



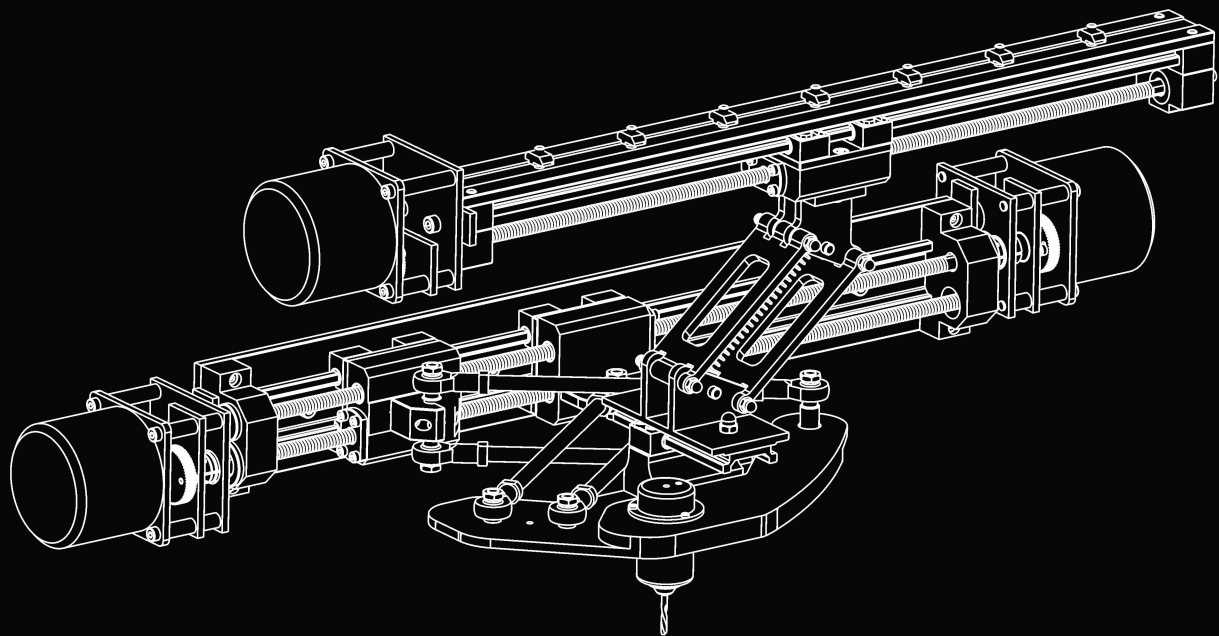
Универзитет у Београду
Машински факултет



мр Саша Т. Живановић

КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ

Докторска дисертација



Београд, 2010. године



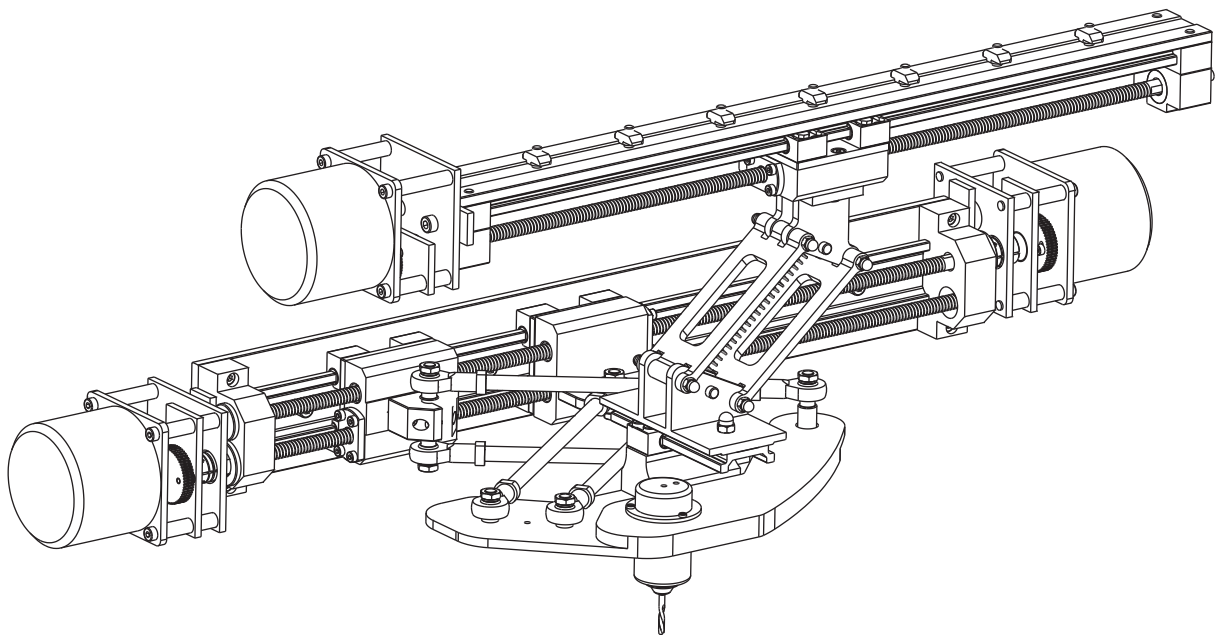
Универзитет у Београду
Машински факултет



мр Саша Т. Живановић

КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ

Докторска дисертација



Београд, 2010. године

Комисија за преглед и одбрану:
Ментор

Проф. др Милош Главоњић,
Машински факултет у Београду

Чланови Комисије:

Проф. др Љубодраг Тановић,
Машински факултет у Београду

Проф. др Павао Бојанић,
Машински факултет у Београду

Проф. др Драган Милутиновић,
Машински факултет у Београду

Проф. др Милан Зељковић,
ФТН Нови Сад

Датум одбране:

2010. године

Томиславу и Луки

Предговор

Ова дисертација представља резултат вишегодишњег истраживачког рада у области машина са паралелном кинематиком. Истраживања су спроведена кроз учешће у реализацији више пројеката током мог усавршавања уз рад на Катедри за производно машинство Машинског факултета у Београду. За успешну реализацију ових истраживања захваљујем се свим члановима Катедре за производно машинство.

Да би се учињене поставке, исказане у овој дисертацији, могле практично проверити ангажовани су ресурси побројани у прилогу 10.1. Највећи део је урађен на Катедри за производно машинство Машинског факултета у Београду. Ангажовани су и ресурси фирми као што су LOLA Sistem и LOLA Institut (др Владимир Квргић, Зоран Димић, Мирослав Васић, Драгољуб Јелић), као и CPS CAD Professional (др Милан Бојановић и Алекандар Мандић). У техници све зависи од ангажовања људи, па овим путем исказујем захвалност поменутиим колегама и фирмама за успешну сарадњу. Захваљујем се и свом пријатељу Дејану Лазаревићу на уложеном труду при лектурисању овог текста.

Посебну захвалност изражавам ментору проф. др Милошу Главоњићу, редовном професору Машинског факултета у Београду за савете, подстрек и усмеравање у току израде ове дисертације.

Желим да се захвалим професорима др Драгану Милутиновићу, др Љубодрагу Тановићу, др Павлу Бојанићу и др Милану Зељковићу на корисним саветима током израде ове дисертације.

Сваком човеку породица је највећи ослонац у животу. Супруга Данијела и син Лука су моја највећа подршка и инспирација која ми даје снагу да истрајем на животном путу. Родитељима, мајци Добрили и оцу Томиславу, дугујем неизмерну захвалност на брзи и подршци за све време мог научноистраживачког рада. Посебну захвалност дугујем мом покојном оцу, металостругару, који је за живота активно учествовао у изради и монтажи стоне троосне машине са паралелном кинематиком.

У Београду, април, 2010.

аутор
др Саша Живановић

САДРЖАЈ

1.	УВОД	1
2.	ИНТЕРПРЕТАЦИЈА МЕТОДА ЗА КОНФИГУРИСАЊЕ МАШИНА АЛАТКИ	8
2.1	ОСНОВНИ ПОЈМОВИ, ДЕФИНИЦИЈЕ И ОСОБИНЕ МАШИНА АЛАТКИ	8
2.2	АНАЛИЗА МЕТОДА ЗА КОНФИГУРИСАЊЕ	9
2.2.1	Дефиниција, класификација и особине конфигурисања	10
2.2.2	Модуларни приступ конфигурисању	12
2.2.3	Принцип фамилије и сличности у конфигурисању	15
2.2.4	Тор Down приступ конфигурисању	16
2.2.5	Примена веб окружења у конфигурисању	20
2.2.6	Функционално моделирање применом IDEF0 дијаграма	22
3.	НОВА МАШИНА АЛАТКА	26
3.1	ДЕФИНИЦИЈА НОВЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ	26
3.2	ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ НОВЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ	29
3.2.1	Машине са паралелном кинематиком	29
3.2.2	Реконфигурабилне машине алатке	34
4.	МЕТОДОЛОГИЈА КОНФИГУРИСАЊА НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ	36
4.1	ПРОЈЕКТОВАЊЕ МАШИНА АЛАТКИ ПРИМЕНОМ ВИРТУЕЛНИХ ПРОТОТИПОВА	37
4.2	НЕКЕ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ	39
4.2.1	Методологије конфигурисања машина са паралелном кинематиком	39
4.3	ПОСТАВКА КОНФИГУРИСАЊА НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ ..	42
5.	МЕТОДИ ИСПИТИВАЊА И ВЕРИФИКАЦИЈЕ НОВЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ	51
5.1	КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТОДА ИСПИТИВАЊА	52
5.2	РАЗВОЈНО ИСПИТИВАЊЕ	54
5.2.1	Систематизација пробних делова	56
5.2.2	Методологија развојног испитивања машина са паралелном кинематиком	61

6.	РАЗВОЈ СТОНЕ ТРООСНЕ МАШИНЕ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ	64
6.1	ФУНКЦИОНАЛНИ ЗАХТЕВИ ЗА ТРООСНУ МАШИНУ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ	66
6.2	ИНТЕРПРЕТАЦИЈА КОНФИГУРИСАЊА СТОНЕ ТРООСНЕ МАШИНЕ СА ПАРАЛЕЛНОМ КИНЕМАТИКОМ ПРИМЕНОМ IDEF0 МЕТОДОЛОГИЈЕ	67
6.3	ПРОЈЕКТНЕ АКТИВНОСТИ У КОНФИГУРИСАЊУ ВИРТУЕЛНОГ ПРОТОТИПА	71
6.3.1	Општи геометријски модел паралелног механизма pn101	73
6.3.2	Решење инверзне и директне кинематике	74
6.3.3	Јакобијан матрица и анализа сингуларитета	77
6.3.4	Избор основних параметара и почетна анализа радног простора паралелног механизма стоне машине pn101_st	80
6.3.5	Конфигурисање виртуелних прототипова	81
6.4	УПРАВЉАЊЕ И ПРОГРАМИРАЊЕ pn101_st	91
6.4.1	Управљање pn101_st	93
6.4.2	Програмирање pn101_st	98
6.4.3	Виртуелне стоне машине	101
6.5	ВЕРИФИКАЦИЈА ВИРТУЕЛНОГ ПРОТОТИПА СТОНЕ ТРООСНЕ МАШИНЕ	104
6.5.1	Симулације кинематике паралелног механизма pn101_st као система крутих тела	106
6.5.2	Завршна анализа радног простора паралелног механизма pn101_st	108
6.6	РЕАЛИЗАЦИЈА ПРВОГ ПРОТОТИПА И ПРОБНИ РАД СТОНЕ ТРООСНЕ МАШИНЕ pn101_st	110
6.6.1	Пробни рад стоне троосне машине са паралелном кинематиком	118
7.	ПРОГНОЗА ДАЉЕГ РАЗВОЈА МАШИНА АЛАТКИ	122
7.1	ИЗАЗОВИ ЗА РАЗВОЈ МАШИНА АЛАТКИ	123
7.2	ОЧЕКИВАНИ РАЗВОЈ МАШИНА АЛАТКИ	125
8.	ЗАКЉУЧАК	128
9.	ЛИТЕРАТУРА	132
10.	ПРИЛОГ	145
	БИОГРАФИЈА	146

КОНФИГУРИСАЊЕ НОВИХ МАШИНА АЛАТКИ

Апстракт

Основни предмет дисертације је нова машина алатка по основу своје концепције и конфигурације, метода којима је конфигурисана, метода за програмирање и процедура за испитивање и верификацију. Дате су дефиниције и класификације машине алатке, конфигурисања и нове машине алатке. Показане су и интерпретације неких од нових машина алатки, као и расположиви и новонастали ресурси током израде дисертације.

У конфигурисању нових машина алатки коришћени су следећи приступи за решавање овог проблема:

- модуларни приступ са својим еквивалентима за формализацију описивања конфигурација машина алатки,
- принцип фамилије и сличности за конфигурисање фамилије машина алатки,
- примена CAD/CAM/CAE окружења за конфигурисање и употреба веб интерфејса са овим окружењем као и коришћење стандардних и реализација специјалних CAD конфигуратора,
- функционлано моделирање машине алатке као система, применом *IDEFO (Integartion Definition For Function Modeling)* методологије, која је искоришћена за поставку и интерпретацију сопствене методологије конфигурисања нове машине алатке.

Овом дисертацијом се дају и примери обједињавања постојећих знања о машинама алаткама, потребних за поставку конфигуратора, а онда се и сам процес конфигурисања формално описује *IDEFO* методологијом. За успостављену методологију конфигурисања извршена је и њена верификација развојем једне стоне троосне машине са паралелном кинематиком према овој методологији, која је направљена, показана и верификована, као нова машина алатка. Реализована је као први прототип и као виртуелна машина алатка. Такође је размотрена и њена надоградња на петоосну хибридную варијанту додавањем двоосне главе, која је реализована на нивоу виртуелне машине алатке. Основни резултати ове дисертације су:

- методологија за конфигурисање нових машина алатки,
- виртуелне стоне машине и то једна троосна и једна хибридна петоосна,
- методологија развојног испитивања машина са паралелном кинематиком,
- развој едукационе стоне троосне машине са паралелном кинематиком.

Поменути резултати су представљени и у оквиру Показног центра за машине са паралелном кинематиком, чиме се оставља могућност отворености за размену искустава са другим истраживачким центрима и стицање нових знања потребних за даљи развој машина алатки, за едукацију и иновацију знања. Стоне троосна машина алатка је и потенцијално комерцијални нови нискобуџетни производ, намењен за тренинг и едукацију у високошколским установама, средњим школама и фабрикама.

Кључне речи: машина алатка, конфигурисање, конфигуратори, нова машина алатка, модуларност, виртуелни прототип машине алатке, машине са паралелном кинематиком, реконфигурабилне машине алатке, управљање и програмирање машина алатки, испитивање и верификација машина алатки

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

Configuring a new machine tool

Abstract

The subject of this dissertation is a new machine tool in its concept and configuration, configuring methods, programming methods and testing and verification procedures. The definitions and classification of machine tools, configuring and a new machine tool are given. Interpretations of a number of new machine tools, as well as available and emerging resources are shown in this dissertation as well.

For new machine tools configuring following approaches are used:

- Modular approach with its equivalents for formalization of machine tools configuring process description
- A principle of family and similarity for configuring a family of machine tools
- Application of CAD/CAM/CAE techniques for configuring and application of web interface together with these environments, as well as application of standard and realization of special CAD configurators
- Functional modeling of a machine tool as a system using IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) methodology which is exploited for setting and interpretation of own methodology for configuring a new machine tool.

This dissertation gives examples of merging existing knowledge about machine tools needed for configurator setting, and a configuration process itself is formally described using IDEF0 methodology. For established configuring methodology verification is carried out by development of a desk-top three axis parallel kinematics machine tool using given methodology - machine is made, shown and verified as a new machine tool. This machine is realized as the first prototype as well as a virtual machine tool. Its upgrade for five axis hybrid variant is considered, as well, by adding two axes head which is realized at the level of virtual machine tool. Basic results of this dissertation are:

- A methodology for configuring a new machine tool
- Virtual desk-top machine tools – one with three axes and another hybrid with five axes
- A methodology for developmental testing of parallel kinematics machine tools
- Development of educational desktop three axes parallel kinematics machine tool

Given results are presented within Demonstration center for parallel kinematics machine tools which gives the possibility for open exchange of experiences with other research centers and acquisition of new knowledge needed for further development of machine tools, education and knowledge innovation. Desk-top three axes machine tool is potential commercial new low-budget product dedicated for training and education in high education, high schools and factories.

Key words: machine tool, configuring, configurators, a new machine tool, modularity, virtual machine tool prototype, parallel kinematics machine tools, reconfigurable machine tools, machine tools control and programming, machine tools testing and verification.

Scientific discipline: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Production Engineering

НОМЕНКЛАТУРА

У оквиру рада су због краћег записивања коришћене скраћенице за увелико устаљене термине чија су значења дата у наставку.

ОБЈАШЊЕЊА СКРАЋЕНИЦА У ТЕКСТУ

<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CAM</i>	Computer Aided Manufacturing
<i>CAE</i>	Computer Aided Engineering
<i>CAPP</i>	Computer Aided Prosess Planning
<i>CNC (КНУ)</i>	Computer Numerical Control (Компјутерско Нумеричко управљање)
<i>CeNT (ЦеНТ)</i>	Центар за Нове Технологије
<i>CeMPK (ЦеМПК)</i>	Центар за машине са паралелном кинематиком
<i>DNC (ДНУ)</i>	Direct Numerical Control (Директно Нумеричко Управљање)
<i>CL</i>	Cutter Location
<i>EMC</i>	Enhanced Machine Control
<i>ERP</i>	Enterprise resource planning
<i>FTS</i>	Флексибилни технолошки систем
<i>GV</i>	Главно вретено
<i>GNU</i>	General Public License
<i>HAL</i>	Hardware Abstraction Layer
<i>HBG</i>	Хоризонтална бушилица глодалица
<i>HMC</i>	Horizontal Machining Center (Хоризонтални обрадни центар)
<i>HMS</i>	Holonic Manufacturing System (Холонски технолошки систем)
<i>IKP</i>	Инверзни кинематички проблем
<i>DKP</i>	Директни кинематички проблем
<i>IDEFO</i>	Integartion Definition For Function Modeling
<i>ICAM</i>	Integrated Computer Aided Manufacturing
<i>ICOM</i>	Input, Control, Output, Mechanism
<i>SADT</i>	Structured Analysis and Design
<i>IGES</i>	Initial Graphics Exchange Specification
<i>MKE</i>	Метод коначних елемената
<i>MPK</i>	Машина са паралелном кинематиком
<i>MA</i>	Машина алатка
<i>NC</i>	Numerical Control
<i>NAS</i>	National Aerospace Standard
<i>NCG</i>	NC-Gesellschaft Anwendung neuer Technologien
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology Национални институт за стандарде и технологију, САД)
<i>NUMA</i>	Нумерички управљане машине алатке
<i>NUMM</i>	Нумерички управљана мерна машина
<i>NS</i>	Носећа структура
<i>OC</i>	Обрадни центар
<i>PPA</i>	Погони, преносници и актуатори
<i>PU</i>	Програмирање и управљање
<i>RCS</i>	Real-time Control System
<i>RTS</i>	Реконфигурабили технолошки систем
<i>STEP</i>	Standard for the Exchange of Product model data
<i>SS</i>	Број степени слободе
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>PDM</i>	Product Data Management
<i>Pro/E</i>	Pro/Engineer
<i>BOM</i>	Bill of Materials
<i>UI</i>	Укључно-искључне операције

VRML Virtual Reality Modelling Language
ZMA Завод за машине алатке

СКРАЋЕНИЦЕ ЗА МЕХАНИЗМЕ И МАШИНЕ

$p3$	Функционални симулатор троосне машине са паралелном кинематиком
<i>PaKiCUT</i>	Parallel Kinematic CUTting (Функционални симулатор троосне машине са паралелном кинематиком)
$pn101$	Паралелни нови (pn) механизам, патент [27], пројекта 101
<i>LOLA pn101_4 V.1</i>	Индустријски прототип троосне машине са паралелном кинематиком на бази механизма $pn101$
$pn101_st V.1$	Паралелна нова машина, пројекта 101, стоне верзије 1 и 2
$pn101_st V.2$	(Стоне троосна машина са паралелном кинематиком)
$pn101_st 5D$	Паралелна нова машина, пројекта 101, стоне петоосна верзија (Стоне петоосна хибридна машина)

СПИСАК ОЗНАКА

ознака	јединица мере	објашњење
D_i	[mm]	пречник обраде
s_i	[mm/o]	корак
φ	-	фактори сличности
p_1, p_2, p_3	[mm]	транслаторна померања погонских оса паралелног механизма $pn101$
α	[°]	угао нагиба између праве на платформи које повезује осе зглобова са правцем X осе
R_1, R_2, R_3		референтне тачке погонских оса p_1, p_2, p_3 , респективно, паралелног механизма $pn101$
x_{R1}, x_{R2}, x_{R3}	[mm]	положај референтних тачака клизача p_1, p_2, p_3 , респективно по X осе
x_{TP}, y_{TP}, z_{TP}	[mm]	параметар положаја GV по осам X, Y, Z , респективно
X_B, Y_B, Z_B		{B} координатни систем базе машине
X_P, Y_P, Z_P		{P} координатни систем покретне платформе
x_T, y_T, z_T	[mm]	координате врха алата (тачке T)
c_1, c_2	[mm]	дужине спојки паралелног механизма $pn101$
c_3	[mm]	параметар дужине обртних спојки транслаторно обртног зглоба
d	[mm]	параметар на клизачу p_2
c_4, c_{41}	[mm]	параметри на платформи ($c_4 = c_{41} \cos \alpha$)
x_{p3}, y_{p3}, z_{p3}	[mm]	параметар положаја пасивног транслаторног зглоба на платформи по све три координатне осе
X, Y, Z	[mm]	ознаке транслаторних координатних оса
A, B, C	[°]	ознаке обртних координатних оса



УВОД

Предмет дисертације је обрадни систем са новом машином алатком, која је конфигурирана применом савремених метода, уз употребу искуствених постојећих и нових стечених знања. За пројектовање, градњу и примену оваквих нових машина већ сада се зна да се морају имати људи са сасвим новим знањима, нове компоненте за градњу, нови системи за програмирање, нови корисници за подршку даљег развоја и нови технолошки систем за исказивање перформанси таквих машина, претпостављајући да се зна који су то производи, за које је то потребно и да ће ти производи неке сада или касније бити потребни. Свакако је могуће да водећи произвођачи машина алатки у програмима свог развоја увек имају и нове прототипове како би, пре других, стекли потребна искуства и кренули са серијском производњом брже од конкуренције.

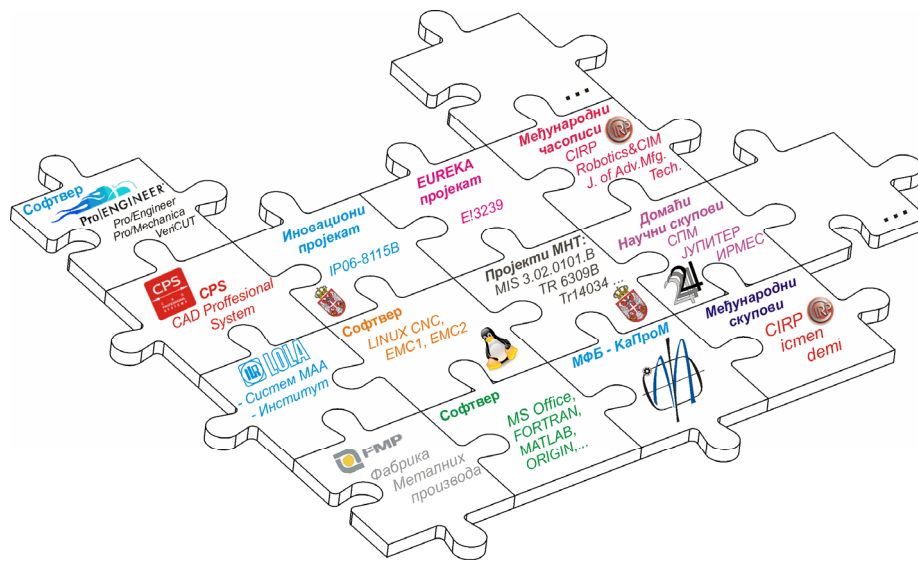
Машина алатка је ресурс који је направио човек, вештином, знањем и свешћу да се то може и боље. Тако су се кроз историју смењивале генерације нових машина алатки. Овом дисертацијом се разматрају активни програми у производном машинству који су искоришћени као подлога за њену поставку. Намеће се питање шта је то машина алатка, каква је њена структура, има ли метода за њену градњу и њено усавршавање? Одговори на ова питања су дати у поглављу 2. Ова дисертација је намењена бољем тумачењу структура и поступака конфигурисања нових машина алатки у рачунарском пројектантском окружењу.

Управљање и програмирање машина алатки по традицији компјутерског нумеричког управљања данас се може сматрати довољно стандардизованом и/или типизираним вештином коју покрива већи број специјализованих произвођача компонената. Истраживачима и даље остаје стални изазов да се машине алатке све више приближе мехатронским конфигурацијама. Непрекидна минијатуризација најизазовнијих производа непрекидно подстиче имплементацију нових процеса, а тиме и машина за реализацију тих технологија. Последица тога је појава машина алатки сасвим нових концепција, величина и перформанси за које се није довољно проширило знање и/или искуство у конципирању, пројектовању, изради, експлоатацији и оптимизацији. Сопствена индустрија неке од тих обрадних система и не фаворизује, па се тако још теже стичу знања о новим машинама са којима се свакако мора рачунати.

Машине алатке имају дугу традицију. Оне су постале основ индустријске револуције пре два века. Тада их нису правили инжењери инжењерским методима. Доступне вештине коришћене су да се машине конципирају и усавршавају емпиријски. Променљивост и/или иновирање процеса и производних програма узајамно се нису подстицали у великом интензитету. Да је тада било управљања у већој мери, било би и адекватнијих модела машина алатки, а они би тражили већа знања. Механизми у машинама алаткама дуго су били типизирани: серијски клизни спојеви са замрзавањем геометрије машине приликом њене израде и/или монтаже. Сада се већ користе разне процедуре калибрације, компензације и њима сличне, а користе се све више. Оне подразумевају мерења, испитивања и израчунавања, односно, моделе и управљање. Један од дуже времена актуелних предмета истраживања су машине са паралелном кинематиком [61] као изазов за пројектанте, произвођаче, технологе и истраживаче. На њима се може уочити недостатак процедура за развој машина алатки тог типа. Ради тога се користе знања о индустријским роботима, механизмима, управљању и из других сличних дисциплина. Могу се уочити и појединачне школе које су створене око оваквих машина. Реконфигурабилне машине [67] су један други актуелни предмет истраживања. Он може да

подстакне обогаћивање знања о модуларним машинама, о фамилијама машина алатки, о морфолошкој анализи и синтези машина и обрадних система и о технолошким системима. Често се говори и о специфичним технолошким решењима у класичним методима обраде. На пример: обрада великим брзинама резања, обрада без хлађења, израда алата и калупа применом ефикасних стратегија обраде, примена брзоходних преносника за помоћна кретања, примена котрљајних вођица за које је специфично мало пригушење, специфично инсталисање машина да се смање улагања у темељ и/или обезбеди померљивост машине итд. И у овим случајевима потребно је иновирати методе програмирања, управљања, испитивања, димензионисања, али и самог конципирања и конфигурисања. По овоме се могу поставити следеће полазне основе дисертације:

- Постојање пројеката на Катедри за производно машинство Машинског факултета у Београду који могу подстаћи истраживачки и експериментални рад (слика 1.1) и који се користе као експериментална база за истраживања у дисертацији.
- Постојање комуникације и отвореност за сарадњу са истраживачким центрима у земљи и свету, што треба да помогне у одржавању актуелности истраживања (слика 1.1).



Учешће на пројектима током израде ове дисертације:

MIS 3.02.0101.B Троосне паралелне машине, домаћи, технолошки развој (2002-2004)	EI3239 Развој уређаја са паралелном кинематиком за интеграцију са троосним обрадним центром за вишеосне процесе обраде резањем, међународни, ЕУРЕКА пројекат (2004-2005)
TR 6309B Петоосне паралелне машине, домаћи, технолошки развој (2005-2007)	IP06-8115B Функционални симулатор троосних машина са паралелном кинематиком, домаћи, иновациони пројекат (2006)
TR14034 Развој технологија вишеосне обраде сложених алата за потребе домаће индустрије, домаћи, технолошки развој (2008 - 2010)	

Слика 1.1 Кооперација пројеката, софтвера, фирми и презентације резултата

- Доступност велике количине информација путем Интернета може помоћи да се оформи и користи литература као сопствена база знања на основу тог масива података.
- Постојање искустава у испитивању и програмирању машина алатки са серијском и паралелном кинематиком.

Полазне хипотезе дисертације:

- Поставка појма конфигурисања у области машина алатки и нове машине алатке.
- Примена модуларних система, принципа фамилије и теорије сличности у конфигурисању машина алатки.
- Поставка интегрисане методологије конфигурисања нових машина алатки на бази њене интерпретације као виртуелног прототипа у CAD/CAM/CAE окружењу и верификација на изабраном примеру једне нове машине алатке.

- Реализација отвореног система управљања на виртуелним машинама и на једном физички реализованом прототипу стоне троосне машине са паралелном кинематиком, као једном представнику нових машина алатки.
- Да се резултати дисертације уврсте у садржај матичне школе, односно Показног центра за машине са паралелном кинематиком и да се први резултати искористе у едукацији и/или иновацији знања.

Један од репера за процену актуелности поставки ове дисертације су реализовани домаћи и међународни пројекти (слика 1.1), као и радови у водећим међународним часописима (као што су [124], [125], [148] и [206]).

На основу увида у постојећа истраживања може се рећи да је још увек актуелан приступ интегрисане методологије за конфигурисање нових машина алатки на бази њене интерпретације као виртуелног прототипа [103]. Овим истраживањима се баве научно истраживачки центри као што су: Институт за индустријске технологије и аутоматизацију у Милану (*CNR*, Италија), Универзитет у Мичигену (САД), а код нас универзитети у Београду и Новом Саду.

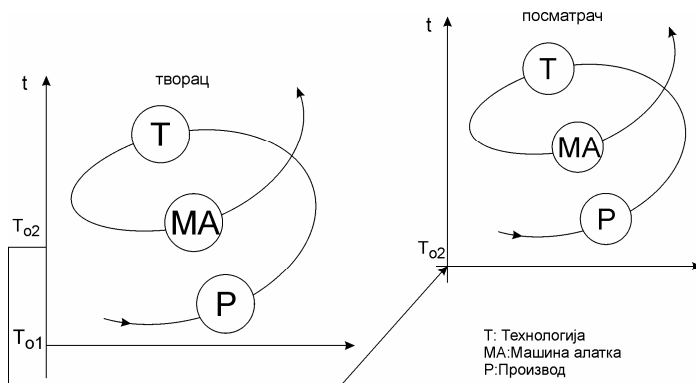
Овом дисертацијом су остварени следећи планирани циљеви:

- Савремена интерпретација постојећих метода и процедура за развој машина алатки.
- Примена модерних метода за конфигурисање нове машине алатке.
- Развој методологије за конфигурисање или конфигуратора машина алатки, посебно нових машина алатки.
- Избор погодних постојећих алата за пројектовање машина и примена у конструисању, изради и испитивању машина алатки и обрадних система у целини.
- Анализа метода за испитивање машина алатки, посебно машина нове генерације и оснивање процедура за испитивање и верификацију нове машине алатке.
- План имплементације добијених резултата у наставу предмета Машине алатке и предмета Машине алатке и работи нове генерације.
- Формирање прогнозе даљег развоја машина алатки када израда дисертације буде у завршној фази. Главни део те прогнозе треба да обухвати програмирање и управљање будућих машина алатки и њихов рад у мрежи са другим технолошким ресурсима.

За решавање постављеног проблема и интерпретацију активности током конфигурисања нових машина алатки у дисертацији је коришћено:

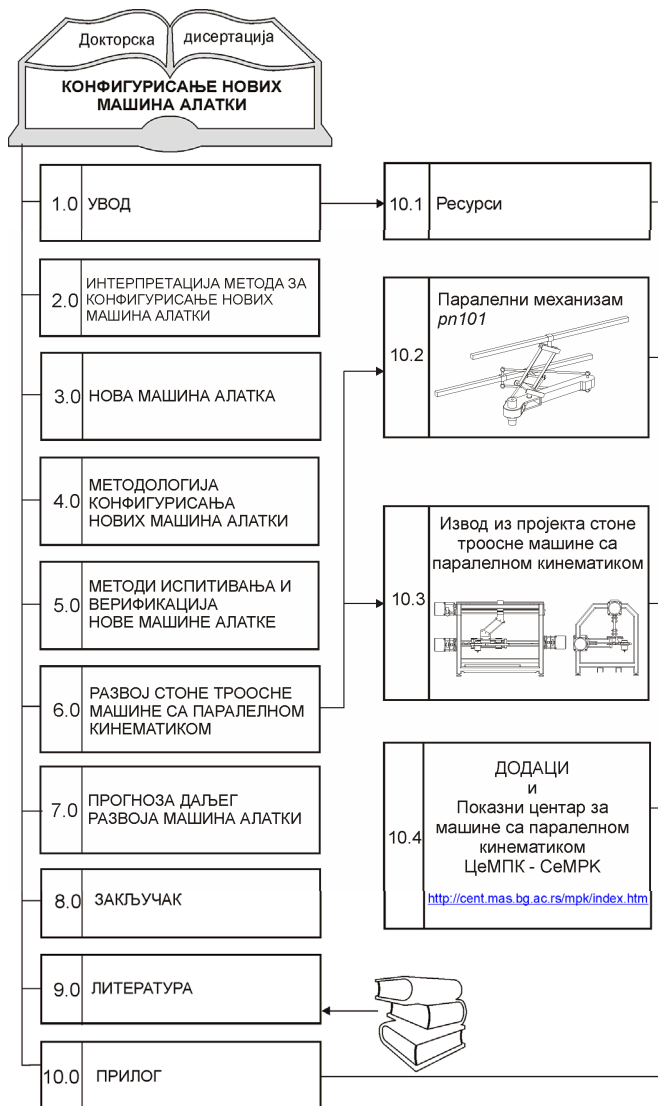
- CAD/CAM/CAE окружење за конципирање, пројектовање, конструисање, програмирање, симулације и испитивање машина алатки.
- Статика, кинематика и динамика и интерпретација ових научних дисциплина у науци о индустријским роботима погодна за димензионисање једне нове машине алатке.
- Знања из Индустријских робота погодна за решавање кинематичких проблема вишеосних машина алатки, као што су машине алатке са паралелном кинематиком и хибридном кинематиком.
- Теорија сличности и принцип фамилије за анализу и синтезу фамилија машина алатки.
- Апликације у оружењу разних инжењерских алата за конципирање, израду, програмирање и испитивање машина алатки.
- Управљање на бази софтвера отворене архитектуре у реалном времену.

За описивање концепција машина алатки често се користи тројка (P;T;MA), којом се интерпретира спирала развоја у индустрији [85], где је P-производ, T-технологија потребна за тај производ и MA – машина алатка за ту технологију и тај и сличне производе. И на спирали развоја се појављују у овом редоследу, слика 1.2. Производ иницира технологију, а технологија активира ресурсе машина алатки и тако редом. Ако је нека средина водећа у тројци (P;T;MA) онда се она сматра творцем и њен развој почиње у глобалном времену $t = T_{01}$. Друге средине су посматрачи и оне покушавају да направе реплику те тројке у глобалном времену $t = T_{02}$ са кашњењем у праћењу. Водећа средина диктира будући развој, што може да се формира и као патент, чијом се инкубацијом припрема средина за почињање неке нове иновације.



Слика 1.2 Творци и посматрачи на спирали развоја [85]

сопствених ангажовања неке тројке (P;T;MA), уважавајући своје потребе и традицију, с циљем да време $t = T_{02}$ учине довољно малим, да би били актуелни, а један од начина за то је сопствена едукација ради разумевања и праћења таквог развоја. И ова дисертација је покушај смањивања времена праћења и одржавања актуелности истраживања у домаћим условима.



Слика 1.3 Структура дисертације

Будући развој је подложен сталном усавањању, па средине посматрачи упадају у замку сопственог развоја, преко дозирања генерација тројке (P;T;MA), присиљене да прате тај развој одржавајући или чак смањујући кашњење које је постојало на почетку праћења. Тако постоје генерације оперативних система, генерације рачунара, генерације софтвера за пројектовање, па и генерације машина алатки и индустријских робота. Посматрачи су увек у дилеми о ваљаности и обиму

У дисертацији се машина алатка интерпретира као систем од бар три њена подсистема као што су: носећа структура (NS), погони, преносници и актуатори (PPA) и програмирање и управљање (PU). За машину се успоставља систем модела, од почетних идеја скелетон, кинематичких до виртуелних модела комплетне машине, који треба да омогући испитивање и верификацију машине у дигиталном рачунарском облику. По завршеном испитивању циљ је да виртуелна машина алатка постане и направљена и да се експлоатацијом провери да ли може бити прихваћена као нова машина алатка. Ако може онда она улази у употребу и заузима своје место у спирали развоја.

Структура ове дисертације је показана на слици 1.3. Основна поглавља су дата у првом нивоу структуре, а прилози са везама у следећем нивоу.

После уводног првог поглавља, у другом поглављу је најпре објашњен појам машине алатке, дата класификација и њена основна структура. У наставку је дефинисан појам конфигурисања машина алатки, дата класификација и особине. Да би се приступило конфигурисању представљени су неки од могућих метода за решавање овог проблема као што су: модуларни концепт и у оквиру

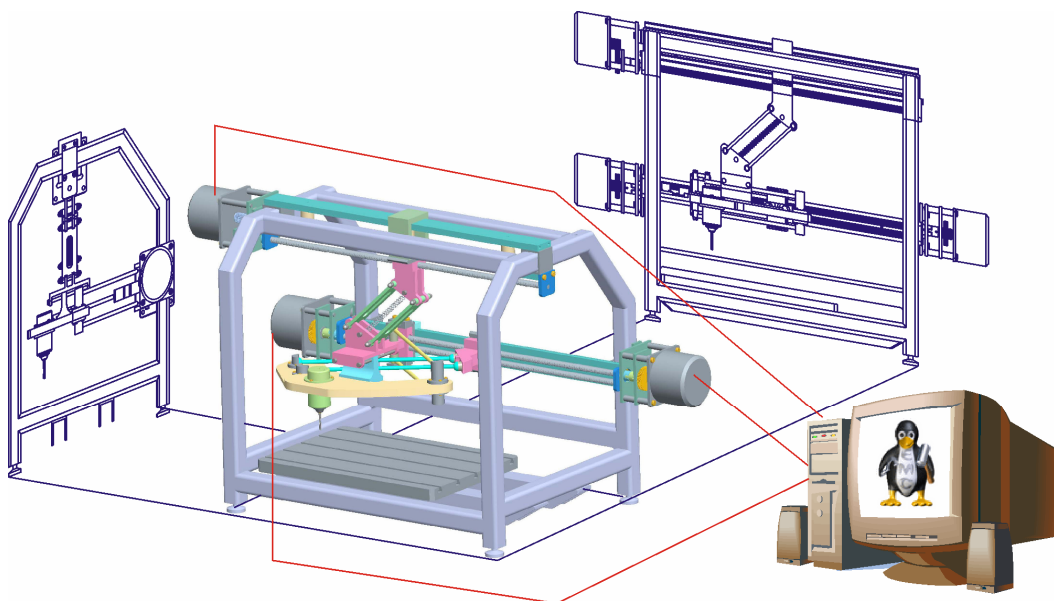
њега морфолошке матрице и метод графова за интерпретацију; концепт класичног хијерархијског приступа пројектовању и конфигурисању "одоздо на горе" (*Bottom-Up*) и новијег приступа пројектовању "одозго на доле" (*Top-Down*). Разматрана је и примена веб интерфејса у конфигурисању као и примена веб конфигуратора компонената. За потребе решавања проблема описа интегрисане методологије за конфигурисање анализирана је методологија функционалног моделирања система применом *IDEF0* дијаграма.

У трећем поглављу су показане неке од интерпретација нове машине алатке, дефиниције, особине, класификација и основ по коме је разматрана машина нова. Детаљније се разматрају машине, које су у дисертацији коришћене за поставку и проверу методологије конфигурисања, као што су машине са паралелном (и хибридном) кинематиком, реконфигурабилне машине алатке, мултифункционалне машине алатке и интелигентне машине алатке.

У четвртном поглављу се анализира тренутно стање истраживања и неопходних знања потребних за поставку могуће методологије конфигурисања нових машина алатки у циљу обједињавања потребних знања о конфигурисању неопходних за поставку методологије конфигурисања, а онда се и сам процес конфигурисања формално описује применом *IDEF0* дијаграма.

У петом поглављу је дат опис метода испитивања и верификације нове машине алатке, као значајних активности у методологији конфигурисања постављеној у поглављу 4. Основ за издвајање ових активности у посебно поглавље може да буде прво сусретање са стварном машином алатком у низу активности које су претходиле њеном настајању, јер је до тада она била на нивоу виртуелног прототипа. После завршеног конфигурисања и реализације машине алатке, њеним испитивањем и верификацијом се проверава да ли она задовољава услове да буде нова машина алатка.

У шестом поглављу је проверена поставка методологије и приступа конфигурисању нових машина алатки на примеру развоја едукационе стоне троосне машине са паралелном кинематиком (слика 1.4), која је по дефиницији нова по основу оса морфолошког простора (кинематике), по основу очекиваних праваца развоја (нискобуџетна машина) и направљена је и показана у бар једном примерку. За потребе конфигурисања и израде стоне троосне машине са паралелном кинематиком ангажовани су ресурси побројани у прилогу 10.1. Машина има радни назив *pn101_st*, где се први део назива *pn101*, односи се на примењени патентирани паралелни механизам [27], а други, *_st* означава почетна слова од стона. Концепција примењеног паралелног механизма је основни улаз за конфигурисање једне овакве машине алатке. О самом паралелном механизму *pn101* детаљније у прилогу 10.2. У овом поглављу је представљена интерпретација конфигурисања стоне троосне машине са паралелном кинематиком применом *IDEF0* методологије, према поставци која је дата у поглављу 4.2.



Слика 1.4 Стоне троосна машина са паралелном кинематиком *pn101_st*

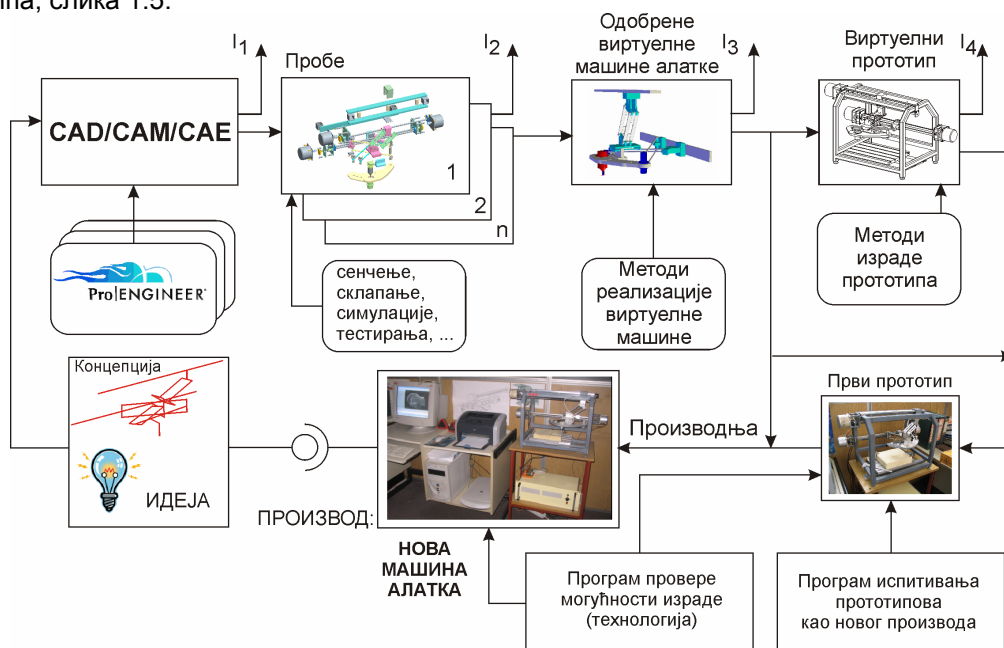
Стана троосна машина са паралелном кинематиком *pn101_st* има три осе: X, Y и Z. Покретањем три клизача који су помоћу два пара спојки и пасивног транслаторно обртног зглоба повезани са покретаном платформом, остварује троосно померање платформе, која при кретању остаје паралелна сама себи, задржавајући константну оријентацију алата. Извод из пројекта стоне троосне машине са паралелном кинематиком дат је у прилогу 10.3.

За потребе машине *pn101_st*, конфигуриран је систем управљања на бази софтвера отворене архитектуре *EMC (Enhanced Machine Control)*, који ради под Linux оперативним системом у реалном времену (поглавље 6.4). За потребе провере и симулација извршено је програмирање виртуелне машине у *Python* програмском језику, за троосну и хибридно петоосну варијанту основне конфигурације машине *pn101_st*. Повезивањем виртуелне машине алатке са управљачким језгром *EMC* софтвера комплетирано је виртуелно графичко окружење за програмирање, управљање и симулацију. Рад у виртуелном окружењу је погодан и са аспекта обуке и едукације за програмирање оваквих обрадних система, поготову у домаћим условима где постоји реалан недостатак савремених машина алатки. На овај начин и без постојања физичких ресурса нових машина, могуће је припремити будуће кориснике за рад са њима када им машине буду доступне.

У седмом поглављу дата је технолошка перспектива машина алатки и прогноза њиховог даљег развоја кроз прогнозе развоја технологија. У Европи је активна платформа *MANUFUTURE (The Technology Platform on Future Manufacturing Technologies)* [178], која је основана као међународна иницијатива за предлагање, развој и примену стратегије убрзавања кључних индустрија на бази истраживања и иновирања. Платформе се оснивају на основу неких истраживања и формираних прогноза развоја технологија, као што је на пример још увек актуелна прогноза *Visionary Manufacturing Challenges for 2020* [179].

У будућности машине алатке очекују два основна изазова. Први се односи на појединачну машину алатку као део обрадног система и могућностима за њено иновирање. Овде се пре свега мисли на иновацију њеног управљања и програмирања, што је већ и започето пројектима *STEP-NC* [171] и *OSACA* [177]. Други изазов се односи на машине алатке, као део неког технолошког система, где се посматра могућност унапређења рада машина алатки у групи, било да граде сталне системе на једном месту, или дислоциране по целом свету, али повезане одговарајућом мрежом, која их чини делом неког технолошког система.

Ако у процесу конфигурисања нових машина алатки постоје активне идеје са испољеним особинама редуванности, најбоље је да се то односи на виртуелне ресурсе као што су *CAD/CAM/CAE* технике, кадре да формирану идеју на разне начине доведу до виртуелног прототипа, слика 1.5.



Слика 1.5 Једна интерпретација мреже ресурса за конфигурисање нове машине алатке

Суштина је да се што касније искористи неки од могућих излаза (I_1, I_2, I_3, I_4). Тиме се стварају услови за старење идеје и њене реализације у довољној мери да се може реализовати као први прототип или производ од прве [11].

У позадини мреже ресурса са слике 1.5, јесте вештина симултаног инжењерства, која испољава високу технолошку професионалност и која може неуком посматрачу створити овакву дилему: ако је виртуелни прототип довољан за довршавање развоја једне идеје, да ли је потребно имати допунску грану на слици 1.5 за израду физичких прототипова и њихову верификацију? Послови у конфигурисању су активности са слике 1.5 при чему се ова структура може сматрати холонском јер су њени холони доведени до радно способног стања и да се као ресурси разних намена, могу упаривати у систем када је то потребно, као делови једне целине (о холонима укратко у поглављу 7.2). Очекује се да посленици оваквих система умеју да виде те целине, иако их не стварају за стално, зато што их посматрају као еквивалент идеји коју реализују и коју, по претпоставци, познају као целину. У свим холонима сажето је све неопходно знање од кога је могуће стварати ново, радећи симултано са другима и бити отворен за сарадњу и кооперацију. У дисертацији је разматрано више примера и различитих конфигурација виртуелних прототипова и виртуелних машина, од којих је један дошао и до физичке реализације градњом првог прототипа стоне троосне машине са паралелном кинематиком, са реализованим програмом испитивања, док су остали искористили неки од расположивих излаза (I_1, I_2, I_3, I_4), чекајући сазревање те конфигурације до њене реализације.

Основни резултати ове дисертације су:

- методологија за конфигурисање нових машина алатки,
- виртуелне стоне машине и то једна троосна и једна хибридна петоосна,
- методологија развојног испитивања машина са паралелном кинематиком,
- развој едукационе стоне троосне машине са паралелном кинематиком.

Неки од резултата дисертације су представљени и у оквиру Показног центра за машине са паралелном кинематиком (прилог 10.4), чиме се оставља могућност отворености за размену искустава са другим истраживачким центрима и стицање нових знања потребних за даљи развој машина алатки, за едукацију и иновацију знања. Стоне троосна машина алатка је и потенцијално комерцијални нови нискобуџетни производ, намењен за тренинг и едукацију у високошколским установама, средњим школама и фабрикама.

Биографија

Општи подаци:

Име и презиме:	САША Т. ЖИВАНОВИЋ
Датум и место рођења:	10. децембар 1969., Параћин
Породично стање:	Ожењен, супруга Данијела, син Лука
Садашња позиција:	Асистент на Машинском факултету у Београду



Образовање:

1989-1995	Студије на Машинском факултету у Београду, одсек Производно машинство
17.2.1995.	Одбрањен дипломски рад на тему: <i>Методи конципирања флексибилног технолошког модула.</i> Дипломирани инжењер
1995-1997.	Последипломске студије (магистарске) на Машинском факултету у Београду
24.7.2000.	Одбрањена магистарска теза под насловом: <i>Технолошки модул са паралелним механизмом.</i> Магистар техничких наука

Професионално искуство:

1995-2000	Асистент-приправник, Машински факултет, Универзитет у Београду
2000 -	Асистент, Машински факултет, Универзитет у Београду

Наставне области, предмети:

1995 -	Машине алатке, Машине алатке и роботи нове генерације, Технологија машиноградње, Технологија бродоградње, Индустијски роботи, Пројектовање обрадних система, Производни системи
---------------	---

Истраживачки рад:

Као истраживач био је укључен у већи број домаћих и међународних пројеката у области: производног машинства, индустријских робота, машина са паралелном кинематиком, флексибилних технолошких система, CAD/CAM. Објавио је преко 55 референци у домаћим и међународним часописима као и на домаћим и међународним научним скуповима, које је са успехом саопштио пред широм стручном јавношћу.



Универзитет у Београду
Машински факултет
Краљице Марије 16,
11120 Београд