конфигурисања нових машина алатки. У овом поглављу је постављена процедура конфигурисања нове машине алатке. Описана је помоћу формализма IDEF0 функционалних дијаграма потребног степена структурисања. Одабране су три теме за разраду: пројектовање применом метода виртуелних прототипова, примери методологија конфигурисања нових машина алатки и описивање формализма конфигурисања нових машина алатки помоћу IDEF0 дијаграма. Прва тема је разрађена по угледу на устаљени појам виртуелног прототипа машине алатке под којим се подразумева синтеза вишеструко верификованих модела машине алатке по постављеним функционалним захтевима у интегралном окружењу за конципирање, конструисање и потребне прорачуне. Ти модели машине алатке зову се њени виртуелни прототипови и комплетирају се применом две методологије: методологијом за конфигурисање и методологијом за верификацију. Приликом конфигурисања виртуелног прототипа користе се сви модели машине помоћу којих се може извршити синтеза и симулација кинематике и чврстоће машине, оптимизација елемената и

склопова, анализа радног простора и сингуларитета са оптимизацијом пројектних параметара итд. Тако се у израду прототипа машине уводи онај виртуелни прототип који је одабран као најбољи међу свим расположивим виртуелним. Тиме се могуће измене на прототипу машине смањују на најмању могућу меру, па се и време развоја нове машине алатке тако смањује. Друга тема се односи на приказ методологија конфигурисања машина алатки са паралелном кинематиком и реконфигурабилних машина алатки. Обе ове коцепције припадају машинама алаткама нове генерације. За сваку од њих наведена је по једна школа у свету која је далеко одмакла у њиховом развоју. За даљу разраду одабрана је машина алатка са паралелном кинематиком. На основу ове две теме отворена је трећа која се експлицитно односи на конципирање нових машина алатки и описана је формализмом IDEF0 функционалних дијаграма. Дати су и детаљно описани дијаграми по степену разраде: A-0, A0, па комплет (A1, A2, A3, A4 и A5). Активности су детаљно описане и илустроване, а на примеру активности A3 показана је и активност A31 која се односи на оптимизацију виртуелног модела машине алатке, јер се њом један виртуелни прототип машине усавршава колико је потребно да би могао бити одабран за превођење у прототип машине као бољи од осталих расположивих.

Поглавље 5. Методи испитивања и верификације нове машине алатке. Ако су методи испитивања машина алатки предмет неког стандарда, онда се обично ради о неком од експлоатационих испитивања којима се подвргава довршена и/или ремонтована машина алатка. Таквим испитивањима претходе развојна, која су посебно анализирана и систематизована у овом поглављу, јер се односе на верификацију нових машина. Зато је прво дата класификација метода испитивања машина алатки са кратким коментаром. Затим је дата функционална структура развојног испитивања са посебним освртом на методе индиректног мерења и/или одређивања показатеља квалитета машине алатке и обрадног система са њом. За пример је узето испитивање машина алатки са паралелном кинематиком. Дата је систематизација пробних делова који се обично користе, или, који се могу користити у овом испитивању троосних и петоосних машина. Затим је описана једна могућа методологија развојног испитивања машина са паралелном кинематиком, а онда је показано како је она примењена у испитивању троосне машине са паралелном кинематиком рп101. Посебна пажња је посвећена избору, обради и анализи пробних делова. На крају је описана једна процедура испитивања тачности машине помоћу еталона, какав се обично користи у калибрацији машина са паралелном кинематиком.

Поглавље 6. Развој стоне троосне машине са паралелном кинематиком. У овом поглављу детаљно је описан главни експеримент ове дисертације. Он је послужио за верификацију развијене методологије конфигурисања нових машина алатки путем израде и пуштања у рад једне стоне троосне машине са паралелном кинематиком. Прво су постављени функционални захтеви за ову машину. Основне одреднице су биле: да радни простор има мере око 200x100x40 mm и да буде употребљен паралелни механизам који је већ био верификован у пројектима у којима је учествовао и Кандидат. Затим је цела спроведена процедура конфигурисања виртуелног прототипа ове машине приказана помоћу IDEF0 дијаграма. У тој процедури прво су решене инверзна и директна кинематика, онда је састављен Јакобијан, па помоћу њега извршена анализа сингуларитета и радног простора. После тога је описано конфигурисање неколико виртуелних прототипова ове машине коришћењем постављеног модуларног система за ову машину, који садржи потребне модуле и скелетон моделе, а онда и типске склопове механизма ове машине. Дата су два виртуелна прототипа. Један је комплетиран помоћу јефтиних компонената, а други помоћу компонената које се обично користе за израду едукационих машина. Дат је и осврт на могућу надградњу овог пројекта у фамилију стоних машина, чиме се завршен приказ конфигурисања машинског подсистема. Затим је дат приказ пројекта управљања и програмирања ове машине као неизоставног подсистема нових машина алатки. Прво су дати функционални захтеви, а онда је процедура конфигурисања подсистема за управљање приказана помоћу IDEF0 дијаграма. За управљање је одабран РС са оперативним системом Linux, који подржава рад у реалном времену и на њему је инсталисан систем EMC за управљање машином. Сав овај софтвер доступан је сваком без накнаде, а омогућио је покретање ове машине на најјефтинији могући начин, без редуковања перформанси: омогућава програмирање помоћу G кода, а тиме и коришћење CAD/CAM система са адекватним постпроцесором. Руковаоц овакве машине поступа као да рукује вертикалном глодалицом са серијском кинематиком, а интерпретер G кода и имплементирано решење инверзне кинематике у језику C у управљачкој

јединици врше потребне трансформације. Отишло се и корак даље: направљена је виртуелна машина која служи за симулацију рада стоне машине по добијеном G коду и пре покретања саме машине да би се проверила исправност програма, оцилиле могуће колизије итд. Показани су карактеристични детаљи у току израде машине, а онда и како је машина пуштена у пробни рад. На крају је описана процедура верификације прототипа ове машине путем обраде одабраних пробних делова. У додацима овом поглављу у електронском облику описани су и други обављени послови: оптимизација једног подскопа паралелног механизма помоћу брзе израде прототипова елемената тог подскопа, основни прорачун носеће структуре машине, кинематичка анализа механизма, симулација рада машине по преузетом програму итд.

Поглавље 7. Прогноза даљег развоја машина алатки. Дисертација је започета укључивањем у пребројавање машина алатки нове генерације, а у овом поглављу је дат осврт на могуће правце даљег развоја машина алатки и технолошких система. Међу изазовима за машине алатке издвојен је нови метод програмирања базиран на протоколу ISO STEP-NC, а међу изазовима за технолошке системе кооперација ресурса у мрежама и холархије. На крају је дат један осврт на садашње стање нових машина алатки са знацима праваца чији је иновациони потенцијал сачуван. Међу њима су брзоходне машине, машине за микротехнологије, реконфигурабилне машине и технолошки системи, машине високе тачности и машине са хибридном кинематиком.

Поглавље 8. Закључак. Дата је рекапитулација обављеног истраживања. Показани су основни резултати и назначени степени њихове разраде. Набројани су коришћени ресурси и показано како се резултати ове дисертације могу користити као нови ресурси: стона машина као ресурс за едукацију у конфигурисању машина алатки, као учило за конфигурисање управљања машине са нетривијалном кинематиком, као радно место за увежбавање програмирање глодалица итд, методологија за конфигурисање нових машина алатки за увежбавање конфигурисања виртуелних прототипова, виртуелна машина за увежбавање симулације програма пре покретање машине по њима итд.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост, оригиналност и значај

Ова дисертација је урађена у окружењу ресурса који су коришћени и за реализацију пројеката из програма технолошког развоја од 2002. године до данас и за објављивање резултата тих истраживања у познатим часописима. Ти ресурси су набројани у Прилогу 10.1, а у Уводу су набројане најважније кооперације пројеката, софтвера, фирми и презентација резултата. Кандидат је у свим тим активностима учествовао дајући свој допринос. Главне теме су биле: машине алатке са паралелном кинематиком, прво троосне, па петоосне, а онда вишеосни обрадни системи са ревитализованим шестоосним роботом. Носилац истраживања је био тим Катедре за производно машинство, чији је члан све време био и Кандидат, а већина истраживања је обављена у сарадњи са тадашњим LOLA системом. Програми истраживања и добијени резултати били су оригинални и објављени су у страним часописима и на међународним конференцијама када су то чинили и водећи истраживачки центри у свету. Конфигурисана и направљена стона троосна машина са паралелном кинематиком, у оквиру верификације развијене методологије конфигурисања нових машина алатки, трећа је у низу оригиналних машина са паралелном кинематиком. Прва је била функционални симулатор машина са паралелном кинематиком, у чијем је развоју учествовао и Кандидат у једном Еурека пројекту, а друга је била Троосна машина са паралелном кинематиком pn101, која је направљена у сарадњи са LOLA системом и за коју је добијено више признања. Детаљи о овоме пописани су у одељку 1.4 овог Извештаја. У текућем програму истраживања покренут је један ревитализовани шестоосни робот као петоосна вертикална глодалица, која се програмира класичним G кодом, где је Кандидату пружена прилика да комплетира своје искуство у управљању и програмирању машина алатки и њима сличних машина помоћу система отворене архитектуре, какви се данас користе. Савременост дисертације заокружена је бирањем за тему машине алатке нове генерације и методе за њихов развој. Сви добијени резултати, које је остварио Кандидат, или које је остварио тим, чији је члан био Кандидат, оригинални су. Нису копија било којег резултата из света. Основни значај добијених резултата је у чувању актуелности истраживања, комплетирању три нова производа до којих

је дошао пројектни тим, чији је Кандидат био члан (функционални симулатори машина са паралелном кинематиком, троосна машина са паралелном кинематиком рп101 и стона троосна машина са паралелном кинематиком) и стварању услова за наредна истраживања у домену машина алатки и технолошких система нове генерације. Наставак тих истраживања сада је току и односи се на вишеосне обрадне системе.

3.2 Референтна и коришћена литература

У изради дисертације је коришћена литература чији је списак дат у поглављу 9. Делом су то цитиране референце, а другим делом библиографија радова који су Кандидату били доступни за време израде дисертације. Наведени су и примери познатих школа и фирми чији су програми рада Кандидату помогли да конципира и развије сопствену методологију конфигурисања и верификације нових машина алатки. 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 развоју машина алатки нове генерације, па је Кандидату било потребно доста времена да изврши анализу програма истраживања водећих центара у свету, а онда да понуди свој допринос развоју машина алатки нове генерације. 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 Примењени научни методи и њихова адекватност за спроведено истраживање

Истраживање је засновано на уобичајеним методима који се користе у развоју нових машина. Коришћен је комплет метода за анализу и синтезу машина са паралелном кинематиком (анализа радног простора са оптимизацијом параметара паралелног механизма, оцена манипулабилности и анализа сингуларитета), а онда и ови методи: параметарско пројектовање и примена top-down поступка у конципирању машине у одабаном CAD систему, синтеза и оптимизација виртуелних прототипова машине алатке, метод коначних елемената у идентификацији статике и динамике виталних елемената носеће структуре, симулација кинематике машине приликом рада по одабраном G коду, тополошка оптимизација виталних елемената машине, брза израда прототипова одабраних елемената машине у току њиховог развоја, виртуелне машине у верификацији G кода и симултано инжењерство и веб технологије у управљању развојем нове машине. Тако је дисертација у целости урађена коришћењем ресурса информационих технологија које машинству данас стоје на располагању.

3.4 Оцена применљивости и верификације остварених резултата

Главни резултати ове дисертације су: методологија за конфигурисање нових машина алатки, виртуелна стона машина са паралелном кинематиком, методологија развојног испитивања машина алатки са паралелном кинематиком и стона троосна машина са паралелном кинематиком. Сви ови резултати су доведени до реализације. На направљеној станој машини могу се видети остала три: на њој је инсталисана виртуелна стона машина са паралелном кинематиком и она се користи за верификацију програма које треба извршити, на њој се могу показати резултати оптимизације виртуелних прототипова, од којих је један реализован као ова машина итд. Метод развојног испитивања прво је верификован на троосној машини са паралелном кинематиком рп101 у индустријским условима, а онда у фрагментима и на овој станој машини, јер она нема строге захтеве за тачност. Сваки од ових резултата је у спрези са осталима тако да су један другом верификација. Тако је методологија за конфигурисање нових машина алатки верификована направљеном стоном троосном машином са паралелном кинематиком и та машина је сада учило за вежбање програмирања машина алатки са паралелном кинематиком, али и за конфигурисање управљања отворене архитектуре за нумерички управљане машине алатке специфичне конфигурације. Истовремено, та стона машина може да се користи и за упоређивање са осталим виртуелним прототиповима, које развијена методологија нуди, по основу облика и мера радног простора, манипулабилности, даљина од сингуларних конфигурација итд. Главна верификација добијених резултата извршена је објављивањем радова у међународним часописима и на међународним конференцијама. Списак тих радова је у одељку 4.4 овог Извештаја. Тај списак указује и на врло корисну навику Кандидата да публикује резултате истраживања.

3.5 Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидату је била пружена прилика да стекне потребна знања и вештине радећи у пројектном тиму Катедре за производно машинство који је био ангажован на реализацији домаћих пројеката из програма Технолошког развоја и једног међународног. 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 велики број радова у којима је први аутор. Део тих радова је набројан у одељку 4.4 овог Извештаја. 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

Овде ће бити дат приказ само четири основна научна доприноса ове дисертације, које је и Кандидат навео у Уводу дисертације. То су: Методологија за конфигурисање нових машина алатки, Виртуелне стоне машине са паралелном кинематиком, Методологија развојног испитивања машина алатки са паралелном кинематиком и Едукациона стона троосна машина алатка са паралелном кинематиком. Остали резултати ове дисертације директно су коришћени у комплетирању наведена четири основна доприноса. Међу њима су: организација истраживања на бази симултаног инжењерства и веб технологија, симулација рада нумерички управљане машине алатке по датом програму и коришћење елемената аксиоматског пројектовања у конципирању нових машина алатки.

Методологија за конфигурисање нових машина алатки. Ово је главни научни допринос дисертације. У поглављима 2. и 3. описана је припрема за комплетирање методологије, а сама је описана у четвртом поглављу. Интерпретирана је на примеру конфигурисања машина алатки са паралелном кинематиком и заснива се на развоју виртуелних прототипова машина алатки. Примењени су следећи методи: структурна анализа помоћу метода коначних елемената са калибрацијом постављених модела путем експерименталне калибрације, кинематичка анализа механизма и машине у целини са оптимизацијом параметара машине на основу резултата те анализе, симулација рада машине по задатом програму, симулација обрадног система са развијеним виртуелним прототипом машине ради анализе узајамног дејства машине, процеса и система за управљање и тополошка оптимизација виталних елемената машине. Основа оваквог приступа је следећа: у домену разних модела машине алатке и обрадног система са њом извршити све могуће анализе, синтезе и оптимизације геометријских и кинематичких параметара тих модела долазећи тако до неколико њих који се овде зову виртуелни прототипови машине. Међу тим прототиповима на крају конфигурисања се издваја најбољи и користи за прављење прототипа нове машине. Под појмом нове машине алатке овде се подразумева машина алатке нове генерације коју треба конфигурисати. Отуда се предложена методологија не спроводи по прописаној процедури, својственој машинама алаткама класичне концепције, него се итеративно усавршавају разни виртуелни прототипови до добијања прихватљиве концепције нове машине. Могуће је чак ову методологију проширити и на такозвану виртуелну израду делова тако што се виртуелни прототип машине укључује у модел обрадног система и тако симулира рад конципиране машине и пре њене израде. Главна очекивана корист од примене ове методологије је од скраћивања времена развоја нове машине, јер се већина оптимизација и калибрација врши на виртуелним прототиповима, применом свих расположивих знања о машинама и обрадним системима, а тиме се смањују и трошкови развоја машина алатки нове генерације.

Виртуелне стоне машине са паралелном кинематиком. Оне су упрошћени кинематички модели машина који се комплетирају помоћу неког расположивог ресурса за потребе симулације рада машине по задатом програму на управљачкој јединици машине. Поставка је оваква: направити кинематички модел који ће вршити кретања на начин на који и сама машина реагује на сигнале са управљачке јединице. Због тога виртуелне машине могу да раде у реалном времену и то брзином којом се одвија покренути програм. Тиме се овакве виртуелне машине суштински разликују од кинематичких модела на којима се врши симулација програма у САМ системима. За потребе дисертације одабрано је окружење језика

Python зато што је исти ресурс коришћен и за прављење интерфејса за систем ЕМС којим се управља машина. Састављене су две овакве виртуелне стоне машине. Једна је троосна, а друга петоосна. Петоосна се, за сада, користи само за верификацију вишеосних програма, док је троосна интегрисана у систем за управљање направљене стоне троосне машине са паралелном кинематиком. Обично се виртуелне машине покрећу упоредо са екраном Axis система ЕМС, којим се управља машином.

Методологија развојног испитивања машина алатки са паралелном кинематиком. Ово испитивање претходи експлоатационом и за њега је развијена методологија која се користи у верификацији прототипова машина алатки, посебно машина алатки са паралелном кинематиком. Она је концизно описана помоћу формализма IDEF0 функционалних дијаграма. Издвојена је група идиректних развојних испитивања која се спроводи помоћу обраде пробних делова. За те потребе је дата систематизација пробних делова по пореклу документа у којем су прописани, по нивоу сложености, врсти провера итд. Међу њима су издвојени пробни делови за глодалице са паралелном кинематиком, троосне и петоосне. Посебно су издвојени и приказани и неки од синтетичких пробних делова који су намењени за једнократно комплетно испитивање радне тачности глодалица. Прва провера развијене методологије развојног испитивања машина алатки са паралелном кинематиком извршена је приликом верификације прототипа троосне машине са паралелном кинематиком rp101 у индустријским условима. Потом је она делимично верификована и на направљеној едукационој стоној троосној машини са паралелном кинематиком и то у мери у којој је било потребно детаљно испитати такву врсте машине с обзиром на њену концепцију и намену. Саставни део ове методологије је и испитивање тачности позиционирања машина помоћу еталона. За пример је описана употреба еталона са трновима. Нису посебно описане рутинске процедуре испитивања, које се у овој методологији подразумевају: тест кружне интерполације, статистичко испитивање тачности позиционирања и њима сличне.

Едукациона стона троосна машина алатка са паралелном кинематиком. Ова машина је проведена кроз цео процес конфигурисања какав је у дисертацији развијен. Сама по себи представља производ на којем су верификована остала три научна доприноса ове дисертације: методологија конфигурисања нових машина алатки, виртуелна машина алатка и методологија развојног испитивања. Помоћу расположиве базе модула, склопова и виртуелних прототипова, развијених у оквиру примене методологије за конфигурисање нових машина алатки, могуће је као нови производ добити и фамилију стоних машина са паралелном кинематиком. Претходник овој машини била је троосна машина са паралелном кинематиком rp101, у чијем је развоју учествовао и Кандидат. Други претходник је био систем отворене архитектуре за управљање нумерички управљаних машина алатки који је потекао из доприноса који је дао Национални институт за стандарде из САД (NIST), који је већ сада постао технолошка баштина којој могу приступити заинтересовани истраживачи као општем добру. Трећи претходник је Удружење за промоцију система отворене архитектуре за управљање нумерички управљаних машина алатки помоћу РС. То је омогућило да се и направи конфигурирана машина алатка са минимумом улагања. Машина има корачне моторе, али јој тиме нису умањене очекиване перформансе за потребе едукације. Сада се ова машина може користити за неку од ових намена: увежбавање конфигурисања система отворене архитектуре за управљање машине алатке са паралелном кинематиком, увежбавање синтезе виртуелне машине алатке који ради у реалном времену и у кооперацији са системом за управљање машине, увежбавање програмирања троосних и петоосних машина итд.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Ова дисертација је рађена у окружењу ресурса ангажованих за вишегодишње истраживање у домену машина алатки нове генерације, кооперације више фирми за реализацију најважнијих резултата тих истраживања и кооперације пројектних тимова у публикавању резултата остварених у овим истраживањима. У свим тим активностима Кандидат је узимао активно учешће и стицао знања и вештине. Од њега зависи како ће организовати свој будући самостални научни рад имајући у виду ове чињенице: сада су у фокусу истраживања вишеосне машине под претпоставком да је истраживање машина са паралелном кинематиком обављено довољно целовито; у наредном времену ће се отворити теме и о другим концепцијама машина алатки, за које ће бити потребно основати нове кооперације

ресурса; програмирање нумерички управљаних машина алатки сада је у фази интензивног реинжењеринга; међу машинама алаткама наредних генерација биће све више оних које се не могу истраживати у окружењу у којем су истраживане машине алатке са паралелном кинематиком, реконфигурабилне машине алатке, машине алатке за брзу израду прототипова, интелигентне и мултифункционалне машине алатке. Неке од тих изазова Кандидат је сам већ поменуо у завршном делу дисертације, знајући да резултате ове дисертације треба стално дограђивати да би пратили развој машина алатки, или да треба отворити нове теме.

4.3 Очекивана примена резултата у пракси

Резултати ове дисертације представљају завршну групу резултата који су примењени у пракси међу свим до којих се дошло у протеклом периоду у оквиру истраживања машина алатки нове генерације. Сва четири основна резултата ове дисертације су практично верификована. Поново се може активирати развијена методологија конфигурисања нових машина алатки када год се укаже потреба да се нова машина конципира и развије за најкраће могуће време и са најмањим трошковима. После ње на ред би дошла верификација прототипа нове машине помоћу развојног испитивања и тако у круг. Развијене виртуелне стоне машине могу бити добра основа за нове када се укаже потреба за таквим ресурсом, обично када треба са већом сигурношћу и већом прегледношћу догађаја покретати обрадне системе по неком програму.

4.4 Верификација научног доприноса

Верификација научног доприноса ове дисертације већ је вршена путем објављивања више радова у међународним часописима, на међународним конференцијама, у домаћим часописима и на домаћим конференцијама. Овде су набројани сви радови у којима је Кандидат коаутор, а који су објављени у међународним и домаћим часописима и саопштени на међународним конференцијама и само радови саопштени на домаћим конференцијама у којима је Кандидат први аутор и то само у време израде дисертације.

Радови објављени у међународним часописима:

- [1] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Kvrjic, V., **Zivanovic, S.**, A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel, Annals of the CIRP, Vol54/1 (2005), pp. 345-348, doi:10.1016/S0007-8506(07)60119-X.
- [2] Glavonjic, M., Milutinovic, D., **Zivanovic, S.**, Functional simulator of 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 42, Issue7 (2009), pp. 813-821, doi:10.1007/s00170-008-1643-x.
- [3] Glavonjic, M., Milutinovic, D., **Zivanovic, S.**, Dimic, Z., Kvrjic, V., Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 46, (2010), pp. 51-60, doi: 10.1007/s00170-009-2070-3.

Радови саопштени на међународним конференцијама:

- [1] Glavonjic, M., Milutinovic, D., **Zivanovic, S.**, Bouzakis, K., Mitsi, S., Misopolinos, L., Development of a Parallel Kinematic device Integrated into a 3-axis Milling centre, Proceedings of 2nd Interanational Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, pp. 351-361, Kassandra-Chalkidiki, Greece, october, 2005.
- [2] Milutinovic, D., Glavonjic, M., **Zivanovic, S.**, Dimic, Z., Kvrjic, V., Mini educational 3-axis parallel kinematic milling machine, Proceedings of 3rd Interanational Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, pp. 463-474, Kallithea of Chalkidiki, Greece, 1-3 october, 2008.
- [3] Dimic, Z., **Zivanovic, S.**, Vasic, M., Cvijanovic, V., Krosnjak, A., Virtual Simulator for five axis vertical Turning Center in Python graphical Environment Integrated with Open Architecture Control System, 10th International Scientific Conference on Flexible Technologies - mma 2009, Proceedings, pp. 94-97, University of Novi Sad, Faculty of Technical Scienses, department for Production Engineering, Novi Sad, october 2009.

Радови објављени у домаћим часописима:

- [1] **Живановић, С.**, Испитивање и верификација геометрије и управљања машина алатки са паралелном кинематиком, Научно-стручни часопис Техничка Дијагностика, ISSN 1451-1975, стр. 55-60, Година IV, Број 1, 2005.

- [2] Главоњић, М., Милутиновић, Д., **Живановић, С.**, Показни центар за машине са паралелном кинематиком, Научно - стручни часопис iipr – Истраживања и пројектовања за привреду, стр. 29-34, 2005.
- [3] **Живановић, С.**, Пример испитивања радне тачности једне троосне паралелне машине, Научно-стручни часопис Техничка Дијагностика, ISSN 1451-1975, стр. 42-48, Година IV, Број 3, 2005.
- [4] Randelović, S., **Živanović, S.**, CAD-CAM Data Transfer as a Part of Product Life Cycle, Facta Universitatis, UDC 681.31: 65.012, Series: Mechanical Engineering Vol 5, No 1, 2007, pp. 87-96.
- [5] **Zivanovic, S.**, Glavonjic, M., Dimic, 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.

Радови саопштени на домаћим конференцијама у којима је Кандидат први аутор:

- [1] **Живановић, С.**, CAD/CAM програмирање p3 - паралелне машине алатке, 29. ЈУПИТЕР конференција, 16. симпозијум CAD/CAM, Зборник радова, стр. 2.83-2.86, Машински факултет, Београд, 2003.
- [2] **Живановић, С.**, Ивановић, Р., Симулације кинематике троосне паралелне машине, 6. Међународно савјетовање о достигнућима електро и машинске индустрије ДЕМИ 2003, Зборник радова, стр. 85-90, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука, 2003.
- [3] **Живановић, С.**, Могућа методологија конфигурисања машина алатки са паралелном кинематиком, 8. Међународна конференција Флексибилне технологије mma 2003, Зборник радова стр. 61-62, Нови Сад, 26-27. јун 2003.
- [4] **Живановић, С.**, Варијантност конфигурисања машина са паралелном кинематиком и праволинијским актуаторима, 30. ЈУПИТЕР конференција, Пленарна седница, 26. симпозијум НУ - Роботи - ФТС, Зборник радова, стр. 3.79-3.82, Машински факултет, Београд, 2004.
- [5] **Живановић, С.**, Ивановић, Р., Симулација кинематике троосне паралелне машине са трансаторно покретним актуаторима дуж Х осе, 7. Међународни научно-стручни скуп о достигнућима електро и машинске индустрије ДЕМИ 2005, Зборник радова, стр. 77-82, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука, мај, 2005.
- [6] **Живановић, С.**, Конфигурисање једне троосне машине са паралелном кинематиком, 30. Јубиларно саветовање производног машинства СЦГ са међународним учешћем, Зборник радова, ISBN 86-7776-009-1, стр.119-124, Технички факултет и Виша Техничка школа Чачак, Врњачка бања, септембар 2005.
- [7] **Живановић, С.**, Физички модел петоосне машине са паралелном кинематиком, 9. Међународна конференција Флексибилне технологије mma 2006, Зборник радова, ISBN 86-85211-96-4, стр. 57-58, Нови Сад, јун 2006.
- [8] **Живановић, С.**, Конфигурисање функционалних симулатора троосних машина са паралелном кинематиком, Истраживање и развој машинских елемената и система - ИРМЕС '06, Зборник радова, стр. 95-100, Машински факултет Бања Лука, септембар 2006.
- [9] **Живановић, С.**, Димић, З., Управљање модела троосне машине са паралелном кинематиком p101 на бази ЕМС системског софтвера, 33. ЈУПИТЕР конференција, 29. симпозијум НУ-Роботи-ФТС, Зборник радова, ISBN 978-86-7083-592-4, стр. 3.19-3.24, Машински факултет, Београд-Златибор, мај 2007.
- [10] **Живановић, С.**, Конфигурације механизма за градњу прототипа петоосне паралелне машине, 8. Међународни научно-стручни скуп о достигнућима електротехнике, машинства информатике ДЕМИ 2007, Зборник радова, стр.321-326, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Бања Лука, 25-26. мај, 2007.
- [11] **Живановић, С.**, Главоњић, М, Методологија функционалног конфигурисања нових машина алатки, 35. ЈУПИТЕР конференција, 31. симпозијум НУ-Роботи-ФТС, Зборник радова, ISBN 978-86-7083-666-2, стр. 3.1-3.7, Машински факултет, Београд, јун 2009.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације под називом “КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ” кандидата мр Саше Т. Живановића, дипл. инж. маш, Комисија за оцену и одбрану сматра да дисертација представља оригиналан научно-истраживачки рад из области производног машинства, у коме је аутор дао значајан допринос развоју метода за конфигурисање нових машина алатки, развоју система за нумеричко управљање машина алатки, као и решавању низа важних практичних проблема везаних за анализу, синтезу, интеграцију и тестирање приликом конфигурисања и израде једне стоне троосне машине алатке са паралелном кинематиком за потребе верификације предложене методологије конфигурисања нових машина алатки. 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.

Комисија за оцену и одбрану зато констатује да је кандидат мр Саша Т. Живановић, дипл. инж. маш. успешно завршио своју докторску дисертацију под називом “КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ” и предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, стави дисертацију на увид јавности и да закаже њену јавну одбрану када се за то стекну услови.

У Београду,
17. маја 2010. године

Чланови Комисије:

(др Милош Главоњић, редовни професор
Машинског факултета у Београду, ментор)

(др Љубодраг Тановић, редовни професор
Машинског факултета у Београду)

(др Павао Бојанић, редовни професор
Машинског факултета у Београду)

(др Драган Милутиновић, редовни професор
Машинског факултета у Београду)

(др Милан Зељковић, редовни професор
Факултета техничких наука у Новом Саду)