

**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem  
**40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE**  
with foreign participants

# **ZBORNIK RADOVA** **PROCEEDINGS**



**UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

**UNIVERSITY OF BELGRADE**  
**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Beograd, maj 2016.

## **40. JUPITER KONFERENCIJA**

# **ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS**



33. simpozijum  
**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG  
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA**

27. simpozijum  
**CAD/CAM**

36. simpozijum  
**NU – ROBOTI –FTS**

42. simpozijum  
**UPRAVLJANJE PROIZVODNOM U  
INDUSTRIJI PRERADE METALA**

20. simpozijum  
**MENADŽMENT KVALITETOM**

Organizator:

**UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

Beograd, maj 2016. godine

## **40. JUPITER KONFERENCIJA**

### **ZBORNIK RADOVA**

Organizator:

**UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

Adresa:

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Tel: 011-3370341, Fax: 011-3370364

**El. pošta: [jupiter@mas.bg.ac.rs](mailto:jupiter@mas.bg.ac.rs)**

Odobreno za štampu odlukom Dekana  
br. 05/16 od 15.04.2016.

Tehnički urednici:

Prof. dr Bojan Babić

Prof. dr Saša Živanović

Beograd, maj 2016.

---

Tiraž: 150 primeraka

Štampa: **Planeta print**,

11000 Beograd, Igora Vasiljeva 33r, tel.: 011 650 6564

**ISBN 978-86-7083-893-2**

## 40. JUPITER KONFERENCIJA

### PROGRAMSKI I NAUČNI ODBOR

#### **Predsednik:**

**Prof. dr Dragan Milutinović**, Mašinski fakultet Beograd

**Članovi:** Prof. dr Slavko Arsovski, MF Kragujevac • Prof. dr Bojan Babić, MF Beograd • Prof. dr Božica Bojović, MF Beograd • mr Goran Vujačić, VŽŠ Beograd • Prof. dr Miloš Glavonjić, MF Beograd • Prof. dr Saša Živanović, MF Beograd • Prof. dr Milan Zeljković, FTN Novi Sad • Prof. dr Milisav Kalajdžić, MF Beograd • dr Vladimir Kvrđić, LOLA Institut Beograd • Prof. dr Pavel Kovač, FTN Novi Sad • Prof. dr Miodrag Lazić, MF Kragujevac • Prof. dr Ljubomir Lukić, MF Kraljevo • Prof. dr Živana Jakovljević, MF Beograd • Prof. dr Vidosav Majstorović, MF Beograd • Prof. dr Vladimir Milačić, MF Beograd • Prof. dr Pavao Bojanić MF Beograd • Prof. dr Milorad Milovančević, MF Beograd • Prof. dr Zoran Miljković, MF Beograd • Prof. dr Bogdan Nedić, MF Kragujevac • Prof. dr Petar Petrović, MF Beograd • Prof. dr Miroslav Pilipović, MF Beograd • Prof. dr Radovan Puzović, MF Beograd • Prof. dr Slobodan Tabaković, FTN Novi Sad • Prof. Dr Zoran Radojević, FON Beograd • Prof. dr Žarko Spasić, MF Beograd • Prof. dr Ljubodrag Tanović, MF Beograd • Prof. dr Velimir Todić, FTN Novi Sad • Prof. dr Miroslav Trajanović, MF Niš • Prof. dr Saša Randelović, MF Niš • Prof. dr Ilija Ćosić, FTN Novi Sad • dr Nebojša Čović, Beograd • Prof. dr Emilia Assenova (Bugarska) • Prof. dr Vladimir I Averchenkov (Rusija) • Prof. dr Nikolai I. Bobir (Ukrajina) • Prof. dr Konstantin D. Bouzakis (Grčka) • Prof. dr Miodrag Bulatović (Crna Gora) • Prof. dr Radomir Vukasojević (Crna Gora) • Prof. dr Milan Vukčević (Crna Gora) • Prof. dr Dušan Golubović (BiH) • Prof. dr Doina Dragulescu (Rumunija) • Prof. dr Kornel Ehmann (SAD) • Prof. dr Alexander Janac (Slovačka) • Prof. dr Vid Jovišević (BiH) • Prof. dr Michael I Kheifetz (Belorusija) • Prof. dr Sergey A. Klimenko (Ukrajina) • Prof. dr Radovan Kovačević (SAD) • Prof. dr Andrey A. Kutin (Rusija) • Prof. dr Peter P. Melnichuk (Ukrajina) • Prof. dr Nicolae Negut (Rumunija) • Prof. dr Stanislaw Pytko (Poljska) • Prof. dr Sreten Savićević (Crna Gora) • Prof. dr Mirko Soković (Slovenija) • Prof. dr Victor K. Starkov (Rusija)

### ORGANIZACIONI ODBOR

#### **Predsednik:**

**Prof. dr Bojan Babić**, Mašinski fakultet Beograd

#### **Sekretar:**

Prof. dr Saša Živanović, Mašinski fakultet Beograd

#### **Članovi:**

Doc. dr Branko Kokotović, MF Beograd • Doc. dr Nikola Slavković, MF Beograd • Asist. dr Goran Mladenović, MF Beograd • Dr Mihajlo Popović, MF Beograd • Asist. dr Slavenko Stojadinović, MF Beograd • Asist. Milica Petrović, MF Beograd • Asist. Jelena Petronijević, MF Beograd • Asist. Miloš Pjević, MF Beograd



## **ZAHVALNICA**

Organizacioni odbor **40. JUPITER KONFERENCIJE** se najsrdačnije zahvaljuje svim institucijama i pojedincima koji su ličnim angažovanjem i konstruktivnim delovanjem pomogli u organizovanju ove konferencije.

Posebno se zahvaljujemo pokrovitelju:

**Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja  
Vlade Republike Srbije**

## **PREDGOVOR**

JUPITER Konferencija prikazuje značajne rezultate istraživanja ostvarene u prethodne dve godine. Ovogodišnja XL JUPITER Konferencija je prilika da se sagledaju trendovi u domenu nauke, obrazovanja i industrije u Republici Srbiji i njihova kompatibilnost sa Strategijom obrazovanja i Strategijom industrijskog razvoja do 2020. godine.

Centar za nove tehnologije - naučni i tehnološki poligon za generisanje novih ideja, koncepta i proizvoda u narednom periodu treba da postane jedan od nosioca stvaranja tehnoloških platformi Republike Srbije. Posebna pažnja će biti usmerena ka međunarodnim projektima i povezivanju sa relevantnim naučnim institucijama u svetu.

Na Konferenciji će biti izloženo 30 radova autora iz Srbije i inostranstva.

Ministarstvo prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije je finansijskom podrškom omogućilo organizovanje ove konferencije kao podršku naporima za unapređenje obrazovanja i nauke u oblasti proizvodnog mašinstva.

U ime organizacionog odbora posebno se zahvaljujem svim domaćim i stranim autorima, kao i članovima recenzentskog tima na izvršenim recenzijama.

Dobro došli na XL JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 17. maj 2016.

Prof.dr Bojan Babić

Izaberite simpozijum JUPITER Konferencije

**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA  
INDUSTRIJE PRERADE METALA**  
CIM IN THE STRATEGY OF TECHNOLOGICAL  
DEVELOPMENT OF METALWORKING INDUSTRY

**CAD/CAM**

**NU – ROBOTI –FTS**  
NC - ROBOTS – FMS

**UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI  
PRERADE METALA**  
PRODUCTION CONTROL IN METALWORKING INDUSTRY

**MENADŽMENT KVALITETOM**  
QUALITY

---

Spisak svih radova na JUPITER Konferenciji  
po prezimenu prvog autora

<b>Antić, A., Zeljković, M., Milošević, M.</b> METODE IZDVAJANJA OBELEŽJA U SISTEMU ZA NADZOR ALATA PRI OBRADI TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA.....	3.1
<b>Baralić, J., Nedić, B.</b> GEOMETRIJA REZA PRI OBRADI ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM .....	3.6
<b>Bracanović, Z., Petrović, V., Grozdanić, B., Borak, Đ.</b> UTICAJI DOLAZNIH I ODLAZNIH PROCESA NA RAZVOJ KONKURENTSKE PREDNOSTI PREDUZEĆA.....	4.44
<b>Dimić, Z., Milutinović, D., Živanović, S., Mitrović, S.</b> METOD KONFIGURISANJA UPRAVLJAČKOG SISTEMA OTVORENE ARHITEKTURE REKONFIGURABILNOG ROBOTA ZA OBRADU .....	3.12
<b>Drndarević, D., Milivojević, M.</b> MODELLING WITH BACKPROPAGATION ALGORITHM.....	1.1
<b>Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Milićević, I.</b> OPTIMIZACIJA SISTEMA LIVENJA NOSAČA ZUBA BAGERA VEDRIČARA.....	2.1
<b>Đurašković, D., Janjić, M., Vukčević, M.</b> MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA PLOČA OD LAMINIRANOG SIGURNOSNOG STAKLA.....	2.7
<b>Đurđević, Đ., Anđelić, N., Maneski, T., Đurđević, A.</b> NUMERIČKA ANALIZA NAPONA UŠKE NA KONTEJNERSKOM TERMINALU.....	2.12
<b>Miloradović, N., Ilić, S., Vujanac, R.</b> MODELIRANJE I PRORAČUN GRAĐEVINSKE STUBNE DIZALICE .....	2.18
<b>Jovanović, R. J., Đukić, D. R.</b> UTICAJ PROIZVODNO-TRANSPORTNE PARTIJE NA TRAJANJE TEHNOLOŠKOG CIKLUSA PROIZVODNE FAZE .....	4.1
<b>Jovičić, G., Tabaković, S., Zeljković, M., Mladenović, C.</b> STRUKTURNA OPTIMIZACIJA POKRETNE PLATFORME VIŠENAMENSKE MAŠINE ALATKE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM.....	3.16
<b>Lukić, D., Milošević, M., Vukman, J., Đurđev, M., Antić, A.</b> KONCEPTUALNO PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA I PROCENA TROŠKOVA IZRADE.....	1.6
<b>Marjanović, J., Gojgić, N.</b> PRIMENA OLAP-a ZA ANALIZU PARAMETARA OPERCIJA U TEHNOLOŠKOM POSTUPKU .....	1.14
<b>Marković, V., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.</b> SEGMENTACIJA JEDNE KLASSE POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA: PROBLEM ODREĐIVANJA PRAGOVA.....	4.7
<b>Mitrović, A., Kovač, P., Kulundžić, N., Savković, B.</b> MODELOVANJE I SIMULACIJA PROCESA OBRADE GLODANJEM.....	2.23
<b>Mitrović, S., Jakovljević, Ž., Dimić, Z., Miljković, Z.</b> UPRAVLJANJE MOBILNIM ROBOTOM ZA ZAOBILAŽENJE PREPREKA U 2D PROSTORU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA.....	4.18
<b>Mladenović, G., Tanović, L., Pjević, M., Popović, M.</b> OBRADA SKULPTORSKIH POVRŠINA - RAZVOJ CAD/CAM SISTEMA .....	2.27
<b>Nestorov, A., Milanović, D., Misita, M.</b> BAZNI MATEMATIČKI MODEL ZA PROJEKTOVANJE SOFTVERSKOG REŠENJA ZA UPRAVLJANJE LJUDSKIM RESURSIMA U CILJU POVEĆANJA KVALITETA I EFIKASNOSTI RADA.....	1.19
<b>Papić, S., Klisura, F.</b> UTICAJ STEPENA STRUČNOSTI LJUDSKIH RESURSA NA KVALITET GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE .....	4.29

<b>Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., Miljković, Z.</b> MULTIAGENTNI I HOLON TEHNOLOŠKI SISTEMI U PROJEKTOVANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA I TERMINIRANJU PROIZVODNJE .....	3.63
<b>Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., Babić, B.</b> INTELIGENCIJA ROJA ČESTICA I TEORIJA HAOSA U INTEGRISANOM PROJEKTOVANJU I TERMINIRANJU FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA.....	3.22
<b>Pjević, M., Tanović, L., Mladenović, G.</b> UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODIRANJA KOD MIKROREZANJA KRTIH MATERIJALA.....	3.33
<b>Popović, M., Mladenović, G.</b> АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЈЕ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА УРЕЗНИКА СА ПРАВИМ ЖЛЕБОВИМА .....	2.33
<b>Slavković, N., Milutinović, D., Živanović, S.</b> METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA IZAZVANIH SILAMA REZANJE PRI OBRADI ROBOTIMA.....	3.39
<b>Stojadinović, S., Majstorović, V., Durakbasa M., .</b> МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ ЗА ИНСПЕКЦИЈУ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ .....	5.1
<b>Vasilić, G., Živanović, S.</b> ANALIZA RADNOG PROSTORA REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG МЕХАНИЗМА МОМА.....	3.47
<b>Vujović, D., Nikšić, P., Nikšić, N.</b> УПРАВЉАЊЕ РИЗИКОМ У ПРОЦЕСИМА ЗАВАРИВАЊА, СА АСПЕКТА БЕЗБЕДНОСТИ НА РАДУ И ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ .....	4.35
<b>Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Milutinović, D.</b> KONFIGURISANJE MULTIFUNKCIONALNIH I REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI I METODI ZA NJIHOVO PROGRAMIRANJE I VERIFIKACIJU PROGRAMA OBRADE .....	3.55

**SPISAK AUTORA**  
**LIST OF AUTHORS**

ANĐELIĆ, NINA  
ANTIĆ, ACO  
BABIĆ, BOJAN  
BARALIĆ, JELENA  
BORAK, ĐURO  
BRACANOVIĆ, ZLATA  
ČOJBAŠIĆ, ŽARKO  
DIMIĆ, ZORAN  
DRNDAREVIĆ,  
DRAGOLJUB  
DUČIĆ, NEDELJKO  
DURAKBASA M., NUMAN  
ĐUKIĆ, RADISAV  
ĐURAŠKOVIĆ, DRAGANA  
ĐURĐEV, MIĆA  
ĐURĐEVIĆ, ANDRIJANA  
ĐURĐEVIĆ, ĐORĐE  
GOJGIĆ, NATAŠA  
GROZDANIĆ, BRANKA  
ILIĆ, STEFAN  
JAKOVLJEVIĆ, ŽIVANA  
JANJIĆ, MILETA  
JOVANOVIĆ, JELENA  
JOVIČIĆ, GORAN

KLISURA, FUAD  
KOKOTOVIĆ, BRANKO  
KOVAČ, PAVEL  
KULUNDŽIĆ, NENAD  
LUKIĆ, DEJAN  
MAJSTOROVIĆ, VIDOSAV  
MANESKI, TAŠKO  
MARJANOVIĆ, JELENA  
MARKOVIĆ, VELJKO  
MILANOVIĆ, DRAGAN D.  
MILIĆEVIĆ, IVAN  
MILIVOJEVIĆ, MILOVAN  
MILJKOVIĆ, ZORAN  
MILORADOVIĆ, NENAD  
MILOŠEVIĆ, MIJODRAG  
MILUTINOVIĆ, DRAGAN  
MISITA, MIRJANA  
MITIĆ, MARKO  
MITROVIĆ, ANĐELIJA  
MITROVIĆ, STEFAN  
MLADENOVIĆ, GORAN  
MLAĐENOVIĆ, CVIJETIN  
NEDIĆ, BOGDAN  
NESTOROV, ALEKSANDAR  
NIKŠIĆ, PETAR

PAPIĆ, SEJFO  
PETRONIJEVIĆ, JELENA  
PETROVIĆ, MILICA  
PETROVIĆ, VELIMIR  
PJEVIĆ, MILOŠ  
POPOVIĆ, MIHAJLO  
SAVKOVIĆ, BORISLAV  
SLAVKOVIĆ, NIKOLA  
SLAVKOVIĆ, RADOMIR  
STOJADINOVIĆ,  
SLAVENKO  
TABAKOVIĆ, SLOBODAN  
TANOVIĆ, LJUBODRAG  
VASILIĆ, GORAN  
VUJANAC, RODOLJUB  
VUJOVIĆ, DRAGAN  
VUKČEVIĆ, MILAN  
VUKMAN, JOVAN  
VUKOVIĆ, NAJDAN  
ZELJKOVIĆ, MILAN  
ŽIVANOVIĆ, MIROSLAV  
ŽIVANOVIĆ, SAŠA

**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE  
with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**



**33. simpozijum**

**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG**  
**RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA**

Beograd, maj 2016.

**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA  
INDUSTRIJE PRERADE METALA**  
CIM IN THE STRATEGY OF TECHNOLOGICAL  
DEVELOPMENT OF METALWORKING INDUSTRY

<b>Drndarević, D., Milivojević, M.</b> MODELLING WITH BACKPROPAGATION ALGORITHM .....	1.1
<b>Lukić, D., Milošević, M., Vukman, J., Đurđev, M., Antić, A.</b> KONCEPTUALNO PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA I PROCENA TROŠKOVA IZRADE .....	1.6
<b>Marjanović, J., Gojgić, N.</b> PRIMENA OLAP-a ZA ANALIZU PARAMETARA OPERCIJA U TEHNOLOŠKOM POSTUPKU .....	1.14
<b>Nestorov, A., Milanović, D., Misita, M.</b> BAZNI MATEMATIČKI MODEL ZA PROJEKTOVANJE SOFTVERSKOG REŠENJA ZA UPRAVLJANJE Ljudskim RESURSIMA U CILJU POVEĆANJA KVALITETA I EFIKASNOSTI RADA .....	1.19







Drndarevic, D, Milivojevic, M.<sup>1</sup>

## MODELLING WITH BACKPROPAGATION ALGORITHM

**Abstract:** *Modelling processes with one kind of neural networks – backpropagation learning algorithm is given. The architecture and characteristics of backpropagation algorithm are presented, and the basic principles of modelling of process of unknown behaviour with development of model are described. The procedure of modelling one sort of manufacture process is shown in the example. In the paper is shown that simulation results of neural network models gives less approximation error then the statistical procedure, which is in conventional application.*

**Keywords:** *Modelling, Process, Neural network, Backpropagation learning algorithm*

### 1. INTRODUCTION

Different techniques are being applied to various problems involved in processes modelling. Most of these techniques are based on statistical methods, which is useful when the number of relevant factors is small and when their effects can be described by the simple functions. However, if the number of influential factors is large and the effects of these factors on final process characteristics are complex with high nonlinearity, it is very difficult, sometimes impossible, to reach required practical results, with techniques such as regression analysis. These problems, particularly in the case when the designing algorithm or rule development is difficult to establish, can be resolved using artificial neural network (NN) approach. Namely, massive parallelism and multipath structure of artificial neural networks exhibit a surprising number of the brain's characteristics. For instance, they learn from experience, generalize from previous examples to new ones, and abstract essential characteristics from inputs containing irrelevant data.

Process modelling by NNs is used in most fields of production. The concepts involved in NN modelling and its application in manufacturing is given in [1], in chemical industry [2] and in powder metallurgy [3]. Investigations of authors in application of NNs mostly in powder metallurgy are given in [4-8].

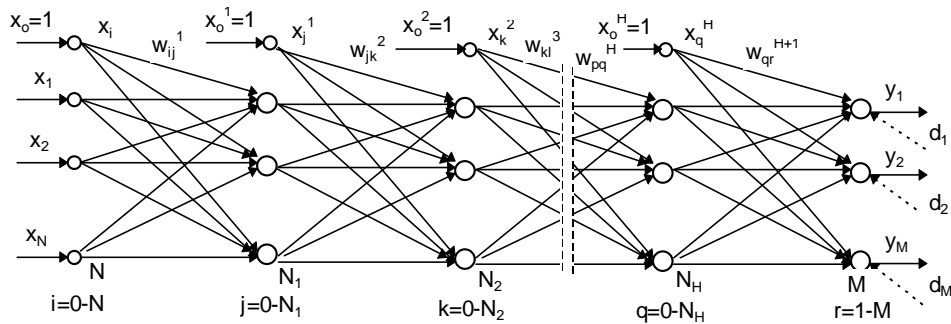
### 2. BACKPROPAGATION ALGORITHM

Backpropagation algorithm, also known as a “Generalized Delta Rule” [9] is used for learning of multilayer NN. Multilayer NN (Figure 1) has a feedforward signals flow and fully interconnected corresponding layers through processing elements. The general architecture consists of the input layer with  $N$  processing elements,  $H$  “hidden” layers with  $N_1, N_2, \dots, N_H$  elements, respectively, and the output layer with  $M$  elements.

The learning process is performed in iterative cycles. Each cycle consists of two passes: a forward pass and a backward pass.

In the forward pass, the outputs of processing elements in all layers from input to output are determined. The input layer does not process input signals  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , it only performs fan-out of signals to the elements of second layer. The inputs  $x_j^1$  in the first “hidden” layer are obtained as the sum of products weights  $w_{ij}^1$  of interconnections of elements  $i$  and  $j$  and the input  $x_i$ , to which the corresponding transfer function is applied. With this kind of NN the transfer function is more often sigmoidal. In the same way, the inputs in other layers are obtained, and at the end the outputs of NN  $y_1, y_2, \dots, y_M$  are obtained.

<sup>1</sup> dr Dragoljub Drndarevic, prof., High Business Technical School, Uzice ([dragoljub.drndarevic@vpts.edu.rs](mailto:dragoljub.drndarevic@vpts.edu.rs)), mr Milovan Milivojevic, prof., High Business Technical School, Uzice ([milovan.milivojevic@vpts.edu.rs](mailto:milovan.milivojevic@vpts.edu.rs))

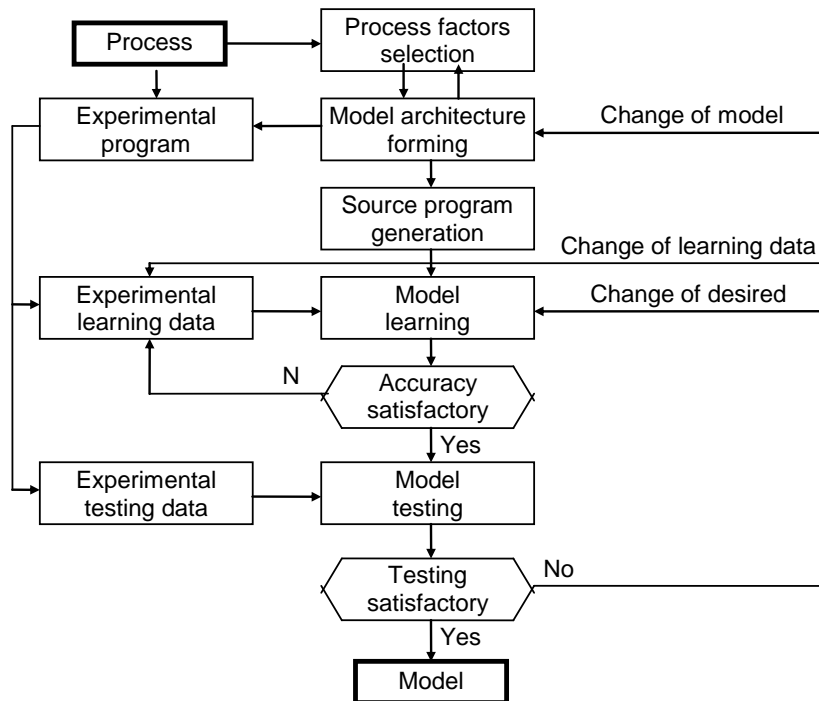


**Figure 1:** A general architecture of multilayer neural network

In the backward pass, by the application of the gradient descent method on the mean square output error, which is difference between the desired outputs  $d_1, d_2, \dots, d_M$  and outputs of the NN  $y_1, y_2, \dots, y_M$ , the correction of weights is done. The correction of weights is performed by the outputs error backpropagation from output to input layer. The iterations are performed for corresponding input/output pairs and thereby the output error is decreased, until it reaches a set value in accordance with chosen criterion. As the criterion, besides the mean square error, the maximal error, the mean error, etc. can be taken.

### 3. DEVELOPMENT OF MODEL

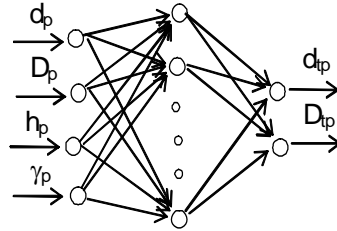
The principal elements of the process model based on NN generally contain input data, NN architecture and learning algorithm. The basic stages, i.e. process modelling activities, are shown in Figure 2. The activity flow chart of process modelling can be divided into two parts. In the first stage, based on prior process analysis, the selection of significant factors is performed and the model architecture with learning algorithm defined, while, in the second stage, the experimental program is formed and computing program is generated to be used for learning and testing of the model. In the case of unsatisfactory test results an intervention is possible on three levels (shown in Figure 2).



**Figure 2.** Development of the process model based on neural networks

#### 4. EXAMPLE

The model is formed for the certain kinds of PM parts - self-lubrication bearings, material of which is bronze P4013Z. The regimes of the process for the given material during obtaining of the experimental data were constant. The process is observed inversely. As input factors, dimensions ( $d_p$ ,  $D_p$ ,  $h_p$ ) and density ( $\gamma_p$ ) of the compact are taken, and output characteristics are dimensions of the compaction tool ( $d_{tp}$ ,  $D_{tp}$ ). Based on the experimental data, a spring-back model of the compact is formed. As a model, a multilayer neural network is used, the architecture of which is shown in Figure 3.



**Figure 3:** The architecture of spring-back model

The standard backpropagation algorithm with correction of weights after every iteration and with the moment term is applied, based on which a programme for simulation is formed. Within the simulation programme, the preparation of inputs, i.e. experimental data, has been performed (randomization of order, division of the entire input set into training data set and test data set, parameterization and normalization of data), generation of the initial weight values and defining of the accuracy criterion.

The set of input, i. e. experimental data is divided in the way that approximately 3/4 of the accidentally chosen data are used for learning and 1/4 for testing. By optimization as per the criterion of the minimum error of testing and minimum number of learning cycles, the parameters of the model are obtained as follows: learning rate term 0.9, momentum term 0.4, the interval of the initial weights  $\pm 0.3$  and the number of processing elements in the hidden layer 10.

By the simulation of the model with the optimal parameters in the set of the experimental data for testing, the outputs are obtained, i. e. tool dimensions for the compaction, for the given dimensions of the compact. Based on the input experimental data and the obtained outputs, the coefficients which represent relative spring-back of the part after ejection are obtained as follows:

$$X_{d_p} = \frac{d_{tp} - d_p}{d_p}; X_{D_p} = \frac{D_{tp} - D_p}{D_p}$$

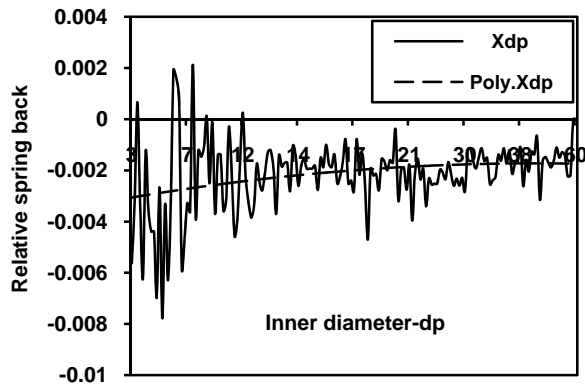
In Figure 4, the spring-back coefficients are shown. The relative spring-back of the inner diameter  $X_{d_p}$  for the bearings with  $d_s = 3-60\text{mm}$  is shown in Figure 4a. Next to the real curve, its polynomial approximation is given. It is observed that the absolute value of the coefficient  $X_{d_p}$  decreases with diameter increasing. The coefficient of the outer diameter  $X_{D_p}$  slowly increases with increasing  $D_p$  (Figure 4b).

The mean values of the spring-back coefficients are:

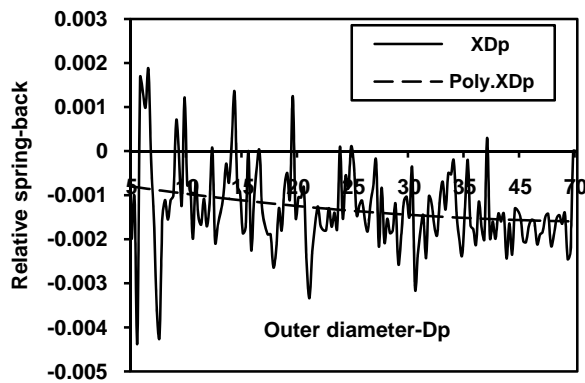
$$X_{d_p} = -2.159 \cdot 10^{-3}, \quad X_{D_p} = -1.320 \cdot 10^{-3},$$

where the sign gives direction of the change in relation to the supposed direction in the equation given above.

The results of the model simulation in the form of the output errors are given in Figure 5. The errors represent mean values of the absolute deviations of the model outputs from the desired ones, i. e. experimental values of the outputs. The diagrams in Figure 5 display the change of learning and testing errors as per dimensions for 3000 cycles of training, since during increase the number of cycles, the convergence is very slow. The learning and testing errors, after a very fast decrease in the first few cycles (which is a usual phenomenon) and variation in the subsequent phase, enter the area of convergence. The testing error for  $D_{tp}$ , after reaching global minimum, increases slowly with the increase of the cycles number due to "overtraining" effect, described in [10].

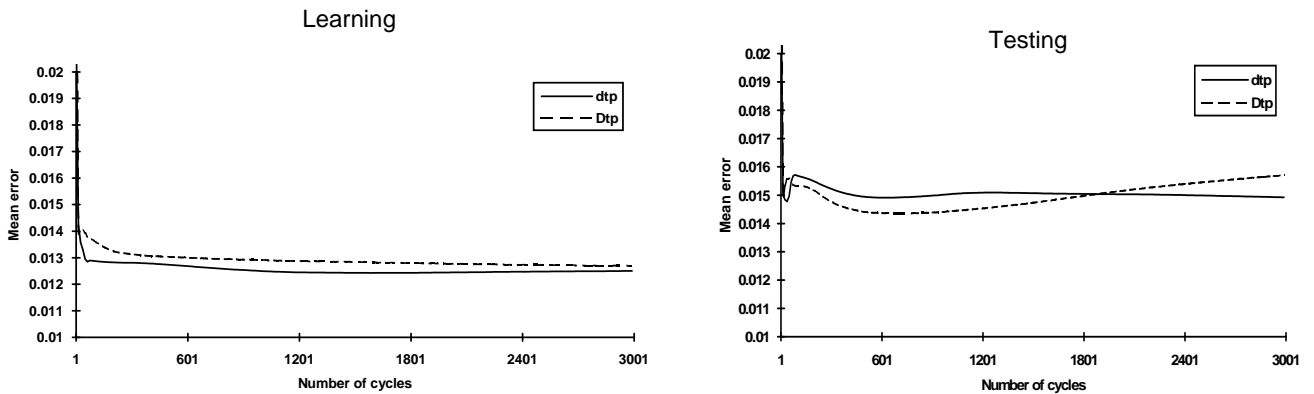


a)



b)

**Figure 4:** The spring-back coefficients



**Figure 5:** The learning and testing errors of the spring-back model

The results of model simulation, given in this paper, were compared with the standard procedure based on statistical processing of experimental data. This procedure is carried out by backward movement, from the finished part dimensions to compaction, taking into consideration dimensional changes in sintering. The spring-back coefficients, based on learning data set used with NN, were determined. Tool dimensions were determined for testing data set using obtained coefficients. The same form of the mean error as the one of the NN was used for comparison.

The comparison results are given in Table 1. The results show that NN based model gives lower total mean error for 3.3% than obtained by statistical procedure. This was achieved by including a greater number of significant factors and their interdependence, as well as by having more common functional forms and iterative approach to solution.

**Table 1:** The mean errors of the prediction for statistical procedure and for NN model

Model	$d_{ip}$	$D_{ip}$	$\Sigma$
By statistical procedure	0.01389	0.01636	0.03025
By NN	0.01491	0.01435	0.02926

## 5. CONCLUSIONS

A neural network approach in modelling and its application at various types of processes is given. The model is based on experimental data applying multilayer neural network with Backpropagation learning algorithm. The basic principle of modelling of a process unknown behaviour is shown and development of neural network model is described.

The advantages of modelling methods using NNs in comparison with statistical procedure and other applicable methods (regressive analysis, cubic spline) are in including the greater number of influential factors and their interactivity, simultaneous obtaining of greater number of outputs, more common functional forms and iterative approach to solution. Characteristics of NNs are fault tolerance, robustness of noise and incomplete information and approximation ability of high nonlinearity systems. All relevant process factors are included, with possibility of omitting those factors which increase the model error or have no influence on outputs.

The limitations and deficiencies of given modelling procedure result from the general characteristics of backpropagation algorithm requiring relatively great amount of input data with random distribution, as well as a great number of iterations for obtaining satisfactory results.

Practical significance of the presented procedure is in better prediction of the output characteristics than that obtained by statistical procedure, mostly used in practice. The model, i.e. trained NN, for another input data (new material, for example) from the range in which learning was performed or from its surroundings (since the model is capable of extrapolation apart from interpolation), gives outputs with a similar average error as for data set used for learning.

## 6. REFERENCES

- [1] Zhang H. C., Huang S. H., *Application of Neural Networks in Manufacturing: a State - of - the - Art Survey*, Int. Journal of Production Research, Vol. 33, No 3, pp. 705-728, 1995.
- [2] Zupan J., Novic M., Gasteiger J., *Neural Networks with Counter-propagation Learning Strategy used for Modelling*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 27, pp. 175-187, 1995.
- [3] Smith L. N., *Modelling PM processes using neural networks*, Metal Powder Report, pp. 30-35, Feb. 2000.
- [4] Drndarevic D., Reljin B., *Accuracy modelling of powder metallurgy process using backpropagation neural networks*, Powder Metallurgy, Vol. 43, No. 1, pp. 25-29, 2000.
- [5] Drndarevic D., Djuricic M., *Modelling of the Dimensional Changes during Sintering*, Science of Sintering, SANU, Belgrade, Vol. 37, No. 3, pp.181-187, 2005.
- [6] Drndarevic D., *Modelling of the spring-back of powder metallurgy parts*, Tehnika, Beograd (M1-8), 6/2005.
- [7] Milivojevic, M., Stopic, S. Friedrich, B, Stojanovic B., Drndarevic, D., *Computer Modeling of High Pressure Leaching Process of Nickel Laterite by Design of Experiments and Neural Networks*, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 19, No. 7, July, pp. 584-594, 2012.
- [8] Drndarevic D., Milivojevic M., *Modelling with neural networks*, Journal of Mechatronics, Vol. 2., No. 2., pp. 143-146, 2014.
- [9] Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J., *Learning representation by back-propagating errors*, Nature, Vol. 323, pp. 533-536, 1986.
- [10] Hecht-Nielsen R., "Neurocomputing", Reading MA, Addison-Wesley, 1990.

Lukić, D., Milošević, M., Vukman, J., Đurđev, M., Antić, A.: <sup>1)</sup>

## KONCEPTUALNO PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA I PROCENA TROŠKOVA IZRADE<sup>2)</sup>

### Rezime

Određivanje troškova proizvodnje predstavlja osnovu za donošenje kvalitetnih odluka u proizvodnoj praksi. Nemogućnost preduzeća da brzo i uspešno odredi troškove može značajno da ugrozi njegov ekonomski opstanak na globalnom tržištu. U početnim fazama razvoja proizvoda najčešće se vrši procena troškova, dok se u kasnijim fazama vrši detaljan proračun troškova.

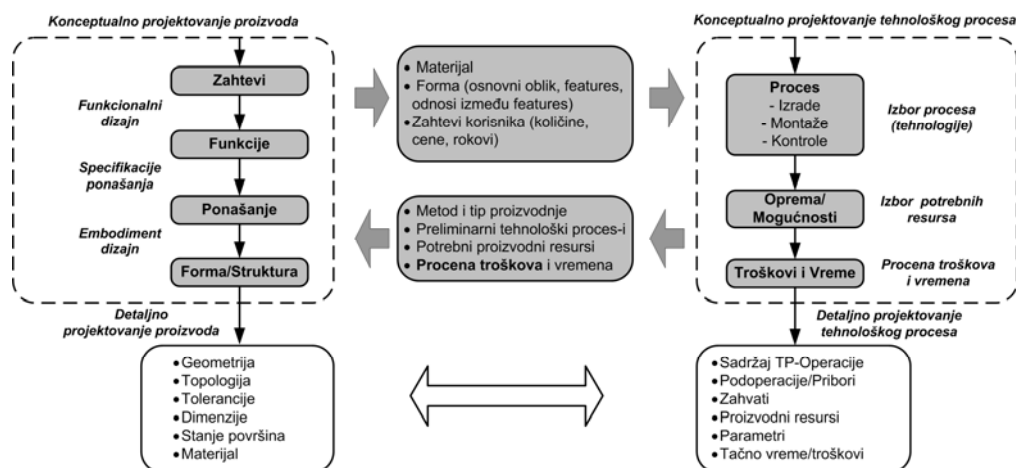
U ovom radu prikazan je značaj procene troškova u fazi konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa izrade proizvoda. Prikazan je primer procene troškova izrade tela endoproteze zgloba kuka primenom razvijenog programskog rešenja za procenu troškova.

**Ključne reči:** Razvoj proizvoda, Konceptualno projektovanje tehnoloških procesa, Procena troškova

### 1. UVOD

Centralno mesto u životnom ciklusu proizvoda zauzima razvoj proizvoda, u okviru koga se generiše kvalitet proizvoda, ali i najveći broj grešaka, koje je neophodno otkloniti u što ranijoj fazi. Zbog toga je potrebno problem proizvodnje razmatrati što je moguće ranije, još u konceptualnoj fazi projektovanja, jer su troškovi izmene veći ako se one izvrše u kasnijoj fazi razvoja proizvoda [1, 2, 3].

Projektovanje tehnoloških procesa je složena aktivnost koja se deli na više hijerarhijskih nivoa. Prvi i najviši nivo u ovoj hijerarhiji predstavlja konceptualno ili preliminarno projektovanje tehnoloških procesa (CPP), kao aktivnost preliminarne procene mogućnosti i efekata proizvodnje proizvoda [4]. Osnovni zadatak ove aktivnosti je podrška ranoj fazi razvoja proizvoda u optimizaciji konstrukcije proizvoda sa aspekta tehnološkičnosti konstrukcije, izboru preliminarnih tehnoloških procesa i **proceni troškova** i vremena proizvodnje. Izlazni rezultati konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa se koriste u fazi konceptualnog projektovanja proizvoda, kao i u fazi detaljnog projektovanja tehnoloških procesa, slika 1.



Slika 1. Mesto i uloga konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa [4, 5]

<sup>1)</sup> Doc. dr Dejan Lukić, e-mail: [lukicd@uns.ac.rs](mailto:lukicd@uns.ac.rs); Doc. dr Mijodrag Milošević, e-mail: [mido@uns.ac.rs](mailto:mido@uns.ac.rs); MSc Jovan Vukman, e-mail: [vukman@uns.ac.rs](mailto:vukman@uns.ac.rs); MSc Mića Đurđev, e-mail: [mdjurdjev@uns.ac.rs](mailto:mdjurdjev@uns.ac.rs); Prof. dr Aco Antić, e-mail: [antica@uns.ac.rs](mailto:antica@uns.ac.rs); Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad.

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopšteni su rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR 35025 "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Konceptualno projektovanje tehnoloških procesa se u literaturi sreće i pod imenom Meta Process Planning [6], Low-level Process Planning [7], High-level Process Planning [8], Preliminary Process Planning [4], Generic Planning [9], dok neki već ovu fazu posmatraju kao deo faze Macro Process Planning [10]. Naravno, sadržaj i redosled aktivnosti koje se rešavaju u okviru navedenih faza konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa nisu na isti način formulisani, ali u suštini zadaci koje rešavaju su u značajnoj meri zajednički. Neki autori programske sisteme za ovu fazu razvoja proizvoda nazivaju konceptualnim CAPP sistemima (C-CAPP) [11]. Aktivnosti konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa se u velikoj meri poklapaju sa aktivnostima u okviru metodologija projektovanja za izradu i montažu (DfMA), gde takođe figuriše aktivnost procene troškova proizvodnje proizvoda [12].

U ovom radu prikazan je značaj procene troškova u fazi konceptualnog projektovanja tehnoloških procesa i odgovarajuće razvijene metode i softverska rešenja. Prikazan je primer procene troškova izrade tela endoproteze zgloba kuka primenom razvijenog programskog rešenja za procenu troškova, kao modula konceptualnog CAPP sistema.

## 2. PROCENA TROŠKOVA IZRADE PROIZVODA

Troškovi proizvodnje predstavljaju jedno od glavnih merila za uspešnost razvijene konstrukcije proizvoda, kako sa aspekta ekonomičnosti, tako i sa aspekta mogućnosti plasmana na tržištu. Nemogućnost preduzeća da brzo i uspešno odredi troškove može značajno da ugrozi njegov opstanak na tržištu [13, 14]

U zavisnosti od faze razvoja proizvoda, postoje različiti načini određivanja troškova. U početnim fazama najčešće se vrši procena, a u kasnijim detaljan proračun troškova. Mnogi autori su se bavili problemom troškova, pa je razvijen veliki broj metoda za proračun i procenu troškova proizvodnje. Prema [15, 16] metode za određivanje troškova se dele na *intuitivne, komparativne, analogne, parametarske* i *analitičke*.

**Tabela 1.** Metode za određivanje troškova [15, 16]

Metoda	Opis metode	Najbolja primena za fazu	Nivo greške
Intuitivna	Procena troškova na bazi ličnog znanja, iskustva i intuicije	Globalno planiranje proizvodnje	30-50 %
Komparativna (Metoda poređenja)	Procena na osnovu postojećih troškova sličnih delova	Globalno planiranje proizvodnje	30-50 %
Analogna	Procena na bazi troškova sličnih delova, definišu se parametri za poređenje sa prethodnim slučajevima	Konceptualno projektovanje	14-30 %
Parametarska	Vrši se izbor parametara koji će se posmatrati, koji se potom vrednuju na bazi težinskih koeficijenata	Konceptualno projektovanje	14-30 %
Analitička	U obzir se uzimaju direktni i indirektni troškovi. Vrši se proračun svih elementarnih troškova.	Detaljno projektovanje	5-15 %

Iz prethodne tabele se vidi da se za određivanje troškova u fazi konceptualnog projektovanja preporučuju analogne i parametarske metode procene troškova. Kod ovih metoda procena troškova se vrši na osnovu poznatih troškova sličnih delova, odnosno na bazi parametara proizvoda koji su usvojeni za poređenje i odgovarajućih težinskih koeficijenata parametara. Određeni troškovi u ovoj fazi razvoja proizvoda su orijentacioni (nivo greške 14-30%), što može da oteža procenu kvaliteta konstrukcije proizvoda. Međutim, za ovaj nivo projektovanja oni mogu biti veoma značajni i dovoljno pouzdani, jer osnovni cilj u ovoj fazi nije utvrđivanje stvarnih troškova već procena troškova i izbor najpovoljnijih varijanti tehnologija izrade.

Kao što je već navedeno procena troškova predstavlja značajnu aktivnost u okviru DfMA metodologija i odgovarajućih programskih sistema. Shodno tome u grupu softvera za procenu troškova mogu se ubrojati i odgovarajući DfMA programski sistemi, kao što je npr. DFMA softver [17], TeamSET [18] i dr.

U poslednjih vreme, velike kompanije u CAx oblasti su svoje proizvode proširile u pravcu razvoja PLM sistema, koji obuhvataju procenu troškova tokom životnog ciklusa proizvoda uključujući i procenu troškova proizvodnje. Tako, na primer, PTC razvio Windchill [19], Siemens svoj PLM sistem [20], Dassault Systemes je razvio PLM Solution [21]. Isto tako razvijena su i odgovarajuća programska rešenja za analizu tehnološkičnosti konstrukcije i procenu troškova proizvoda. Ona figurišu kao posebni moduli u odgovarajućim CAD sistemima ili mogu biti zasebne aplikacije koje se mogu ugraditi u CAD sisteme. Neki od njih su: *DFMPro* [22], *SolidWorks Costing* [23], *Autodesk Simulation DFM* [24], *SEER for Manufacturing* [25], *MicroEstimating* [26], *aPriori Production Cost Management* [27], *CustomPartNet* [28], *DISCUS* [29], itd., koji su detaljnije opisani u [1,30].

### 3. PROGRAMSKO REŠENJE ZA PROCENU TROŠKOVA

U okviru razvijenog programskog rešenja za konceptualno projektovanje tehnoloških procesa, rešavaju se pojedini zadaci iz domena sledećih aktivnosti [31]:

- *Analize tehnologičnost konstrukcije proizvoda,*
- *Izbora i ocene osnovnih tehnoloških procesa izrade proizvoda i*
- *Procene troškova izrade proizvoda.*

U razvoju programskog rešenja/modula za procenu troškova primenjena je metoda koja spada u grupu analognih metoda, prema [32]. Ova metoda se bazira na inženjerskom iskustvu i znanju, kao i odgovarajućim podacima iz proizvodne prakse u industriji Velike Britanije, koji su sistematizovani i statistički obrađeni, i na osnovu kojih su formirane odgovarajuće tabele i grafici funkcija pojedinih elemenata troškova.

Troškovi proizvodnje (T) određenog dela sastoje se od troškova materijala ( $T_m$ ), troškova izrade ( $T_i$ ) i troškova termičke obrade i/ili površinske zaštite ( $T_t$ ):

$$T = T_m + \sum_{i=1}^n T_i + T_t \quad (1)$$

Troškovi materijala se određuju kao proizvod zapremine priprema  $V_p$  i jedinične cene materijala  $C_{mp}$  (cena materijala po jedinici zapremine):

$$T_M = V_p \cdot C_{mp} \quad (2)$$

Kao osnova za određivanje troškova izrade proizvoda uzimaju se troškovi "idealnog proizvoda" iz odgovarajuće klasifikacione grupe, uz korekciju sa relativnim koeficijentom troškova koji iskazuje razliku posmatranog proizvoda i idealnog proizvoda, s obzirom na vrstu materijala, složenost oblika, određene dimenzije, tolerancije i kvalitete površina, odnosno:

$$T_i = P_C \cdot R_C \quad (3)$$

gde su:

- $P_C$  – *Troškovi izrade idealnog proizvoda*
- $R_C$  – *Relativni koeficijent troškova*

Relativni koeficijent troškova se računa na osnovu sledećeg izraza:

$$R_C = C_C \cdot C_{mp} \cdot C_S \cdot C_{ft} (\max C_t \text{ ili } C_f) \quad (4)$$

gde su:

- $C_C$  – *Koeficijent složenosti oblika proizvoda*
- $C_{mp}$  – *Koeficijent pogodnosti materijala za određeni proces proizvodnje*
- $C_S$  – *Koeficijent koji uzima u obzir debljinu sekcija/zidova proizvoda*
- $C_t$  – *Koeficijent tolerancija*
- $C_f$  – *Koeficijent kvaliteta obrade površina*

Posle određivanja koeficijenata tolerancija  $C_t$  i kvaliteta obrade površina  $C_f$ , uzima se u obzir koeficijent sa većom vrednošću, koji dobija oznaku  $C_{\bar{n}}$ . Za određivanje pojedinih koeficijenata koji figurišu u izrazima za proračun, potrebno je prethodno izvršiti klasifikaciju proizvoda prema složenosti geometrijskog oblika. Svi proizvodi su podeljeni u tri osnovne klase (A - Rotaciono-simetrični i rotaciono-nesimetrični delovi, B - Prizmasti i kutijasti puni delovi, C - Prizmasti i kutijasti tankozidni delovi), koje se dele na pet različitih podklasa, prema klasifikatoru iz [32]. U okviru rada [31] prikazan je algoritam na osnovu koga je razvijeno ovo programsko rešenje/modul za procenu troškova.

### 4. PROCENA TROŠKOVA VARIJANTI TEHNOLOŠKIH PROCESA IZRADE TELA ENDOPROTEZE ZGLOBA KUKA

Implatati koji se koriste u medicinskoj protetici prema vremenskom periodu mogu biti privremeni i trajni, a prema konstrukcionom rešenju i načinu izrade mogu biti individualni prema karakteristikama pacijenta



„custom“, koji se najčešće izrađuju pojedinačno, i modularne građe „ready made“, koji se najčešće izrađuju serijski [33]. U ovom radu prikazana je procena troškova izrade tela endoproteze zgloba kuka od kobaltove legure nerđajućeg čelika, na bazi izabranih primarnih tehnoloških procesa u [34].

Osnovnu grupu ulaznih podataka za procenu troškova proizvodnje posmatranog tela endoproteze zgloba kuka primenom posmatranog programskog rešenja za procenu troškova, čine sledeći podaci:

- Vrsta materijala dela: Nerđajući čelici (specijalne legure),
- Ukupan broj procesa,  $n=1$  ili  $n=2$  u zavisnosti od alternativnih varijanti
- Varijante tehnoloških procesa:
  - Varijanta I – Obrada rezanjem CNC (pripremak od ploče-lima)
  - Varijanta II – Precizno livenje + Obrada rezanjem CNC
  - Varijanta III – Kovanje u zatvorenom kalupu + Obrada rezanjem CNC
  - Varijanta IV – Metalurgija praha + Obrada rezanjem CNC
- Godišnji obim proizvodnje, var.  $Q=10, 50, 100, 200, 400, 1000, 10000$  kom./god.,
- Minimalna debljina zida ili sekcije dela: (područje  $>5\text{mm}$ ),
- Najuzža tolerancija mere dela: tolerancije slobodnih mera  $0,05\text{ mm}$  (ISO 2768),
- Broj ortogonalnih ravni u kojima se javlja ova tolerancija mera:  $3+$  ravni,
- Najstrožiji kvalitet obrade površina - klasa hrapavosti na delu:  $Ra=0,2\text{mm}$  (N4),
- Broj ortogonalnih ravni u kojima se javlja ova klasa hrapavosti:  $3+$  ravni.

Jedan od ulaznih podataka predstavlja i klasifikaciona oznaka tela endoproteze, koja se vrši interaktivno u okviru razvijenog programskog rešenja, prema kome ovaj proizvod pripada podklasi A5, slika 2. Ulazni podatak predstavlja i zapremina priprema koja je u ovom slučaju uzeta kao merodavna.



Slika 2. Klasifikacija tela endoproteze prema geometrijskoj složenosti u programskom rešenju

U nastavku, na slici 3 prikazani su uneti podaci za varijantu II koja se sadrži od dva osnovna procesa, preciznog livenja (IC) i CNC obrade rezanjem (CNC), za obim proizvodnje od 10 kom/god. Na osnovu definisanih elemenata troškova i odgovarajućih koeficijenata vrši se proračun troškova primenom izraza za procenu troškova, odnosno izraza koji u njemu figurišu (1-4).

Na izlazu se dobijaju proračunate vrednosti troškova izrade tela endoproteze za posmatranu varijantu II. Ovi troškovi su podeljeni na troškove materijala i troškove izrade, sa grafičkim prikazom udela svakog od njih u ukupnim troškovima izrade, slika 4.

Procena troskova materijala: X

## PROCENA TROŠKOVA PROIZVODNJE

Naziv dela:   
 Oznaka dela:   
 Vrsta materijala:   
 Cena u Peni:     Cena u EuroCent:   
 Odnos Peni/EuroCent:   
 Ukupan broj procesa:   
 Broj procesa (operacija):   
 1    2  
 Vrsta procesa:   
 Godišnji obim proizvodnje:  [kom/god]    Pc =   
 Minimalna debljina sekcije:  [mm]    Cs =   
 Tolerancija:  [mm]    Broj ortogonalnih ravni na kojima leže kritične tolerancije:   
 Kvalitet površine:  Ra(N)[µm]    Broj ortogonalnih ravni na kojima leže kvaliteti površine:



Koeficijent pogodnosti materijala za određeni proces: Cmp =

**IZABERI OBLIK**    Koeficijent složenosti oblika: Cc =

Oblik:  A     B

**ROTACIONO-SIMETRIČNI I ROTACIONO-NESIMETRIČNI**

**nepravilni i/ili složeni oblici**

Zapremina:

Pripremk    Vp =   
 Dela    V =

Koeficijent tolerancija: Ct =     Koeficijent skinutog materijala: Wc =   
 Koeficijent kvaliteta obrade površine: Cf =     Troškovi termičke obrade: Tt =

a) Podaci za precizno livenje

Procena troskova materijala: X

## PROCENA TROŠKOVA PROIZVODNJE

Naziv dela:   
 Oznaka dela:   
 Vrsta materijala:   
 Cena u Peni:     Cena u EuroCent:   
 Odnos Peni/EuroCent:   
 Ukupan broj procesa:   
 Broj procesa (operacija):   
 1    2  
 Vrsta procesa:   
 Godišnji obim proizvodnje:  [kom/god]    Pc =   
 Minimalna debljina sekcije:  [mm]    Cs =   
 Tolerancija:  [mm]    Broj ortogonalnih ravni na kojima leže kritične tolerancije:   
 Kvalitet površine:  Ra(N)[µm]    Broj ortogonalnih ravni na kojima leže kvaliteti površine:



Koeficijent pogodnosti materijala za određeni proces: Cmp =

**IZABERI OBLIK**    Koeficijent složenosti oblika: Cc =

Oblik:  A     B

**ROTACIONO-SIMETRIČNI I ROTACIONO-NESIMETRIČNI**

**nepravilni i/ili složeni oblici**

Zapremina:

Pripremk    Vp =   
 Dela    V =

Koeficijent tolerancija: Ct =     Koeficijent skinutog materijala: Wc =   
 Koeficijent kvaliteta obrade površine: Cf =     Troškovi termičke obrade: Tt =

b) Podaci za CNC obradu rezanjem

Slika 3 Ulazni podaci za proračun troškova izrade za varijantu II i prikaz odgovarajućih podataka i koeficijenata za proračun

Procena troskova proizvodnje:

## PROCENA TROŠKOVA PROIZVODNJE - IZLAZ

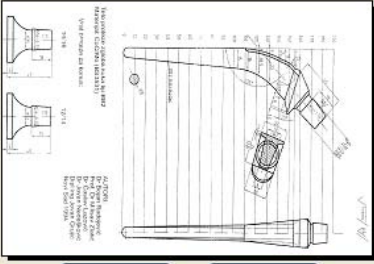
**Naziv dela:** Telo  
**Oznaka dela:** EP1  
**Materijal:** Nerđajući čelci  
**Cena:** 0.5

**Broj procesa:** 2

1  2  
**Proces:** Obrada rezanjem CNC

**Zapremina dela:** 36500  
**God obim proizv:** 10  
**Min debljina sek:** Više od 5  
**Tolerancija:** 0.05  
**Broj ravni za tol:** 3  
**Kvalitet površine:** 0.2 (H4)  
**Broj ravni za k.p.:** 3  
**Oblik:**

**ROTACIONO-SIMETRIČNI I ROTACIONO-NESIMETRIČNI**  
**nepravilni i/ili složeni oblici**



**Troškovi materijala:**  $T_m = V_p * C_{mt} = 43800 * 0.5 = 21900$  u peniima: 21900 u eurocentima: 17520

**Troškovi Izrade:**  $T_i = \sum(P_{ci} * R_{ci}) = 7008.75$  u peniima: 7008.75 u eurocentima: 5607

**Troškovi termičke obrade:**  $T_t = 0$  u peniima: 0 u eurocentima: 0

**Ukupni troškovi:**  $T = T_m + T_i + T_t = 28908.75$  u peniima: 28908.75 u eurocentima: 23127

**Navigation:** <<< BACK, NEXT >>>

Slika 4 Izlazni rezultati procene troškova izrade tela endoproteze za varijantu II

Promenom ulaznih vrednosti izvršeno je variranje podataka za četiri postavljene varijante tehnološkog procesa izrade tela endoproteze zgloba kuka, uz variranje obima proizvodnje za 10, 50, 100, 200, 400, 1000 i 10000 kom/god, dobijene su procenjene vrednosti troškova izrade, koje su prikazane u tabeli 2.

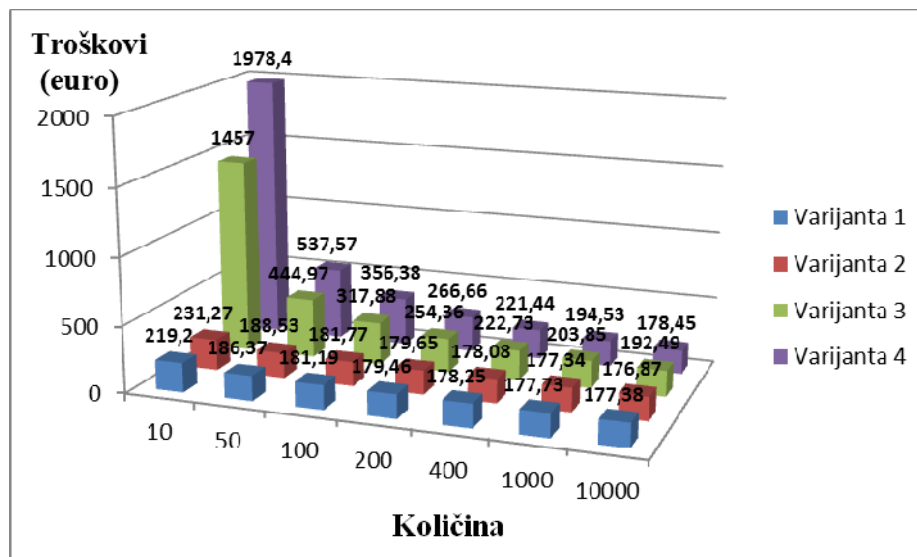
Tabela 2. Vrednosti procene troškova izrade (izražene u €) tela endoproteze za alternativne varijante tehnoloških procesa i različite obime proizvodnje

Tehnološki proces	Obim proizvodnje Q [kom./god.]						
	10	50	100	200	400	1000	10000
Varijanta I	219,2	186,37	181,19	179,46	178,25	177,73	177,38
Varijanta II	231,27	188,53	181,77	179,65	178,08	177,34	176,87
Varijanta III	1457	444,97	317,88	254,36	222,73	203,85	192,49
Varijanta IV	1978,4	537,57	356,38	266,66	221,44	194,53	178,45

Na slici 5 prikazan je grafik zavisnosti procenjenih troškova izrade od ulaznih količina za izabrane varijante tehnoloških rešenja, na osnovu rezultata iz tabele 2.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju, koja odgovara pojedinačnoj izradi tela endoproteza zgloba kuka "custom" najpovoljnija varijanta I, odnosno varijanta II. Naravno, za veće količine značajnije učešće u proizvodnji posmatranih proizvoda uzele bi i druge varijante tehnologija izrade.

Savremena proizvodnja implantata bazirana je na primeni fleksibilnih proizvodnih tehnologija livenja, deformisanja, obrade rezanjem, itd. i direktnih proizvodnih tehnologija kao što su rapid tooling, rapid prototyping i rapid manufacturing, koje se sve više primenjuju u praksi. Kao podrška ovim tehnologijama primenjuju se metodologije zasnovane na reverzibilnom inženjerstvu, uz značajnu podršku savremenih CAX sistema i CNC tehnoloških sistema.



*Slika 5 Grafički prikaz zavisnosti procene troškova od obima proizvodnje za usvojene varijante tehnoloških procesa izrade tela endoproteze*

## 5. ZAKLJUČAK

Određivanje troškova je veoma značajno sa aspekata mogućnosti plasmana proizvoda, smanjenja troškova razvoja i proizvodnje proizvoda, kao i ekonomičnosti poslovanja preduzeća. Preduzeće koje nije u stanju da brzo i uspešno proceni troškove i na osnovu toga definiše troškove proizvodnje i pružanja usluga, odnosno cenu proizvoda može značajno da ugrozi svoj opstanak na sve zahtevnijem globalnom tržištu.

Osnovni predmet istraživanja u ovom radu se odnosi na prikaz značaja procene troškova u konceptualnom projektovanju tehnoloških procesa, odnosno u ranoj fazi razvoja proizvoda. Prikazana je podela metoda za određivanje troškova, kao i pregled odgovarajućih softverskih rešenja za procenu troškova. Dat je kratak prikaz jedne analogne metode za procenu troškova na osnovu koje je razvijeno istoimeno programsko rešenje. Ovo programsko rešenje je primenjeno za procenu troškova izrade tela endoproteze za različite varijante tehnologija i obime proizvodnje, čiji rezultati su prikazani u ovom radu.

Metodologija procene troškova koja je u ovom radu opisana, omogućuje brzu i dovoljno kvalitetnu procenu troškova izrade proizvoda, čime se u značajnoj meri olakšava posao projekatana. U cilju održive konkurentnosti, skoro svaka proizvodna organizacija će biti prinuđena da usvoji filozofiju integracije projektovanja proizvoda i tehnoloških procesa njihove proizvodnje, i da shodno tome primeni alate za procenu troškova u ranim fazama razvoja proizvoda, kao i za njihovo određivanje i praćenje u čitavom životnom ciklusu proizvoda.

## 6. LITERATURA

- [1] Chang, K-H.: *Product Cost Estimating-chapter 6*, In *Product Manufacturing and Cost Estimating using CAD/CAE*, Academic Press is an imprint of Elsevier, Oxford, pp. 237-294, 2013.
- [2] Dieter, G.E.: *ASM Handbook-Material Selection and Design*, ASM International, Vol. 20, Ohio, 1997.
- [3] Ashby, M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design-3rd edition*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [4] Feng, S., Song, E.: *A manufacturing process information model for design and process planning integration*, Journal of Manufacturing systems, Vol. 22, No. 1, pp. 1-14, 2003.
- [5] Feng, S., Song, E.: *Information Modeling on Conceptual Design Integrated with Process Planning*, Proceedings of Symposia for Design For Manufacturability, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, pp. 160-168, 2000.
- [6] Chan, K., King, C., Wright, P.: *COMPASS: Computer Oriented Materials, Processes and Apparatus Selection Systems*, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 275-286, 1988.
- [7] Altung, L., Zhang, H.: *Computer Aided Process Planning: The State of the Art Survey*, International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 4, pp. 535-585, 1989.
- [8] Febransyah, A.: *A Feature-based Approach to Automating High-Level Process Planning*, Ph.D. Thesis, Faculty of North Carolina State University, 2001.



- [9] ElMaraghy, A.H.: *Evolution and Feature Perspectives of CAPP*, Annals of CIRP, Vol. 42, No. 2, pp. 739-751, 1993.
- [10] Cay, F., Chassapis, C.: *An IT View on Perspectives of Computer Aided Process Planning Research*, Computers in Industry, Vol. 34, No. 3, pp. 307-337, 1997.
- [11] Lutervelt, C.A.: *Research Challenges in CAPP*, Production Engineering and Computers, Vol. 4, No. 5, pp. 5-18, 2002.
- [12] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W.: *Product Design for Manufacturing and Assembly*, 3rd Edition, Taylor&Francis, New York, 2011.
- [13] Adithan, M.: *Process Planning and Cost Estimation*, New Age International (P) Limited Publisher, New Delhi, 2007.
- [14] Kesavan, R., Elanchezian, C., Vijaya Ramnath, B.: *Process Planning and Cost Estimation*, New age International (P) Limited Publisher, New Delhi, 2009.
- [15] Creese, R.C., Moore, L.T.: *Cost Modeling for Concurrent Engineering*, Cost Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 23-27, 1990.
- [16] Martin, P., Dantan, J.Y., Siadat, A.: *Cost Estimation and Conceptual Process Planning*, In Cunha, P.F. and Maropoulos, P.G. (ed.) *Digital Enterprise Technology: Perspective and Future Challenges*, Springer Science+Business Media, LLC., New York, pp. 243-250, 2007.
- [17] DFMA software, <http://www.dfma.com/software/dfma.htm>
- [18] The University of Hull: DFA Analysis Overview, [http://www2.hull.ac.uk/discover/mapp/sandpit/dfa/dfa\\_analysis.aspx](http://www2.hull.ac.uk/discover/mapp/sandpit/dfa/dfa_analysis.aspx)
- [19] PTC Windchill Product Analytics; [www.ptc.com/product/windchill/cost](http://www.ptc.com/product/windchill/cost)
- [20] Siemens PLM Software; [www.plm.automation.siemens.com/en\\_us](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us)
- [21] Dassault Systemes: PLM Solution; [www.3ds.com](http://www.3ds.com)
- [22] DFMPRO: A Geometric product; <http://dfmpro.geometricglobal.com>
- [23] SOLIDWORKS Costing ; [www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/solidworks-costing.htm](http://www.solidworks.com/sw/products/3d-cad/solidworks-costing.htm)
- [24] Autodesk Simulation DFM; [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)
- [25] SEER FOR MANUFACTURING;  
<http://galorath.com/products/manufacturing/SEER-software-estimation-manufacturing-projects>
- [26] Micro Estimating Systems Inc.; [www.microest.com/www.mtisystems.com](http://www.microest.com/www.mtisystems.com)
- [27] aPriori Production Cost Management; [www.apriori.com](http://www.apriori.com)
- [28] CustomPartNet; [www.custompartnet.com](http://www.custompartnet.com)
- [29] Discus software; [www.discussoftware.com](http://www.discussoftware.com)
- [30] Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., Đurđev, M.: *Stanje i trend razvoja u oblasti projektovanja za izradu – DFM*, 39 Jupiter konferencija, Mašinski fakultet, Beograd, pp.3.75–3.81, 2014.
- [31] Lukić D., Todić V., Milošević M., Jovičić G., Vukman J.: *Software development for conceptual process planning*, 11th Anniversary International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, FME, Banja Luka, pp. 375-381, 2013.
- [32] Swift, K.G., Booker, J.D.: *Process Selection: From Design to Manufacture*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [33] Grujić, J., Tabaković, S., Živković, A., Zeljković, M., Gatalo, R.: *Modularna tumorska endoproteza zgloba kuka*, Infoteh-Jahorina, Vol. 10, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, pp. 259-262, 2011.
- [34] Lukić D., Todić V., Milošević M., Vukman J., Jovičić G.: *Multi-criteria evaluation and selection optimal manufacturing processes of the body endoprosthesis hip joint*, 35th International Conference of Production Engineering, Faculty of Mechanical and Civil Engineering Kraljevo, Kopaonik, pp. 297-300, 2013.

**Lukić, D., Milošević, M., Vukman, J., Đurđev, M., Antić, A.:**

## **CONCEPTUAL PROCESS PLANNING AND MANUFACTURING COST ESTIMATION**

**Abstract:** *Determining the production cost is the basis for better decision-making in manufacturing practice. The inability of enterprises to quickly and effectively determine the costs can significantly endanger their economic survival on the global market. The cost estimation is usually performed in the initial stages of product development, while the later stages consider the detailed cost calculation.*

*This paper represents the importance of manufacturing cost estimation in the conceptual process planning stage. The example of manufacturing cost estimation for hip joint endoprosthesis body is shown by using the developed software for cost estimation.*

**Keywords:** *Product development, Conceptual process planning, Cost estimation*



*Jelena Marjanović<sup>1</sup>, dr Nataša Gojgić<sup>2</sup>*

## PRIMENA OLAP-a ZA ANALIZU PARAMETARA OPERCIJA U TEHNOLOŠKOM POSTUPKU

### *Rezime*

*U radu je prikazana mogućnost primene računara u procesu upoređivanja operacija tehnoloških postupaka prilikom razvoja proizvoda tako da su postavke rada odgovaraju realnim potrebama proizvodnih kompanija. Za osnovu prilikom izrade baze podataka uzeta je operaciona lista koja sadrži opis predviđenih operacija za izradu jednog dela kao i redosled njihovog izvođenja. Ono što je prilikom izrade svakog mašinskog dela bitno jeste njegova cena. Priemnom OLAP kocke nad jednom bazi podataka u kojoj su uneta dva tehnološka postupka sa svojim operacijama i režimima obrade za zahvate, izvršeno je poređenje cena operacija sa svojim zahvatima što znatno utiče i na konačnu cenu proizvoda.*

**Ključne reči:** operacijski list, parametri zahvata operacija, OLAP

### 1. UVOD

Razvoj proizvoda je jedan od najvažnijih procesa u svakom preduzeću. Razvoj treba da omogući kraće vreme do komercijalizacije, lakšu proizvodnju, montažu i testiranje proizvoda, ispunjenje zahteva potrošača, održanje ili izgradnju brenda i očuvanje životne sredine.

Proces razvoja proizvoda se sastoji od:

1. izbora ideje za novi proizvod,
2. izrade konstruktivne dokumentacije na osnovu plana razvoja novog proizvoda,
3. izrade tehnološke dokumentacije proizvoda,
4. izrade prototipa i realizacija nulte serije,
5. sprovođenje izmena nad tehničko-tehnološkom dokumentacijom.

### 2. TEHNOLOŠKA DOKUMENTACIJA

Tehnološka dokumentacija je dokumentacija potrebna za pripremu, organizovanje i praćenje proizvodnje u industriji. Postoje dve grupe i to: administrativno-organizaciona dokumentacija i tehnička dokumentacija.

Kao ulazni element, tehnološka dokumentacija ima osnovni zadatak da definiše redosled i način izvođenja tehnoloških operacija u tehnološkom procesu.

Najčešći oblici tehnološke dokumentacije su tehnološka karta, tehnološki postupak i operacijski list.

- **Tehnološka karta** – pregled redosleda toka predmeta koji se obrađuje.

- **Tehnološki postupak** – definiše naziv i broj operacija sa opisom radnji u tehnološkoj operaciji uz definisanje i nekih drugih veličina: količina materijala, vreme obrade.

- **Operacijski list** – daje detaljan opis tehnološke operacije sa opisom sredstava za rad, alata sa

<sup>1</sup> Jelena Marjanović, [jelenamarjanovic032@gmail.com](mailto:jelenamarjanovic032@gmail.com), Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak

<sup>2</sup> dr Nataša Gojgić, [natasa.gojgic@vstss.com](mailto:natasa.gojgic@vstss.com), Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak

opisom rada i detaljnim crtežom proizvoda koji se proizvodi odgovarajućom operacijom.

## 2.1 Tehnološki postupak

Najčešće, postoje dve vrste dokumenata: jedan dokument za celokupan proces izrade predmeta, koji se naziva tehnološki postupak ili postupak rada i koji sadrži spisak operacija sa najneophodnijim podacima za svaku operaciju (redni broj operacije, naziv operacije, radno mesto i vreme operacije) i niz dokumenata za svaku pojedinačnu operaciju, koji se nazivaju tehnološka karta, operacioni list, sadržaj operacije itd. i koji sadrži sve potrebne podatke za izvođenje svake pojedinačne operacije iz tehnološkog postupka.

U opštem slučaju, kada se posmatra bilo koji proces obrade metala, tehnološkim postupkom se definišu svi potrebni podaci za proces izrade predmeta.

## 2.2 Operaciona lista

Operaciona lista sadrži opis predviđenih operacija za izradu jednog dela kao i redosled njihovog izvođenja. Operaciona lista predstavlja propratnicu radnog naloga i daje prikaz kompletnog tehnološkog postupka proizvoda sa operacijama, instrukcione liste operacija, mašinama, oznakom operacije (npr. redni broj operacije).

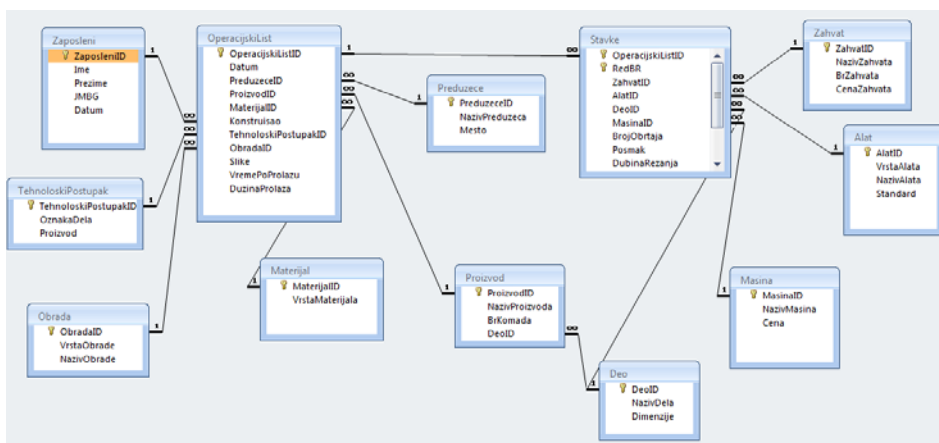
Operaciona lista se sastoji od podataka koji su direktno vezani za sam komad koji se obađuje, a u te podatke spadaju datum izrade operacionog lista, konstruktor, broj operacionog lista, vrsta alata koji je korišćen, njegov standard, kao i podaci o preduzeću. Osim toga, operacioni list sadrži i podatke o proizvodu, broju komada, broju i nazivu dela tog proizvoda, kao i o vrsti i nazivu obrade, broju i nazivu zahvata i mašini na kojoj je obrada izvršena.

## 3. ANALIZA DOKUMENTACIJE ZA IZRADU BAZE PODATAKA

Realizacija baze podataka za evidenciju operacionih lista zahteva definisanje modela podataka (slika 1) korišćenjem *CASE* alata *ERwin*, dok su za projektovanje modela podataka neophodni sledeći podaci dobijeni na osnovu analize polja iz operacijske liste i stavki:

1. Broj operacijskog lista kao i datum izrade operacione liste;
2. Preduzeće za koje se izrađuje dati deo;
3. Naziv proizvoda kao i naziv i oznaka materijala;
4. Podaci o zaposlenima, koji imaju ključnu ulogu u izradi i kontroli tehnološkog postupka, polja za potpise učesnika u izradi i odobravanju crteža sa datumima pojedinih aktivnosti;
5. Oznaka tehnološkog postupka koja je vezana za tačno određeni deo;
6. Naziv zahvata, alata i dela koji opisuju vrstu obrade koja se izvršava, kojim alatom kao i za koji deo se vrši navedena operacija.;
7. Podaci o mašini na kojoj se vrši operacija;
8. Broj obrtaja;
9. Posmak;
10. Dubina rezanja;
11. Ukupno vreme predstavlja utrošak vremena neophodnog za izvršenje jednog zahvata.

Šema logičke baze podataka obuhvata poseban skup podataka (odgovarajući rečnik podataka) sa odgovarajućom semantikom i vezama među elementima baze podataka. Fizički, ove veze su smeštene u bazi podataka, za kasniju upotrebu. Određivanjem tipova polja u fizičkom modelu podataka u *ERwin*-u i njegovim generisanjem dobija se baza podataka u *Microsoft Access*-u 2007 (slika 1).



Slika 1. Baza podataka za evidenciju operacija tehnološkog postupka

Za evidenciju parametara za operacijski list potrebno je uraditi formu za unos podataka. Za unos oba tehnološka postupka N52-01-44 i N52-02-45 za izradu kontrolne klupe, a koja su korišćena u radu koristi se ista forma prikazana na slici 3.

OperacijskiListID	Zahvat	Alat	Deo	Masina	BrojObrtaja	Posmak	DubinaRezanja	BrojProlaza
3	Odsecanje mat	Strugarski nož	Vratilo	Strug	600	0,25	0,15	1
3	Čeono grubo st	Strugarski nož	Vratilo	Strug	630	/	1	1
3	Poprečno grubo	Strugarski nož	Vratilo	Strug	630	/	1	1
3	Poprečno fino	Strugarski nož	Vratilo	Strug	3000	0,7	1	1
3	Uzdužno grubo	Strugarski nož	Vratilo	Strug	630	0,4	2	1
3	Uzdužno fino st	Strugarski nož	Vratilo	Strug	800	0,8	10	3
3	Zabušivanje sre	Strugarski nož	Vratilo	Strug	630	/	/	1
3	Obimno brušer	Strugarski nož	Vratilo	Strug	630	/	1	1

Slika 2. Korisnička forma za Operacijski list

#### 4. ANALIZA PARAMETARA ZAHVATA OPERCIJA PRIMENOM OLAP-a

OLAP tehnologija je zasnovana na multidimenzionalnoj kocki podataka koja omogućava analitičarima da interaktivno manipulišu velikim količinama detaljnih i konsolidovanih podataka i da ih ispituju iz mnogih perspektiva. Ona takođe omogućava analizu kompleksnih odnosa između ogromnog broja stavki podataka smeštenih u multidimenzionalnim bazama podataka radi otkrivanja trendova.

OLAP ima moć gledanja u bazu podataka iz raznih perspektiva. Ugao gledanja se određuje zadavanjem uslova nad dimenzijama čime se preciznije lociraju podaci koji se žele analizirati. Zadavanjem uslova nad metrikama (vrednostima) iz lociranog korpusa podataka se mogu izdvojiti samo one vrednosti koje zadovoljavaju zadate kriterijume. Izgled izveštaja koji predstavlja rezultat analize se lako opisuje odabirom i uređenjem atributa i metrika za prikaz. Manipulacije nad izveštajima kao što su Page-By, pivoting, sortiranje, filtriranje i druge omogućuju analitičaru da od postojećeg izveštaja jednim potezom napravi novi koji će pružiti potpuno nove informacije.

Izborom opcije MSQRY32 otvara se prozor pri čemu se pokreće OLAP. Klikom na ikonicu otvara se novi prozor u kome možemo izvršiti izbor baze podataka sa kojom želimo da povežemo OLAP. Kako bi



olakšali unos podataka u *OLAP* potrebno je u *Access* bazi kreirati upit sa stavkama koje želimo da prikazemo u *OLAP*-u. U ovom *Query*-ju nije potrebno vršiti obradu podataka, niti sortiranje jer je sve predhodno odrađeno u *MSAccess*-u, koji ima znatno bolje alatke za obradu podataka. Ovim nam je postupak znatno olakšan jer smo sve željene podatke prebacili direktno u *OLAP* i možemo ih direktno sačuvati.

#### 4.1 Poređenje cena zahvata operacija

Ono što je prilikom izrade svakog mašinskog dela bitno jeste njegova cena. U dosadašnjem delu rada uspeli smo da u istoj bazi prikazemo dva tehnološka postupka sa svojim režimima obrade. U sledećem delu rada izvršićemo poređenje cena tehnoloških postupaka sa svojim zahvatima. Klikom na dugme *Insert*, *Pivot table* izabraćemo prvu ponuđenu opciju pomoću koje ćemo izvršiti sumiranje podataka. Pivot tabela nam olakšava uređivanje komplikovanih listi podataka i daje nam mogućnost fokusiranja na detalje.

Nakon izbora prve opcije sa padajuće liste otvoriće se novi prozor u kome ćemo izabrati opseg podataka koje želimo da uporedimo, što znači da nam ova opcija daje mogućnost da suzimo listu sa podacima, odnosno da se usresredimo na detalje. U našem slučaju radi dobijanja što tačnijih detalja potrebni su nam svi prikazani podaci, zato ćemo selektovati celu tabelu.

Na slici 3 vidimo rezultate izveštaja. Do ovih rezultata smo došli tako što smo prvo u *Checkbox*-u označili podatke koje želimo da prikazemo. U *Pivot Table Filed List* raščekiramo sve osim *OznakeDela* i *NazivaZahvata*, zatim u donjoj tabeli *OznakuDela* prebacimo u polje *Legends Fields* i onda se čekiraju parametri koje želimo da uporedimo, odnosno *CeneZahvata*.

Sum of CenaZahvata	Column Labels		
Tehnološki postupak	N52-01-44	N52-02-45	Grand Total
Bušenje rupe	33.33333333	16.66666667	50
Nareckivanje	11.11111111	16.66666667	27.77777778
Obaranje ivice	11.11111111	22.22222222	33.33333333
Obimno brušenje	27.08333333	37.5	64.58333333
Odsecanje materijala	16.66666667	27.77777778	44.44444444
Poprečno fino struganje	33.33333333	388.8888889	422.2222222
Poprečno grubo struganje	33.33333333	916.6666667	950
Urezivanje žljeba	2.777777778	5.555555556	8.333333333
Uzdužno fino struganje	63.88888889	50	113.8888889
Uzdužno grubo struganje	650	27.77777778	677.7777778
Zabušivanje središnjeg gnezda	11.11111111	55.55555556	66.66666667
<b>Grand Total</b>	<b>893.75</b>	<b>1565.277778</b>	<b>2459.027778</b>

Slika 3. Pivot tabela sa izabranim parametima za poređenje

Od upita koje smo formirali u *MCAccess*-u dobili smo mogućnost da podatke koje smo do sada mogli samo pregledati sortiramo na više načina, izdvajamo one koji su nam interesantni i međusobno ih poredimo. Što znači da nije potrebno imati dva upita i dva izveštaja i zatim ručno sabirati rezultate i porediti ih, već je dovoljno imati samo jedan upit koji obuhvata sve potrebne stavke, a iz njega selektovati ono što želimo da vidimo i što želimo da poredimo.

#### 4.2 Grafički prikaz rezultata

Pored toga što možemo izabrati podatke koje želimo da pratimo i vršimo njihovo poređenje *On-Line Analytical Processing* nam omogućava i grafički prikaz parametara. *PivotChart* se formira na isti način kao i pivot tabela i u našem slučaju sa istim parametrima koje želimo da pratimo. On nam grafički prikazuje poređenje cena zahvata dva tehnološka postupka. Pomoću ovog grafičkog poređenja lako možemo pratiti





A.Nestorov<sup>1</sup>, D.D.Milanović<sup>2</sup>, M.Misita<sup>2</sup>

BAZNI MATEMATIČKI MODEL ZA PROJEKTOVANJE SOFTVERSKOG REŠENJA ZA  
UPRAVLJANJE LJUDSKIM RESURSIMA U CILJU POVEĆANJA KVALITETA I  
EFIKASNOSTI RADA

*Rezime*

U industriji, pogotovo u granama industrije gde manuelni rad čini najveći deo proizvodnog procesa, pored praćenja efikasnosti procesa i opreme, veoma je značajno praćenje efikasnosti operatera, tako da stepen njihove obučenosti postaje neophodnost i jedan od ključnih faktora za povećanje i očuvanje kvaliteta. Kako na pravilno upravljanje ljudskim resursima u proizvodnom procesu utiče veliki broj faktora, donošenje najboljih rešenja u smislu organizacije rada, postaje veoma zahtevan i kompleksan zadatak. U radu će biti predstavljeno formiranje matematičkog problema, kao osnove za kreiranje softvera sa ciljem praćenja uticajnih faktora i predlaganja optimalnijeg rešenja u zavisnosti od plana proizvodnje. Uvodjenje software-a u proces organizacije i kontrole radne snage u proizvodnim uslovima značajno može doprineti povećanju efikasnosti i kvaliteta rada.

**1. UVOD**

Polivalentnost ili obučenost operatera je jedan od ključnih faktora za efikasno i kvalitetno poslovanje. Naročito ovo ima značaja u industriji gde najveći deo aktivnosti u procesu formiranja finalnog proizvoda ima manuelni ljudski rad. Automobilska industrija, tj. proizvodnja komponenata za njene potrebe je pravi primer za to, pre svega zbog visokih standarda kvaliteta kao i veoma kratkih rokova proizvodnje i isporuke. Veliki broj različitih komponenti u kombinaciji sa velikim brojem operatera sa različitim nivoima obučenosti, čini jednu složenu matricu na čiju promenu utiče nekoliko faktora u toku vremena.

Matrica obučenosti operatera u suštini predstavlja skup podataka za svakog od operatera, ko može da obavlja koju operaciju i sa kakvom uspešnošću. Veoma je bitno redovno ažuriranje ove matrice, kako nakon obuke za novi proizvod, tako i za stanje performansi operatera na postojećim proizvodima (1).

Iz potrebe da se na najbolji način isprate dinamičke promene matrice, kao i da se obezbedi maksimalna efikasnost i minimalna šansa za pojavu greške, rodila se ideja o kreiranju software-a / baze znanja. Software bi pored praćenja promene nivoa obučenosti za svakog operatera po proizvodu, imao i ulogu raspoređivanja radne snage po radnim stanicama sa ciljem ostvarivanja najboljih performansi. Raspored operatera po radnim stanicama bi bio takav, da se neefikasnost i mogućnost pojave greške svede na minimum. U takvom slučaju je uticaj čoveka, tj. svaki vid subjektivnog zaključivanja ili previda gotovo eliminisan. Takođe, svi vremenski faktori koji mogu uticati na nivo obučenosti, kao što su: poslednje učestvovanje u proizvodnji reference, poslednji negativni audit, poslednja reklamacija itd., biće automatski praćeni i kontrolisani.

Pored već nabrojanih aktivnosti, automatizacija ovog procesa će doprineti i boljem i efikasnijem praćenju razvoja operatera kroz automatsko kreiranje trening planova u odnosu na potrebe, planiranje njihovog izvršenja kao i praćenje njihove efikasnost kroz rezultate rada.

<sup>1</sup> Mecaplast Group, Lazarevački drum bb, Zrenjanin

<sup>2</sup> Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

## 2. POLIVALENTNOST I MATRICA POLIVALENTNOSTI

Optimalno korišćenje ljudske radne snage, sa najefikasnijim iskorišćenjem njihove obučenosti za pojedini proizvod, za kompaniju može da ima nekoliko benefita, uključujući: povećanje kvaliteta izrade proizvoda, smanjenje troškova za zapošljavanje i selekciju, povećanje fleksibilnosti rada (2).

Nivo obučenosti operatera se može podeliti u 4 nivoa koji se obično obeležavaju simbolima (I, L, U, O) (3):

1. Nivo jedan koji se obično označava sa uspravnim crtom (I) predstavlja operatera na treningu. Operatera na treningu prati i kontrolise operater sa nivoom obučenosti 3 (U). Nivo 1 obuke podrazumeva čitanje i razumevanje procedure za rad, tj. teorijsko razumevanje redosleda operacija i način njihovog obavljanja. Pored teoriskog, operater prolazi i prvu praktičnu obuku za referencu za koju se trenira. Kao što je napomenuto, nadzor načina rada operatera na treningu obavlja polivalentan operater za tu referencu. Kao dokaz o dovoljnoj istreniranosti je i jedna pozitivna kontrola standardnog rada (SW audit) od strane lidera.
2. Nivo 2 (L) obučenosti podrazumeva da je operater uspešno savladao nivo 1 obuke, i da je osposobljen da prepozna zahtevani kvalitet na reference za koju se trenira. To praktično znači da operater može da prepozna sve defekte na delu i da takve delove ukloni iz proizvodnje. Kao i za nivo 1, operater radi uz kontrolu drugog polivalentnog operatera (min. nivo 3). Kao dokaz o dovoljnoj istreniranosti su dve pozitivne kontrole standardnog rada (SW audit) od strane lidera.
3. Nivo 3 (U) obučenosti podrazumeva da je operater osposobljen da prepozna zahtevani kvalitet na komponenti, kao i da postize da obavi sve zahtevane operacije u propisanom vremenu. Nadzor nad operaterom na obuci za nivo 3 (U) isključivo obavlja operater sa najvisim nivoom obučenosti, nivoom 4 (O).
4. Nivo 4 (O) obučenosti stice operater koji najmanje 6 meseci u kontinuitetu ima nivo obučenosti 3 (U) i osposobljen je da stečeno znanje prenese na druge.

Matrica obučenosti / polivalentnosti se predstavlja u obliku (slika 2), ili relacijom:

$$m \times n = b \quad (1)$$

gde je:

m - broj operatera u smeni

n - broj proizvoda

b - nivo obučenosti operatera za svaki od proizvoda

Nivo obučenosti operatera može da se kreće u oba smera (na gore, rastuće ili na dole, opadajuće). Rastuće znači da svojim kvalitetnim radom i sticanjem rutine na datom proizvodu nivo obučenosti operatera raste od nivoa 1 do 4. Takođe postoje uslovi kada nivo obučenosti može da ide i opadajućom putanom, tj. da operater izgubi određeni nivo za pojedini proizvod.

Nivo obučenosti se može izgubiti u sledećim slučajevima, i to:

- Nakon ponovljene greške na istom proizvodu, ili iste ili sličane greške na sličnom proizvodu, operater se vraća na nivo I obučenosti,
- Ukoliko operater nije proizvodio komponentu u trajanju duže od mesec dana, vraća za jedan nivo obučenosti 2 (npr. sa U na L)
- U slučaju da je od poslednjeg rada operatera na nekoj komponenti prošlo više od 3 meseca u kontinuitetu, vraća na nivo obučenosti I.
- Ukoliko operater na 2 uzastopne provere načina rada (SW audit) ima negativan rezultat, vraća se na nivo obučenosti I.
- U slučaju nepoštovanja pravila o bezbednosti i zdravlja na radu, operater se vraća na nivo I.



Tabel 1. Koeficienti težine po proizvodu, izvod dela tabele

Naziv proizvoda	Ciklusno vreme mašine	Vreme rada operatera	Koeficient c	Broj komponenti koji se ugrađuje	Koeficient d	Broj koraka u SW	Koeficient e	Zahtevani kvalitet f	Ukupni koeficient $c*d*e*f$
B pillar lower	43	38	0,88	4	0	8	0	0,5	1,38
B pillar upper	35	30	0,86	2	0	6	0	0,5	1,36
Front door sills	49	47	0,96	2	0	8	0	0,5	1,46
Rear door sills	48	48	1,00	8	0	8	0	0,5	1,50
Tech. supp. RDS+TLT	27	22	0,81	2	0	8	0	0	0,81
Trunk lower trim	58	57	0,98	19	0,5	8	0	0,5	1,98
Trunk side trim	71	54	0,76	4	0	9	0	0,5	1,26
B pillar front door	68	66	0,97	6	0	10	0,5	1	2,47
B pillar rear door	68	62	0,91	8	0	10	0,5	1	2,41
C pillar rear door	68	64	0,94	8	0	11	0,5	1	2,44
BSM front door base	46	44	0,96	12	0,5	2	0	0,5	1,96
BSM front door lux	50	44	0,88	12	0,5	10	0,5	0,5	2,38
BSM rear door base	52	44	0,85	11	0,5	10	0,5	0,5	2,35
BSM rear door lux	45	44	0,98	11	0,5	12	0,5	0,5	2,48

### 3. PREDLOG SOFTVERSKOG REŠENJA NA BAZI MATEMATIČKOG MODELA

Softver čija bi logika rada bila zasnovana na matematičkom modelu kreiranom od niza pravila i ograničenja, sastojao bi se od tri velike celine:

1.1. Ulazni podaci (inputi)

1.2. Logički deo (matematički model sa kreiranim vezama između ulaznih podataka),

1.3. Izlazni podaci (izveštaji)

1.1. Ulaze (input) u bazu znanja i odlučivanja činili bi sledeći podaci:

- Spisak operatera,
- Nivo obučenosti operatera,
- Šifarnik proizvoda,
- Sastavnice proizvoda (ciklusna vremena, broj operatera potrebnih za rad, koeficiente proizvodne težine po proizvodu itd.),
- Raspored operatera po smenama i GAP-ovima (autonomna proizvodna jedinica unutar smene),
- Spisak GAP-ova,
- Spisak mašina,
- Spisak reklamacija,
- Spisak audita (provera) procesa,
- Evidencija odsutnosti.

1.2. Logički deo softvera pored funkcije kreiranja relacija između ulaznih podataka, imao bi još nekoliko ključnih zadataka:

- Promena nivoa obučenosti operatera po proizvodu u toku vremena na osnovu jasno definisanih pravila,
- Predlaganje najoptimalnijeg rasporeda operatera po radnim stanicama,
- Kreiranje trening planova na osnovu definisanih potreba,
- Predlaganje rasporeda provera rada po operateru i proizvodu.

Relacija između matrice obučenosti (slika 1) i plana, matematički se može prikazati na sledeći način (4):





$$y < 30, i$$

$$z = 3, i$$

$$k = 0$$

..... (10)

Softver kreiran na ovakvoj bazi podataka (znanja) treba da bude pomoć pri odlucivanju lideru pri raspoređivanju operatera po radnim stanicama na početku smene na osnovu zadatih pravila i kriterijuma, kreiranje trening plana na osnovu ukupnih težinskih faktora po operateru, a vodeći pritom računa da matrica ne postane prezasićena, što predstavlja gubitak finansijskih sredstava za obavljanje nepotrebnih treninga. Takodje, softver treba da olakša, ako ne i potpuno automatizuje proces praćenja nivoa obučenosti na osnovu već navedenih uticajnih faktora, što danas predstavlja ozbiljan izazov i veliki prostor za kreiranje grešaka.

Ovaj alat bi se koristio i za bolju kontrolu i redukovanje procenta škarta po proizvodu, tako što bi se jednostavnim kombinovanjem podataka iz SAP sistema o vrednostima škarta po danu i proizvodidu sa podacima o operaterima koji su radili na proizvodnji istog, mogli doneti vazni zaključci o percepciji kvaliteta pojedinog operatera.

1.3. Izlazne podatke (output-e) bi činili:

- Smenski raspored operatera po radnim stanicama u zavisnosti od plana proizvodnje i trenutne raspoloživosti radne snage,
- Lista operatera sa njihovim nivoima obučenosti u realnom vremenu,
- Broj grešaka po operateru / proizvodu,
- Rezultati provere rada po proizvodu / operateru,
- Sugerisanje kome i na kom proizvodi treba uraditi proveru rada,
- Rotacija operatera po proizvodima za zadati period,
- Trening plan operatera kako bi se matrica zasitila,
- Škart po operateru / proizvodu,
- Planiranje pauza operatera (u vreme zamena alata – povećanje efikasnosti).

#### 4. ZAKLJUČAK

Kao što je napomenuto na početku rada, pravilno upravljanje ljudskim resursima pre svega u industrijama u kojima se proizvodnja bazira na manualnom radu, je jedan od ključnih uslova za ostvarivanje efikasnog i uspešnog poslovanja.

Primena informacionih tehnologija u svrhu automatizacije procesa praćenja evaluacije ljudske radne snage, kao i pomoći pri odlučivanju, je oblast koja nije dovoljno istražena. U najvećem broju slučajeva ove aktivnosti i dalje obavlja čovek manuelno, primenom tabela ili jednostavnih formi. To ostavlja dovoljno prostora za kreiranje grešaka, pre svega zbog nedovoljno dobre ažurnosti podataka.

Prikazano rešenje u ovom radu je formirano na primeru proizvodnog procesa kompanije Mecaplast, koja se bavi proizvodnjom plastičnih komponenti za potrebe automobilske industrije, s tim što su elementi softvera formirani modularno, čime je omogućeno da se uz jednostavne adaptacije može primeniti u bilo kom proizvodnom sistemu.

Prednost primene ovog rešenja je višestruka, pre svega sa stanovišta smanjenja direktnog uticaja čoveka (lidera / supervisora) na odluke oko raspoređivanja operatera po radnim stanicama, kao i na formiranje neophodnih treninga i dinamike njihovog održavanja.

Krajnji rezultat se ipak ogleda u povećanju efikasnosti rada, smanjenju verovatnoće nastanka grešaka usled rada sa nedovoljno dobro obučanim operaterom, potencijalno smanjenje broja lidera po smeni usled smanjenog obima manualnih operacija koje su obavljali, eliminacija mogućnosti održavanja nepotrebnih obuka, prikupljanju preciznih podataka o kvalitetu rada operatera po proizvodu, održivosti nivoa obučenosti u vremenu pravilnom rotacijom operatera, kao i mnogi drugi benefiti. Na kraju, svaka od navedenih prednosti ima značajan uticaj na finansijski rezultat poslovanja, kao i na obezbeđivanje održivosti ugleda kompanije u očima kupaca boljim upravljanjem i kontrolom procesa proizvodnje.



## 5. LITERATURA

- [1] R. Narkhedkar, V. Dhorugade, M. J Sonavane, “Skill matrix: Effective tool to boost productivity“, Indian Textiles Journal, 2013,
- [2] W. Waszkeilewicz, R. Prusak, R. Budzik, “The increase of metallurgical enterprise elasticity by using polyvalence skills of workers”, Metalurgija 44, str. 69-73, 2005
- [3] Mecaplast interna procedura, RM-EE-D00-C, <http://intranet.mecaplast.com/sites/SMART/Documents/RMEED00-C-EN.docx>, Monaco, 2016
- [4] R. Todić, V. Marković, Matematički metodi u ekonomiji preduzeća, Institut za organizaciju rada i automatizaciju poslovanja, Beograd, 1966

**A.Nestorov, D.D.Milanović, M.Misita**

***Abstract:** In industry, especially in the part of industry where the manual work is the biggest part of the production process, in addition to monitoring efficiency of processes and equipment, it is very important to follow the efficiency of operators, on the way that their level of polyvalence becomes necessity and one of the key factors for quality level increasing. How to properly manage with human resources in the production process are affected by many factors , adoption of best practices in terms of organization of work , it becomes very demanding and complex task . In this paper will be presented creation of mathematical model as the basis for the creation of software with the aim of monitoring the influencing factors and propose optimal solutions depending on the production plan. The introduction of software in the process of organization and control of the workforce in manufacturing conditions can significantly contribute to increasing the efficiency and quality of work.*

**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE  
with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**



**27. simpozijum**

**CAD/CAM**

Beograd, maj 2016.

## CAD/CAM

<b>Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Milićević, I.</b> OPTIMIZACIJA SISTEMA LIVENJA NOSAČA ZUBA BAGERA VEDRIČARA.....	2.1
<b>Durašković, D., Janjić, M., Vukčević, M.</b> MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA PLOČA OD LAMINIRANOG SIGURNOSNOG STAKLA.....	2.7
<b>Đurđević, Đ., Anđelić, N., Maneski, T., Đurđević, A.</b> NUMERIČKA ANALIZA NAPONA UŠKE NA KONTEJNERSKOM TERMINALU.....	2.12
<b>Miloradović, N., Plić, S., Vujanac, R.</b> MODELIRANJE I PRORAČUN GRAĐEVINSKE STUBNE DIZALICE .....	2.18
<b>Mitrović, A., Kovač, P., Kulundžić, N., Savković, B.</b> MODELOVANJE I SIMULACIJA PROCESA OBRADE GLODANJEM.....	2.23
<b>Mladenović, G., Tanović, L., Pjević, M., Popović, M.</b> OBRADA SKULPTORSKIH POVRŠINA - RAZVOJ CAD/CAM SISTEMA .....	2.27
<b>Popović, M., Mladenović, G.</b> АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЈЕ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА УРЕЗНИКА СА ПРАВИМ ЖЛЕБОВИМА .....	2.33





Dučić, N.<sup>1)</sup>, Čojbašić, Ž.<sup>2)</sup>, Slavković, R., Milićević, I.<sup>1)</sup>

## OPTIMIZACIJA SISTEMA LIVENJA NOSAČA ZUBA BAGERA VEDRIČARA

### Rezime

*U radu je predstavljena metodologija unapređenja procesa livenja u pesku, nosača zuba bagera, koja obuhvata primenu genetskih algoritama u optimizaciji geometrije ulivnog sistema. Primarni cilj optimizacije geometrije ulivnog sistema je da maksimizuje brzinu punjenja kalupa, uzimajući u obzir definisana ograničenja, kao što su modul ulivnika i Reynoldsov broj. Predmet optimizacije su dimezije ulivnika i visina livenja. Na bazi vrednosti optimizovanih veličina projektovana je celokupna geometrija ulivnog sistema. Primarni cilj optimizacije sistema hranjenja odlivka jeste smanjenje utroška materijala, uz poštovanje odgovarajućih geometrijskih limita. Optimizovano rešenje sistema livenja podvrgnuto je numeričkoj simulaciji. Nakon potvrde o valjanosti dizajniranog i optimizovanog sistema usledila je industrijska implementacija.*

**Ključne reči:** livenje u pesku, optimizacija, genetski algoritmi, numerička simulacija

### 1. UVOD

Pravilno i potpuno popunjavanje kalupa je osnovni cilj procesa livenja, kojim se postiže visok kvalitet odlivka. Uloga dizajna ulivnog sistema i dizajna hranitelja u ostvarenju ovog cilja je veoma značajna. Nepravilan dizajn ulivnog sistema dovodi do brojnih nedostataka u procesu livenja, što za posledicu ima nizak kvalitet odlivka. To su uglavnom sledeći nedostaci: nepotpuno punjenje kalupa, čvrsti i gasoviti uključci. Nepotpuno punjenje kalupa se manifestuje u dva oblika: hladni varovi i šupljine. Hladni varovi se javljaju u slučaju susreta dva fluida suprotnih smerova koji se ne mogu stopiti u potpunosti. Šupljine se javljaju kada rastopljeni metal ne popuni određene delove kalupa. Čvrsti uključci su direktna posledica turbulencija i manifestuju se kao uključci peska. Gasoviti uključci se javljaju kao vazduh “zarobljen” u kalupu, u formi rupa i poroznosti. Dakle, zadatak ulivnog sistema je da obezbedi glatko, ujednačeno i potpuno punjenje kalupa čistim, istopljenim metalom. Glatko punjenje eliminiše turbulencije, ujednačeno punjenje obezbeđuje kontinuirano punjenje u toku vremena, a potpuno punjenje podrazumeva vođenje istopljenog metala do tankih i krajnjih delova kalupa [1]. Tokom hlađenja odlivka dolazi do zapreminskog skupljanja metala, tj. smanjenja zapremine odlivka. Značaj hranitelja se ogleda u njihovoj funkciji da nadoknađuju odlivku manjak tečnog metala usled zapreminskog skupljanja [2].

Ulivni sistem i sistem hranjenja predstavljaju dva integralna dela sistema livenja u pesku, čije je unapređenje predmet ovog rada. Objekat livenja je nosač reznog zuba bagera, a postizanje visokog kvaliteta odlivka optimizacijom i dizajnom sistema livenja je primarni cilj ovog istraživanja. Dosadašnji sistemi livenja korišćeni u izradi nosača reznog zuba bagera, pokazali su niz nedostataka koji su se odrazili na kvalitet odlivka, ali i na utrošak materijala i efikasnost livenja. Optimizacija procesa livenja je predmet brojnih istraživanja sprovedenih do sada, a sve u cilju zadovoljenja kvalitativnih karakteristika proizvoda i povećanja efikasnosti i ekonomičnosti procesa. Pristupi rešavanju optimizacionih problema u ovoj oblasti su različiti, u zavisnosti od parametara procesa koji se optimizuju, kao i od korišćenih optimizacionih tehnika. Većina dostupnih istraživanja se bavi problemima lokacije ulivnika u sistemu livenja, minimizacijom brzine istopljenog metala u ulivniku, minimizacijom deformacija, optimizacijom pozicije, tipa i zapreminskih karakteristika hranitelja, itd. Za razliku od literaturno dostupnih istraživanja, ovo istraživanje se bavi maksimizacijom stope punjenja kalupa, što je posebno značajno za tanke i duge odlivke koji brzo gube

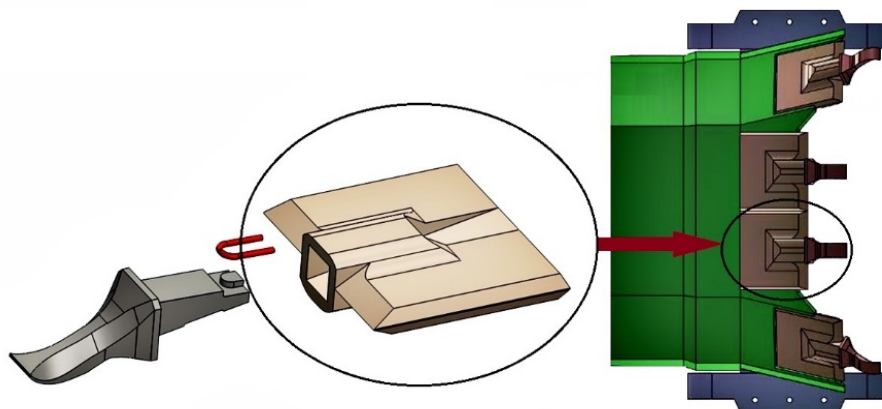
<sup>1)</sup> M.Sc Nedeljko Dučić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, ([nedeljko.ducic@ftn.kg.ac.rs](mailto:nedeljko.ducic@ftn.kg.ac.rs)), prof. dr Radomir Slavković, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, ([radomir.slavkovic@ftn.kg.ac.rs](mailto:radomir.slavkovic@ftn.kg.ac.rs)), dr Ivan Milićević, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, ([ivan.milicevic@ftn.kg.ac.rs](mailto:ivan.milicevic@ftn.kg.ac.rs))

<sup>2)</sup> prof. dr Žarko Čojbašić, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, ([zcojba@ni.ac.rs](mailto:zcojba@ni.ac.rs))

toplotu, a veća brzina punjenja kalupa pomaže da se eliminišu pojave hladnih varova i šupljina.

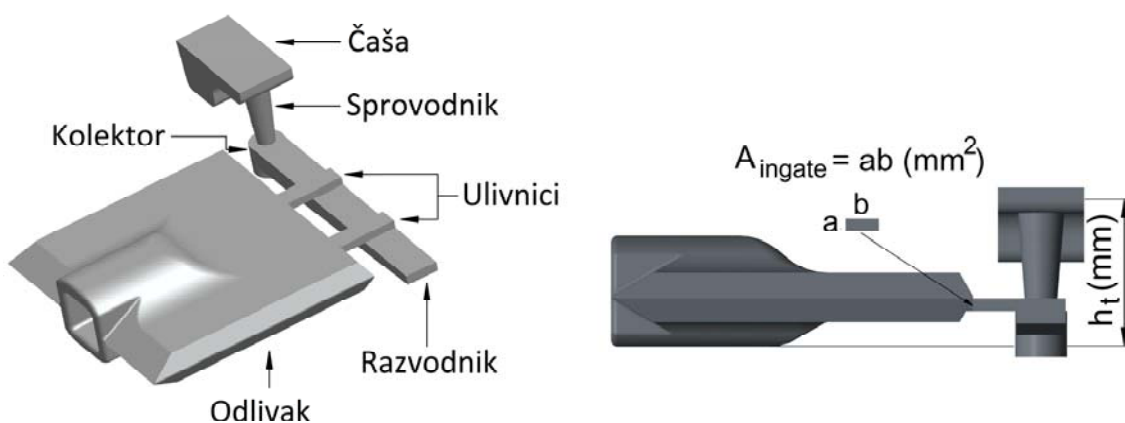
## 2. POSTAVKA ULIVNOG SISTEMA

Kao što je naglašeno u uvodu, odlivak je nosač reznog zuba bagera, čiji je CAD model prikazan na Slici 1. Predviđeno je da nosač reznog zuba bude izrađen od manganskog čelika hemisjskog sastava (0.5% C, 1.4% Mn, 0.035% P, 0.035% S, 0.4% Si, 0.1% V), koji je otporan na dinamička opterećenja i udare.



Slika 1. Rezni zub, nosač zuba i vedrica

Prvi korak u optimizaciji i dizajnu ulivnog sistema je izbor tipa ulivnog sistema. U konkretnom slučaju izabran je horizontalni ulivni sistem sa ulivnikom na podeonoj liniji kalupa, zbog dobre primenljivosti kod gravitacionog livenja u pesku. Ulivni sistem sa ulivnikom na podeonoj liniji kalupa karakteriše visoka stopa punjenja kalupa u poređenju sa sistemom kod koga je ulivnik na dnu, kao i manji efekti turbulencija u poređenju sa sistemom kod koga je ulivnik na vrhu. Na Slici 2 dat je prikaz predloženog ulivnog sistema, kao i parametri koji su direktan predmet optimizacije:  $A_{ingate}$  – poprečni presek ulivnika,  $h_t$  – visina između donje površine odlivka i nivoa istopljenog metala u ulivnoj čaši. Na osnovu pomenutih parametara definišu su geometrijske vrednosti ostalih elemenata ulivnog sistema. Predloženi ulivni sistem obuhvata ulivnu čašu, sprovodnik, kolektor, razvodnik i ulivnike, kao elemente putanje istopljenog metala od livačkog lonca do kalupa.



Slika 2. Ulivni sistem za livenje nosača zuba

## 3. OPTIMIZACIJA GEOMETRIJE ULIVNOG SISTEMA

U realnim proizvodnim uslovima dizajn ulivnog sistema se zasniva na principu eksperimentisanja, pokušaja i grešaka. U ovom delu tehničkog rešenja predstavljena je primena genetskog algoritma (GA) u optimizaciji geometrije ulivnog sistema. Genetski algoritam je heuristička metoda optimizacije koja imitira prirodni evolucionjski proces. Karakteriše ih jednostavnost ideje na kojoj su bazirani, kao i njihove primene, što ih kvalifikuje kao vrlo moćan alat u rešavanju čitavog niza problema iz inženjerske prakse. Analogija evolucije kao prirodnog procesa i genetskog algoritma kao optimizacione tehnike, ogleda se u procesu

selekcije i genetskim operatorima. Kod genetskih algoritama ključ selekcije je funkcija cilja, koja na odgovarajući način predstavlja problem koji se rešava. Definisane funkcije cilja predstavljaju jedan od najznačajnijih koraka u optimizaciji upotrebom GA. Cilj optimizacije je maksimiziranje brzine punjenja kalupa (1).

$$Filling\_rate = \rho_m A_{ingate} V_{ingate} \quad (1)$$

Gde su:  $\rho_m$  – gustina istopljenog metala,  $A_{ingate}$  – poprečni presek ulivnika,  $V_{ingate}$  – brzina istopljenog metala na ulivniku. Obzirom na male varijacije gustine metala iznad tačke topljenja, u ovoj analizi je  $\rho_m = const.$ . Dakle, brzina punjenja kalupa zavisi od poprečnog preseka ulivnika ( $A_{ingate}$ ) i brzine istopljenog metala na mestu ulivnika ( $V_{ingate}$ ). Povećanje brzine punjenja kalupa implicira smanjenje vremena punjenja kalupa. Na osnovu toga minimiziranje vremena punjenja dato relacijom (2) predstavlja funkciju cilja optimizacije. Ukupno vreme punjenja kalupa može se odrediti integracijom vremena punjenja svakog sloja kalupa od dna do vrha.

$$\tau_f = \int_0^{h_{cast}} \frac{A_i(h)}{\sum_j A_{ingate-j} \cdot V_{ingate-j}} dh \quad (2)$$

Gde su:  $A_i(h)$  površina poprečnog preseka odlivka u funkciji visine odlivka,  $A_{ingate-j}$  i  $V_{ingate-j}$  su poprečni presek i trenutna brzina istopljenog metala, respektivno  $j$ -og ulivnika,  $h_{cast}$  je visina odlivka, čija je vrednost 90mm. Kako su predviđena dva ulivnika istog poprečnog preseka,  $A_{ingate} = a \cdot b$  i brzina  $V_{ingate} = \sqrt{2g \cdot (h_t - h)}$ , vreme punjenja kalupa je dato relacijom (3).

$$\tau_f = \frac{1}{2ab\sqrt{2g}} \int_0^{h_{cast}} \frac{A_i(h)}{\sqrt{h_t - h}} dh \quad (3)$$

Gde su:  $g$  – gravitaciono ubrzanje,  $h_t$  – rastojanje između dna odlivka i nivoa istopljenog metala u ulivnoj čaši (Slika 2). Poprečni presek odlivka  $A_i(h)$  je promenljivog karaktera, u zavisnosti od visine odlivka. Izračunavanje funkcije  $A_i(h)$  je naredni korak u dobijanju funkcije cilja. Kreiranjem poprečnih preseka (sa korakom  $\Delta h = 1mm$ ) na CAD modelu odlivka dobijene su vrednosti površina porečnih preseka na odgovarajućoj visini odlivka, (Slika 3.).



**Slika 3.** Poprečni presek odlivka  $A_i(52mm) = 78041.27mm^2$

Interpolacijom dobijenih vrednosti, pomoću tri relacije u odgovarajućim granicama, dobija se funkcija promene poprečnog preseka prema visini odlivka. Prvom relacijom je dobijena promena poprečnog preseka u granicama od 0 do 21 mm.

$$A_i(0 - 21) = -0.39h^3 - 33.9h^2 + 1095h + 7032 \quad (4)$$

Drugom relacijom je dobijena promena poprečnog preseka u granicama od 21 to 60mm.

$$A_i(21 - 60) = 0.1h^4 - 16h^3 + 884.84h^2 - 19285h + 205672.2 \quad (5)$$

Konačno, treća relacija predstavlja promenu poprečnog preseka u opsegu visina od 60 do 90mm.

$$A_i(60-90) = -1.7h^3 + 381.89h^2 - 28579h + 731728.18 \quad (6)$$

Uvrštavanjem polinoma koji predstavljaju promenu poprečnog preseka po visini odlivka u relaciju (3), dobija se relacija (7).

$$\tau_f = \frac{1}{2ab\sqrt{2g}} \left( \int_0^{21} \frac{A_i(0-21)}{\sqrt{h_t-h}} dh + \int_{21}^{60} \frac{A_i(21-60)}{\sqrt{h_t-h}} dh + \int_{60}^{90} \frac{A_i(60-90)}{\sqrt{h_t-h}} dh \right) \quad (7)$$

Rešavanjem svakog integrala pojedinačno i vraćanjem njihovih rešenja u (7), dobija se konačan izraz fitness funkcije (8).

$$\tau_f = \frac{I_1(h_t) + I_2(h_t) + I_3(h_t)}{2ab\sqrt{2g}} \quad (8)$$

Ograničenja optimizacionog procesa definisana su modulom ulivnika i Rejnoldsovim brojem. Modul ulivnika mora biti manji ili jednak od modula odlivka.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{ingate} \leq M_{casting\_part} \\ n \left( \frac{A_{ingate}}{P_{ingate}} \right) \leq \left( \frac{V_{casting\_part}}{A_{casting\_part}} \right) \end{array} \right\} \quad (9)$$

Gde su:  $n$  – broj ulivnika,  $A_{ingate}$  – poprečni presek ulivnika,  $P_{ingate}$  – obim ulivnika,  $V_{casting\_part}$  – zapremina odlivka,  $A_{casting\_part}$  – površina odlivka. Broj predviđenih ulivnika je dva, a analizom CAD modela odlivka dobijene su vrednosti:  $V_{casting\_part} = 3661113.8mm^3$  i  $A_{casting\_part} = 253716.66 mm^2$ . Poprečni presek i obim ulivnika su:  $A_{ingate} = ab$ ,  $P_{ingate} = 2(a+b)$ . Uvrštavanjem navedenih veličina u relaciju (9) dobija se konačna forma ograničenja data relacijom (10).

$$ab - 14.43 \cdot (a + b) \leq 0 \quad (10)$$

Drugo ograničenje je Rejnoldsov broj, koji predstavlja odnos sila inercije i viskoznosti, i definiše granicu između laminarnog i turbulentnog strujanja (11).

$$Re = \frac{Inertia\_forces}{Viscouse\_forces} = \frac{\rho V_{ingate}^d}{\mu} \quad (11)$$

Gde su:  $\mu$  – dinamička viskoznost istopljenog metala,  $d$  – karakteristična dužina, data relacijom (12).

$$d = \frac{4A_{ingate}}{P_{ingate}} = \frac{4ab}{2(a+b)} = 2 \frac{ab}{a+b} \quad (12)$$

Visoka vrednost Rejnoldsovog broja dovodi do turbulentnog strujanja fluida. U cilju izbegavanja turbulentnog strujanja Rejnoldsov broj bi trebalo da bude manji od 20000. Uzimajući u obzir ovu činjenicu, i povezivanjem (11) i (12) dobija se relacija (13).

$$Re = 2 \frac{\rho}{\mu} \sqrt{2g} \frac{ab\sqrt{h_t-20}}{a+b} \leq 20000 \quad (13)$$

Viskoznost čelika je  $\mu = 7 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms}$ , a gustina je  $\rho = 7000 \frac{kg}{m^3}$ . Uvrštavanjem navedenih vrednosti u relaciju

(13) dobija se konačno ograničenje dato relacijom (14).

$$ab\sqrt{h_t-20} - 71.4(a+b) \leq 0 \quad (14)$$

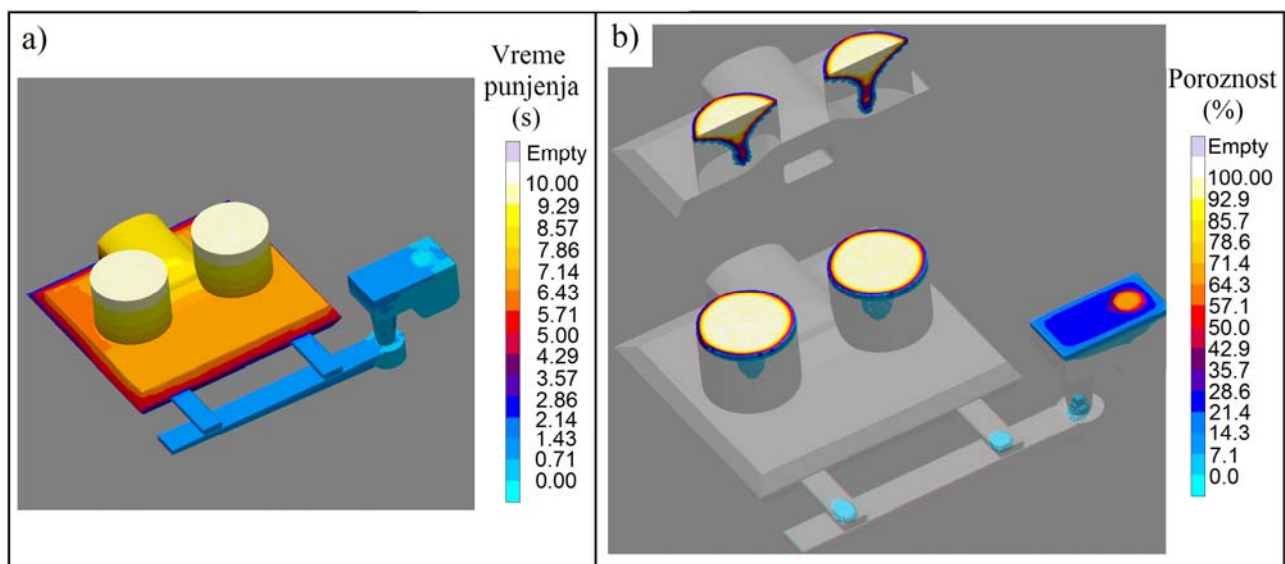
Domen pretrage vrednosti veličina koje se optimizuju je u skladu sa predloženom geometrijom ulivnog sistema:  $a=10-30mm$ ,  $b=10-30mm$  i  $h_t=100-130mm$ . Veličina populacije je 120 jedinki, a maksimalan broj generacija je 50. Algoritam korišćen u selekciji je stohastičko univerzalno uzorkovanje. Populacija se posmatra kao da je mapirana na rulet-točak, veći delovi točka pripadaju onim stringovima koji imaju manji fitness (jer se radi o minimizacionom problemu). Na rulet se ravnomerno postavlja  $N$  pokazivača, gde je  $N$  broj jedinki u populaciji. Jednim okretanjem ruleta formira se populacija. Kao operator ukrštanja korišćeno je uniformno ukrštanje. “Crossover fraction“ definiše deo nove populacije koji je nastao ukrštanjem (bez elitnih jedinki), i njegova vrednost se kreće između 0 i 1. Broj elitnih jedinki koje se prenose u novu generaciju je 2. GA zaustavlja svoj rad već u petoj generaciji jer su prekršena zadata ograničenja. Vrednost funkcije cilja koja predstavlja minimizovano vreme punjenja kalupa je 5.75s. Dobijene optimizovane vrednosti su sledeće:  $h_t=110.53mm$ ,  $a=10mm$  i  $b=29.98mm$ . Dakle, veličine na osnovu kojih će biti dimenzionisan kompletan

ulivni sistem su:  $A_{ingate} \approx 300 \text{ mm}^2$  i  $h_i = 110 \text{ mm}$ . Na bazi rezultata optimizacije (dimenzija ulivnika i visine livenja) definiše se celokupna geometrija ulivnog sistema. Da bi se startovalo sa dizajniranjem elemenata ulivnog sistema, pored poznavanja vrednosti poprečnog preseka ulivnika, potrebno je odlučiti se za jedan od dva sistema punjenja. Čuveni istraživači Johnson, Bishop and Pellini su 1954. godine definisali podelu sistema punjenja na: sisteme pod pritiskom i sisteme bez pritiska [1]. U ovom slučaju dizajniranja ulivnog sistema izabran je sistem pod pritiskom. Oba sistema punjenja kalupa karakterišu odgovarajući odnosi poprečnih preseka sprovodnika, razvodnika i ulivnika. Literaturom su date dve preporuke za sisteme pod pritiskom. Prva je: izlaz sprovodnika:razvodnik:ulivnik=1:0.8:0.6, druga je: izlaz sprovodnika:razvodnik:ulivnik=1:1:0.8. Na bazi vrednosti poprečnog preseka ulivnika ( $A_{ingate} \approx 300 \text{ mm}^2$ ) i koristeći prvu preporuku dimenzionisani su poprečni presek razvodnika –  $A_{runer} = 400 \text{ mm}^2$  i poprečni presek izlaza sprovodnika –  $A_{sprue} = 500 \text{ mm}^2$ . Izabran je trapezni razvodnik koji omogućuje uniformno popunjavanje ulivnika sa relativno sličnim brzinama. Sprovodnik je kružnog poprečnog preseka zbog manje površine izložene hlađenju i manjeg otpora protoku metala. Dimenzije kolektora definisane su na osnovu dimenzija razvodnika i sprovodnika, dakle elemenata ulivnog sistema koji su u direktnom kontaktu sa kolektorom. Kolektor je u obliku cilindra čija je površina osnove dva puta veća od površine kraja sprovodnika, a visina 1.5 puta veća od visine poprečnog preseka razvodnika. Ulivna čaša je dizajnirana kao čaša sa posebnom komorom, sa ciljem da se iskontrolišu vertikalna i horizontalna komponenta brzine istopljenog metala. Ovakav dizajn ulivne čaše omogućava laminaran tok istopljenog metala i izdvajanje šljake i mehurića pre dovođenja metala u sprovodnik.

Odabrani tip hranitelja je cilindrični otvoreni hranitelj, zbog toga što ima najveći modul (cilindar ima najmanju površinu u odnosu na zapreminu). Pozicija hranitelja se definiše tako da obezbedi usmereno očvršćavanje, čime se postiže očvršćavanje od tanjih ka debljim delovima odlivka, i na kraju u hraniteljima [3]. Naime, predloženo rešenje su dva cilindrična otvorena hranitelja, namenjena da nadoknade zapreminsko skupljanje metala.

#### 4. NUMERIČKA SIMULACIJA

Rezultati simulacije, realizovane upotrebom softvera MAGMA<sup>5</sup>, daju važne i suštinske informacije o kvalitetu i korektnosti sistema livenja. Na Slici 4 dat je prikaz samo dva kriterijuma numeričke simulacije, od ukupne urađene analize. Izdvojen je kriterijuma *FSTIME* (koji daje informaciju o vremenu punjenja kalupa), jer je predmet optimizacije upravo bilo vreme punjenja kalupa. Ukupno vreme punjenja kalupa (odlivak, ulivni sistem i hranitelji iznosi oko 10s, pa je rezultat optimizovanog vremena punjenja zapremine odlivka, saglasan sa rezultatom simulacije.



*TOTAL POROSITY* rezultat pokazuje zbirno poroznost i mikroporoznost u jednom rezultatu. To znači da su pokazane maksimalne vrednosti poroznosti i mikro poroznosti. Na Slici 4b) prikazana je kroz rengenski pogled i ukupna poroznost u odlivku i poroznost kroz sredinu hranitelja. Jedinica mere za ukupnu poroznost je (%). Na osnovu rengenskog pogleda u odlivak, zaključujemo da tehnologija livenja legure obezbeđuje



zahtevani kvalitet. Predloženi sistem livenja nosača zuba bagera je realizovan u industrijskim uslovima, u livnici Industrijskog kombinata Guča. Odliveni deo, nosač zuba bagera, ugrađen je na kašiku bagera i u uslovima eksploatacije se pokazao veoma uspešno, kao i celokupno modularno rešenje kašike bagera.



*Slika 5. Nosač zuba, montaža, kašika bagera*

## 5. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj rada, bio je unapređenje tehnologije livenja nosača zuba bagera, koje se reflektuje kroz povećanje kvaliteta odlivka i smanjenje utroška materijala. Unapređenje tehnologije podrazumevalo je optimizaciju geometrije sistema livenja, koji obuhvata ulivni sistem i sistem hranjenja. Kao optimizaciona tehnika korišćeni su genetski algoritmi, a predmet optimizacije su poprečni presek ulivnika i visina livenja, kada je u pitanju ulivni sistem. A kada je u pitanju sistem hranjenja odlivka, broj, visina i prečnik hranitelja su predmet optimizacije. Na bazi optimizovanih vrednosti projektovani su svi ostali integralni elementi sistema livenja. Numeričkom simulacijom izvršena je verifikacija ispravnosti projektovanog rešenja, kao poslednji korak pre implementacije rešenja u industriji.

Metodologija razvijena i predstavljena kroz rad, primenljiva je na različite delove koji se izrađuju tehnologijom livenja u pesku. Njen poseban značaj ogleda su u primenljivosti na delovima kompleksne geometrije.

## 6. LITERATURA

- [1] Campbell, J.: *Complete casting Handbook*, Elsevier Ltd, Amsterdam, 2011.
- [2] Ravi, B.: *METAL CASTING, Computer-Aided Design and Analysis*, Prentice-Hall, New Delhi, 2005.
- [3] Jacob, E., Sasikumar, R., Praveen, B., Gopalakrishna, V.: *Intelligent design of feeders for castings by augmenting CAD with genetic algorithms*, Journal of Intelligent Manufacturing, 15 (3), 299–305, 2004.
- [4] Masoumi, M., H. Hu, H., Hedjazi, J., Boutorabi, M. A.: *Effect of gating design on mold filling*, AFS Transactions, 113, 185-196, 2005.
- [5] Shinde, V.D., Joshi, D., Ravi, B., Narasimhan, K.: *Optimization of mold yield in multicavity sand castings*, JMEPEG, 21 (12), 1574–1581, 2012.
- [6] Kumaravadivel, A., Natarajan, U.: *Optimization of sand-casting process variables a process window approach*, Int J Adv Manuf Technol., 66 (5-8), 695–709, 2012.

**Dučić, N., Čojbašić, Ž., Slavković, R., Milićević, I.**

### **OPTIMIZATION OF THE CASTING SYSTEM FOR MAKING HOLDER OF CUTTING TOOTH**

**Abstract:** *The paper describes the methodology of improving the casting system, for making holder of cutting tooth, which includes the application of genetic algorithms to optimize the geometry of gating system. The objective was to maximize filling rate given the constraints posed by both the ingate module and Reynolds number. Mold filling time has been presented as a function of the ingate cross section and casting height. Based on the the value of optimization, designed the overall geometry of the gating system. The primary goal of optimizing feeding system is to reduce material consumption, with respect to the corresponding geometric limits. Optimized solution of casting system is subject to the numerical simulation. After confirmation of the validity designed and optimized casting system, was followed by industrial implementations.*



D. Đurašković<sup>1</sup>, M. Janjić<sup>2</sup>, M. Vukčević<sup>3</sup>

## MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA PLOČA OD LAMINIRANOG SIGURNOSNOG STAKLA

### Rezime

Staklo spada u savremene građevinske materijale bez čije primjene bi naša svakodnevica bila nezamisliva. Razvoj digitalnih računara, učinio je da je računar u posljednje vrijeme, postao nezamjenljivo sredstvo u svim fazama istraživanja, razvoja, projektovanja, konstruisanja, proizvodnje i održavanja proizvoda i sistema različite fizičke prirode, pa tako i stakla [8]. U ovom radu, prikazano je numeričko modeliranje naponsko deformacionog stanja opterećene ploče od sigurnosnog laminiranog stakla bazirane na teoriji metode konačnih elemenata (MKE). Simulacija je izvedena primjenom programskog paketa ANSYS. Takođe je izvršena uporedna analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

**Ključne riječi:** Metoda konačnih elemenata, ANSYS, modeliranje, simulacija.

### 1. UVOD

Primjena računara u inženjerskoj praksi izazvala je prelazak sa analitičkih na numeričke metode proračuna. Od svih numeričkih metoda, najveću upotrebnu vrijednost pokazala je metoda konačnih elemenata. Razvojem metode konačnih elemenata u drugoj polovini XX i početkom XXI vijeka, postignut je ogroman napredak, čime ova metoda postaje opšte prihvaćena u tehničkoj praksi [9]. Danas postoji velikog broja softverskih paketa (ABAQUS, ANSYS, ALGOR, DEFORM, CATIA itd.), za modeliranje i simulaciju različitih prototipa na brz i jednostavan način. Korisnički interfejs se kontinuirano unapređuje u cilju veće aplikativnosti u industriji. Mogućnosti i cijene FEM programa su različite, u zavisnosti od toga koliko su prilagođeni praktičnim potrebama krajnjeg korisnika preko korisničkog interfejsa i koliko su efikasni u radu, u pogledu tačnosti analize i kompjuterskog vremena [3]. Razvoj savremene arhitekture u današnje vrijeme je nezamisliv bez primjene stakla, kako pri izradi enterijera tako i eksterijera. Javlja se potreba za ostakljivanjem velikih površina i primjenom stakla i na onim mjestima gdje su se donedavno koristili drugi materijali. Mogućnost da se staklo iskoristi kao nosivi element, arhitekta, konstruktore i inženjere podstaknula je na sve hrabrije oblikovanje konstrukcija. Laminirano staklo sastoji se od dva ili više stakala, koja se prekrivaju i čvrsto su slijepljena pomoću jedne ili više elastičnih folija od polivinilbutirala (PVB), različitih karakteristika i debljina. Spada u grupu sigurnosnih stakala [1]. Laminirano staklo ne samo što ima odličnu čvrstoću, već se koristi i kod izrade stakala za akustičnu izolaciju prostorija. Ovo staklo se uprkos lomu ne raspada i zadržava dio svoje zaštitne funkcije. To je posebno važno u slučaju protivprovalnih i neprobojnih stakala. Osim toga, našlo je primjenu pri izradi nadsrešnica, ograda tj. tamo gdje postoji rizik od povreda u slučaju loma. Cilj istraživanja ovog rada je posvećen istraživanju naponsko deformacionih parametara, laminiranih staklenih ploča pomoću ANSYS softverskog paketa, primjenom metode konačnih elemenata. Izvršit će se uporedna analiza numeričkih rezultata i rezultata dobijenih eksperimentalnim istraživanjima [2].

<sup>1</sup> Mr Dragana Đurašković, DM KRISTAL d.o.o., Vasa Raičkovića 29, 81000 Podgorica, e-mail: draganadjuraskovic94@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. dr Mileta Janjić, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet Podgorica, ul. Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, e-mail: mileta@ac.me

<sup>3</sup> Prof. dr Milan Vukčević, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet Podgorica, Dž. Vašingtona bb, 81000 Podgorica, e-mail: milanvu@t-com.me

## 2. NUMERIČKA MKE SIMULACIJA

### 2.1. Uvod u MKE

Metod konačnih elemenata-MKE (*Finite Element Method-FEM*) predstavlja najmoćniji ali istovremeno i najkompleksniji numerički metod rješavanja inženjerskih problema i problema koji se zasnivaju na fizičkoj diskretizaciji objekta. Metoda konačnih elemenata spada u metode diskretne analize. Umjesto elementa diferencijalno malih dimenzija, osnovu za sva proučavanja predstavlja dio područja konačnih dimenzija, manje područje ili konačni elemenat [9]. Sa stanovišta fizičke interpretacije, to znači da se razmatrano područje, kao kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode, zamjenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata, sa konačnim brojem stepeni slobode. S obzirom na to da je broj diskretnih modela za jedan granični problem neograničeno veliki, osnovni zadatak je da se izabere onaj model koji najbolje aproksimira odgovarajući granični problem. Tako u slučaju računanja naponsko deformacionog stanja strukture rezultati su pomjeranja svakog čvora strukture i naponi unutar svakog elementa. Pomjeranja i naponi su posljedica djelovanja spoljašnjeg opterećenja. Osobine materijala koje se definišu u proračunu su: - modul elastičnosti  $E$ , - modul klizanja  $G$ , - poissonov broj i koeficijent termičkog širenja.

### 2.2. Simulacija u ANSYS softverskom paketu

Prije početka modeliranja konačnim elementima u ANSYS-u potrebno je izvršiti odgovarajuće pripreme, tokom kojih se vrši izbor vrste analize koja se želi sprovesti metodom konačnih elemenata, kao i geometrijsko modeliranje elemenata sistema koji je objekat analize [6]. U praktičnom smislu, faze analize određenog problema metodom konačnih elemenata u ANSYS-u su sljedeće [7]:

1. Postavljanje zadatka,
2. Priprema analize (preprocesiranje),
3. Analiza (procesiranje) i
4. Obrada rezultata (postprocesiranje)

Faza *preprocesiranja* počinje identifikacijom geometrije i ulaznih podataka o ponašanju materijala. Nakon toga se pristupa generisanju početne MKE mreže za obradak i alat, što predstavlja najvažniji i najteži korak u MKE analizi. Zatim se generisana mreža mora detaljno pregledati, i eventualno poboljšati u zonama sa složenom geometrijom. Generalno, faza preprocesiranja aproksimativno predstavlja 80% MKE analize. Modeliranje konačnim elementima se odvija u modulu *Mechanical*. Dobijeni rezultati se dalje interpretiraju i pregledaju u fazi *postprocesiranja*, od strane korisnika.

## 3. MODELIRANJE I SIMULACIJA OPTEREĆENE PLOČE OD LAMINIRANOG STAKLA

### 3.1. Objekat istraživanja

Predmet modeliranja metodom konačnih elemenata u ANSYS softverskom paketu je laminirana staklena ploča. Staklo zbog svoje krte prirode ne teče nego se naglo lomi. Zbog toga, kod proračuna staklenih konstrukcija treba paziti da se izbjegavaju rješenja koja dovode do pojavljivanja koncentracija napona. Posebnu pažnju treba posvetiti vijčanim spojevima stakla koja su sve više u upotrebi. Tu se u bušene rupe između stakla i vijka postavlja PVC cijevčica koja raspoređuje napone na veću površinu. Kod prenosa sila sa stakla na metalni okvir, uvijek se koriste meki materijali. Uzrok loma stakla nije samo trenutni koncentrisani udar, već i naprezanje usljed savijanja, toplotno naprezanje i kritična deformacija. Nema nikakvog upozorenja koje može ukazati na lom. Lom zavisi primarno od broja površinskih pukotina (površinska opterećenja), nivoa naprezanja, veličine napregnute površine i trajanja opterećenja. Ponašanje laminiranog stakla različito je pod dugotrajnim i kratkotrajnim opterećenjem. Za kratkotrajno opterećenje laminirano staklo djeluje kao sastavljeni nosač. Za dugotrajno opterećenje teret se raspoređuje na dvije staklene ploče prema njihovim krutostima zbog deformacije među-sloja. Povećanje temperature omekšava među-sloj i na taj način umanjuje djelovanje sastavljenog nosača.

### 3.2. Način i cilj istraživanja

Analiza naponsko deformacionog stanja staklene ploče, ima za cilj istraživanje zavisnosti svih relevantnih parametara u funkciji ulaznih faktora. Modeliranjem staklene ploče, određuju se funkcionalne zavisnosti veličina koje determinišu proces deformisanja, kao što su: pomjeranja, naponi, deformacije, ugibi. Ploča je oslonjena na dva kraja na krute cilindrične valjke zbog čega se naponi i deformacije koji nastaju na

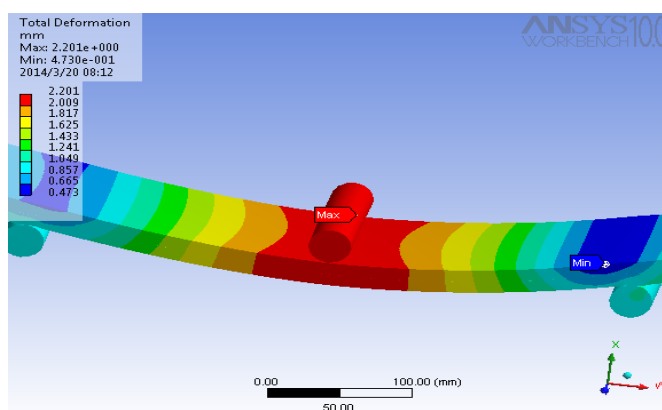
njima zanemaruju dok se opterećenje nanosi ravnomjernim pomjeranjem u sredini raspona preko krutog valjka.

#### 4. REZULTATI SIMULACIJE MKE U ANSYS SOFTVERSKOM PAKETU

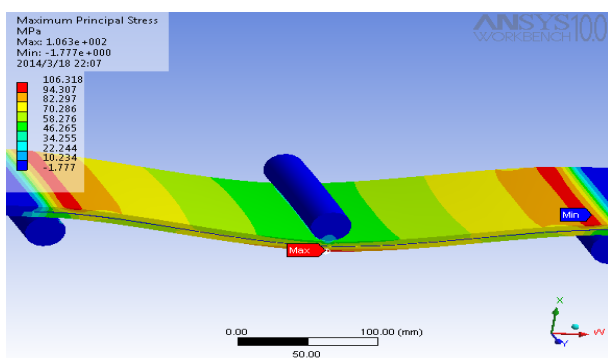
Modeliranjem i simulacijom metodom konačnih elemenata u ANSYS-u došlo se do rezultata napona, deformacija i ugiba kod laminiranog sigurnosnog stakla. Dio ANSYS-ovog modula mechanical *solution* nam nudi rezultate simulacije za ugibe, von-Mises-ove napone kao i maksimalne i minimalne napone i deformacije. Izlazni rezultati dobijeni modeliranjem i simulacijom u ANSYS-u, osim tabelarno, prikazani su i pomoću trodimenzionalnih dijagrama u bojama svih parametara dobijenih modeliranjem i simulacijom metodom konačnih elemenata [3].

**Tabela 2.** Izlazni rezultati simulacije u ANSYSU za različite debljine laminiranog stakla

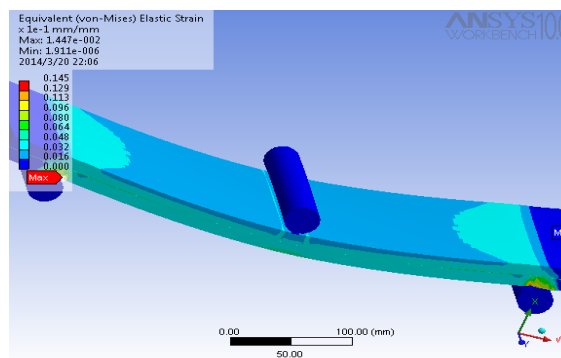
SOLUTION	Jed.mjere	lam.staklo 5.1.5[mm]	lam.10.1.10[mm]	lam. 12.1.12[mm]
Total deformation	[mm]	1.39	2.20	1.59
Von-Mises stress	[MPa]	115.4	92	87
Max. principal elastic stress	[MPa]	89	102	75
Min. principal elastic stress	[MPa]	3,97	23.68	7.2
Von-Mises strain		0.06	0.029	0.024
Max. principal elastic strain		0.051	0.024	0.021



**Slika 1.** Ugib laminirane staklene ploče debljine 10.1.10[mm]

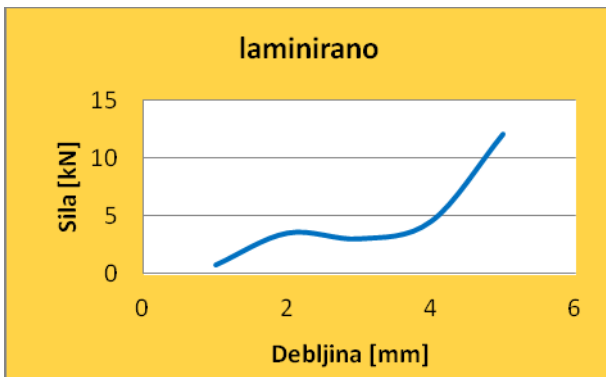


**Slika 2.** Distribucija von-Misesovih napona kod laminirane staklene ploče debljine 5.1.5 [mm]

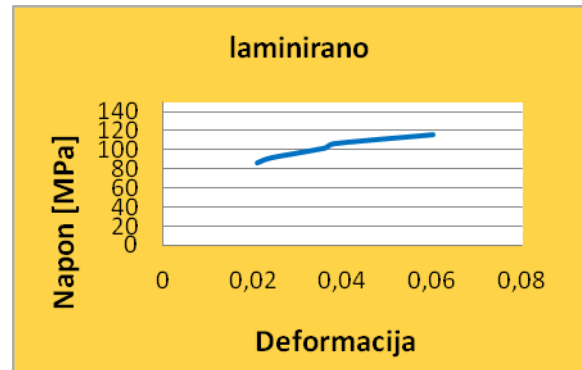


**Slika 3.** Distribucija von-Misesovih deformacija kod lam. staklene ploče debljine 12.1.12 [mm]

U daljoj izradi rada prišlo se razradi dobijenih rezultata, crtanjem grafikona zavisnosti između pojedinih veličina, kao i dijagrama u kojima se upoređuju vrijednosti ugiba, napona i deformacija kod laminiranog stakla, koje je predmet istraživanja ovog rada.



Slika 4. Sila u funkciji debljine kod laminiranog stakla

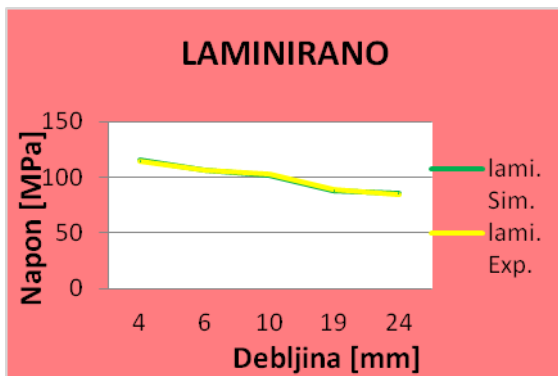


Slika 5. Dijagram zavisnosti napona i deformacija za laminirano staklo

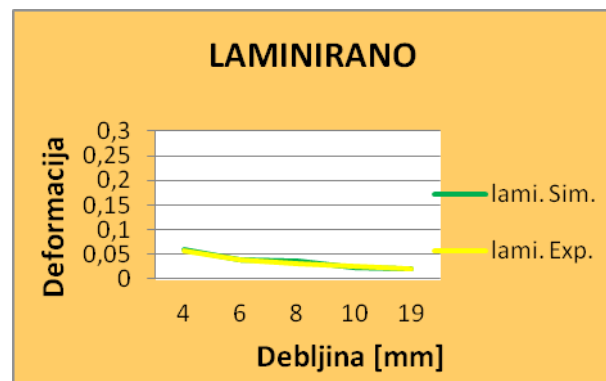
Na Slici 4. prikazano je opterećenje silom u funkciji debljine kod laminiranog stakla. Sa dijagrama se može uočiti da je laminirano staklo 5.1.5 dosta izdržljivije od 3.1.3 ali ne kao laminirana stakla 10.1.10 i 12.1.12 koja trpe velika opterećenja, što je predstavljeno naglim skokom krive. Kod laminiranog stakla kriva napon deformacija poprima gotovo pravu liniju, uz malo kolebanje u dijelu deformacija koje odgovaraju laminiranom staklu 5.1.5, jer je u toj zoni zabilježen nešto veći pad napona i deformacija. Pad napona u odnosu na deformacije je dosta ujednačen pa i kriva na (Slici 5.) poprima takav karakter.

## 5. UPOREDNA ANALIZA REZULTATA

Simulacije su vrlo pogodne, kako sa aspekta naučnih istraživanja, tako i za rješavanje određenih konkretnih problema inženjerske prakse. Međutim, uvijek se postavlja pitanje njihove pouzdanosti. Upravo zbog toga je napravljeno poređenje vrijednosti opterećene laminirane staklene ploče, dobijenih modeliranjem i simulacijom u ANSYS softverskom paketu sa eksperimentalnim [2]. U cilju dobijanja adekvatnih zaključaka sprovodi se analiza rezultata i vrši njihovo poređenje. Kod laminiranog stakla naponi blago opadaju sa povećanjem debljine stakla. Slika 6. predstavlja napone dobijene kao rezultat eksperimentalnog ispitivanja i simulacije MKE u ANSYS-u. Kod ovog stakla je primjećena minimalna greška u odnosu na eksperimentalna istraživanja.



Slika 6. Naponi dobijeni ANSYS simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjima za lami. staklo



Slika 7. Deformacije dobijene ANSYS simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjima za lami. staklo

Laminirano staklo trpi najmanje deformacije, što se ogleda na krivoj prikazanoj na (Slici 7). Takođe je podudarnost rezultata evidentna. Greška skoro da ne postoji jer su vrijednosti deformacija za ovo staklo jako male.

Dakle, rezultati numeričke simulacije se odlično poklapaju sa realnim vrijednostima kada je u pitanju simulacija ugiba, napona i deformacija, što se moglo vidjeti iz grafičkog poređenja rezultata. Iz navedenog primjera se može konstatovati, da se u softverskom paketu ANSYS može uspješno izvršiti modeliranje i simulacija naponsko deformacionog stanja opterećene ploče od laminiranog stakla.



## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih modeliranjem i simulacijom metodom konačnih elemenata (MKE) opterećene laminirane staklene ploče i njihovim poređenjem sa rezultatima eksperimentalnog istraživanja, jasno se uočava da je moguće izvršiti modeliranje navedene ploče u ANSYS softverskom paketu. Simulacijom naprezanja laminirane staklene ploče u ANSYS-u metodom konačnih elemenata, ploča se savija dok ne nastupi lom. Veličina ugiba zavisi od debljine stakla, što se može vidjeti sa dijagrama na Slici 4. Na osnovu krive može se zaključiti da je laminirano staklo 3.1.3 najkrtije staklo i da puca već pod malim opterećenjem, dok se 5.1.5 najviše savija, tj. ugib je veći u odnosu na ostale debljine. Razlika između vrijednosti ugiba nastalih simulacijom i vrijednosti dobijenih laboratorijskim istraživanjima je gotovo neznatna, pa se dobijeni rezultati smatraju zadovoljavajućim. Osim ugiba, numeričkom metodom u ANSYS-u došlo se i do vrijednosti napona i deformacija opterećene laminirane staklene ploče. U oba slučaja, uporednom analizom rezultata sa eksperimentalnim istraživanjima, primjećeno je gotovo potpuno poklapanje, što se može vidjeti sa dijagrama prikazanih na Slikama 6. i 7. Takođe, sa dijagrama se uočava veće poklapanje dobijenih rezultata kod napona, nego kod deformacija. Svi rezultati nastali kao proizvod modeliranja i simulacije zasnovanih na teoriji metode konačnih elemenata, pomoću računara, opterećene laminirane staklene ploče su se pokazali pouzdanim. To je opravdalo sve veću primjenu računara u svim fazama istraživanja, razvoja, projektovanja i konstruisanja, bez gubitka vremena i sredstava za izradu funkcionalnih modela, prototipa i njihovog ispitivanja.

## LITERATURA:

- [1] Akter S.T., M. S. Khani, *Characterisation of laminated glass for structural applications*, Master thesis in Structural Engineering, 2013.
- [2] Costa S., Miranda M., Varum H., Teixeira-Dias F.: *On the Evaluation of the Mechanical Behaviour of Structural Glass Elements*, University of Aveiro, Portugal, 2006.
- [3] Đurašković D.: *Simulacija naprezanja i istraživanje profitabilnosti i održavanja pri obradi staklenih ploča* - Magistarski rad, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014.
- [4] Hajdinak R.: *Gradimo staklom*, Reflex d.o.o, Podgora, 2009.
- [5] Janjić M.: *Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja* - Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Podgorica, 2005.
- [6] Jovanović J.: *"Konstruisanje podržano računarom"*, Mašinski fakultet, Podgorica, 2013.
- [7] Mandić V.: *Fizičko i numeričko modeliranje procesa obrade deformisanjem*, Kragujevac, 2012.
- [8] Nedić N., Pršić D.: *Računarsko modeliranje i simulacija u savremenoj tehnologiji upravljačkih komponenti i sistema*, Mašinski fakultet Kraljevo i Mašinski fakultet Srpsko Sarajevo, Infoteh, Jahorina, 2001.
- [9] Vrekić S., Živković M., Milovanović M.: *Primjena metode konačnih elemenata u proračunima tankozidnih nosač*, Mašinski fakultet, Kragujevac, Juinfo, Kopaonik, 2006.

**D. Đurašković, M. Janjić, M. Vukčević**

## MODELING AND SIMULATION OF STRESS PLATE LAMINATED SAFETY GLASS

**Abstract:** *Glass is a contemporary building materials without whose application to our daily life would have been unthinkable. The development of digital computers, has made it a computer, recently, has become an irreplaceable tool in all phases of research, development, design, construction, production, and maintenance of products and systems of different physical nature [7]. In this paper, the numerical modeling of stress and strain state of loaded plates laminated safety glass based on the theory of FEM. The simulation was performed using the software package ANSYS. He also performed a comparative analysis of numerical and experimental results.*

**Keywords:** *Finite element method, ANSYS, modeling, simulation.*

Đurđević, Đ.<sup>1)</sup>, Anđelić, N.<sup>2)</sup>, Maneski, T.<sup>2)</sup>, Đurđević, A.<sup>3)</sup>

## NUMERIČKA ANALIZA NAPONA UŠKE NA KONTEJNERSKOM TERMINALU 10800×3400

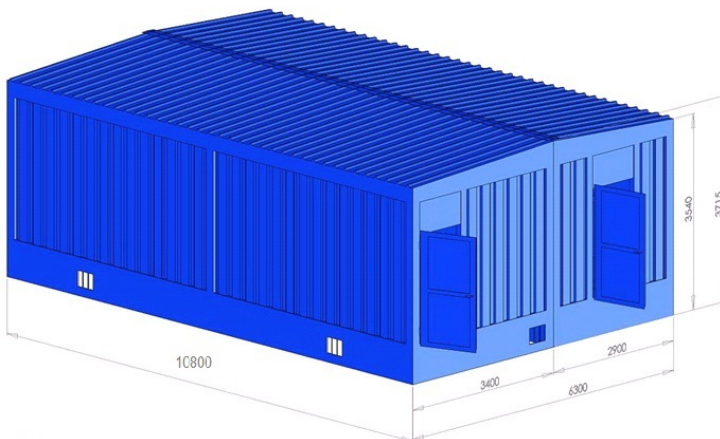
### Rezime

U ovom radu autori predstavljaju rezultate istraživanja analize naponskog stanja uške spojene sa kontejnerskim terminalom. Kontejnerski terminal služi za snabdevanje električnom energijom i upravljanje sistemom transportnih traka koje se koriste u eksploataciji u rudarskom basenu „Kolubara“. Analiza naponskog stanja uške je urađena pri utovaru kontejnera iz razloga što je jedan kontejner sa elektroopremom težak 25 tona. Istraživanje je sprovedeno u saradnji sa firmom „Eurometal“ iz Uba.

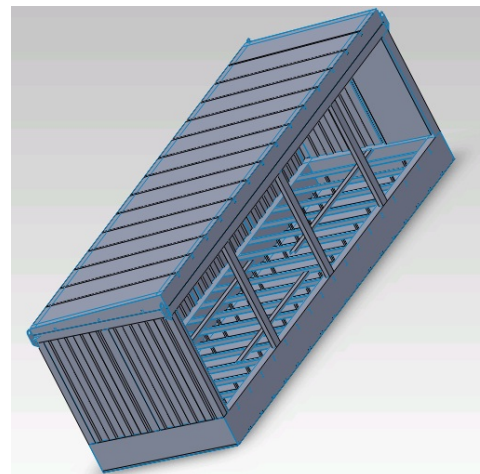
**Ključne reči:** uška, kontejnerski terminal, ekvivalentni napon, konačni element.

### 1. UVOD

Kontejnerski terminal je celina koja se formira od dva kontejnera širine 3400 i 2900 mm i dužine 10800 mm, slika 1. Transport i manipulacija kontejnera se može obaviti samo razdvojeno, svaka jedinica posebno, (slika 2), a ne kao celina od dva kontejnera. Međusobna veza kontejnera se ostvaruje zavrtnjevima M20 u kvalitetu 8.8 (slika 3).



Slika 1. Kontejnerski terminal



Slika 2. Jedna polovina kontejnerskog terminala

Kada se izvrši povezivanje kontejnera, mesto spoja se prekriva posebnom opšivkom koja se pričvršćuje zavrtnjevima za prethodno zavarene nosače, a sam spoj sa krovom se zaliva posebnom masom koja je otporna na sve vremenske uticaje. Takođe se po celom obimu spojenih kontejnera postavlja opšivka koja štiti spoj krova i gornjeg pojasa kontejnera od padavina praćenih vetrom. Kontejneri su opremljeni vratima koja poseduju anti-panik bravu čija je uloga da omogući bezbedno napuštanje unutrašnjosti kontejnera i u uslovima kada su vrata zaključana.

Tehnologija izrade je takva da je kontejner najvećim delom izrađen od savijenih limova (ploča), tako da čini jednu tankozidu strukturu. Na primer stubovi i pojasevi su izrađeni od lima debljine 8mm. Da bi strukturu

<sup>1)</sup>Đorđe Đurđević, TEHNIKUM TAURUNUM Visoka inženjerska škola strukovnih studija Beograd-Zemun (dj.djurdjevic@yahoo.com),

<sup>2)</sup> prof. dr Nina Anđelić, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu (nandjelic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Taško Maneski, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu (tmaneski@mas.bg.ac.rs),

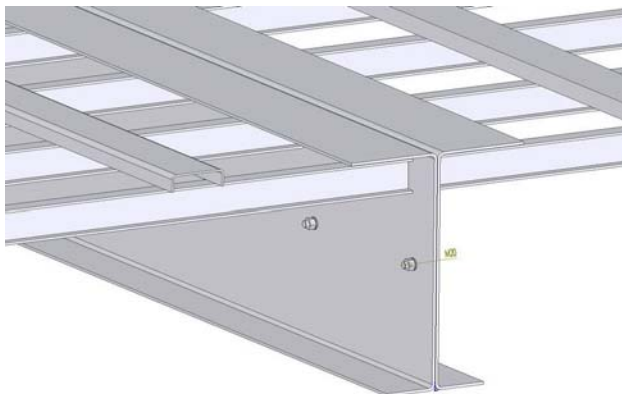
<sup>3)</sup> dr Andrijana Đurđević, Inovacioni centar, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, (andrijana.miler@yahoo.com).

smatrali tankozidom mora biti zadovoljen uslov [1,2] (1).

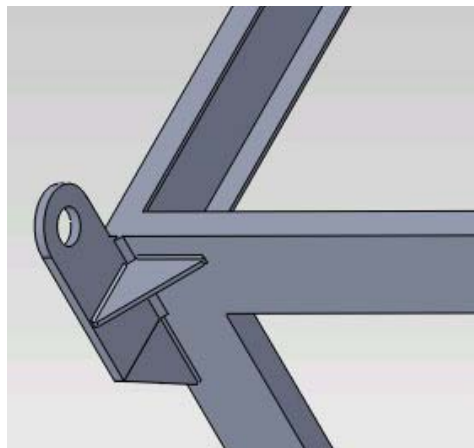
$$\frac{t}{a}, \frac{t}{b} \leq \frac{1}{10}, \quad (1)$$

gde je  $t$  debljina zida, a  $a$  i  $b$  spoljašnje dimenzije poprečnog preseka.

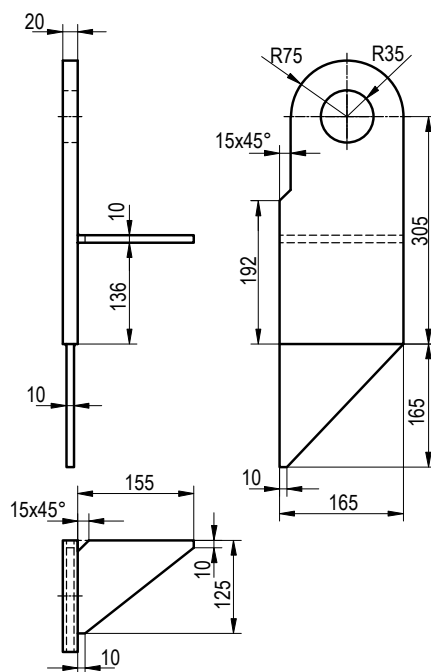
Veza uške i pojasa kontejnera je izvedena zavarivanjem ugaonim šavovima, a varovi su proporcionalni debljini limova, slika 4. Dimenzije uške koje će dalje biti korišćene za proračun prikazane su na slici 5



*Slika 3. Međusobna veza dva kontejnera*



*Slika 4. Veza uške za stub kontejnera*

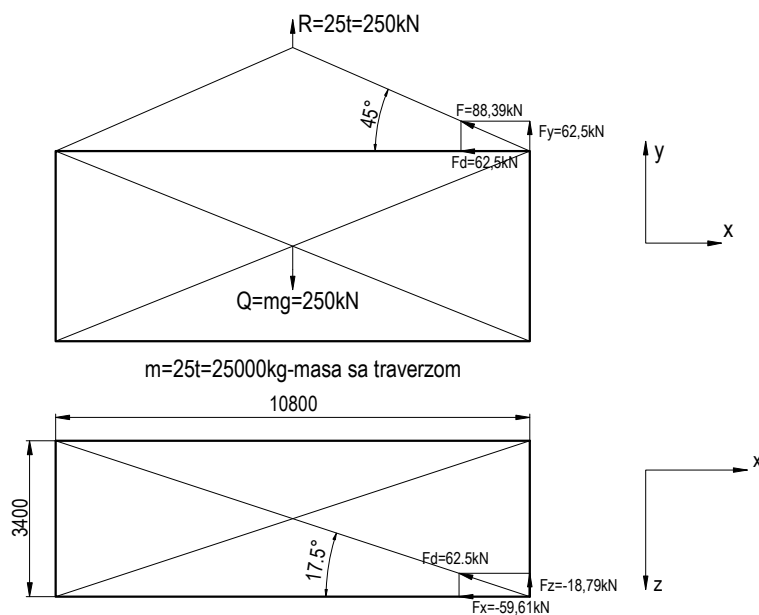


*Slika 5. Tehnički crtež uške*

## 2. ŠEMA OPTEREĆENJA UŠKE KONTEJNERA

Pri analizi napona krenulo se od standardnih proračuna iz otpornosti materijala (proračun uške na zatezanje i savijanje, zavarenih spojeva na smicanje, stubova na ekscentrično zatezanje, pojaseva na izvijanje). Šema opterećenja uški prikazana je na slici 6. Svi proračuni su zadovoljili sem proračuna uške na savijanje, pa iz tog razloga se pristupilo analizi napona metodom konačnih elemenata radi dobijanja preciznije raspodele napona [5].





**Slika 6. Šema opterećenja**

**Tabela 1. Hemijski sastav čelika Č0361**

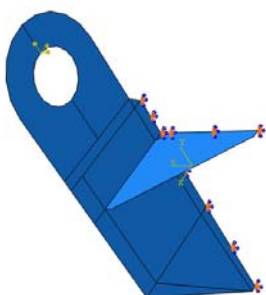
Legirajući element	C	Mn	P	S	N	Cu	C <sub>E</sub>
Sadržaj u [%]	0,170	1,400	0,035	0,035	0,012	0,550	0,350

**Tabela 2. Mehaničke osobine čelika Č0361**

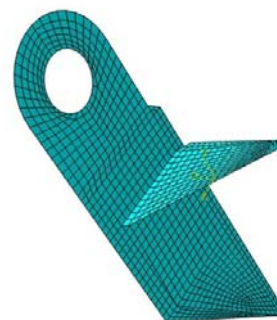
Yuong-ov Modul elast. [kN/cm <sup>2</sup> ]	Puasonov koficijent	R <sub>eH</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ] gran. tečenja	R <sub>m</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ] zatez. čvrstoća	A [%] uzduž./popr.
21000	0,3	24	36,0-51,0	26/24

### 3. NUMERIČKI PRORAČUN

Karakteristike materijala koji je korišćen u simulaciji date su u tabelama 1 i 2 [6]. Numerički proračun je urađen metodom konačnih elemenata u softverskom paketu ABAQUS [7].

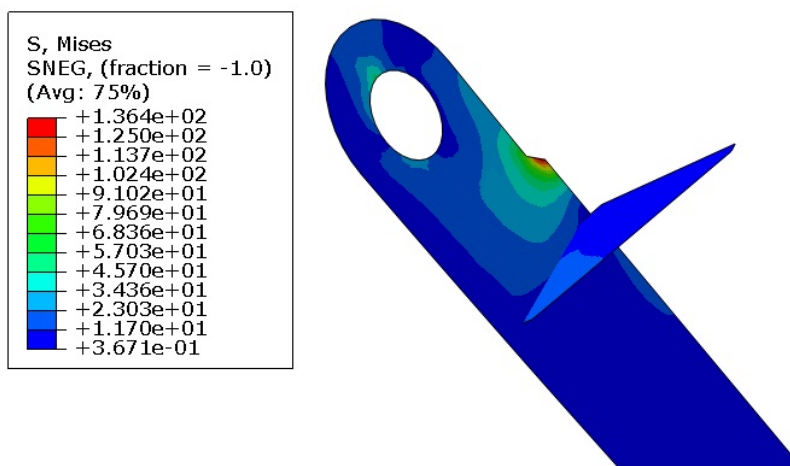


**Slika 7. Opterećenje i granični uslovi**



**Slika 8. Mreža konačnih elemenata**

Na slici 7 prikazani su granični uslovi, a na slici 9 mreža konačnih elemenata. Korišćeni su pločasti konačni elementi (shell model) [7].

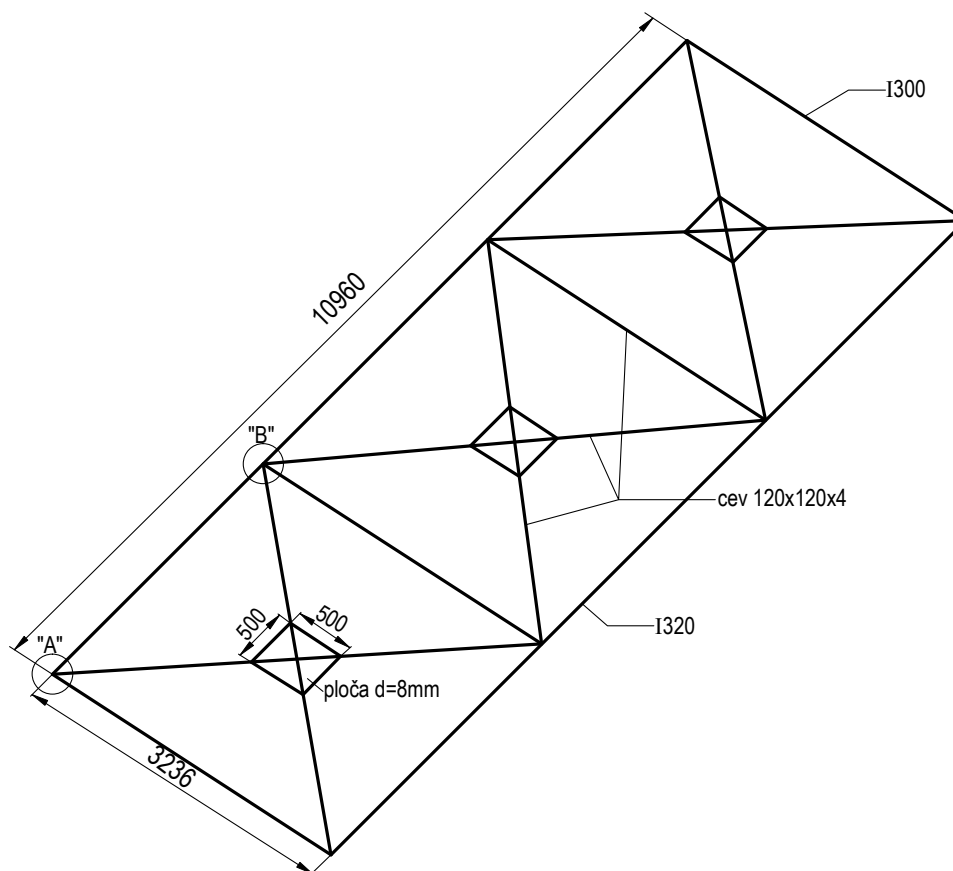


*Slika 9. Prikaz naponskog stanja u kN/cm<sup>2</sup>*

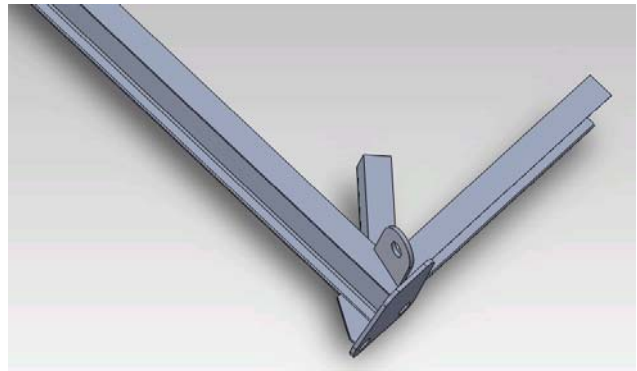
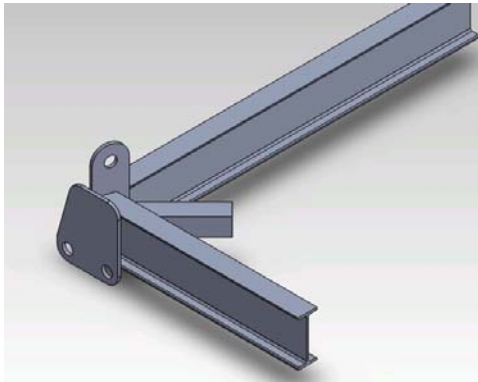
Na slici 9 se vidi da je ekvivalentni napon po hipotezi Hencky-Mises u zoni zavarenog spoja veći od dozvoljenog. Ustanovljeno je da taj napon najvećim delom izaziva bočna sila  $F_z$  koja vrši savijanje uške (ploče) oko ose  $x$ , pa se iz tih razloga pristupilo nalaženju drugog rešenja. Cilj je bio eliminisati ili smanjiti bočnu silu  $F_z$ .

#### 4. TRAVERZA ZA UTOVAR KONTEJNERA

Kao moguće rešenje konstruisan je pomoćni pribor za utovar kontejnera (traverza), tako da su uške za kačenje sajli postavljene po dijagonali osnove kontejnera, slika 6, slika 10. Gabaritne mere su spoljašnje mere, slika 10. Sa takvim rešenjem je izbegnuto savijanje uške oko ose sa minimalnim momentom inercije.

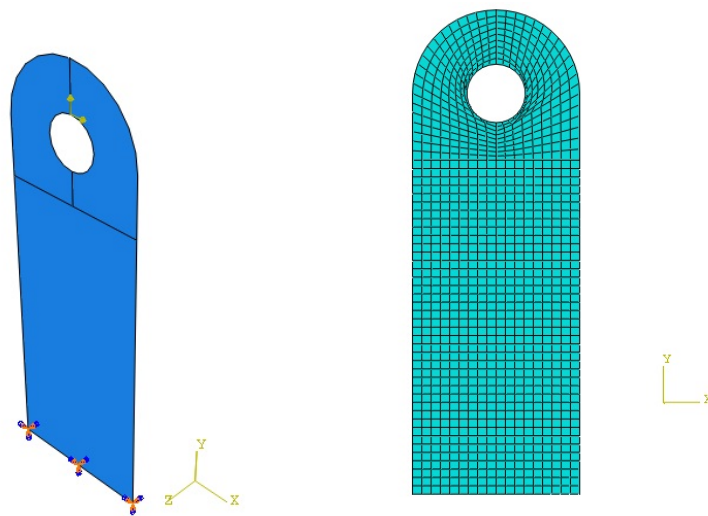


*Slika 10. Pomoćni pribor (traverza) za utovar kontejnera*

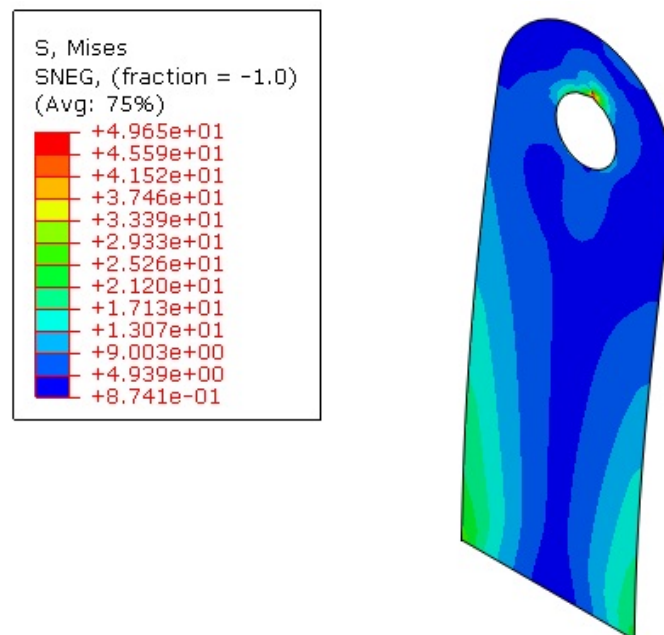


*Slika 11. Detalj „A“ pomoćnog pribora za utovar kontejnera*

Modeliranje i numerički proračun je sproveden kao kod predhodnog rešenja, s tim da je razmatran najnepovoljniji slučaj (uška ukleštena) radi sigurnosti, slika 12. Mreža konačnih elemenata i ograničenja su prikazana na slici 12 [7,8].



*Slika 12. Opterećenje, granični uslovi i mreža konačnih elemenata*



*Slika 13. Prikaz naponskog stanja u kN/cm<sup>2</sup>*

## 5. ZAKLJUČCI

U ovom radu autori su predstavili rezultate istraživanja analize naponskog stanja uške spojene sa kontejnerskim terminalom i analizu naponskog stanja pomoćnog pribora (traverze) za utovar kontejnera. Ekvivalentni napon na uški traverze u okolini ukleštenja se kreće u granicama dozvoljenog za dati materijal ( $\sigma_d = 24 \text{ kN/cm}^2$ ), slika 13. Ekvivalentni napon u okolini dejstva koncentrisane sile se ne uzima kao merodavan. Podizanje kontejnera na kamion pomoću traverze je bezbedno izvršeno. Podizanje kontejnera može izvršiti samo ovlašćeno lice sa odgovarajućom opremom i uređajima za podizanje. Tokom utovara i istovara kontejnera, niko ne bi trebao da stoji u zoni kontejnera u radijusu od 15 m. Sva oprema za manipulaciju (dizalica, lanci, noseće trake, kuke i sl.) treba da ima odgovarajuću nosivost i da poseduje važeći dokument da je pregledana.

## 6. LITERATURA

- [1] Anđelić, N., Milošević-Mitić, V., Maneski, T., Milovančević, M., Đurđević, Đ.: *Optimum design of open section thin-walled structural elements according to stress constraint*, Proceedings of 6<sup>th</sup> International symposium on Industrial Engineering SIE 2015, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade 2015, pp. 345-348.
- [2] Ružić, D.: *Strength of Structures*, University of Belgrade- Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade 1995.
- [3] Anđelić N., Milošević-Mitić V.: *Optimum design of thin-walled I-beam subjected to stress constraint*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 50, no. 4, 553-571 (2012).
- [4] Kollbruner, C. F., Hajdin, N.: *Dunnwandige Stabe*, Band 1, Springer Verlag, 1972.
- [5] Maneski, T.: *Computer modeling and calculation of structures*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade 1998.
- [6] Ružić, D., Čukić, R., Dunjić, M., Milovančević, M., Anđelić, N., Milošević-Mitić, V.: *Tables of Strength of Materials*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade 2003.
- [7] Đurđević, Đ., Radojković, M., Sedmak, S., Đorđević, B., Tatić, U.: *Comparison of two numerical models of connected steel beams as separate and combined plates*, the paper is accepted for the 32<sup>nd</sup> Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Starý Smokovec, Slovakia, 2015, pp. 116, 117.
- [8] Đurđević, Đ., Anđelić, N., Maneski, T., Milošević-Mitić, V., Milovančević, M., Đurđević, A.: *Analytical and numerical calculation of the equivalent stress of open section thin-walled "U" profile at constrained torsion*, Proceedings the 7<sup>th</sup> International Scientific and Expert Conference TEAM 2015, Belgrade, October, 2015, pp. 502-505.

**Đurđević, Đ., Anđelić, N., Maneski, T., Đurđević, A.**

### **STRESS NUMERICAL ANALYSIS OF THE CONNECTING LUG ON CONTAINER TERMINAL 10800×3400**

**Abstract:** *In this paper, the authors present the results of research of stress analysis of the connecting lug connected with the container terminal. Container terminal is used for the supply of electrical energy and control system of conveyor belts that are used in the exploitation of the mining basin „Kolubara“. Stress analyzes of the connecting lug was done when loading containers because one container with electrical equipment is weigh 25 tons. The research was conducted in cooperation with company “Eurometal” from Ub.*

**Key words:** *connecting lug, container terminal, equivalent stress, finite element*

Miloradović, N., Ilić, S., Vujanac, R. <sup>1)</sup>

## MODELIRANJE I PRORAČUN GRAĐEVINSKE STUBNE DIZALICE

### Rezime

U okviru ovog rada kreiran je 3D model građevinske stubne dizalice u softverskom paketu SolidWorks. Izvršen je izbor sastavnih elemenata, pogonskih uređaja i pratećih mehanizama koji omogućavaju realizaciju osnovnih dizaličnih operacija. Dimenzije i parametri najkritičnijih elemenata konstrukcije određeni su na osnovu prethodnog proračuna koji je delom, takođe, predstavljen u okviru rada. Pri izradi ovog modela, u skladu sa standardima, analizirana su opterećenja koja utiču na stabilnost i nosivost stubne dizalice. U obzir su uzeti zahtevi iz oblasti bezbednost i zdravlja na radu.

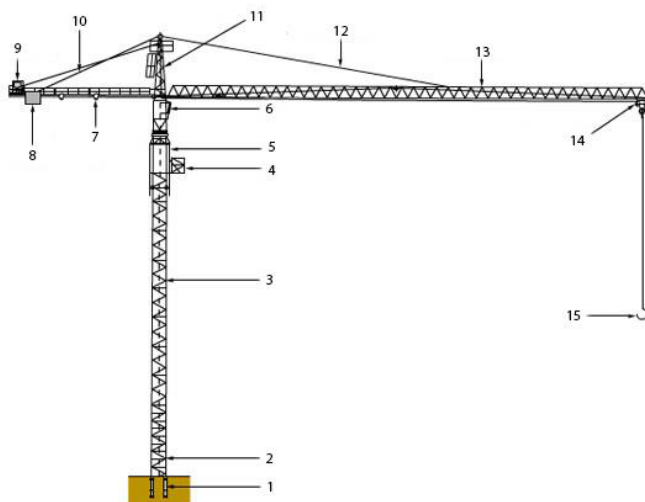
**Ključne reči:** građevinska stubna dizalica, 3D model, SolidWorks

### 1. UVOD

Građevinske stubne dizalice se koriste za opsluživanje skladišta, rečnih pristaništa, fabrika... Ogromna nosivost, veliki dohvat kuke, lako podešavanje visine stuba, danas čine ovaj tip dizalice nezamenljivim u građevinarstvu. U ovoj oblasti su razvijeni različiti tipovi i konstrukcije ovih dizalica koje karakterišu jednostavna i brza montaža, demontaža i prevoz u skladu sa savremenim uslovima gradnje. One se i dalje ubrzano usavršavaju, s obzirom da je potreba za većim i moćnijim dizalicama sve veća [1].

### 2. OSNOVI PRORAČUNA

Uprkos velikom broju sastavnih elemenata koji se mogu međusobno razlikovati u zavisnosti od tipa dizalice, moguće je izdvojiti neke najznačajnije. Šema tipične građevinske stubne dizalice sa karakterističnim elementima prikazana je na slici 1.



Slika 1. Šema tipične građevinske stubne dizalice

Osnovni elementi dizalične konstrukcije prikazane na slici 1 su [2]:

- 1 – elementi za vezu sa podlogom;
- 2 – sekcija osnove rešetkastog stuba;
- 3 – sekcija rešetkastog stuba;
- 4 – hidraulični sklop;
- 5 – elevacioni element (za „rast“ kрана);
- 6 – kabina;
- 7 – kontrastrela;
- 8 – kontrateg – balast;
- 9 – mehanizam za dizanje tereta;
- 10 – uže za oslanjanje kontrastrele;
- 11 – „glava“ stuba (tornja);
- 12 – uže za oslanjanje strele;
- 13 – sekcija rešetkaste strele;
- 14 – kolica sa koturačom;
- 15 – kuka.

Pri proračunu, osnovni zadatak je da se teorijski pokaže da dizalica odgovara zahtevima bezbednosti,

<sup>1)</sup> Stefan Ilić, инж. маш., Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, ([ilic.stefan93@gmail.com](mailto:ilic.stefan93@gmail.com)),  
doc. dr Nenad Miloradović, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, ([mnenad@kg.ac.rs](mailto:mnenad@kg.ac.rs)),  
doc. dr Rodoljub Vujanac, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, ([vujanac@kg.ac.rs](mailto:vujanac@kg.ac.rs)).

uzimajući u obzir radne uslove, tok transporta, montaže i demontaže. Koncept proračuna se bazira na standardima SRPS EN 14439 i SRPS EN 13001. Uzeta su u obzir stalna opterećenja koja deluju na dizalicu tokom njenog rada [3-5].

Stalna opterećenja su:

- uticaj težine tereta i ubrzanja na masu dizalice,
- uticaj inercije i gravitacije pri vertikalnom dizanju tereta,
- opterećenja pri kretanju po neravnoj površini,
- opterećenja od oscilovanja pokretnih delova dizalice,
- opterećenja uzrokovana izmeštanjem dizalice.

Uvođenjem dinamičkih faktora u proračun, uzimaju se u obzir dinamičke sile koje nastaju pri radu pogonskih elemenata dizalice.

Polazna konstrukcija (Potain MD 310 C K16) je tradicionalna varijanta dizalice sa nepokretnom strelom i glavom dizalice. Postoji veći broj različitih izvođenja ove konstrukcije koja prvenstveno zavise od tri moguća tipa osnove (betonska, nepokretna i pokretna čelična osnova). U okviru rada analizirano je izvođenje dizalice sa nepokretnom čeličnom osnovom, kodne oznake ZD 463 čija visina tornja iznosi 46 m. Osnovne karakteristike strele kao što su dužina (minimalna 30 m, a maksimalna 70 m), ali i prateće krive nosivosti dostupne su u tehničkoj dokumentaciji dizalice. Za analiziranu konstrukciju predviđena je kontrastrela dužine 18 m, sastavljena od dva individualna elementa. Nosivost dizalice može biti ili 8 t ili 16 t, i prvenstveno zavisi od izabranog sklopa koturače i kuke. Projektovana konstrukcija kreirana je na osnovu usvojenih kataloških vrednosti za izvođenje ZD 463, pri dužini strele od 45 m.

### 3. KREIRANJE 3D MODELA

Projektovani model dizalice je izrađen je u softveru „SolidWorks“ 2014 i prikazan je na slici 2. S obzirom na kompleksnost modela prikazane slike preuzete su iz „Viewport“-a softvera „SolidWorks“, kako bi se lakše razgraničile ivice pojedinih sastavnih elemenata u odnosu na klasičan renderovan model [6].

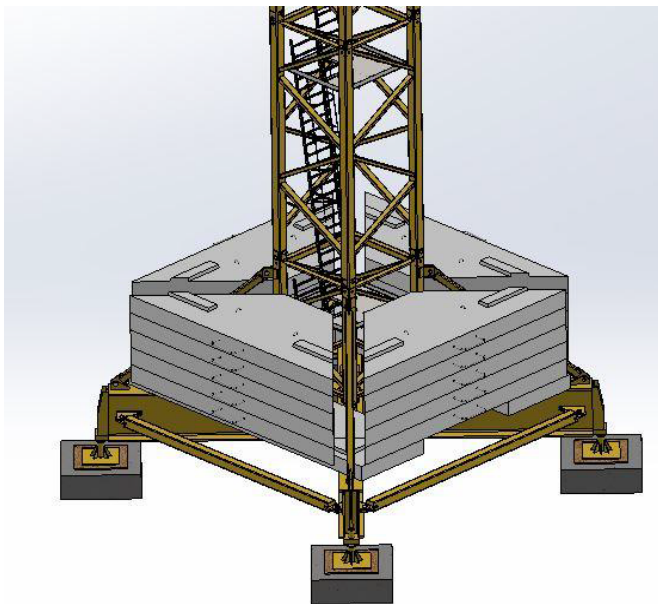


*Slika 2. Renderovan model građevinske stubne dizalice*

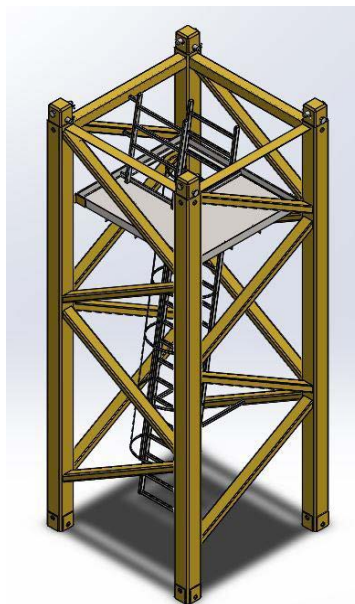
Osnovne elemente čelične konstrukcije osnove dizalice čine tri individualna H profila. Njihova veza



ostvorena je putem čivija. Kako bi se ostvarila veća stabilnost čelične konstrukcije osnove, H profili su bočno vezani dodatnim kutijastim profilima. Konstrukcija oslonca sa balastnim blokovima i nožicama prikazana je na slici 3.



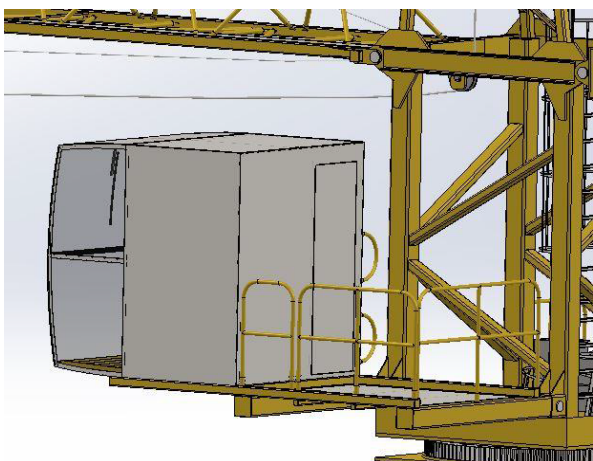
*Slika 3. Konstrukcija oslonca*



*Slika 4. Rešetkasta sekcija tornja*

Kao balast su iskorišćena dva različita tipa betonskih blokova. Prvi tip blokova (oblika kvadra) formira osnovu na koju se postavlja drugi tip trapezoidnih blokova. Pozicioniranje prvih izvršeno je pomoću dva cilindrična useka (na bloku) i ispupčenja (na profilu). Primenjena su dva bloka prvog tipa, i ukupno dvadeset blokova (po pet sa svake strane) drugog tipa. Kontakt sa podlogom ostvaren je pomoću četiri nožice. Radi postizanja željenog poravnanja nožice su postavljene na prethodno izliveno betonske blokove.

Rešetkasta konstrukcija se sastoji od četiri individualna vertikalna kutijasta profila koji su dodatno ojačani. Postavljene su merdevine koje omogućavaju pristup kabini (slika 4.). Kabina je postavljena na odgovarajuću platformu. Kako bi se ostvarila bolja preglednost prostora na prednjem donjem delu kabine umesto lima postavljeno je staklo. Radnik noge ne oslanja direktno na staklo već na odgovarajuću čeličnu konstrukciju koja je zavarena za platformu kao što je prikazano na slici 5.



*Slika 5. Kabina sa platformom*

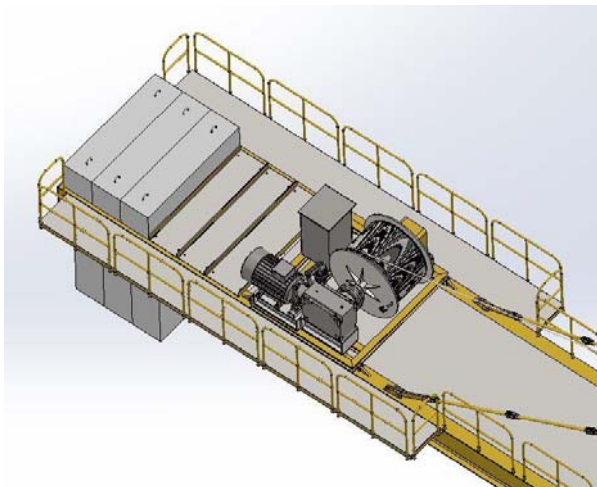


*Slika 6. Kraća sekcija kontrastrele*

Kontrastrele dizalice se sastoji od dve individualne sekcije. Vodeći elementi su I profili koji su ojačani dodatnim zavarenim profilima kao što je prikazano na slici 6. Veza individualnih sekcija kontrastrele omogućena je putem čivija sa odgovarajućim osiguračima. Mehanizam za dizanje tereta (motor, spojnica, kočnica, reduktor i doboš) takođe je postavljen na dužoj sekciji kontrastrele. Pristup balastnim blokovima i ostalim elementima postignut je primenom odgovarajuće bočne platforme, što je prikazano na slici 7. Strela

dizalice se, takođe, sastoji od većeg broja zasebnih sekcija.

Mehanizam za dizanje tereta predstavlja najzahtevniji sklop u celokupnoj konstrukciji. Na izlaznom vratilu elektromotora postavljena je kočnica. Na bazi zadate brzine dizanja, dimenzionisani su reduktor, spojnica, pogonski doboš, usvojeno čelično uže za dizanje tereta.



*Slika 7. Deo kontraštrele sa mehanizmom za dizanje tereta i balastom*



*Slika 8. Konačna konstrukcija individualnog sklopa kolica*

Kolica koja nose sklop koturače i kuke kreću se duž strele. Kako bi se ostvarilo pravilno kretanje kolica primenjena su dva tipa točkova. Predviđena je i dodatna platforma za radnika za održavanje i servisiranje elemenata dizalice (prikazana na slici 8.).

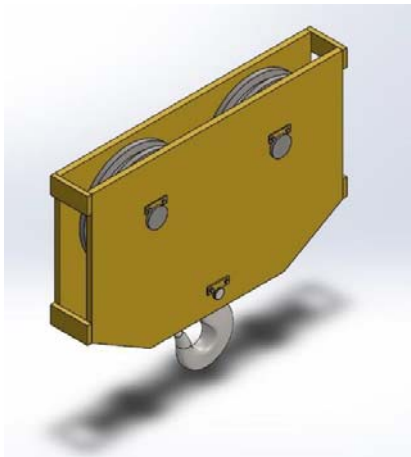


*Slika 9. Renderovan model strele i dilazičnih kolica*

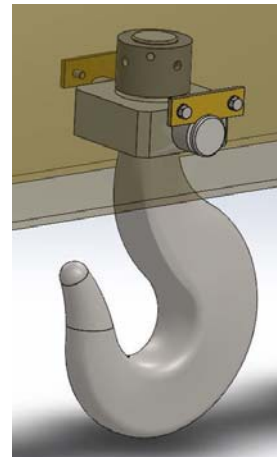
Na kolicima su postavljeni koturovi za uže (prikazani na slici 9.) koji vode uže do sklopa koturače i kuke, prikazanog na slici 10.

Kuke je modelirana na osnovu standardnih dimenzija kuka (slika 11.).





*Slika 10. Sklop koturače i kuke*



*Slika 11. Sklop kuke, traverza i navrtka*

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno kreiranje trodimenzionalnog modela na osnovu dizalice Potain MD310 C K16 izvođenja ZD 463, pri čemu su iz prateće tehničke dokumentacije preuzeti osnovni polazni parametri [7].

Analizirana je realna konstrukcija brzo-montirajuće dizalice. Navedeni su osnovni elementi, ali i neke specifičnosti analizirane konstrukcije. Na osnovu konfiguracije gradilišta definisano je pozicioniranje dizalice. Posebna pažnja usmerena je i ka procesu montaže i to pre svega ka ostvarenju potrebne visine tornja i pozicioniranju strele u zavisnosti od visine objekata koji se zidaju. Predstavljeni su najčešći uzroci statičkih i dinamičkih opterećenja. Posmatran je i uticaj vetra kao specijalan slučaj dinamičkog opterećenja.

Model je kreiran u softverskom paketu „SolidWorks“ korišćenjem osnovnih i posebnog „Weldments“ modula. Kreiran model je eksportovan u softverski paket „KeyShot“ gde je dodatno obrađen kako bi se ostvarila što bolja fotorealistična vizualizacija.

Razvoj modularnih sistema građevinskih stubnih dizalica znatno olakšava projektovanje, proizvodnju i eksploataciju dizalica. Modularni sistemi predstavljaju familije građevinskih stubnih dizalica različitih izvođenja, formiranih na osnovnim standardnim modulima i elementima. Time se smanjuju troškovi projektovanja, izrade, eksploatacije i povećava pouzdanost i trajnost transportnih sistema.

#### 5. LITERATURA

- [1] Lawrence, K. Shapiro, Jay, P. Shapiro: *Cranes and Derricks*, fourth edition, The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [2] Ostrić D., Tošić S.: *Dizalice*, Mašinski fakultet, Centar za mehanizaciju, Beograd, 2005.
- [3] SRPS EN 14439:2009: *Dizalice - Bezbednost - Toranjke dizalice*, Institut za standardizaciju Srbije, 2009
- [4] SRPS EN 13001-1:2010: *Dizalice - Konstrukcija uopšte - Deo 1: Opšti principi i zahtevi*, Institut za standardizaciju Srbije, 2010.
- [5] FEM. 1.007: *Recommandations to maintain tower cranes in safe condition*, The European Federation of Materials Handling “FEM”, Novembar 2003.
- [6] Ilić, S.: *Građevinska stubna dizalica*, završni rad, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, 2014.
- [7] Manitowoc: Potain MD310 C K16 data sheet metric, <http://www.manitowoccranes.com/>, 2008.

**Miloradović, N., Ilić, S., Vujanac, R.**

#### MODELLING AND CALCULATION OF A CONSTRUCTION TOWER CRANE

**Abstract:** A 3D model of a construction tower crane was developed in this paper using SolidWorks software package. Selection of main elements, drive units and accompanying mechanisms that enable realization of basic crane's operations was performed. Dimensions and parameters of the most critical elements of the design were determined based on previous calculations, partly presented in the paper. In development of the model, the loads influencing stability and carrying capacity of the tower crane were analysed according to standards. Requirements regarding safety and health at work were also considered in the paper.

**Key words:** construction tower crane, 3D model, SolidWorks

Mitrović A.<sup>1)</sup>, Kovač P.<sup>2)</sup>, Kulundžić N.<sup>3)</sup>, Savković B.<sup>4)</sup>

## MODELOVANJE I SIMULACIJA PROCESA OBRADJE GLODANJEM

### Rezime

Obrada glodanjem je jedan od najvažnijih konvencionalnih postupaka obrade i pod uticajem je velikog broja parametara. Jedan od najznačajnijih parametara je temperatura, pa je zbog toga predviđanje temperature tokom obrade glodanjem veoma važno za optimizaciju parametara rezanja. Glavni cilj ovog rada je modelovanje i simulacija procesa obrade glodanjem sa predviđanjem temperature u zoni rezanja pomoću 3D metode konačnih elemenata korišćenjem programskog paketa ANSYS / Explicit Dynamics.

**Ključne reči:** metoda konačnih elemenata, glodanje, temperatura, ANSYS

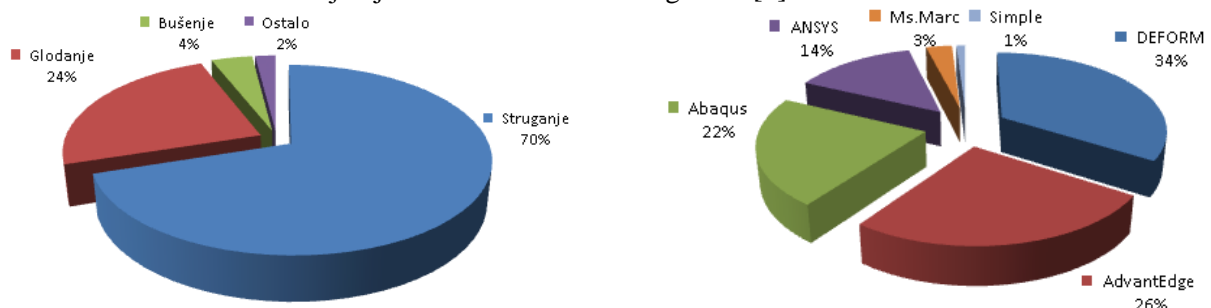
### 1. UVOD

Iako je obrada metala rezanjem široko istraživana, izbor parametara rezanja, materijala alata i geometrije alata za male obime proizvodnje još uvek je zasnovana na iskustvu operatera ili preporuci priručnika. Izabrani parametri su retko optimalni a mali obim proizvodnje ne opravdava izvođenje eksperimenata za povećanje efikasnosti. S obzirom na to da su mašinski eksperimenti skupi i dugotrajani, postoji potreba da se razviju ili efikasnije strategije koje smanjuju broj eksperimenata ili da se eksperimentalna ispitivanja eliminišu u potpunosti.

Za određivanje temperature u zoni rezanja pri čeonom glodanju koriste se različite metode. Zbog složenosti procesa obrade glodnjem glavne teškoće u merenju temperature rezanja tokom glodanja javljaju se zato što: (a) alat rotira i zubi alata ulaze u zahvat sa obratkom i izlaze iz njega, (b) zona obuhvaćena toplotom pomera se po površini obratka i (c) strugotina može da ometa merenje [1].

Zbog ovih poteškoća razvijeni su alternativni pristupi kao što su matematičke simulacije u kojima se koriste numeričke metode. Pokazalo se da je među numeričkim metodama metoda konačnih elemenata najkorisnija i u širokoj upotrebi. Ubrzo nakon što se metoda konačnih elemenata pojavila, istraživači su počeli da koriste ovu metodu za analizu procesa obrade rezanjem.

U poslednje dve decenije, metoda konačnih elemenata postaje najčešće korišćen metod u analizi obrade metala rezanjem. Na slici 1 dat je grafički pregled najizučavaniji procesa obrade rezanjem i najčešće korišćenih programskih paketa za simulaciju procesa obrade rezanjem metodom konačnih elemenata na osnovu 116 naučnih radova objavljenih tokom 2000-2014. godine [2].



Slika 1: Pregled istraživačkih aktivnosti u području simulacija metodom konačnih elemenata

<sup>1</sup> mr Anđelija Mitrović, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Svetog Save 65, Čačak, e-mail: andjelija.mitrovic@vstss.com

<sup>2</sup> prof. dr Pavel Kovač, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: pkovac@uns.ns.ac.rs

<sup>3</sup> M.Sc Nenad Kulundžić, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: kulundzic@uns.ac.rs

<sup>4</sup> dr Borislav Savković, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: savkovic@uns.ac.rs

Pravilan izbor programskog paketa za analizu metodom konačnih elemenata je veoma važan za određivanje obima i kvaliteta analize koja će biti izvršena. Neki od važnijih programa koji se koriste za simulaciju obrade metala rezanjem su: DEFORM, AdvantEdge, Abaqus i ANSYS. U ovom radu za simulaciju obrade glodanjem sa predviđanjem temperature u zoni rezanja korišćen je programski paket ANSYS.

## 2. PROGRAMSKI PAKET ANSYS

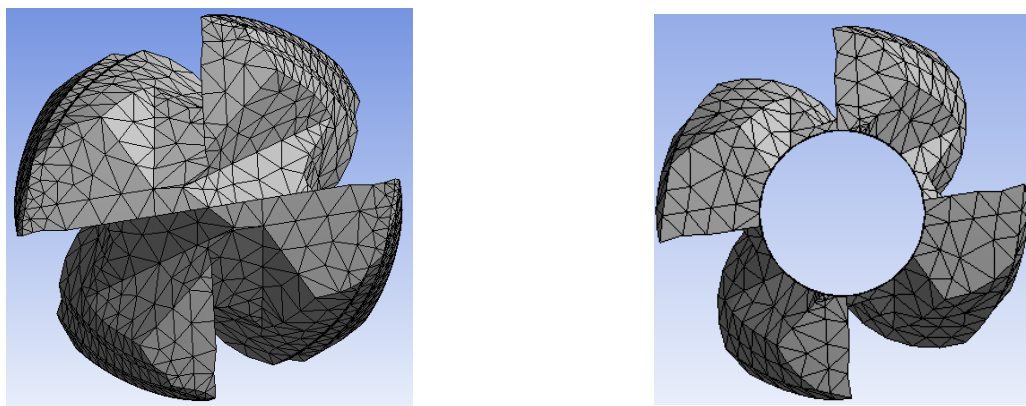
ANSYS (ANalysis SYstem) je programski paket opšte namene projektovan za proračun uz pomoć metode konačnih elemenata koji poseduje različite mogućnosti analiziranja od jednostavnih linearnih, statičkih analiza, do kompleksnih nelinearnih, dinamičkih analiza. Analiza u ovom programskom paketu sastoji se iz tri glavna koraka: preprocesiranje (definisane i oblikovanje modela), procesiranje (primena opterećenja i dobijanje rezultata) i postprocesiranje (analiza dobijenih rezultata). ANSYS Workbench predstavlja glavni meni u kome se realizuju projekti. Sadrži veliki broj različitih opcija koje omogućavaju realizaciju tri glavna koraka koja se postavljaju pred ANSYS.

Modul ANSYS Explicit Dynamics omogućava korisnicima da zadovolje zahteve rešenja različitih složenosti zasnovanih na detaljima problema i stručnosti korisnika [3]. Ovaj modul pruža vrhunsku funkcionalnost mnoštvu naprednih mogućnosti dajući poverenje u rezultate simulacija koji odgovaraju realnosti. ANSYS Explicit Dynamics omogućava inženjerima da istraže širok spektar izazova kao što su: proces proizvodnje sa nelinearnom plastičnom reakcijom, složeni kontakti, kvazistatika, simulacije-udarni test, visokobrzinske i hiperbrzinske uticaje, lom materijala, mehanički prodor, velika opterećenja koja daju velike deformacije materijala, fragmentaciju materijala, uticaj prostornih krhotina, projektovanje sportske opreme, eksplozivno opterećenje, eksplozivno formiranje, interakciju eksplozivne strukture.

## 3. SIMULACIJE OBRADJE GLODANJEM

### 3.1 Izrada geometrijskog modela

U programskom paketu SolidWorks napravljeni su modeli vretenastog glodala i obratka. Nakon toga, jedan pojednostavljen model vretenastog glodala i obratka je napravljen kako bi broj elemenata modela bio manji. U oba slučaja u obzir je uzet samo rezni deo glodala koji učestvuje u obradi. Zatim su modeli za simulaciju snimljeni kao STEP fajlovi i uvezeni u ANSYS Explicit Dynamics. Na slici 2 prikazani su modeli glodala bez i sa pojednostavljenjem u ANSYS-u.



Slika 2: Modeli glodala uvezeni u ANSYS

### 3.2 Definisane materijala

Za materijal obratka izabran je čelik AISI 4340 iz biblioteke materijala Explicit Materials, dok su za materijal vretenastog glodala, volfram karbid, uneti potrebni podaci jer ne postoje u biblioteci materijala.

U simulacijama obrade za ponašanje materijala obratka izabran je klasičan Džonson-Kuk konstitutivni model materijala [4]. Ponašanje materijala čelika AISI 4340 je definisano prema Džonson-Kuk zakonu kao:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

gde  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  predstavljaju napon, deformaciju i stepen deformacije, a  $T$ ,  $T_r$ ,  $T_m$  je trenutna temperatura radnog materijala, sobna temperatura i temperatura topljenja materijala, respektivno.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  i  $m$  su konstante materijala. Parametri materijala AISI 4340 [5] definisani prema Džonson-Kuk zakonu prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1: Parametri čelika AISI 4340

A(MPa)	B(MPa)	C	m	n	$\dot{\varepsilon}_0$	$T_m$ (°C)	$T_r$ (°C)
1150	739	0.014	1.03	0.26	1	1450	20

### 3.3 Definisanje parametara simulacije

Prilikom definisanja parametara za simulaciju potrebno je definisati: modele, koordinatne sisteme, povezanost, umrežavanje modela, kretanja alata i obratka, trajanje simulacije i izbor izlaznih rezultata. Za svaki model potrebno je definisati da li je krut ili fleksibilan. Izabrano je da su glodalo i obradak fleksibilni. Zadržan je globalni koordinatni sistem i definisan koordinatni sistem za glodalo. U početnoj fazi simulacije glodalo i obradak su razdvojeni tako da nije definisana povezanost modela.

Za definisanje graničnih uslova simulacije korišćen je Lagranžov model u kome je mreža konačnih elemenata postavljena na materijalu obratka i pokriva celu oblast koja se analizira. Lagranžov model je široko primenjen u simulacijama rezanja metala zbog mogućnosti da odredi geometriju strugotine od početne faze do stabilnog stanja i ova geometrija je funkcija parametara rezanja, procesa plastične deformacije i karakteristika materijala i zbog toga se granice i oblici strugotine ne moraju znati odmah.

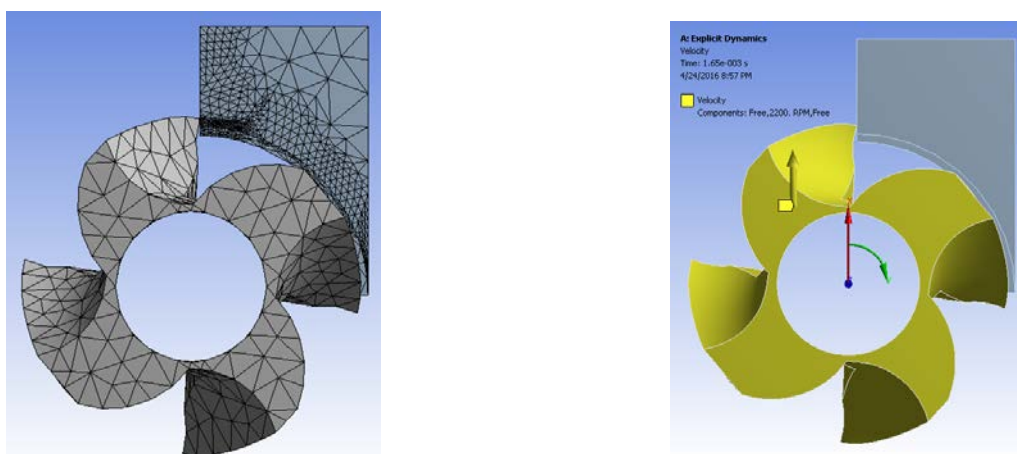
Dve simulacije su pokrenute, pri čemu je u prvoj simulaciji korišćeno glodalo bez pojednostavljeno dok je u drugoj simulaciji korišćeno glodalo sa pojednostavljenjem. U prvoj simulaciji mreža je automatski formirana tako da glodalo i obradak imaju ukupno 12520 elemenata i 2964 čvorova. U drugoj simulaciji mreža na obratku je formirana korišćenjem komande Refinement tako da se povećao broj elemenata i čvorova i u ovom slučaju glodalo i obradak imaju ukupno 18957 elemenata i 4181 čvorova. Računarsko vreme potrebno za prvu simulaciju je 5 dana a za drugu simulaciju 7 dana na HP xw8600 radnoj stanici sa 2 x CPU procesora sa 4 fizička jezgara svaki, što znači ukupno 8 fizičkih jezgara i 16 GB RAM-a.

Ulazni parametri za simulaciju su brzina rezanja, odnosno broj obrtaja, korak i dubina rezanja. Vrednosti izabranih parametara obrade prikazani su u tabeli 2. Različiti izlazni rezultati simulacije mogu se zadati napon, deformacija, temperatura, elastičnost itd. U ovom radu kao izlazni parametar simulacije izabrana je temperatura.

Tabela 2: Parametri obrade

Brzina rezanja, $v$ (izračunato)	Broj obrtaja, $n$	Korak po zubu, $s_z$	Dubina rezanja, $a_p$
70(m/min)	2200(o/min)	0,040(mm/z)	1(mm)

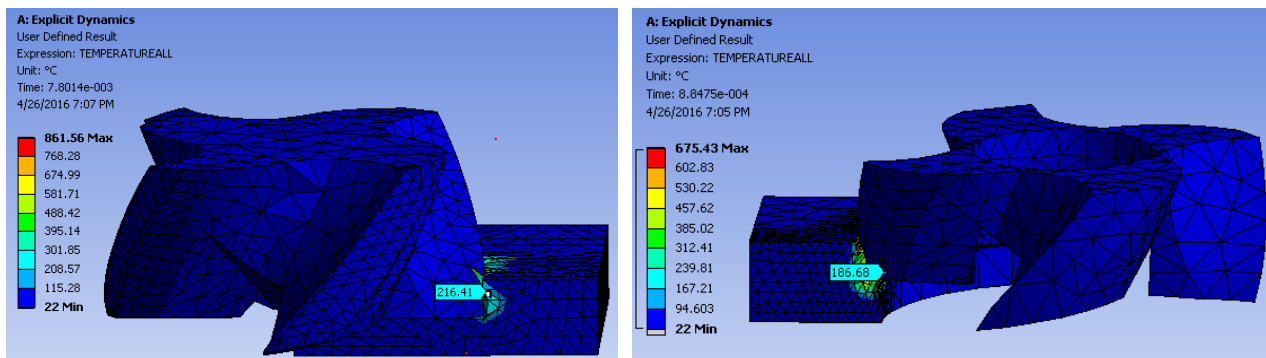
Na slici 3 prikazan je pojednostavljen model glodala i obratka nakon definisanja mreže i nakon definisanja kretanja u ANSYS-u.



Slika 3: Modeli glodala i obratka nakon umrežavanja i nakon definisanja kretanja u ANSYS-u

#### 4. REZULTATI SIMULACIJA

Rezultati simulacija obrade glodanjem sa raspodelom temperature mogu se videti na slici 4. Poređenjem rezultata dobijenih u simulacijama može se videti da se u prvoj simulaciji dobijaju više vrednosti temperature u zoni rezanja. Jedan od razloga za to je što je preciznost rezultata simulacije u osnovi funkcija veličine elemenata. Generalno posmatrano, što je manji element to su precizniji rezultati, ali to zahteva i mnogo više vremena da se urade proračuni.



Slika 4: Raspodela temperature u simulacijama

#### 5. ZAKLJUČAK

Simulacija obrade glodanjem u ANSYS/Explicit Dynamics-u može se koristiti za predviđanje temperatura u zoni rezanja. Jedan od glavnih problema u simulaciji obrade glodanjem je umrežavanje obratka kao i precizno modeliranje geometrije i umrežavanje glodala. S druge strane, previše gusta mreža bitno utiče na povećanje vremena obrade simulacije tako da su teškoće u optimizaciji mreže i vreme proračunavanja glavne prepreke za simulaciju procesa obrade glodanjem.

#### 6. LITERATURA

- [1] Le Coz G, Marinescu M, Devillez A, Dudzinski D, Velnom L.: “Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys“, Applied Thermal Engineering, 36:434- 441, 2012.
- [2] Bontiu Pop A., Lobontiu M.: “The finite element analysis approach in metal cutting“, Academic journal of manufacturing engineering, Vol. 13, ISSUE 1, 2015.
- [3] <https://www.simutechgroup.com/ANSYS/Explicit-Dynamics>, Solution, 2011.
- [4] Johnson G.R., Cook W.H. :“A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures“, Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, April 19–21, pp. 541–547, 1983.
- [5] Alcaraz J., Lorenzo I., Lacalle L.:“Thermomechanical Analysis of a Chip Machining Process“, ABAQUS Users’ Conference, 2003.

Mitrovic A., Kovac P., Kulundzić N., Savkovic B.

#### MODELING AND SIMULATION OF THE MILLING PROCESS

**Abstract:** The milling process is one of the most widely conventional machining operations. It is influenced by a large number of parameters. One of the most significant factors is temperature. Therefore prediction of temperature during milling is very important for optimizing the cutting parameters. The main purpose of this paper is modeling and simulation of the milling process with prediction of temperatures in cutting zone by using 3D finite element analysis with ANSYS/Explicit.





Mladenović G., Tanović Lj., Pjević M., Popović M. <sup>1)</sup>

## OBRADA SKULPTORSKIH POVRŠINA - RAZVOJ CAD/CAM SISTEMA <sup>2)</sup>

### Rezime

*U pogledu geometrijskih aspekata, opis skulptorskih površina je veoma dobro pokriven, međutim i dalje ostaju problemi kada je u pitanju stvarna proizvodnja jer u zavisnosti od generisane putanje alata zavisi cena izrađenog dela. U vezi sa ovim se nameće pitanje generisanja optimalne putanje alata koja će respektovati uslov obrade sa minimalnim vremenom, a u granicama dozvoljenog odstupanja i hrapavosti obrađene površine. U radu je prikazana metodologija razvoja CAD/CAM sistema za projektovanje tehnologije obrade glodanjem loptastim glodalom delova sa skulptorskim površinama.*

**Ključne reči:** Skulptorske površine, CNC obrada, generisanje putanje alata

### 1. UVOD

Problemi obrade delova sa skulptorskim površinama su predmet proučavanja mnogih istraživačkih centara već više od 30 godina. Delovi sa skulptorskim površinama su prisutni u svim granama inženjerstva. Upotreba skulptorskih površina je prevashodno zbog poboljšanja dizajna, ili/i zbog poboljšanja funkcionalnih zahteva [1]. Kada je u pitanju mašinsko inženjerstvo najzastupljeniji su u oblasti automobilske i avio industrije, brodogradnje, proizvodnje kalupa za kovanje i livenje kao i u industriji proizvodnje robe široke potrošnje.

Kada je u pitanju dobijanje delova sa skulptorskim površinama najzastupljeniji je metod obrade glodanjem loptastim glodalom na 3 ili 5 osnim NUMA. Do sada je razvijeno više metoda za obradu skulptorskih površina, a tri najviše korišćenih su: izoparametarski [2], izoravanski [3] i izohrapavi [4]. U danasnje vreme se ulažu veliki naponi za razvoj novih metoda generisanja i optimizacije putanje alata. Sam proces optimizacije putanje alata se može sprovesti kroz jedan ili više kriterijuma. Kada je u pitanju visekriterijumska optimizacija putanje alata neizostavno je uvođenje faktora kriterijuma optimizacije  $w_i = \{0, 1\}$  pomoću kojih se definiše značaj svakog kriterijuma ponaosob.

Prateći ovaj trend, Katedra za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu je sprovedla višegodisnja istraživanja u ovoj oblasti. Posebni naponi se ulazu u razvoj metoda za optimizaciju putanje alata i razvoj novih CAD/CAM sistema. U radu je prikazana razvijena metodologija generisanja putanje alata na bazi učitanih CAD modela izratka i priprema, definisane hrapavosti ( $R_{max}$ ) i tačnosti obrađene površine ( $h_{max}$ ), skupa faktora uključenja/isključenja kriterijuma optimizacije ( $w_{PK}$ ,  $w_{UK}$ ,  $w_{Vs}$ ) i baze podataka o raspoloživim alatima, parametrima obradljivosti i karakteristikama izabrane NUMA [5].

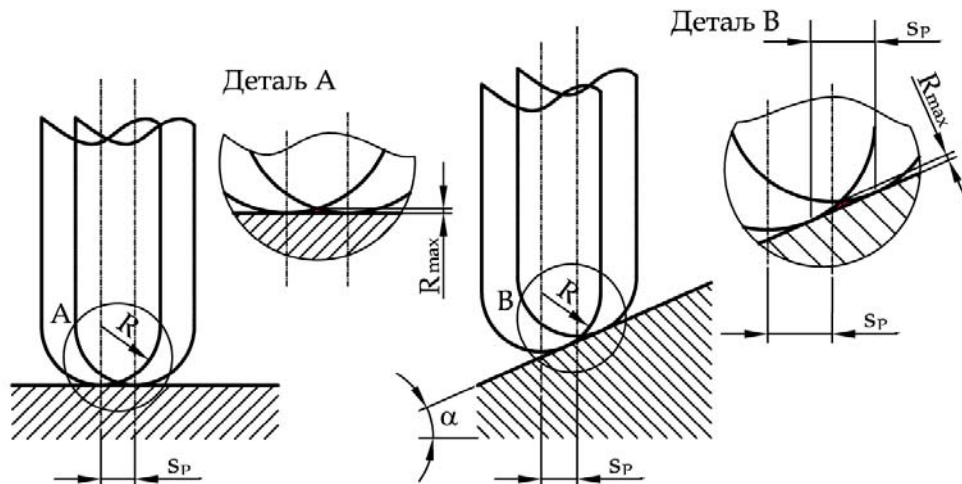
### 2. RAZVOJ CAD/CAM SISTEMA

Projektovani sistem je namenjen za klasu delova kod kojih je osnova kvadrat ili pravougaonik, a skulptorska površina se nalazi na jednoj strani dela. Razvijeni sistem za učitani CAD model izratka u STL formatu vrši izračunavanje tačaka preseka skulptorske površine i koordinatnih ravni (XZ i YZ) primenom algoritma za određivanje preseka trougla i ravni sa odgovarajućom rezolucijom. Za tako određeni skup presečnih tačaka se dalje formira interpolacioni polinom i na bazi toga izračunava minimalni radijus krivine na konveksnom delu putanje alata. Najmanja izračunata vrednost se dalje koristi da bi se na osnovu baze podataka automatski izabrao alat kojim bi se vršila obrada.

<sup>1)</sup> dr Goran Mladenović, ([gmladenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:gmladenovic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Ljubodrag Tanović, ([ltanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:ltanovic@mas.bg.ac.rs)), Miloš Pjević, mast.inž.maš., ([mpjevic@mas.bg.ac.rs](mailto:mpjevic@mas.bg.ac.rs)), dr Mihajlo Popović, ([mpopovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mpopovic@mas.bg.ac.rs)), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koji su realizovani u okviru projekta TR 35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

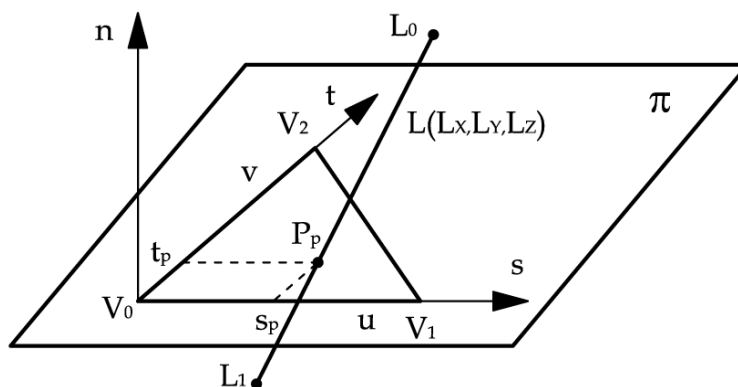
Na osnovu učitane geometrije izratka, definisanog prečnika alata i zahtevane tačnosti i hrapavosti obrađene površine, a prema modelu formiranja hrapavosti prikazanom na slici 1 vrši se izračunavanje vrednosti poprečnog ( $s_p$ ) koraka prema procedurama datim u [6], a u zavisnosti od definisanih vrednosti faktora uključenja/isključenja kriterijuma optimizacije poprečnog ( $w_{PK}$ ) koraka.



**Slika 1.** Model formiranja hrapavosti za CAD modele u STL formatu

$$s_p = \begin{cases} 2\sqrt{R^2 - (R - R_{\max})^2}, & \text{za } w_{PK} = 0 \\ 2 \cos \alpha \sqrt{R^2 - (R - R_{\max})^2}, & \text{za } w_{PK} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Iz razloga bržeg rada sistema i uključivanja mehanike procesa rezanja u generisanju putanje alata učitani CAD model priprema se konvertuje u model predstavljen pomocu Z mape koji je prvi uveo Anderson [7]. Za rezoluciju osnove Z-mape je izabran kvadrat čija je stranica jedinične dužine. Za formiranje internog zapisa priprema upotrebljen je algoritam za određivanje preseka zraka (prave) i trougla kojim je predstavljena skulptorska površina, slika 2.



**Slika 2.** Presek prave i trougla

Postoji više načina za određivanje tačke preseka prave i trougla, a u ovom slučaju je upotrebljen naizmenični metod [8] koji koristi direktne 3D proračune za određivanje tačke prodora. U algoritmu se koristi parametarska jednačina za definisanje ravni data preko dva parametara  $u, v$ :

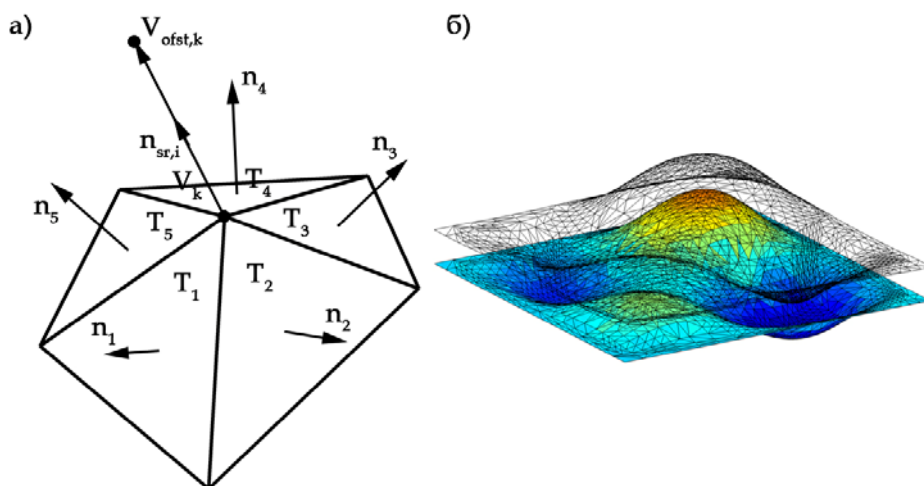
$$V(s, t) = V_0 + su + tv = V_0 + s(V_1 - V_0) + t(V_2 - V_0) = (1 - s - t)V_0 + sV_1 + tV_2 \quad (2)$$

gde su  $s, t$  realni brojevi, a  $u, v$  su vektori strana trougla  $T$ .

U slučaju projektovanja tehnologije obrade za CAD modele delova sačuvanih u STL formatu fajla koji u svojoj strukturi sadrži koordinate tačaka trouglova  $V_i$ , komponente vektora normale svakog trougla  $n_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]$ , kao i oznake tačaka koje formiraju trouglove moguće je direktno formirati ofsetovanu površinu (takođe predstavljenu pomoću skupa trouglova) na rastojanju jednakom radijusu loptastog dela glodala (R) prema:

$$V_{ofst,i} = V_i + R \cdot n_{sr,k}, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

gde  $V_{ofst,i}$  predstavlja ofsetovano teme i-tog trougla, N- ukupan broj temena trouglova, a  $n_{sr,k}$  - osrednjeni vektor normale [9] u tački koja predstavlja zajedničko teme za više trouglova, slika 3a.



**Slika 3.** Osrednjeni vektor normale (a) i ofsetovana površina predstavljena trouglovima (b)

Na slici 3a je prikazan skup od pet trouglova sa jednim zajedničkim temenom ( $V_k$ ) i osrednjenim vektorom normale ( $n_{sr,k}$ ) u pravcu koga je za vrednost radijusa loptastog dela glodala ofsetovano zajedničko teme trouglova ( $V_{ofst,k}$ ). U opštem slučaju osrednjavanje vektora normale zajedničkog temena se vrši prema [9]:

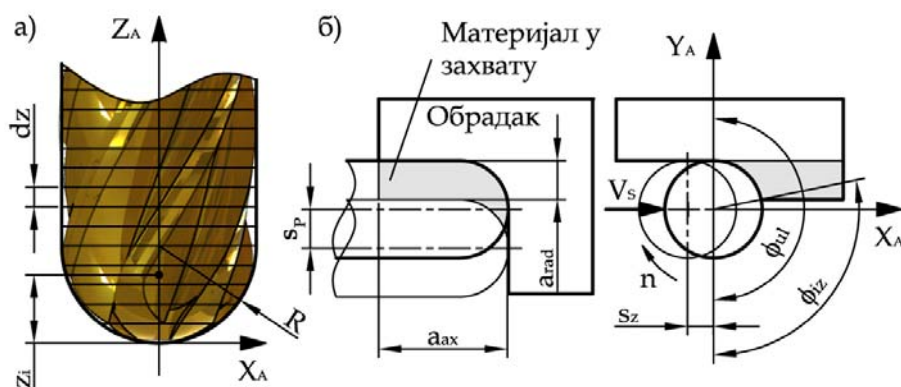
$$\vec{n}_{sr,k} = \frac{\sum_{j=1}^M N_{k,j}}{\left| \sum_{j=1}^M N_{k,j} \right|}, \quad 1 \leq k \leq M \quad (4)$$

gde M predstavlja broj trouglova koji imaju zajedničko teme.

U slučaju projektovanja tehnologije obrade sa variranjem brzine pomoćnog kretanja za uparene CAD modele izratka i priprema se dalje vrši analiza dubine i širine glodanja duž putanje alata i na osnovu formiranog modela za predikciju sile glodanja vrši izračunavanje potrebne brzine pomoćnog kretanja u svakoj tački lokacije alata za izabranu kombinaciju materijala i geometrije alata i materijala priprema. Brzina pomoćnog kretanja se određuje tako da rezultujuća sila glodanja ne pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost koja je definisana u bazi podataka za svaki prečnik loptastog glodala. Naravno, predviđene su granice minimalne i maksimalne dozvoljene brzine pomoćnog kretanja prema opsegu koji je usvojen prilikom izrade modela za predikciju sile glodanja. Dva su razloga za uvođenje ograničenja brzine pomoćnog kretanja jer mesta sa velikom dubinom rezanja mogu proizrokovati brzinu pomoćnog kretanja blisku nuli. Analogno, mesta sa malom dubinom rezanja mogu proizrokovati isuviše veliku vrednost brzine pomoćnog kretanja što se može odraziti na kvalitet obrađene površine. U slučaju da vrednost brzine pomoćnog kretanja dostigne minimalnu dozvoljenu vrednost, a vrednost sile glodanja bude veća od maksimalno dozvoljene dobija se obaveštenje da se površina ne može obraditi zadatim režimima obrade pa je potrebno obradu izvršiti iz više prolaza.



U projektovanom sistemu je prihvaćen model za predikciju sile glodanja koji podrazumeva podelu loptastog glodala diskovima elementarne debljine  $dz$ , slika 4a, a prema proceduri datoj u [10]. Količina materijala u zahvatu se određuje prema dubini ( $a_{ax}$ ) i širini ( $a_{rad}$ ) glodanja, sa ograničenjem da je projekcija zahvaćenog materijala na ravan upravnu na brzinu pomoćnog kretanja jedna zatvorena kontura. Iz razloga simulacije procesa obrade uveden je lokalni koordinatni sistem alata koji je postavljen tako da se  $X_A$  osa poklapa sa pravcem brzine pomoćnog kretanja dok je  $Y_A$  osa usmerena u desno gledajući u pravcu vektora brzine pomoćnog kretanja. Osa  $Z_A$  upotpunjuje Dekartov koordinatni sistem desne orijentacije, slika 4b.



**Slika 4.** Disretizacija reznog dela glodala (a), koordinatni sistem alata i količina materijala u zahvatu (b)

Ukoliko je u pitanju projektovanje tehnologije obrade sa optimizacijom hrapavosti obrađene površine potrebno je pri izboru brzine pomoćnog kretanja proveriti da li je zadovoljen uslov održanja hrapavosti na maksimalnu vrednost prema [11]:

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{max}^{k1}}{R^{k2}} \quad (5)$$

gde su:  $k1$ ,  $k2$  koeficijenti korekcije brzine pomoćnog kretanja.

Na osnovu karakteristika izabrane NUMA, tj snage pogonskih motora servoosa potrebno je proveriti uslov ograničenja koraka po maksimalnoj dozvoljenoj vučnoj sili prema NUMA [12]:

$$\frac{s_z^{y_0}}{n^{w_0}} \leq \frac{F_X \cdot D_{LG}^{i_0}}{0.4 \cdot C_p a^{x_0} b^{q_0} z \cdot k_F} \quad (6)$$

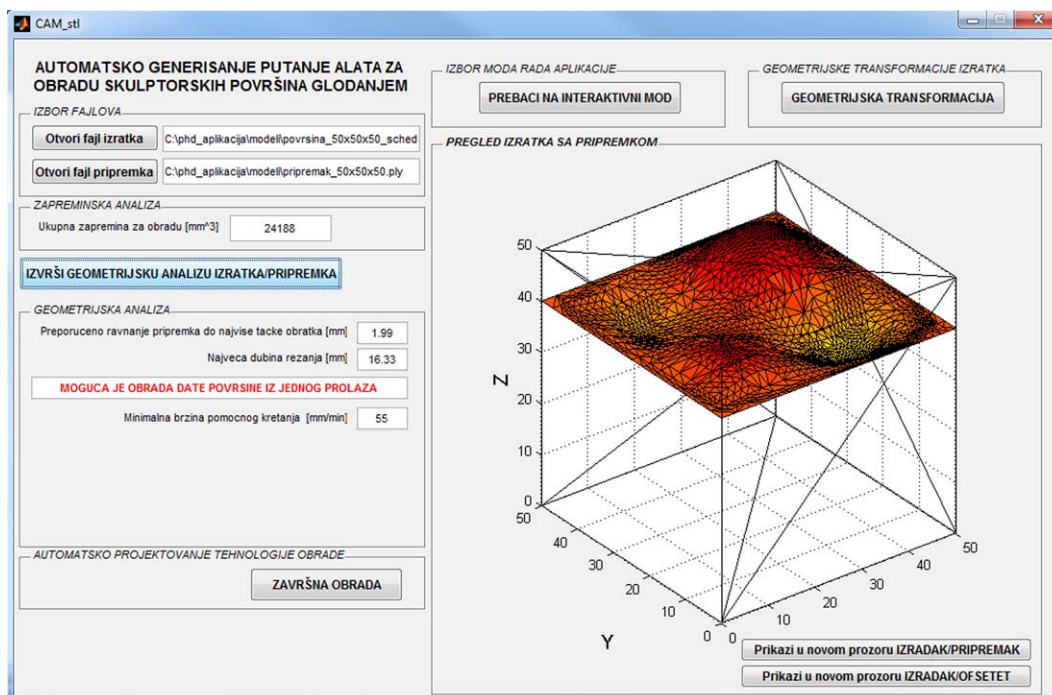
gde je:  $n$  - broj obrtaja,  $z$  - broj zuba,  $b$  - širina glodanja,  $x_0, y_0, q_0, w_0, i_0, C_p, k_F$  - koeficijenti i parametri obradljivosti [13].

Analizom razvijenih strategija obrade komercijalnih CAM sistema, u sistem su ugrađene tri strategije za obradu skulptorskih površina i to: (1) obrada u jednom pravcu, (2) ZIG-ZAG strategija i (3) spiralna strategija. U procesu generisanja putanje alata prvo se sprovodi procedura generisanja segmenata putanje, a zatim procedura povezivanja segmenata putanje prema metodologiji opisanoj u [6].

### 3. RAZVOJ SOFTVERSKOG REŠENJA

Prema konceptu razvijenog sistema opisanom u prethodnom poglavlju primenom softverskog paketa MATLAB<sup>®</sup> (Matrix Laboratory) [14], verzija 7.12 – R2011a razvijeno je CAD/CAM softversko rešenje za proces automatskog projektovanja tehnologije obrade delova sa skulptorskim površinama. Na slici 5 je prikazan prozor formiranog softvera gde je sukcesivnim otkrivanjem polja omogućeno jednostavno rukovanje softverom prema formiranim procedurama opisanim u prethodnom poglavlju. Softver je u mogućnosti da prikaže upozorenje u slučajevima kada je površinu nemoguće uraditi iz jednog prolaza, a što je uslovljeno izabranim prečnikom alata i odnosom geometrije izradak/pripremak. Krajnji izlaz iz razvijenog softvera je NC kod za obradu dela na osnovu učitanih CAD modela izratka i priprema, materijala

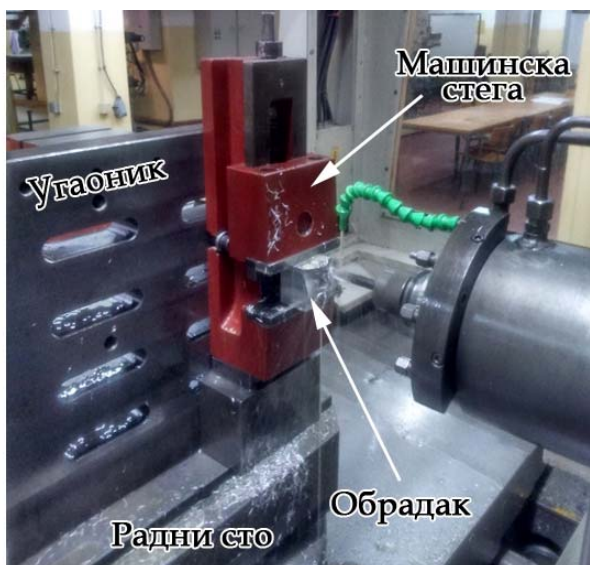
priprema, definisanog kvaliteta i tačnosti obrade i vrednostima skupa faktora uključenja/isključenja kriterijuma optimizacije putanje alata.



Slika 5. Prozor razvijenog softverskog rešenja

#### 4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

U cilju verifikacije rada razvijenog softvera, a samim tim i razvijenih metoda generisanja i optimizacije putanje alata pristupilo se projektovanju tehnologije obrade delova sa skulptorskim površinama (na bazi učitanih CAD modela izratka i priprema generisanih u nekom od komercijalnih CAD sistema u STL formatu fajla) i samoj izradi prema generisanim NC kodovima. Mašinska obrada delova je vršena na horizontalnom obradnom centru ILR–HMC500/40, upravljačka jedinica FANUC O-M. Pripremak je u ovom slučaju baziran i stegnut u steznom priboru postavljenom na ugaonik i radni sto obradnog centra, slika 6.



Slika 6. Eksperimentalna postavka obrade dela na obradnom centru

Korišćeni material priprema je AlMg4.5Mn, a alat je loptasto glodalo materijala HSSE (8% Co) prečnika 12mm sa dva zuba, ugla nagiba zavojnog žljeba cilindričnog dela 30°.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana razvijena metodologija visekriterijumske optimizacije putanje alata pri obradi delova sa skulptorskim površinama glodanjem loptastim glodalom. Razvijena metodologija je zatim primenom softverskog paketa MATLAB implementirana u jedinstveno softversko rešenje za proces automatskog projektovanja tehnologije obrade delova sa skulptorskim površinama. Za CAD modele izratka i priprema formiranih u nekom od komercijalnih CAD/CAM sistema je izvršeno je generisanje upravljačkog koda čijom je primenom izvršena obrada delova i time verifikovan rad razvijenog softverskog rešenja. Primena razvijenog softverskog rešenja je od velikog značaja u slučajevima kada je gruba obrada ujedno i završna obrada čime se smanjuju troškovi obrade za dati deo.

## 6. LITERATURA

- [1] Mladenovic G., Tanovic L.J., Ehmann K.F.: *Tool Path Generation for Milling of Free Form Surfaces With Feedrate Scheduling*. FME Transactions, 43(1): pp. 9-15, 2015.
- [2] G.C. Loney, T.M. Ozsoy: *NC machining of free form surfaces*, Computer-Aided Design, Vol. 19 No.2, pp. 85–90, 1987.
- [3] Z.L. Han, D.C.H. Yang: *Iso-phot based tool-path generation for machining free-form surfaces*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME Transactions, Vol. 121 No.4, pp. 656–664, 1999.
- [4] K. Suresh, D.C.H. Yang: *Constant scallop height machining of free form surfaces*, Journal of Engineering for Industry, ASME Transactions, Vol.116, pp. 253–259, 1994
- [5] Mladenovic G. *Optimizacija putanje alata pri obradi skulptorskih površina glodanjem*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet
- [6] P. Bojanić: *Generisanje putanje alata pri obradi skulptorskih površina na 3-osnim CNC mašinama loptastim glodalom, 33<sup>rd</sup> Savetovanje proivodnog mašinstva Srbije, Zbornik radova*, pp. 115-118, Beograd, Mašinski fakultet Beograd, 16-17 Jun, 2009.
- [7] Anderson. R.O.: *Detecting and eliminating collisions in NC machining*. Computer-Aided Design, 10(4), pp. 231-237, 1978.
- [8] Möller T., Trumbore B.: *Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection*. Journal of Graphics Tools, 2(1), pp. 21-28, 1997.
- [9] Malosio M., Pedrocch N., Molinari Tosatti L.: *Algorithm to Offset and Smooth Tessellated Surfaces*. Computer-Aided Design and Applications, 6(3), pp. 351-636, 2009.
- [10] Altintas Y.: *Manufacturing Automation – Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [11] Chen J.S., Huang Y.K., Chen, M.S.: *Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(9), pp. 1070-1076, 2005.
- [12] Tanović Lj., Petrakov IO.: *Teorija i simulacija procesa obrade*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [13] Kalajdžić M., Tanović Lj., Babić B., Miljković Z., Puzović R., Kokotović B., Popović M., Živanović S., Tošić, D., Vasić I.: *Tehnologija obrade rezanjem – Priručnik*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [14] URL: <http://www.mathworks.com/>

Mladenović G., Tanović Lj., Pjević M., Popović M.

## SCULPTURED SUFRACE MILING - THE DEVELOPMENT OF CAD/CAM SYSTEM

**Abstract:** While the geometric aspects of the design for sculptured surfaces are relatively well-covered, issues still remain when it comes to the actual manufacture of parts because cost of the part directly depends of generated tool path. Regarding with this, arises the question about optimal tool path generation which will respect the requirement of minimal machining time. The paper present description of CAD/CAM system development for ball-end milling.

**Key words:** Sculptured surfaces, CNC machining, tool path generation



Поповић, М., Младеновић, Г.<sup>1)</sup>

## АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЈЕ РЕЗНИХ ЕЛЕМЕНАТА УРЕЗНИКА СА ПРАВИМ ЖЛЕБОВИМА<sup>2</sup>

### Резиме

*За потребе предикције сила и момента у процесима обраде урезивања навоја потребно је извршити идентификацију положаја и дужине главних и помоћних сечива урезника који представља један од најсложенијих резних алата који се користи у пракси. Урезник је вишесечан алат код кога у процесу настанка струготине учествују главна сечива која се налазе на конусној површини резног дела и која су прекинута жлебовима који формирају профил навоја и помоћна сечива која се налазе на профилу навоја. У раду је приказан поступак аналитичког одређивања геометрије сечива на резном делу урезника са правим жлебовима и њихова анализа у програмском пакету Matlab.*

**Кључне речи:** урезник са правим жлебовима, геометрија алата

### 1. УВОД

У раду је приказан поступак аналитичког одређивања геометрије сечива машинског урезника за потребе успостављања модела за предикцију сила и момента урезивања навоја у свим фазама захвата алат-обрадак и дефинисања потребних алгоритама за развој софтверских модула, који се базира на геометрији и акцији сечива у процесу урезивања навоја [1, 2]. Све операције резања деле исте принципе механике резања, али њихова геометрија и кинематика се разликују. Успостављање аналитичких модела за рачунарску симулацију сила и момента урезивања навоја који се базира на геометрији и акцији сечива у процесу урезивања навоја, а на бази резултата ортогоналног резања истом комбинацијом материјала алата и обратка разматрано је у радовима [1, 2, 4 и 5]. У раду [3] је приказан поступак моделирања фамилије урезника са правим жлебовима у CAD пакету. Детаљна анализа геометрије резних елемената урезника омогућава даља истраживања и испитивања оптималне геометрије алата у процесу резања.

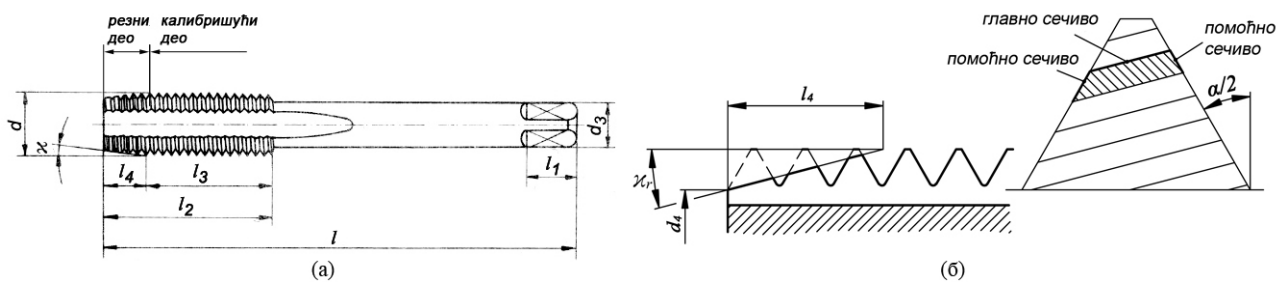
Урезници и операције урезивања се сматрају за најсложеније и најмање схваћене резне алате и процесе обраде који се користе у пракси. Израда унутрашњег навоја је један од најзахтевнијих машинских процеса и представља завршну обраду са сложеном и неприступачном површином у отвору малог пречника, а коју остварује алат са великим бројем зуба и сечива. Најчешћи проблеми са којима се сусрећемо у процесу урезивања навоја, а имајући у виду да се ради о вишесечном алату и инхерентно променљивим силама током процеса, су лом алата и лош квалитет израђеног навоја. По правилу урезивање навоја представља једну од последњих операција у току израде дела, па су и цена уложеног материјала и рада на врхунцу у тренутку примене операције урезивања. Последице лома алата током урезивања навоја често доводе до формирања непоправљивих неусаглашености на изратку и могу имати драстичне економске ефекте. Истраживања процеса урезивања су изузетно корисна како би се избегао лом алата и лош квалитет навоја који могу имати екстремно скупе последице, а посебно у односу на вредност која се производу додаје операцијом урезивања. Боље разумевање процеса урезивања и система сила у урезивању је корисно и за произвођаче алата, као и за дефинисање режима обраде са циљем повећања продуктивности.

<sup>1)</sup> Др Михајло Поповић, [mpopovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mpopovic@mas.bg.ac.rs), др Горан Младеновић, [gmladenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Универзитет у Београду - Машински факултет, Катедра за Производно машинство, Краљице Марије бр.16. 11120 Београд 35

<sup>2)</sup> Рад је настао у оквиру истраживања на пројекту TR 35022: Развој нове генерације домаћих обрадних система, који финансијски подржава Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

## 2. АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЈЕ УРЕЗНИКА

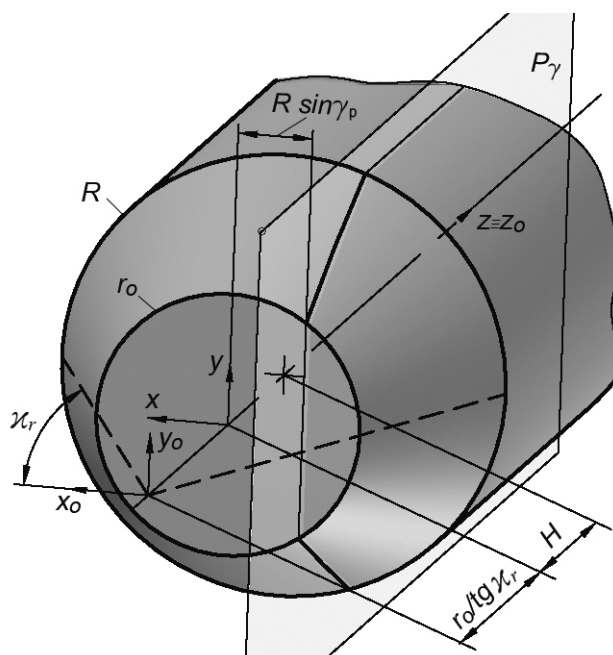
Урезници су вишесечни резни алати који се користе за урезивање, тј. обраду унутрашњег навоја у отворима или рупама. На себи имају навој који је прекинут са неколико правих или спиралних жлебова за одвођење струготине и формирање резног клина алата којима су дефинисана сечива. Почетни део урезника је конично сужен, што значи да су сечива на почетном делу са непотпуним профилем, чиме је обезбеђена равномернија расподела укупног попречног пресека струготине на поједина сечива урезника. Приликом обраде, урезник изводи два кретања, и то обртно и транслаторно у правцу осе обртања. На слици 1 су приказане основне димензије урезника са правим жлебовима [6]. Улазни, конусни део урезника врши резање навоја, а калибришући на цилиндричном делу резеника почишћавање. Сваки зуб улазног дела (слика 1б) скида одређени слој материјала који зависи од броја жлебова, корака навоја и синуса угла улазног, конусног дела урезника. Главна и помоћна сечива имају различиту геометрију.



Слика 1. Машински урезник са правим жлебовима, основне димензије урезника (а) и резни део урезника са пресецима струготине (б)

Сечива урезника формира више површина, које као и код осталих алата представљају грудну и леђну површину. Основни облик резног дела је конус, који у калибришућем делу прелази у цилиндар. Грудна површина може бити равна или криволинијска и формира се уздужним жлебовима који могу бити прави или завојни. Леђна површина се формира подбрусивањем на конусном и цилиндричном омотачу. Границе леђне површине, као и помоћне леђне површине формирају се завојном површином профила навоја (стандардни или специјални) чији је нагиб у функцији корака урезника.

Дефинисањем ових површина у њиховим пресецима добија се скуп тачака који чине сечива урезника. На слици 2 приказани су основни геометријски елементи који формирају главно сечиво. Главно сечиво се налази у пресеку зарубљене купе/конуса на улазном делу алата и грудне површине.



Слика 2. Формирање главног сечива урезника у пресеку конусне и равне површине [5]



За случај када је грудна површина равна и паралелна са једном од равни глобалног координатног система математичким апаратом се добијају изрази који описују криву сечива.

Конус, са углом врха  $2\kappa_r$  у координатном систему који се налази у врху  $(x_0, y_0, z_0)$ , дефинисан је изразом:

$$x_0^2 + y_0^2 = \operatorname{tg}^2 \kappa_r \cdot z_0^2 \quad (1)$$

Ако се координатни систем постави у врх алата, неопходно је извршити translацију координатног почетка за  $r_0/\operatorname{tg} \kappa_r$  у к.с.  $(xyz)$ , при чему се добија једначина која описује резни део урезника као:

$$x^2 + y^2 = \operatorname{tg}^2 \kappa_r \cdot \left( z + \frac{r_0}{\operatorname{tg} \kappa_r} \right)^2 \quad (2)$$

За грудну раван  $P_\gamma$  која је паралелна равни  $yz$  (најједноставнији случај), једначина која је у општем облику  $a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0$ , при чему је  $b = c = 0$  постаје:

$$x = -R \sin \gamma_p \quad (3)$$

Зависност мањег пречника зарубљеног конуса  $r_0$ , који се налази на самом врху алата, његовог угла  $\kappa_r$  и висине конусног дела  $H$  је:

$$H = (R - r_0) / \operatorname{tg} \kappa_r \quad (4)$$

где је  $R$  номинални пречник урезника.

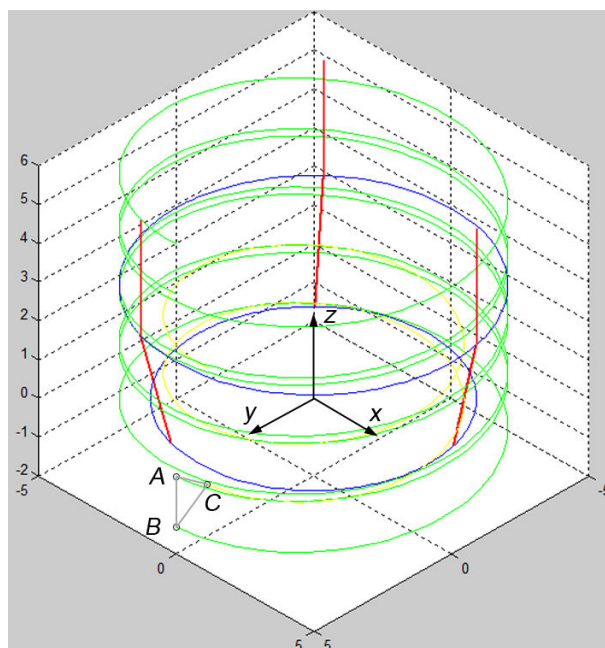
Пресек конуса и равни (изрази 2 и 3) представља једначину хиперболе, која за транслирани координатни почетак гласи:

$$y^2 = \operatorname{tg}^2 \kappa_r \cdot \left( z + \frac{r_0}{\operatorname{tg} \kappa_r} \right)^2 - R^2 \sin^2 \gamma_p \quad (5)$$

На овај начин су дефинисане тачке сечива једног жлеба. С обзиром да се број жлебова урезника  $z$  креће од 2, тачке сечива на тим жлебовима лако се могу добити помоћу матрица ротације око осе  $z$  за углове  $(i-1) \cdot 360^\circ / z$ , где  $i$  узима вредности од два до броја жлебова  $z$ .

### 3. МОДЕЛИРАЊЕ СЕЧИВА УРЕЗНИКА

На слици 3 црвеном бојом су приказане криве (хиперболе) на којима се налазе главна сечива на резном делу и праве на калибрационом делу урезника са три жлеба ( $z = 3$ ), добијене у програмском пакету *Matlab* користећи изразе 4 и 5 са инкрементом по  $z$  осе од 0.01 mm.



Слика 3. Правци главних сечива [5]

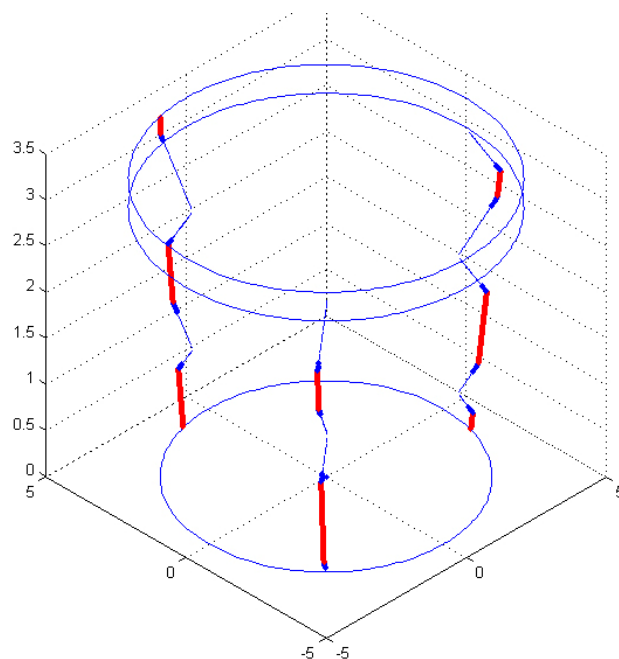
На слици су такође учртане завојнице које формирају навојну површину и које полазе из тачака које су дефинисане профилем навоја и које представљају границе појединачних главних сечива. Завојнице су дефинисане изразима:

$$\begin{aligned} x &= R \cos t \\ y &= R \sin t \\ z &= \frac{P}{2\pi} t \end{aligned} \quad (6)$$

док су почетне тачке стандардног профила навоја усвојене у равни  $uz$ :

$$\begin{aligned} A(0, R, 0) \\ B(0, R, -7/8P) \\ C(0, R - 7/8P \cos \varphi / 2, z_B / 2) \end{aligned}$$

Значи, главно сечиво на једном жлебу није континуално, већ је прекинуто површима профила навоја, које чине бокове зуба, па постоји више главних сечива, што се види на слици 4.



Слика 4. Главна сечива и правци помоћних сечива на резном делу урезника [5]

Помоћна сечива се налазе у наставку главних сечива и дефинишу се као пресек грудне и површина које формира профил навоја а које су нагнуте под угловима  $\pm\alpha/2$  ( $\pm 30^\circ$  за случај стандардног ISO профила) у односу на осу урезника (слика 4).

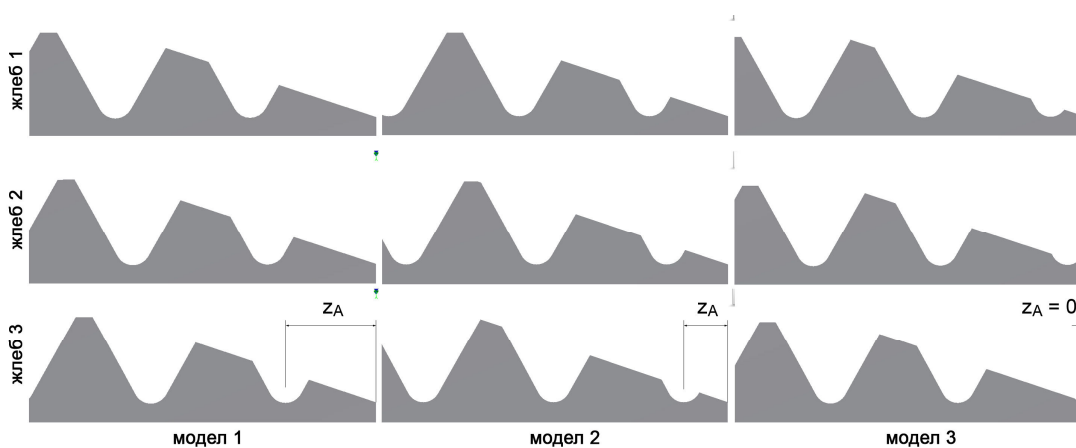
На грудној површини, у датом случају равни која је паралелна са равни  $uz$ , једначина правца помоћних сечива гласи:

$$y = y_D - \frac{|z - z_D|}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (7)$$

где су координате  $y_D$  и  $z_D$  координате крајњих тачака главног сечива. Дужина помоћних сечива је у функцији нападног угла и корака по зубу.

Распоред сечива зависи од почетног положаја профила навоја ABC у односу на чело урезника, тј. координате  $z = 0$ . У случају који је приказан на слици 4, усвојено је да је  $z_A = 0$  ( $z$  координата тачке A је на челу урезника). Усвајањем другачије вредности  $z_A$ , које има смисла у границама  $0 - P/z$ , где је  $P$  корак а  $z$  број жлебова урезника добија се различит распоред сечива, самим тим и њихов положај и дужина. На слици 5 су у попречним пресецима приказани могући распореди сечива на свим жлебовима за три различите вредности  $z_A$ .





Слика 5. Резни део урезника са различитим вредностима  $Z_A$

Да би се у производним условима добили урезници који у границама толеранција имају приближно иста сечива врши се механичко означавање једне стране четвртке, тј. призме на крају дршке алата, и она постаје технолошка база за сва каснија базирања у захватима обраде урезника [5].

На овај начин, почевши од математичког описа површина које дефинишу резни део урезника, у *Matlab* програмском окружењу дефинисан је компјутерски модел урезника са правим жлебовима. Овај модел са подацима о положају и дужини појединачних сечива на резном делу урезника је искоришћен приликом симулација процеса урезивања навоја [4, 5].

#### 4. ЗАКЉУЧАК

У раду је извршена анализа геометријских елемената урезника са правим жлебовима. Сечива, која се налазе у пресеку грудне површине која је разматрана као равна и леђне површине која је на улазном делу конус, идентификована су аналитички и анализирана кроз програмски пакет *Matlab*. Изведени изрази омогућавају даља успостављања оптималних подручја геометрије овог алата и дефинисање оптималних режима обраде кроз компјутерске симулације процеса.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Altintas, Y., *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.
- [2] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., Witt, S., Virtual Machine Tool, *Cirp Annals-manufacturing Technology - CIRP Ann-Manuf Technol*, 54(2), 115-138, 2005.
- [3] Поповић, М., Параметарско моделирање урезника са правим жлебовима, 39. ЈУПИТЕР конференција, 26. симпозијум CAD/CAM, Зборник радова, стр. 2.37-2.40, Београд, 2014.
- [4] Popović, M., Tanović, Lj., Tapping proces simulation based on orthogonal cutting tests, II International scientific conference COMETA 2014, Proceedings, pp. 25-32, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2014.
- [5] Поповић, М., Истраживање утицаја резног сечива у процесу урезивања навоја, докторска дисертација, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2016.
- [6] SRPS EN 25967, Урезници и резачи навоја — Номенклатура главних типова и терминологија, 2011.

Popovic, M., Mladenovic, G.

#### THE CUTTING EDGE GEOMETRY ANALYSIS OF STRAIGHT FLUTES TAPS

**Abstract:** For the purpose of prediction the forces and torque in the tapping process it is necessary to identify the location and length of the tap major and minor cutting edges. Tap is one of the most complex cutting tools used in practice. The major edges are located on the tap conical chamfer surface and interrupted by grooves that form a thread profile while minor edges are located on the thread profile. The paper presents the procedure for analytical determination of the tool geometry on the cutting part of the taps with straight flutes and their analysis in the Matlab programming environment.

**Key words:** straight flutes tap, tool geometry

**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE  
with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**



**36. simpozijum**

**NU \* ROBOTI \* FTS**

Beograd, maj 2016.

**NU – ROBOTI –FTS**  
**NC - ROBOTS – FMS**

<b>Antić, A., Zeljković, M., Milošević, M.</b> METODE IZDVAJANJA OBELEŽJA U SISTEMU ZA NADZOR ALATA PRI OBRADI TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA.....	3.1
<b>Baralić, J., Nedić, B.</b> GEOMETRIJA REZA PRI OBRADI ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM .....	3.6
<b>Dimić, Z., Milutinović, D., Živanović, S., Mitrović, S.</b> METOD KONFIGURISANJA UPRAVLJAČKOG SISTEMA OTVORENE ARHITEKTURE REKONFIGURABILNOG ROBOTA ZA OBRADU .....	3.12
<b>Jovičić, G., Tabaković, S., Zeljković, M., Mladenović, C.</b> STRUKTURNA OPTIMIZACIJA POKRETNE PLATFORME VIŠENAMENSKE MAŠINE ALATKE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM.....	3.16
<b>Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., Babić, B.</b> INTELIGENCIJA ROJA ČESTICA I TEORIJA HAOSA U INTEGRISANOM PROJEKTOVANJU I TERMINIRANJU FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA.....	3.22
<b>Pjević, M., Tanović, L., Mladenović, G.</b> UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODIRANJA KOD MIKROREZANJA KRTIH MATERIJALA .....	3.33
<b>Slavković, N., Milutinović, D., Živanović, S.</b> METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA IZAZVANIH SILAMA REZANJE PRI OBRADI ROBOTIMA.....	3.39
<b>Vasilić, G., Živanović, S.</b> ANALIZA RADNOG PROSTORA REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA.....	3.47
<b>Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Milutinović, D.</b> KONFIGURISANJE MULTIFUNKCIONALNIH I REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI I METODI ZA NJIHOVO PROGRAMIRANJE I VERIFIKACIJU PROGRAMA OBRADE .....	3.55
<b>Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., Miljković, Z.</b> MULTIAGENTNI I HOLON TEHNOLOŠKI SISTEMI U PROJEKTOVANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA I TERMINIRANJU PROIZVODNJE .....	3.63





Antić, A.,<sup>1</sup> Zeljković, M.,<sup>1</sup> Milošević, M.<sup>1</sup>

## RAZVOJ METODE IZDVAJANJA OBELEŽJA U SISTEMU ZA NADZOR ALATA PRI OBRADI TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA<sup>2</sup>

### Rezime

**Rezime:** Rad sadrži prikaz dela eksperimentalnog istraživanja vezanog za izdvajanje obeležja za Fuzzy sistem prepoznavanja stanja pohabanosti alata pri obradi teško obradivih materijala na bazi legura titanijuma (Ti6Al4V). Izdvajanje obeležja u sistemu za nadzor stanja pohabanosti alata izvršeno je na osnovu razvijene nove metode, nazvane 2D. Karakteristika razvijene metode je korišćenje spektrograma kratkotrajne diskretne Furierove transformacije (STDFT) na prozoriranom signalu u različitim opsezima 2D teksture "slike" dobijene primenom razvijene tehnike. Istraživanja sprovedena u okviru ovog rada imaju za cilj definisanje robusnijih ulaznih informacija u sistema za klasifikaciju stanja pohabanosti alata.

**Ključne reči:** obrada signala, ekstrakcija obeležja, habanje alata

### 1. UVOD

Praćenje stanja alata se sprovodi u cilju sprečavanja eventualnih oštećenja obradaka ili mašina alatki. Pouzdane tehnike monitoringa treba da obezbede brz odgovor na neočekivane promene stanja rezne geometrije alata. Razvoj informacionih tehnologija rezultirao je primenom tehnika brže i jednostavnije obrade signala i korišćenju sistema sa više različitih senzora u cilju dobijanje informacija za kontrolu procesa i predviđanje stanja habanja alata. Efikasno praćenje stanja alata primenom različitih vrsta senzora, kao i adekvatne metode obrade signala predstavlja veliki interes za veliki broj akademskih i komercijalnih istraživanja.

Konvencionalni načini nadzora habanja alata za obradu rezanjem zasnovani su na poznatim fizičkim principima, vizuelnim, slušnim i intelektualnim sposobnostima operatera, pomoću kojih se nastoji prepoznati pohabanost alata. Savremeni, inteligentni sistemi za nadzor habanja alata za obradu rezanjem treba da svojim karakteristikama zamene i nadgrade ljudske nedostatke i mogućnosti u smislu kontinualnog, brzog i tačnog određivanja stanja pohabanosti alata što dovodi do:

- povećavanja stepena sigurnosti obradnog sistema, posebno izraženo u situacijama visokog stepena pohabanosti i loma alata,
- optimizacije parametara obrade s obzirom na zahtevanu postojanost alata, uzimajući u obzir i tehnološka ograničenja procesa,
- kontrole kvaliteta obrađene površine i zahtevane dimenzione tačnosti obratka i
- dodatne racionalizuje troškova proizvodnje.

Intenzivnija istraživanja vezana za razvoj "inteligentnih" sistema za nadzor alata za obradu rezanjem započela su 90-ih godina prošlog veka primenom više senzorskog pristupa i klasifikatora habanja zasnovanih na algoritmima veštačke inteligencije. Početak istraživanja u ovoj oblasti pretpostavljao je da će korišćenje ovih metoda rezultirati industrijski primenljivim rešenjima nadzora habanja alata za obradu rezanjem. Fokus istraživanja je bio na primeni više senzorskih sistema i razvoju klasifikatora pohabanosti zasnovanih na algoritmima veštačke inteligencije sa velikim brojem obeležja. Početni rezultati istraživanja habanja alata za obradu rezanjem baziranog na primeni ovih metoda nagoveštavali su stvaranje industrijskog primenljivog rešenja što se na žalost nije desilo. Mnogi sistemi za nadzor alata bazirani na primeni modela veštačke

<sup>1</sup> V.prof. dr Aco Antić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2312, E-mail: [antica@uns.ac.rs](mailto:antica@uns.ac.rs)

Prof. dr Milan Zeljković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2350, E-mail: [milanz@uns.ac.rs](mailto:milanz@uns.ac.rs),

Doc. dr Mijodrag Milošević, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2346, E-mail: [mido@uns.ac.rs](mailto:mido@uns.ac.rs)

<sup>2</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR 35025: Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici

inteligencije razvijeni su u cilju optimizacije, predviđanja stanja pohabanosti alata ili kontrole procese obrade. Jedna od ključnih tačaka kod razvoja klasifikatora pohabanosti zasnovanih na algoritmima veštačke inteligencije je izdvajanje obeležja. U radu se prikazuje nova metoda, nazvana 2D, u zadatku prepoznavanja stanja pohabanosti alata. Karakteristika razvijene metode je korišćenje spektrograma kratkotrajne diskretne Furierove transformacije (STDFT) na prozoriranom signalu u različitim pojasevima i opsezima 2D teksture "slike" dobijene primenom razvijene tehnike. Dakle, u pomenutom 2D prostoru mapira se problem prepoznavanja stanja pohabanosti alata kao problem prepoznavanja tekstura. Ova metoda "otvara vrata" za uključivanje brojnih tehnika za prepoznavanje i klasifikaciju tekstura koje mogu da se primene na području prepoznavanja pohabanosti alata. Među najperspektivnije tehnike [1, 2] za pomenute zadatke spadaju one koje koriste odgovor prostorno invarijantne filter banke, odnosno, filter banke na osnovu maksimalnog seta odgovora kao što su (BFS, MR8, MR4, i MRS4), filter banke Leung i Malik [3]. Pokazano je da rotaciono invariantni, multi-scale MR8 filter banka daje bolje rezultate od bilo kog drugog. U prikazanom sistemu za nadzor habanja alata izabrana je MR8 filter banka. Iz pomenute filter banke ne koriste se svi filteri već samo njegove komponente koje izdvajaju relevantna obeležja tekstura koja su dovedena u vezu sa promenom habanja alata [4 - 6].

## 2. PRIKAZ METODE

Neka je  $F(x, y)$  tekstura slike, koja odgovara identifikovanom spektrogramu STDFT posmatranog signala senzora  $s$ , pri čemu je STDFT je spektrogram  $|S(k, \omega)|^2$  definisan kao

$$S(k, \omega) = \sum_{n=-K/2}^{K/2} s(n)w(k-n)e^{-ikn} \quad (1)$$

gde je  $k$  označen diskretni vremenski okvir, sa  $\omega$  diskretna vremenska frekvencija, odnosno, diskretna frekvencija zona pokrivenosti, dok je  $w$  prozorska sekvenca koja se koristi (koristi se Hamming-ova funkcija), sa dužinom  $K$ . Diskretni vremenski prozor  $k$ , za  $k = 0, \dots, k_{max}$ , identifikovan je kao  $x$  osa teksture slike, tako da je  $x_{max} = k_{max}$ . Takođe  $\omega$ , za  $\omega = 0, \dots, \omega_{max}$  identifikovana je kao  $y$  osa, tako da je  $y_{max} = \omega_{max}$ . Sada je:

$$F(x, y) = |S(k, \omega)|^2 \quad (2)$$

$$x = 0, \dots, x_{max}, y = 0, \dots, y_{max}$$

$$k = 0, \dots, k_{max}, \omega = 0, \dots, \omega_{max}$$

Sve dalje analize se rade nad teksturom slike  $F(x, y)$  dobijene na prethodno objašnjen način, gde se radi jednostavnosti, bez gubitka generalizacije, posmatraju kontinualne promenljive  $x \in [0, x_{max}]$  i  $y \in [0, y_{max}]$ . Tada je

$$G(\sigma_x, \sigma_y, \theta, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{(A(\theta)^T [x \ y]) \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 \\ 0 & \sigma_y \end{bmatrix} (A(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix})} \quad (3)$$

$$v_{x,q}^1 = \left[ v_{x,q}^{1,(1)} \mid v_{x,q}^{1,(2)} \mid 1 \in L \right]. \quad (4)$$

gde je

$$v_{x,q}^{1,(1)} = \max_{\theta} G(\sigma_x, \sigma_y, \theta, x, y) * P_{x,q}$$

$$v_{x,q}^{1,(2)} = \max_{\theta} \Delta G(\sigma_x, \sigma_y, \theta, x, y) * P_{x,q}$$

Na osnovu prethodnog dobija se set predprocesiranih obeležja sub-vektora  $V_k = [v_{k,1} \dots v_{k,R}]$ . Iz svakog izdvojenog obeležja  $u$ , izdvaja se  $q_u$ , i formira se predprocesirani vektor  $V_k^u, k = 1, \dots, q_u$ . Vektor  $V$ , je tada slučajna promenljiva, tako da  $V_k^u$  su njegove realizacije, za svaki vremenski okvir  $k$ . Zapravo, primećuje se (ako se uzme u obzir kontinualno vreme  $t$  umesto diskretnog vremenskog okvira  $k$ ), da postoji jedinstvena korespondencija između raspodele verovatnoća  $p_{V^u}$  i  $k_{V^u}$ , a njegova karakteristična funkcija je

$$\{v_{x,q} | x = 0, \dots, x_{\max}^u\} \quad (5)$$

$$k_{V_q^u}(t) = E[e^{iV_q^u t}] = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(it)^j}{j!} E[(V_q^u)^j] \quad (6)$$

gde je  $v_{x,q}^1$  dato u jednačini 4. Zaključuje se da je  $v_{x,q}$  na osnovu zapažanja ove slučajne promenljive  $V_q^u$  primanom "probability distribution function" (pdf)  $p_{V_q^u}$ .

Dobija se  $i = \{1, \dots, d\}$ ,  $d = 6$ , nezavisni vektor obeležja koji se određuje na osnovu

$$v_i^u = [m_1^{u,1,(i)} \dots m_1^{u,P,(i)} | \dots | m_M^{u,1,(i)} \dots m_M^{u,P,(i)}], \quad (7)$$

gde je  $m_q^{u,j,(i)}$  označava  $i$ -tu komponentu momenta  $m_q^{u,j}$  koji je  $d = 6$ , dimenzionalni vektor dobijen iz 7 na osnovu koga se formira pojedinačni vektor.

### 3. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Klasifikacija stanje pohabanosti alata vrši se posredno praćenjem signala vibracija tokom procesa rezanja. Pri eksperimentalnom ispitivanju generisano je 15 ulaznih signala vibracija, razvrstanih u 3 grupe (5 signala za svako stanje pohabanosti), na osnovu nivoa pohabanosti (nova pločica, odnosno nema habanja, malo pohabana, odnosno do 0,25 mm, i veoma pohabana, odnosno iznad 0,5 mm). Svako stanje predstavlja jednu klasu u zadatku prepoznavanja stanja. Imajući u vidu da su promene stanja habanja alata kontinualne, granice između klasa nije mogla biti idealno definisana i jednoznačna. Analiza rezultata prikazana je korišćenjem 5-grupa korišćenjem kros validacije: ukupan broj od 12 signala vibracija koji se koriste za obuku klasifikatora, i još 3 signala vibracija koji se koriste u test faze, a svaka od 3 kategorije je podjednako zastupljeni u oba seta podataka. Svih 5 grupa rezultata su u proseku zadovoljili konačnu prosečnu tačnost klasifikacije. Postavka eksperimenta i merenja prikazana je na slici 1.



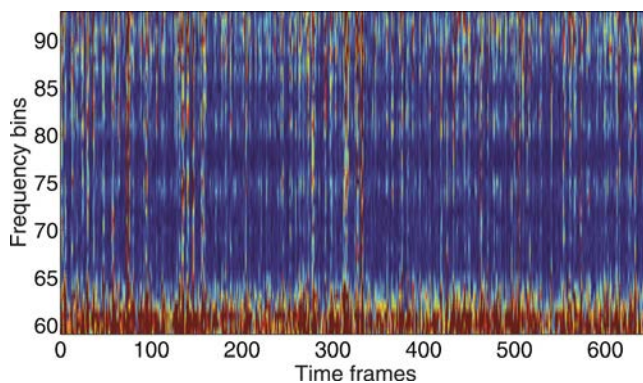
Slika 1. Postavka eksperimenta

### 4. ANALIZA REZULTATA

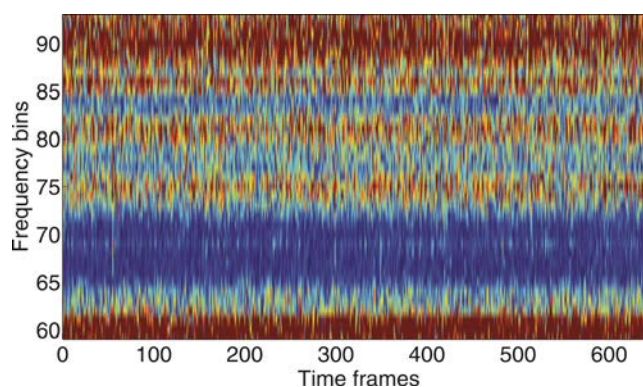
Transformacija signala za oba seta podatak počinje računanjem spektra vibracija signala, koristeći *Short-Time Fourier Transform* (STFT), uz primenu  $M = 256$  tačaka frekvencija u Hamming prozoru jednake dužine  $M$ , sa  $M/4$  preklapanjem između segmenata. Signali su bili dugi 0.2 sekundi u vremenu, sa frekvencijom uzorkovanja od 625 kHz. Rezultat je matrica koja sadrži 129 frekvencija ( $M/2 + 1$  za stvarne signala i jednakog broja tačaka frekvencije, iako je korišćen ograničen frekventni opseg za naredne transformacija) i 650 frekvencijskih binova (broj segmenata). Svaki segment predstavlja procenu nekog kratkog vremena, vremenski lokalizovanog sadržaja frekvencije ulaznog signala vibracija. Svaki spektrogram je centralizovan kako bi se isključile DC komponente. Konvolucijom se vrši između spektra i odgovarajućeg filtera iz MR8 filtera banka je opisala u prethodnom poglavlju. Tako, robusna obeležja, odnosno dobijeni deskriptori tretiraju samo jedan opseg,  $M = 1$ , gde su isključene sve relativne frekvencije niže od  $\omega_{low} = 0.4729$  i veća od  $\omega_{high} = 0.7382$  kako je predstavljeno na slici 2. Prikazane frekvencije nisu bile dovoljno diskriminativne za zadatak prepoznavanja. Kao obeležja su uvedeni  $P = 3$  centralni



momenti: varijansa skewness i kurtosis, dok je prvi momenat isključena iz razmatranja, jer su posmatrani samo centralizovani spektrogrami, odnosno odgovarajuće centralizovane teksture slike (prikazano na slici 2a i 2b).

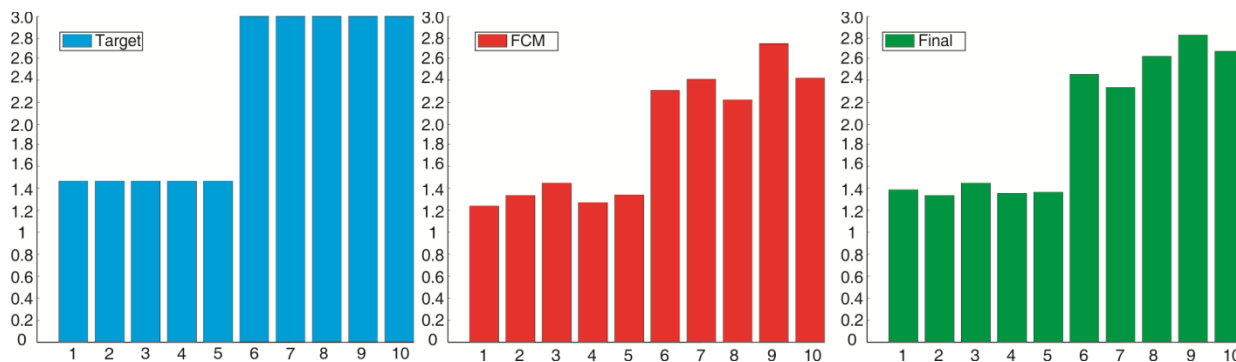


Slika 2a. Short-Time Fourier Transformacija signala pri obradi novim alatom



Slika 2b. Short-Time Fourier Transformacija signala pri obradi pohabanim alatom

Provera razvijenog metoda izvršena je i promenom materijalu obratka koji je u ovom slučaju bio na bazi legura titanijuma (Ti6Al4V) koji se koristi za izradu endoproteza u medicinskoj protetici. Ova vrsta materijala je mnogo zahtevnija za obradu od standardnih materijala koji se koriste u industriji. Slika 3 prikazuje izlazne vrednosti za 3 skale klasifikacije. Uvedene su 2 klase klasifikacije jer je nakon veoma kratkog vremena rezni alat menjao svoje karakteristike iz zadovoljavajućeg stanja prelazi u pohaban alat. Klasifikacija ovih rezultata rađena je na manjem broju uzoraka zbog ograničenja u raspoloživom broju uzoraka koji su bili dostupni tokom eksperimenta. Na slici 3 su prikazani rezultati klasifikacije gde su i za klasifikaciju i verifikaciju korišteni signali vibracija nastali obradom legura titanijuma.



Slika 3. Rezultati klasifikacije 3 momenta za 2 grupe stanja pohabanosti alata

## 5. ZAKLJUČAK

Rezultati eksperimenta pokazuju da ovaj pristup daje dobre rezultate u većini slučajeva prevazilazi standardne metoda u izdvajanju obeležja za prepoznavanje stanja pohabanosti alata. Osim toga, predložena



metoda se takođe može koristiti u proceni stanja alata kod drugih tipova obrade, kao što su bušenje i glodanje. Kao nedostatak ove metode može se smatrati zahtev za visokim performansama računarskog sistema u fazi obuke. U budućnosti, neka poboljšanja treba preduzeti na povećanju performansi izdvajanja obeležja i fleksibilnosti modela. Takođe, proširenje postupaka i na obeležja iz područja vremenskog domena doprineće boljem sagledavanju dinamike degradacije rezne geometrije alata, tj. procesa habanja alata i povećanja tačnosti klasifikacije.

## 6. LITERATURA

- [1] Lazebnik, S., Schmid, C., Ponce, J.: *A Sparse Texture Representation Using Local Affine Regions*, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 27, 8, pp. 1265-1278, 2005.
- [2] Varma, M., Zisserman, A., Statistical, A.: *Approach to Material Classification Using Image Patch Exemplars*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 31, 11, pp 2032 - 2047, 2009.
- [3] Leung, T., Malik, J.: *Representing and Recognizing the Visual Appearance of Materials Using Three-Dimensional Textons*, Int'l J. Computer Vision 43, 1, pp. 29-44, 2001.
- [4] Antić, A., Petrović, P. B., Zeljković, M., Kosec, B. Hodolič, J.: *The Influence of Tool Wear on the Chip-Forming Mechanism and Tool Vibrations*, Materiali in Tehnologije 46, 3, pp. 279-285, 2012.
- [5] Antić, A., Šimunović, G., Šarić, T., Milošević, M., Ficko, M.: *A Model of Tool Wear Monitoring System for Turning*, Tehnicki Vjesnik 20, 2, pp. 247-254, 2013.
- [6] Antić, A., Šarić, T., Milošević, M.: *A Module for Feature extraction within the Neuro-Fuzzy System for Tool Wear Recognition*, Proceedings / 12th International Scientific Conference MMA 2015 "Flexible Technologies", Novi Sad, 25-26 September 2015, pp. 63-66

**Antić, A., Zeljković, M., Milošević, M.,**

### **THE DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR FEATURE EXTRACTION IN THE TOOL WEAR SYSTEM IN PROCESSING HARD MATERIALS**

**Abstract:** *The paper presents the experimental research related to feature extraction for the fuzzy system for recognizing the tool wear condition in processing hard materials based on titanium alloys. Feature extraction in the system is performed on the basis of the developed new method, called 2D, in the task of recognizing the tool wear condition. The characteristic of the developed method is the usage of spectrogram of the short-term discrete Fourier transformation (STDFT) on a windowed signal in diverse ranges of 2D texture of the "image" obtained by applying the developed technology. The research conducted within the paper has the objective of defining more robust input information in the system for tool wear condition classification.*

**Key words:** *signal processing, feature extraction, tool wear, vibration spectrum*



Baralić, J.<sup>1</sup>, Nedić, B.<sup>2</sup>

## GEOMETRIJA REZA PRI OBRADI ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

### *Rezime*

*Geometrija reza je veoma bitna karakteristika pri obradi abrazivnim vodenim mlazom. Nepravilnosti koje se javljaju na geometriji reza – razlika u širini reza na ulazu i izlazu abrazivnog vodenog mlaza iz predmeta obrade, ograničavaju primenu abrazivnog vodenog mlaza. Poznavanje zavisnosti promene širine reza je takođe važno da bi se pravilno definisale putanje kretanja rezne glave, u cilju dobijanja tačnih dimenzija. U radu je analiziran uticaj različite vrste materijala na geometriju reza. Sečeni su čelici X5CrNi 18–10, C 45 i S235JRG. Na dobijenim uzorcima su izmerene širine i nagib reza. Izvršeno je poređenje dobijenih vrednosti za različite materijale.*

**Ključne reči:** *širina reza, nagib reza, abrazivni vodeni mlaz*

### 1. UVOD

Razvoj avio, kosmičke, vojne, nuklearne i procesne industrije je, takođe, uslovio razvoj nekonvencionalnih postupaka obrade pri kojima se koristi koncentrisana energija nastala hemijskim, fizičkim, svetlosnim, termičkim ili erozionim procesima. Trenutno od svih nekonvencionalnih postupaka obrade najširu primenu imaju obrade elektroerozijom, plazmom, laserom i abrazivnim vodenim mlazom.

Obrada abrazivnim vodenim mlazom je nekonvencionalni postupak obrade novijeg datuma, koji je za sada malo istražen, ali ima sve veću primenu u industriji. To je veoma efikasna metoda za konturno sečenje različitih vrsta materijala. Obrada abrazivnim vodenim mlazom je superiorna u odnosu na slične postupke obrade kada je u pitanju izrada delova koji imaju složenu dvodimenzionalnu formu većih debljina.

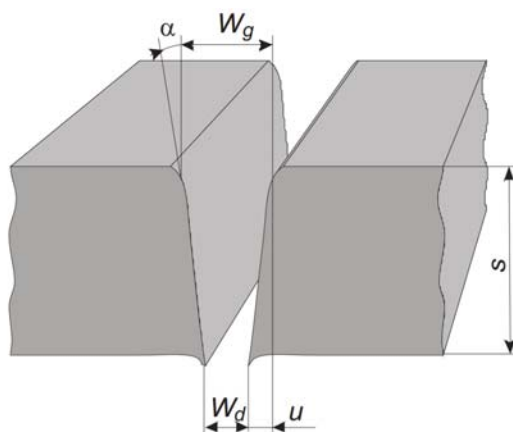
Ograničavajući faktor za širu upotrebu abrazivnog vodenog mlaza je pojava nagiba stranica reza, odnosno razlika u širini reza na ulazu i izlazu abrazivnog vodenog mlaza iz predmeta obrade. Poznavanje promene širine i nagiba reza u zavisnosti od parametara procesa obrade i materijala koji se obrađuje može doprineti široj primeni abrazivnog vodenog mlaza. U radu je ispitivan uticaj vrste materijala koji se obrađuje na geometriju reza pri različitim parametrima obrade.

### 2. GEOMETRIJA REZA

Geometrija reza kod obrade abrazivnim vodenim mlazom je definisana širinom reza na ulazu abrazivnog vodenog mlaza u materijal koji se obrađuje – merno mesto 1 –  $W_g$  i širinom reza na izlazu abrazivnog vodenog mlaza iz materijala koji se obrađuje – merno mesto 2 –  $W_d$ , odstupanjem od upravnosti – nagibom reza  $u$  i uglom nagiba reza  $\alpha$ . Na slici 1. je prikazan izgled površina reza sa svim geometrijskim parametrima koji je opisuju.

<sup>1</sup> Doc. dr Jelena Baralić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku ([jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs](mailto:jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs))

<sup>2</sup> Prof. dr Bogdan Nedić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka ([nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs))



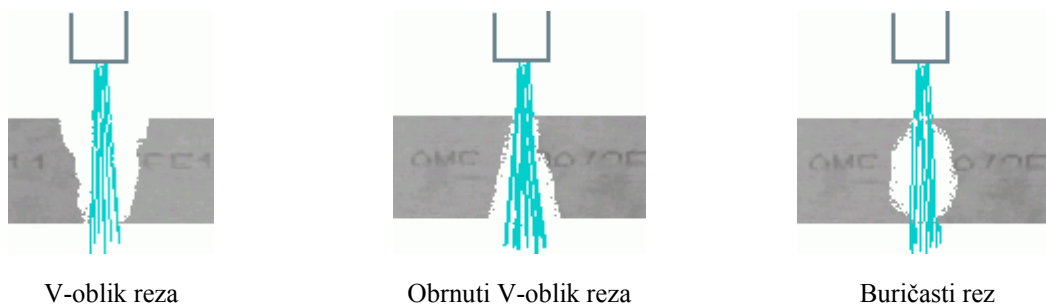
**Slika 1.** Geometrija reza kod obrade abrazivnim vodenim mlazom

Nagib reza je definisan na osnovu izmerenih vrednosti širina  $W_g$  i  $W_d$ , a na osnovu izraza (1):

$$u = \frac{W_g - W_d}{2s} \quad (1)$$

Ugao nagiba reza,  $\alpha$ , je definisan formulom (2):

$$\alpha = \arctg \frac{u}{s} \quad (2)$$

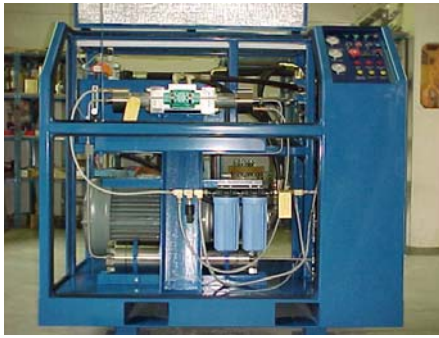


**Slika 2.** Različiti oblici reza[2]

Na slici 2. su prikazani različiti oblici reza pri obradi abrazivnim vodenim mlazom. Kod V oblika reza širina na gornjoj strani reza je veća od širine na donjoj strani reza. Ovaj oblik reza se javlja jer je energija abrazivnog vodenog mlaza veća na ulazu u obrađivani materijal, nego na izlazu iz njega. Ovo je najčešći oblik reza koji se sreće u praksi. Sa porastom brzine kretanja rezne glave, ovakav oblik je još izraženiji. Obrnuti V oblik reza se javlja pri obradi abrazivnim vodenim mlazom sa veoma malim brzinama kretanja rezne glave. Javlja se i pri obradi veoma mekih materijala. Kod buričastog oblika reza, širina reza na sredini je veća od širine na gornjoj i donjoj strani reza. Do pojave ovakvog reza može doći pri obradi materijala velike debljine.

### 3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna istraživanja su vršena u realnim, industrijskim uslovima na mašini PTV-3.8/60 proizvođača PTV spol. sr.o, Czech Republic, koja se nalazi u firmi „SLOVAS“ iz Čačka. Mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom PTV-3.8/60 se sastoji iz dva dela koji se nalaze u posebnim prostorijama. Prvi deo je hidraulični deo mašine i on je osnovni deo mašine za obradu abrazivnim vodenim mlazom, slika 3.a) U ovom delu su smeštene komponente koje su od vitalnog značaja za funkcionisanje mašine za obradu abrazivnim vodenim mlazom, a to su jedinica za pripremu vode, uljna pumpa, pojačavač pritiska i akumulator pritiska. Drugi deo mašine je izvršni deo, slika 3.b). Njega čine rezna glava, radno sto i jedinica za upravljanje.



a)



b)

**Slika 3.** Mašina za obradu abrazivnim vodenim mlazom PTV-3.8/60

Kao materijali za istraživanja su korišćeni X5CrNi18-10, C45 i S235JRG2. U tabeli 1. su date karakteristike materijala korišćenih za eksperimentalna istraživanja.

<b>Tabela 1. Materijali korišćeni za eksperimentalna istraživanja</b>				
Materijal	Stara oznaka materijala	Tvrdoća $HB$	Granica tečenja $R_p$ , N/mm <sup>2</sup>	Zatezna čvrstoća $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>
S235JRG2	Č 0361	102 ÷ 125	230	370 ÷ 450
C45	Č 1530	207	340	580 ÷ 770
X5CrNi18-10	Č 4580	130 ÷ 180	185	500 ÷ 700

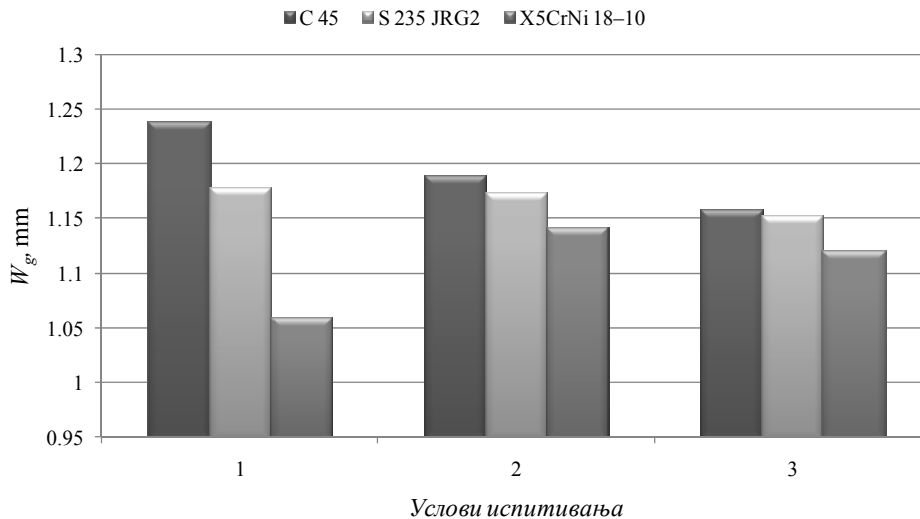
#### 4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Uzorci na kojima su vršena istraživanja su bili prizmatičnog oblika, dimenzija 20x300x20mm. Materijali su obrađivani sa tri različita režima rezanja ( $p$  - radni pritisak,  $m_a$  - protok abraziva,  $v_c$  - brzina kretanja rezne glave). Na dobijenim rezovima su izmerene širine reza na definisanim mernim mestima 1 i 2, dok su nagib i ugao nagiba reza dobijeni računski.

U tabeli 2. su date vrednosti karakteristika reza za korišćene materijale.

<b>Tabela 2. Vrednosti karakteristike reza</b>							
<b>X5CrNi18-10 # 20</b>							
$p$ , MPa	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.764	1.060	0.912	0.148	0.424
320	300	50	0.718	1.142	0.93	0.212	0.607
270	200	30	0.758	1.121	0.9395	0.1815	0.52
<b>C45 # 20</b>							
$p$ , MPa	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.819	1.239	1.029	0.21	0.602
320	300	50	0.788	1.190	0.989	0.201	0.576
270	200	30	0.858	1.159	1.0085	0.1505	0.431
<b>S235JRG2 # 20</b>							
$p$ , MPa	$m_a$ , g/min	$v_c$ , mm/min	$W_d$ , mm	$W_g$ , mm	$W_{sr}$ , mm	$u$ , mm	$\alpha$ , °
413	400	70	0.780	1.178	0.979	0.199	0.57
320	300	50	0.768	1.173	0.9705	0.2025	0.58
270	200	30	0.798	1.153	0.9755	0.1775	0.508

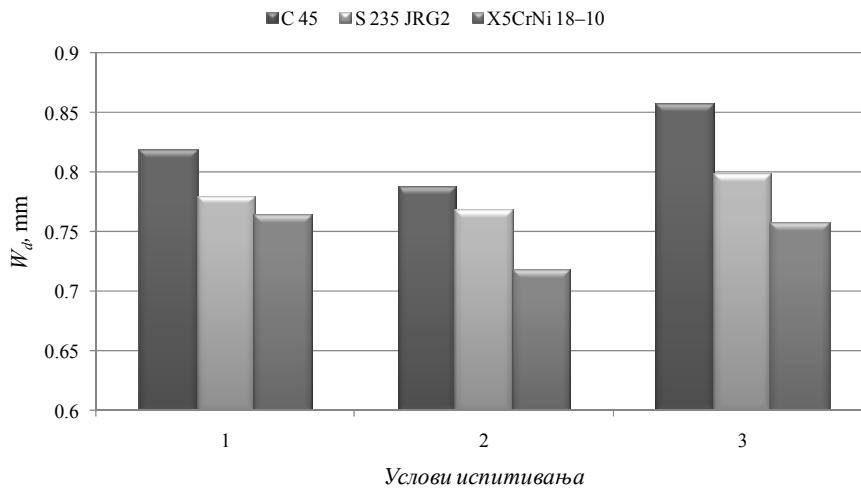
Na slici 4. je prikazana promena širine reza  $W_g$ , u zavisnosti od materijala koji se obrađuje. Sa dijagrama se vidi da je za čelik X5CrNi18-10 najmanja širina reza, dok je kod čelika C45 širina reza na ovom mernom mestu najveća. Vrednosti širine reza za čelik S235JRG2 su između vrednosti za C45 i X5CrNi18-10. Ovakav odnos širina reza je nepromenjen za sve režime rezanja.



Uslovi ispitivanja 1:  $p = 413$  MPa;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min  
 Uslovi ispitivanja 2:  $p = 320$  MPa;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min  
 Uslovi ispitivanja 3:  $p = 270$  MPa;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

**Slika 4.** Širina reza  $W_g$  za različite vrste čelika

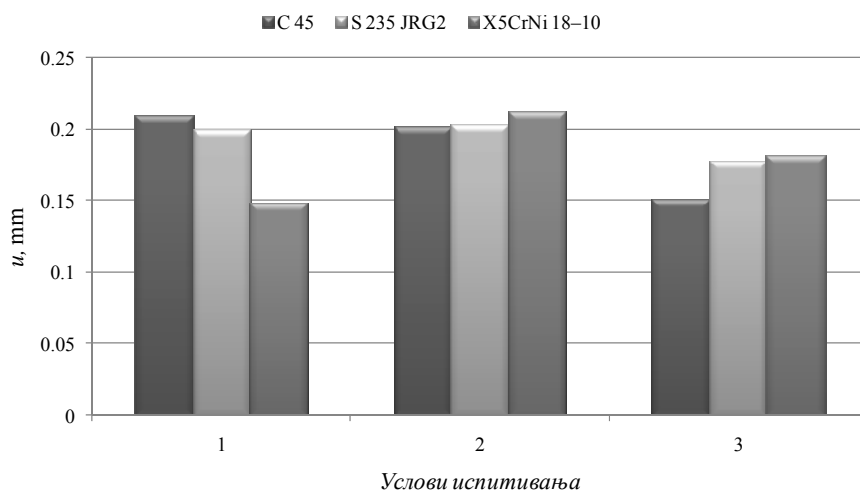
Na slici 5. Prikazana je promena širine reza  $W_d$  u zavisnosti od čelika koji se obrađuje. Sa dijagrama se vidi da važi ista pravilnost kao i za širinu reza  $W_g$ , naime, najveća širina reza je za čelik C 45, dok je najmanja širina reza za materijal X5CrNi 18-10.



Uslovi ispitivanja 1:  $p = 413$  MPa;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min  
 Uslovi ispitivanja 2:  $p = 320$  MPa;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min  
 Uslovi ispitivanja 3:  $p = 270$  MPa;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

**Slika 5.** Širina reza  $W_d$  za različite vrste čelika

Promena nagiba reza i ugla nagiba reza za različite vrste čelika su prikazani na slikama 6. i 7. Na dijagramima se uočava da je pri obradi sa najvećim vrednostima parametara procesa obrade, najmanji nagib i ugao nagiba reza za čelik X5CrNi 18-10, dok je za čelik C45 nagib reza i ugao nagiba reza najveći. Pri obradi sa srednjim vrednostima parametara, nagib reza i ugao nagiba reza su približno isti za sve materijale. Pri obradi sa najnižim vrednostima parametara uslova ispitivanja nagib reza i ugao nagiba reza za čelik X5CrNi 18-10 su najveći, dok su za čelik C45 najmanji.

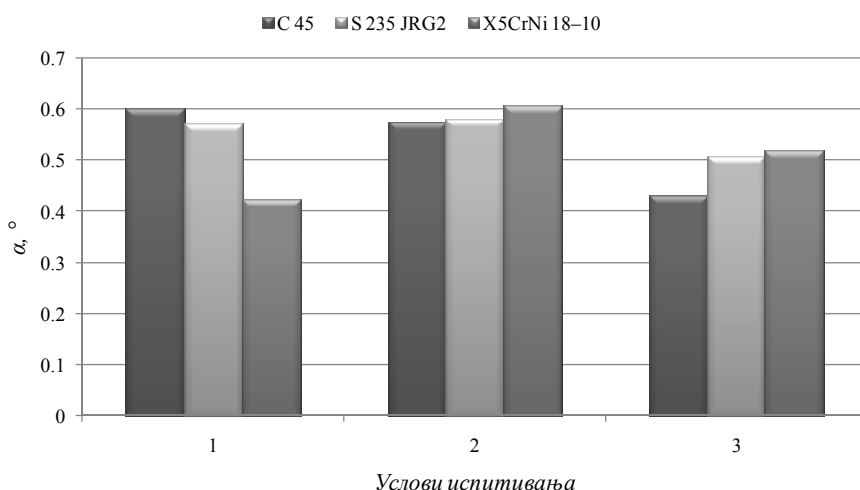


Uslovi ispitivanja 1:  $p = 413$  MPa;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Uslovi ispitivanja 2:  $p = 320$  MPa;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Uslovi ispitivanja 3:  $p = 270$  MPa;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

**Slika 6.** Nagib reza za različite vrste čelika



Uslovi ispitivanja 1:  $p = 413$  MPa;  $m_a = 400$  g/min;  $v_c = 70$  mm/min

Uslovi ispitivanja 2:  $p = 320$  MPa;  $m_a = 300$  g/min;  $v_c = 50$  mm/min

Uslovi ispitivanja 3:  $p = 270$  MPa;  $m_a = 200$  g/min;  $v_c = 30$  mm/min

**Slika 7.** Ugao nagiba reza za različite vrste čelika

## 5. ZAKLJUČAK

Vrsta materijala koji je obrađivan ima uticaja na geometriju reza. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da su širine reza na ulazu i izlazu iz materijala koji se obrađuje najveći za materijal C45. Ovaj materijal ima najveće vrednosti granice tečenja. Najmanja širina reza se javlja kod X5CrNi18-10, koji ima najmanje vrednosti granice tečenja. Ovo važi za sve uslove ispitivanja. Na promenu nagiba i ugla nagiba reza najviše utiču uslovi ispitivanja, odnosno režimi rezanja.

Obzirom da je broj uzoraka koji su ispitivani mali, ne može se sa sigurnošću tvrditi koja karakteristika materijala ima najveći uticaj na širinu reza. Takođe, može se zaključiti da na različite materijale pojedini parametri procesa obrade imaju različit uticaj.

## 6. LITERATURA

- [1] Guo N.S., Louis G., Meier G., *Surface structure and kerf geometry in abrasive waterjet cutting: Formation and optimization*, 7th American Waterjet Conf., p.p. 1-25, Seattle, Washington, USA, 1993
- [2] <http://www.omax.com/>, 08.04.2016.
- [3] Momber A.W., Kovacevic R., *Principles of Abrasive Waterjet Machining*, Springer, London, 1998.
- [4] Zeng J., Henning A., *Kerf characterization in abrasive waterjet cutting*, American WJTA Conference and Expo August 18-20, Houston, Texas, 2009
- [5] Баралић Ј., *Енергија и квалитет обраде абразивним воденим млазом*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014.
- [6] Baralić, J., Nedić, B., Radovanović, M., Janković, P., *Obradivost materijala rezanjem abrazivnim vodеним млазом*, monografija, Факултет инжењерских наука, Крагујевца, 2015.

**Baralić, J., Nedić, B.**

### **KERF GEOMETRY IN ABRASIVE WATER JET MACHINING**

***Abstract:** The geometry of the cut is a very important feature in abrasive water jet machining. Irregularities on the kerf geometry - the difference in the width of the cut at the entrance and exit of the abrasive water jet from the workpiece, limit the application of abrasive water jet. Understanding the ways, in which kerf width changes depending on various parameters, is important for properly defining the path of the cutting head, in order to obtain accurate dimensions. This paper analyzes the influence of different types of materials on the kerf geometry. Steels X5CrNi 18-10, C 45 and S 235 JRG were cut. On the obtained sections width and taper of the kerf were measured. The obtained values for different materials were compared.*

***Key words:** cut width, cut taper, abrasive water jet*





Dimić, Z., Milutinović, D., Živanović, S., Mitrović, S.<sup>1)</sup>

## METOD KONFIGURISANJA UPRAVLJAČKOG SISTEMA OTVORENE ARHITEKTURE REKONFIGURABILNOG ROBOTA ZA OBRADU<sup>2)</sup>

### Rezime

*U radu je prikazan jedan metod konfigurisanja/rekonfigurisanja upravljačkog sistema otvorene arhitekture rekonfigurabilnih robota za obradu. Na primeru EMC2 upravljačkog softvera otvorene arhitekture su posredstvom dijagrama za modelovanje dinamičkih procesa definisane aktivnosti sistem-integratora/korisnika u procesu konfigurisanja/rekonfigurisanja upravljačkog sistema, i uspostavljene su relacije između softverskih i hardverskih komponenta upravljanja.*

**Ključne reči:** upravljački sistem, rekonfigurabilnost, otvorena arhitektura, robot za obradu

### 1. UVOD

Ideja da se postojeći CAD/CAM sistemi koriste za programiranje robota u G-kôdu za višeosnu obradu rezanjem, navodi na razvoj upravljačkog sistema koji treba korisniku da omogući emulaciju različitih 5-osnih mašina alatki robotima vertikalne zglobne konfiguracije. S obzirom na činjenicu da upravljački sistem svojom rekonfigurabilnošću treba da pokrije više konfiguracija robotskih ćelija za obradu, ali i da omogući integritetima sistema da sami kreiraju nove konfiguracije, odgovarajući softverski upravljački moduli, kao što su kinematički, moduli interfejsa i sl., moraju biti dostupni za modifikaciju i/ili proširenje. Uz činjenicu da mogućnost konfigurisanja i rekonfigurisanja upravljanja zavisi od otvorenosti, modularnosti i skalabilnosti upravljačke arhitekture [1], u ovom radu je data metoda konfigurisanja/rekonfigurisanja softverski orijentisanog upravljačkog sistema robota, realizovanog na bazi sistema otvorene arhitekture.

### 2. KONCEPT RAZVOJA REKONFIGURABILNOG UPRAVLJAČKOG SISTEMA

Realizacija upravljačkog sistema robotskih ćelija za obradu se u predmetnom radu zasniva na primeni gotovih hardverskih i softverskih rešenja otvorene arhitekture. Otvorenost arhitekture je sve prisutnija u oblasti upravljanja robotima i mašinama alatkama. Na sličan način na koji je uticala na revolucionaran rast industrije personalnih računara (PC), otvorenost utiče na razvoj i širenje primene industrijskih robota. Prema IEEE 1003.0 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [2] modelu, otvoreni sistem je definisan kao sistem koji omogućava da se aplikacije implementirane na odgovarajući način mogu izvršavati na platformama različitih proizvođača, komunicirati sa drugim sistemskim aplikacijama i omogućiti konzistentni način interakcije sa korisnikom.

Prema usvojenom konceptu u ovom radu, razvoj rekonfigurabilnog upravljačkog sistema se zasniva na:

- Jednom od postojećih upravljačkih softverskih sistema otvorene arhitekture, EMC2 (Enhanced Machine Controller verzija 2), KCAM, TurboCNC, Mach3, DeskCNC, CNCZeus, DesKAM, CNCPro ili sl., koji se integriše u upravljački sistem bez izmena izvornog kôda;
- Mogućnosti implementacije sopstvenih kinematičkih modula, koja proističe iz otvorenosti arhitekture upravljačkog softvera;

<sup>1)</sup> Zoran Dimić, dipl. inž. el., Lola institut d.o.o., Beograd, ([zoran.dimic@li.rs](mailto:zoran.dimic@li.rs)), prof. dr Dragan Milutinović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([dmilutinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)), Stefan Mitrović, mast. inž. maš., Lola institut d.o.o., Beograd, ([stefan.mitrovic@li.rs](mailto:stefan.mitrovic@li.rs))

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektima: TR\_35023: Razvoj uređaja za trening pilota i dinamičku simulaciju leta modernih borbenih aviona i to 3-osne centrifuge i 4-osnog uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota i TR35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

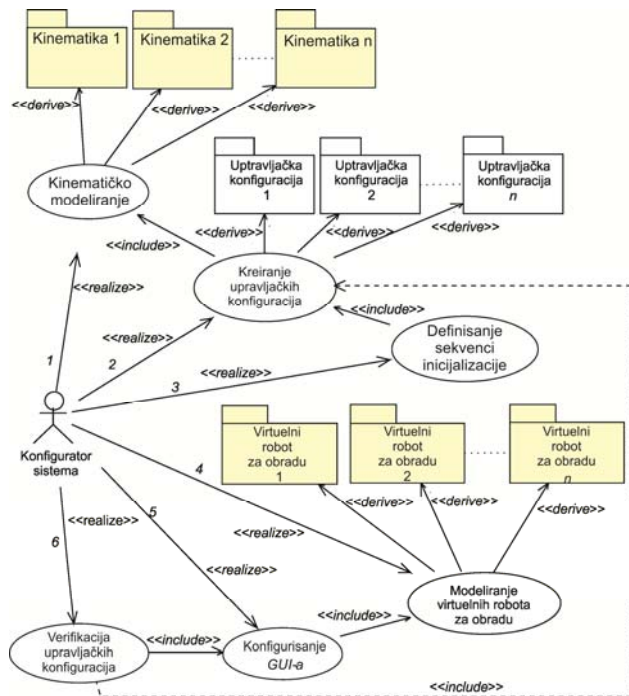
- Mogućnosti konfigurisanja virtuelnih emuliranih mašina alatki, odnosno robota posredstvom odgovarajućih grafičkih biblioteka;
- Postojanju konfiguracionog interfejsa koji omogućava rekonfigurisanje sistema;
- Operativnom sistemu otvorene arhitekture za rad u realnom vremenu;
- Računarskoj hardverskoj platformi otvorene arhitekture.

Osnovna prednost primene gotovih softverskih i hardverskih rešenja u realizaciji upravljačkog sistema robota za obradu se ogleda u mogućnosti precizne predikcije performansi i vremena realizacije upravljanja u ranim fazama razvoja.

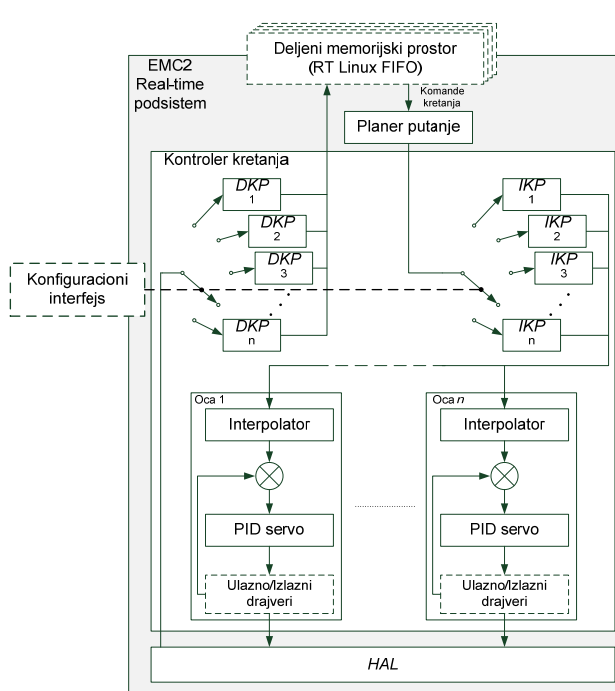
### 3. PRIKAZ MORFOLOŠKOG METODA ZA KONFIGURISANJE I REKONFIGURISANJE UPRAVLJAČKOG SISTEMA NA BAZI EMC2

Deo aktivnosti Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju SAD-a, poznatijeg kao NIST (*National Institute of Standards and Technology*), usmeren je na razvoj mernih metoda i standarda za inteligentne upravljačke sisteme u proizvodnji. Kao rezultat dugogodišnjeg istraživanja u ovoj oblasti, NIST je promovisao RCS (*Real-Time Control System*) softversku biblioteku [3], koja danas predstavlja standardnu, referentnu osnovu za razvoj inteligentnih upravljačkih sistema. RCS biblioteka je evoluirala tokom godina i rezultirala razvojem brojnih upravljačkih aplikacija, uključujući i EMC2 [4], real-time upravljački softver otvorene arhitekture, koji se može iskoristiti za upravljanje najrazličitijih mašina alatki i robota. Obiman rad i iskustvo koji su godinama ulagani u RCS i EMC, u svetskim razmerama predstavljaju dobru tehnološku osnovu za implementaciju sopstvenog sistema upravljanja i programiranja mašina alatki i robota.

Da bi upravljački sistem na bazi EMC2 mogao biti konfigurisan za upravljanje različitim konfiguracijama obradnih ćelija na bazi robota vertikalne zglobne konfiguracije, mora se formirati konačan broj kinematičkih modela, odnosno softverskih modula. Rekonfigurabilni upravljački sistem mora uključiti sve softverske komponente i kinematičke konfiguracije potrebne za upravljanje odabranim konfiguracijama obradne ćelije na bazi robota. Procedura inicijalnog konfigurisanja rekonfigurabilnog sistema upravljanja na bazi EMC2 softvera se obavlja prema uspostavljenoj metodologiji prikazanoj primenom UML (*Unified Modeling Language* [5]) dijagrama na slici 1.



Slika 1. UML dijagram inicijalnog konfigurisanja upravljačkog sistema na bazi EMC2



Slika 2. Simbolički prikaz načina rekonfigurisanja

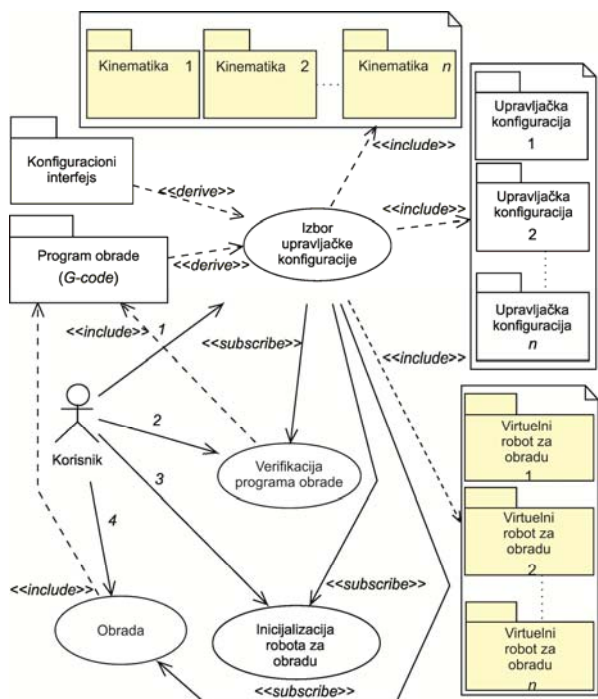
Prema postavljenom metodu za inicijalno konfigurisanje upravljačkog sistema rekonfigurabilnih ćelija na bazi robota, integrator sistema postavlja skup izabranih konfiguracija za koje treba da izvrši sledeće aktivnosti:

- Rešavanje direktne i inverzne kinematike za odabrane konfiguracije robota za obradu;

- Kreiranje odgovarajućeg broja kinematičkih softverskih modula za odabrane konfiguracije robota za obradu na osnovu prethodno dobijenih rešenja inverznog i direktnog kinematičkog problema;
- Implementaciju konfiguracionih datoteka sa relevantnim parametrima za svaku kinematičku konfiguraciju;
- Definisane inicijalizacione sekvence za svaku konfiguraciju obradne ćelije na bazi robota;
- Konfigurisanje virtuelnih robotskih ćelija za odabrane konfiguracije obradne ćelije na bazi robota;
- Konfigurisanje grafičkog korisničkog interfejsa (GUI) u skladu sa specifičnostima obrade robotom i zahtevima korisnika (definisane grafičkih elemenata za praćenje pozicija osa robota, pokretanje i praćenje procesa inicijalizacije, kontrolu brzine pomoćnog kretanja itd.);
- Testiranje odabranih konfiguracija obradne ćelije na bazi robota posebno izrađenim test programima obrade, najpre u prethodno konfigurisanim virtuelnim okruženjima, a posle verifikacijom i na realnim konfiguracijama.

Rekonfigurabilnost upravljačkog sistema na bazi EMC2 se zasniva na uspostavljanju odgovarajućih veza između definisanih softverskih modula posredstvom aplikativnih interfejsa koje obezbeđuje HAL (*Hardware Abstraction Layer* [6]). Prema instrukcijama sadržanim u konfiguracionim datotekama, vrši se povezivanje odgovarajućih kinematičkih modula sa modulima za planiranje i upravljanje kretanja, slika 2.

Procedura za rekonfigurisanje sistema upravljanja razvijenog na bazi EMC2 softvera obavlja se prema uspostavljenoj metodologiji prikazanoj primenom UML dijagrama na slici 3.



**Slika 3.** UML dijagram rekonfigurisanja upravljačkog sistema na bazi EMC2

Pod pretpostavkom da su kinematičke konfiguracije definisane i da je sistem inicijalno konfigurisan, rekonfigurisanje upravljačkog sistema podrazumeva obavljanje sledećih aktivnosti prema uspostavljenoj metodologiji:

- Izbor odgovarajućeg kinematičkog modula, konfiguracione datoteke i konfiguracije virtuelne obradne ćelije na bazi robota, posredstvom konfiguracionog interfejsa upravljačkog sistema, za potrebe verifikacije konfigurisanog sistema i programa obrade;
- Verifikaciju programa obrade na odgovarajućoj konfiguraciji virtuelne obradne ćelije uz simulaciju putanje alata i praćenje kretanja segmenata robota radi uočavanja eventualnih kolizija;
- Inicijalizacija obradne ćelije na bazi robota u skladu sa odabranom kinematičkom konfiguracijom;
- Obrada radnog predmeta prema prethodno verifikovanom programu obrade, G-kôdu.

#### 4. REALIZACIJA PROTOTIPA UPRAVLJAČKOG SISTEMA NA BAZI EMC2 SOFTVERA

Za potrebe inicijalnog konfigurisanja upravljačkog sistema na bazi EMC2 softvera na raspolaganju je bio robot vertikalne zglobne konfiguracije Lola 50 sa 6 stepeni slobode, slika 4. Upravljački sistem robota Lola 50 je bio zasnovan na robot kontroleru predviđenom za programiranje obučavanjem i upravljanje PTP (eng. *Point-To-Point*) kretanjima. Primenom uspostavljene metodologije inicijalnog konfigurisanja upravljačkog sistema na bazi gotovih hardverskih i softverskih sistema otvorene arhitekture, realizovan je upravljački sistem korišćenjem EMC2 softvera, Linux operativnog sistema sa real-time jezgrom, PC hardvera i interfejs kartica za ulazno/izlazne operacije. Robot kontroler je zamenjen novom upravljačkom jedinicom koja je povezana sa postojećim električnim sistemima i analognim pogonima servo motora, slika 4. PCI (*Peripheral Component Interconnect*) interfejs ka matičnoj ploči PC računara je bio jedan od glavnih kriterijuma za izbor MOTENC Lite interfejsa za ulazno/izlazne operacije, odnosno za spregu sa senzorima i pogonima motora. Dve ovakve kartice, koje su pridodate osnovnoj računarskoj platformi, imaju ukupno osam analognih izlaza za vezu sa frekvencijskim regulatorima i osam kvadraturnih digitalnih ulaza za vezu sa optičkim mernim

sistemima (inkrementalnim enkoderima u ovom slučaju). Tokom eksperimentalne provere, robot je konfigurisan primenom opisane metodologije. Generisane su konfiguracione datoteke i izabrana je odgovarajuća konfiguracija robota. Po izvršenju inicijalizacije, robot za obradu je bio spreman za izvršavanje programa obrade pripremljenog za 5-osnu mašinu alatku čija je kinematička konfiguracija emulirana.



*Slika 4. Elementarna obradna ćelija na bazi robota Lola 50 sa realizovanim upravljačkim sistemom primenom softvera EMC2*

## 5. ZAKLJUČAK

Sa ciljem da se robotu za obradu omogući promena konfiguracije, a samim tim poveća fleksibilnost tokom obrade, u radu je predložen metod inicijalnog konfigurisanja upravljačkog sistema robota za obradu, kao i metod rekonfigurisanja kojim se omogućava emulacija različitih višeosnih mašina alatki. Primenom softverskih alata za modelovanje dinamičkih procesa, na transparentan način su prikazani postupci sistem integratora, odnosno korisnika, koje je neophodno učiniti tokom konfigurisanja, odnosno rekonfigurisanja upravljačkog sistema robota za obradu.

## 6. LITERATURA

- [1] Z. M. Bi & Sherman Y. T. Lang & M. Verner & P. Orban: *Development of reconfigurable machines*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39:1227–1251, 2008.
- [2] IEEE 1003.0: *IEEE GUIDE TO THE POSIX OPEN SYSTEM ENVIRONMENT (OSE)*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1995.
- [3] *RCS - Real-Time Control System Library*, URL: <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rcslib>, april 2016.
- [4] *LinuxCNC*, URL: <http://linuxcnc.org>, april 2016.
- [5] *UML<sup>®</sup> - Unified Modeling Language<sup>™</sup>*, URL: <http://www.omg.org/spec/UML>, april 2016.
- [6] *HAL - Hardware Abstraction Layer*, URL: <http://linuxcnc.org/docs/html/hal/intro.html>, april 2016.

**Dimić, Z., Milutinović, D., Živanović, S., Mitrović, S.**

### **A METHOD FOR CONFIGURATION OF AN OPEN-ARCHITECTURE CONTROL SYSTEM OF A RECONFIGURABLE MACHINING ROBOT**

**Abstract:** *A method for configuration/reconfiguration of an open-architecture control system of a reconfigurable machining robot is given. By utilizing dynamic process modelling diagrams, activities of systems integrator/user regarding control system configuration/reconfiguration shall be presented by the example of open-architecture control software, altogether with established relations between hardware and software components of a given control system.*

**Key words:** *control system, reconfigurability, open architecture, machining robot*





Jovičić, G., Tabaković, S., Zeljković, M., Mladenović, C. <sup>1)</sup>

## STRUKTURNA OPTIMIZACIJA POKRETNE PLATFORME VIŠENAMENSKE MAŠINE ALATKE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM <sup>2)</sup>

### Rezime

*Projektanti se danas nalaze pred velikim izazovom pri projektovanju elementa noseće strukture proizvoda. Naime, vrlo često je neophodno projektovati proizvode koji maksimalno ispunjavaju zahteve eksploatacije uz minimalnu masu i dimenzije, što predstavlja zahtevan zadatak.*

*U radu su prikazani rezultati optimizacije pokretne platforme mašine alatke se hibridnom kinematikom. Po svojoj koncepciji navedena mašina treba da obezbedi velike brzine kretanja pokretne platforme u pravcu pojedinih osa, pa je i u ovom slučaju pri strukturalnoj optimizaciji funkcija cilja minimalna masa.*

**Ključne reči:** *strukturna optimizacija, konstrukcija proizvoda, metod konačnih elemenata, hibridna kinematika.*

### 1. UVOD

Ubrzani tehnološki i naučni razvoj primorao je projektante da pored klasičnih metoda projektovanja mašinskih konstrukcija počnu da primenjuju i savremenije metode koje omogućavaju projektovanje i izradu optimalnih konstrukcija proizvoda uz smanjenje utrošenog materijala, ravnomerne raspodele napona, postizanje maksimalne krutosti konstrukcija i sl. Strukturna optimizacija predstavlja metodu koja omogućava dobijanje optimalnog rešenja konstrukcije proizvoda, variranjem odgovarajućih konstruktivnih promenljivih i predstavlja još uvek nedovoljno istraženu oblast [1,2]. Tradicionalni pristup strukturne optimizacije podrazumeva samo optimizaciju dimenzija konstrukcije, dok su novija istraživanja usmerena prema optimizaciji topologije i oblika.

Ovaj vid optimizacije je našao primenu u oblastima mašinskog, građevinskog, i biomedicinskog inženjerstva. Kada je reč o mašinskom inženjerstvu, optimizacija se realizuje na konstrukcijama kod kojih je važno smanjenje masu delova i sklopova. *Good* [3] je razmatrao problem strukturne optimizacije delova aviona. *Valakos i saradnici* [4] su primenili strukturnu optimizaciju geometrije elise u odnosu na maksimalni dozvoljeni napon. Strukturna optimizacija u građevinskom inženjerstvu se primenjuje kod optimizacije nosećih komponenata. U radu [5] prikazana je optimizacija topologije sa stanovišta napona, pomeranja i pojave sopstvenih frekvencija sklopa. Kada je reč o biomedicinskom inženjerstvu, *Herera i saradnici* [6] su se bavili problematikom modelovanja konačnim elementima u cilju postizanja tačne reprodukcije anatomije kao i korelacije različitih struktura u bilo kom regionu ljudskog tela. *Žitňanský i saradnici* [7] su razvili novi tip cementne endoproteze pod nazivom *ZIREMA* koji je razvijen i testiran, i trenutno je u procesu kliničkog ispitivanja.

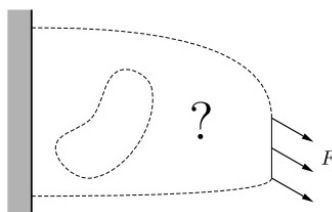
Strukturna optimizacija se može sprovoditi pri projektovanju potpuno novih konstrukcija ili na već postojećim konstrukcijama, u cilju poboljšanja karakteristika proizvoda. U radu je prikazana optimizacija postojeće konstrukcije, na primeru pokretne platforme višenamenske mašine alatke sa hibridnom kinematikom, u cilju redukcije mase i ravnomerne raspodele napona u proizvodu.

<sup>1)</sup> M.Sc., Goran Jovičić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ([goran.jovicic@uns.ac.rs](mailto:goran.jovicic@uns.ac.rs)), van. prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ([tabak@uns.ac.rs](mailto:tabak@uns.ac.rs)), prof. dr. Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ([milanz@uns.ac.rs](mailto:milanz@uns.ac.rs)), M.Sc., Cvijetin Mladenović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ([mldja@uns.ac.rs](mailto:mldja@uns.ac.rs)).

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR 35025: Savremeni prilazi u razvoju specijalnih uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE STRUKTURNE OPTIMIZACIJE

Uopštenu definiciju *strukture* u mehanici dao je Gordon [8] kao „kreiranje konstrukcije proizvoda od datog materijala izloženog određenom opterećenju“. Pod pojmom *optimizacija* se podrazumeva traženje najpovoljnijeg rešenja. Prema prethodno navedenom, definicija strukturne optimizacije, može se iskazati na sledeći način [9] „Strukturna optimizacija je oblast istraživanja koja se bavi kreiranjem konstrukcije proizvoda od određenog materijala koja ima za cilj prenos potrebnog opterećenja na najbolji mogući način“. U cilju pojašnjenja ideje, neophodno je zamisliti situaciju gde opterećenje treba da bude preneto sa regiona u prostoru na deo koji je u osloncu, slika 1.



**Slika 1.** Prikaz problema strukturne optimizacije [9]

Cilj strukturne optimizacije je da se pronađe konstrukcija proizvoda koja obavlja definisani zadatak na najbolji mogući način. Međutim da bi ovaj cilj imao smisla, neophodno je definisati termin „najbolji“. Jedan ovakav kriterijum je kreiranje takve strukture proizvoda da bude što lakša, odnosno minimiziranje njene mase. Drugi kriterijum je npr. kreiranje konstrukcije proizvoda koja ima maksimalnu krutost. Jasno je da se postizanje maksimalnih i minimalnih vrednosti ne može postići bez određenih ograničenja. Na primer, ako ne postoji ograničenje za količinu materijala koja se može koristiti, može se napraviti kruta konstrukcija bez ograničenja onda se javlja optimizacioni problem bez dobro definisanog rešenja. Veličine koje su obično ograničene u problemima strukturne optimizacije su napon, pomeranje i/ili geometrija. Treba imati na umu da većina veličina koje se mogu smatrati ograničenjima mogu takođe biti mere „najboljeg“, odnosno kao funkcije cilja. Dakle, mogu da se primene brojni kriterijumi na performanse strukture kao što su: težina, krutost, kritično opterećenje, napon, pomeranje i dimenzije. Problem strukturne optimizacije je definisan uzimanjem jedne od navedenih karakteristika kao funkcije cilja koja može biti maksimalna ili minimalna, i korišćenjem nekih drugih kao ograničenja.

Proces strukturne optimizacije se sprovodi primenom skupa matematičkih i fizičkih postupaka koji su definisani na osnovu rezultata proučavanja. Strukturna optimizacija obuhvata oblasti kao što su: mehanika, dinamika, kao i teorija otkaza. Teorijski gledano, primarni cilj strukturne optimizacije je nalaženje kompromisa između deformacija i napona. Prema novim strategijama projektovanja, strukturna optimizacija predstavlja primarnu metodu u procesu projektovanja, dok sekundarnu predstavlja testiranje fizičkog prototipa.

### 2.1 Proces projektovanja kod strukturne optimizacije

Pre pristupanja procesu projektovanja konstrukcije proizvoda neophodno je definisati nekoliko ključnih koraka koji se odnose na idealan slučaj i imaju sledeći redosled (Kirsch [10]):

- Razmatranje namene konstrukcije proizvoda, gabaritnih dimenzija i očekivanog opterećenja.
- Utvrđivanje tipa koncepta koji će se primenjivati.
- Razmatranje mogućnosti optimizacije u odnosu na izabrani koncept, funkciju cilja i ograničenje.
- Razmatranje detalja koji se odnose na estetske faktore.

### 2.2 Opšti matematički model strukturne optimizacije

Kod problema *strukturne optimizacije* (SO) je prisutna funkcija cilja, kao i kod ostalih metoda optimizacije, i promenljive koje su date u nastavku [9]:

- *Funkcija cilja ( $f$ ):* Funkcija se koristi u cilju klasifikacije konstrukcija proizvoda. Za sve konstrukcije, funkcija pruža izlazni informaciju koja ukazuje na kvalitetnu (dobru) konstrukciju proizvoda. Često  $f$  predstavlja težinu, pomeranje u datom pravcu, efektivne napone i sl.
- *Promenljiva konstrukcije proizvoda ( $x$ ):* Predstavlja funkciju ili vektor koji opisuje konstrukciju proizvoda, koji se može menjati tokom optimizacije. Može predstavljati geometriju ili materijal.

- *Promenljiva struktura (y)*: Za datu strukturu, npr., za datu konstrukciju proizvoda ( $x$ ),  $y$  je funkcija ili vektor koji predstavlja odgovor date strukture. Za mehaničku strukturu, odgovor bi bio napon, deformacija, sila i pomeranje.

$$SO \left\{ \begin{array}{l} \min f(x,y) \text{ u odnosu na promenljive } x \text{ i } y \\ \text{ograničenja} \left\{ \begin{array}{l} \text{ograničenje promenljive } y \\ \text{ograničenje promenljive } x \\ \text{ograničenje jednačine ravnoteže} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (1)$$

### 2.3 Tipovi strukturne optimizacije

U zavisnosti od geometrijskih karakteristika modela, strukturna optimizacija se deli u tri kategorije i to: optimizacija dimenzija, oblika i topologije.

Optimizacija dimenzija kao promenljivu uzima u obzir debljinu zida ako su u pitanju delovi od lima, poprečni presek ili dimenzije elemenata rešetkastog nosača i slično.

Zadatak optimizacije oblika podrazumeva optimizaciju oblika ili konture nekog dela, kao i njihovu lokaciju na geometriji konstrukcije proizvoda.

Topološka optimizacija ima za cilj pronalaženje optimalnih granica strukture. Ovim tipom optimizacije se definiše uklanjanje, ili dodavanje materijala, koji su opterećeni ispod neke granice, u cilju smanjenja mase.

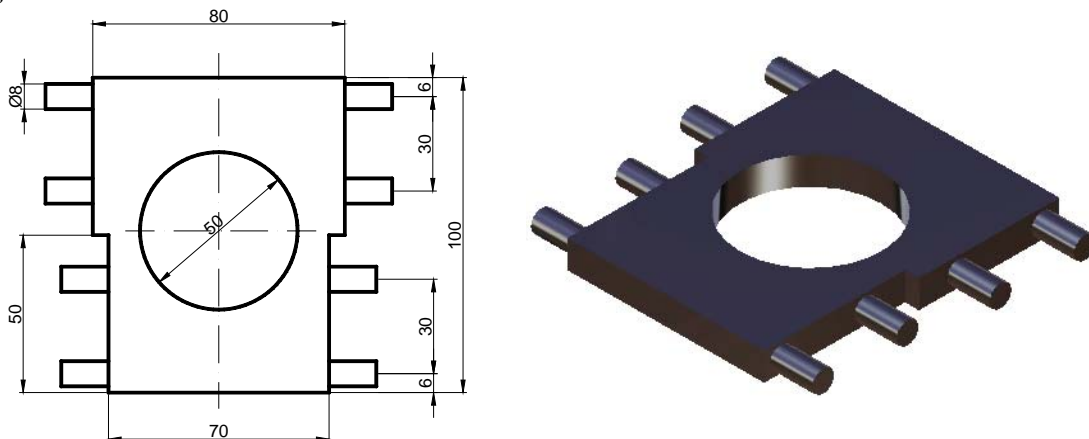
Od sva tri prikazana tipa strukturne optimizacije, topološka optimizacija predstavlja najkopleksniji vid optimizacije najčešće zbog velikog broja promenljivih. Ovaj tip optimizacije se uglavnom koristi u početnoj fazi postupka projektovanja, dok se optimizacija dimenzija i oblika primenjuje kod detaljnog projektovanja.

## 3. STRUKTURNA OPTIMIZACIJA NA PRIMERU POKRETNE PLATFORME

Sprovođenja strukturne optimizacije se realizuje kroz više faza: projektovanje inicijalne geometrije konstrukcije, simulacija naponskog stanja modela, određivanje početne mase i parametrizacija konstrukcionih promenljivih, i nakon tada se pristupa optimizaciji. Sve faze su u konkretnom slučaju sprovedene u *CATIA V5-R21* programskom paketu primenom pojedinih modula.

### 3.1 Modelovanje pokretne platforme

Modelovanje pokretne platforme je izvršeno primenom modula *Mechanical Design – Part Design* prema dimenzijama datim na slici 2.

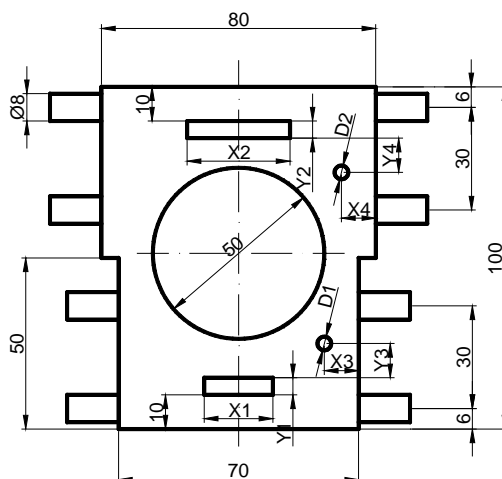


*Slika 2. CAD model pokretne platforme višenamenske mašine alatke sa hibridnom kinematikom*

Nakon modelovanja inicijalne konstrukcije pristupa se parametrizaciji geometrije. Proces parametrizacije konstrukcije pruža mogućnost projektantima da definišu geometrijske karakteristike za svaku konstrukcionu promenljivu. Pored toga, parametrizacije geometrije predstavlja i najvažniji korak u pripremi strukturne optimizacije. Za konkretan slučaj, parametrizacija modela je prikazana na slici 3.



Nakon toga se vrši izbor materijala modelu u cilju dobijanja relevantnih podataka za konkretan problem. Za konkretan primer izabran je A199 iz postojeće biblioteke materijala sa karakteristikama koje su prikazane u tabeli 1.



**Slika 3.** Geometrijski parametri modela pokretne platforme višenamenske mašine alatke sa hibridnom kinematikom

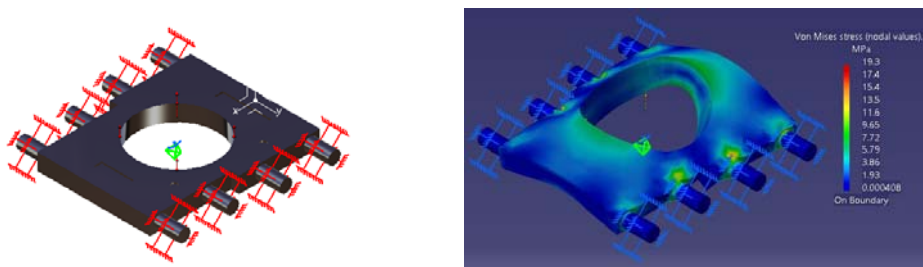
Tabela 1. Karakteristike materijala	
Naziv karakteristike	Vrednost
Jungov modul elastičnosti	70000 [MPa]
Poasonov koeficijent	0.346
Gustina	2710 [kg/m <sup>3</sup> ]
Granica razvlačenja	95 [MPa]

### 3.2 Simulacija pokretne platforme

Posle modelovanja konstrukcije pristupa se analizi naponskog stanja primenom modulu *Analysis & Simulation – Generative Structural Analysis* u cilju diskretizacije modela metodom konačnih elementima i određivanja inicijalnog naponskog stanja modela. Na početku je neophodno definisati tip konačnog elemenata. U konkretnom slučaju izabran je izoparametarski tetraedri čije su karakteristike prikazane u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike konačnih elemenata	
Naziv karakteristike	Vrednost
Veličina elementa	6,89 [mm]
Odstupanje od geometrije	1,1 [mm]
Ukupan broj čvorova	5331
Ukupan broj elemenata	2726

Zatim je definisano uklještenje ograničavanjem sve tri translacije, i zadat je pravac delovanja sile,  $F=1000$  [N], preko otvora u pozitivnom pravcu "z" ose, nakon čega se pristupa inicijalnom izračunavanju Von-Mises-ovog napona, slika 4. Nakon prikaza naponskog stanja i pre prelaska u modul za optimizaciju neophodno je definisati globalne senzore, u konkretnom slučaju Von-Mises-ov napon i masu, kako bi se mogle „meriti“ posmatrane veličine.



**Slika 4.** Grafički prikaz uklještenje, delovanje sile opterećenja i naponskog stanja

### 3.3 Optimizacija pokretne platforme

U okviru modula za strukturnu optimizaciju *Knowledgeware – Product Engineering Optimizer* sprovodi se topološka optimizacija. Pri sprovođenju postupka optimizacije neophodno je ealizovati nekoliko faza:

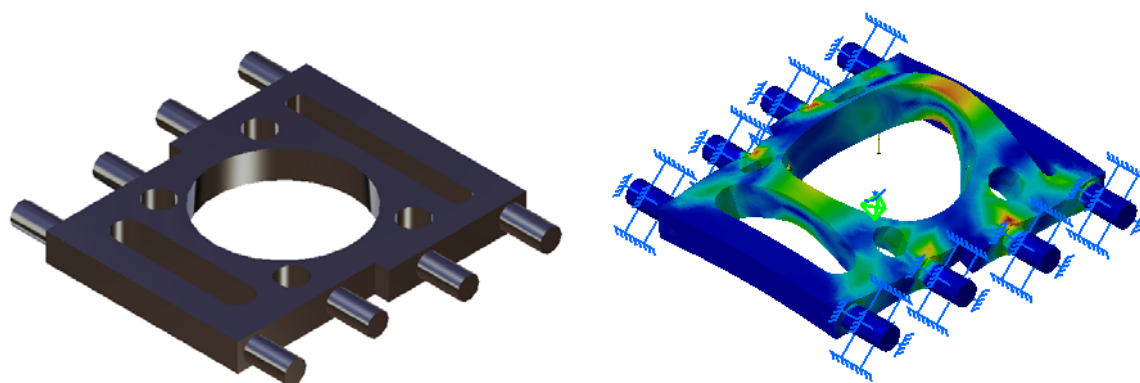
- Definisane funkcije cilja.
- Izbor metode optimizacije.
- Definisane graničnih uslova.

Pri optimizaciji konstrukcije pokretne platforme za funkciju cilja definisana je minimalna masa, za optimizacioni algoritam koristi se metoda simuliranog kaljenje koja je pogodana u ovakvim slučajevima, dok je za kriterijume optimizacije uzeti: brza konvergencija, broj iteracija – 500, broj iteracija bez poboljšanja – 50, i vreme trajanja otpimizacije – 5 minuta, kao ograničenje je zadata vrednost maksimalnog Von-Mises-ov napona  $\sigma < 24$  [MPa]. Vrednost Von-Mises-ovog napona je usvojena imajući u vidu da je mašina alatka višenamenska i da je sem statičkog i dinamičkog izložena i značajnom toplotnom opterećenju.

### 4.0 PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Nakon sprovedenog postupka topološke optimizacije može se zaključiti da se masa konstrukcije smanjila sa  $m = 0,17$  [kg] na  $m = 0,13$  [kg], odnosno za 23,53 % u odnosu na početnu vrednost, uz maksimalni Von-Mises-ov napon  $\sigma = 20$  [MPa], što je odličan rezultat u odnosu na dozvoljeni napon tečenja kod Al, koji iznosi  $\sigma_{0,2} = 95$  [MPa]. U tabeli 3 su prikazani masa i naponi u zavisnosti od rednog broja optimizacije, dok je na slici 5 prikaz optimizovan model konstrukcije proizvoda.

Redni br. optim.	Masa [kg]	Von-Mises [MPa]
0	0,17	19,3
1	0,16	20,164
2	0,15	21,027
3	0,14	18,765
4	0,14	18,752
5	0,14	19,8
6	0,13	20



*Slika 5. Prikaz konstrukcije pokretne platforme nakon optimizacije*

### 5.0 ZAKLJUČAK

Primenom razmatrane metode projektovanja konstrukcije uočeni su određeni nedostaci konstrukcije. Shodno tome, pruža se mogućnost sprovođenja korekcija do postizanja optimalnih karakteristika. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je dobijena optimalna konstrukcija proizvoda u odnosu na inicijalnu, uz ravnomerniju raspodelu napona i značajnu redukciju mase za skoro 24%.

Na modelu gde je prikazano naponsko stanje mogu se uočiti zone malih napona oko otvora što daje dodatnu mogućnost za optimizaciju, odnosno kreiranje „U” profila između džepova i otvora. Čeone strane modela, koje takođe predstavljaju zone malih napona, iz funkcionalnih razloga se ne mogu menjati.

Buduća istraživanja bi mogla uključiti strukturnu optimizaciju oblika i dimenzija, zajedno sa topološkom optimizacijom, što bi moglo rezultirati još većim smanjenjem mase. Pored toga mogla bi se vršiti i optimizaciju primenom drugog materijala, kao što je na primer čelik koji ima bolje mehaničke karakteristike u odnosu na Al.

Na samom kraju može se zaključiti da projektovanjem na ovakav način pored toga što se olakšava proces projektovanja ima i ekonomsku opravdanost.

## 6.0 LITERATURA

- [1] Papalambros, P.Y.: *The optimization paradigm in engineering design-promises and challenges*, Computer - Aided Design, Vol. 34, No. 12, pp. 939-951, 2002.
- [2] Isailović, B., *Strukturna optimizacija elemenata mašinskih konstrukcija u CAD okruženju*, magistarski rad, Kragujevac, 2010.
- [3] Good, M.G.: *Development of Variable Camber Compliant Aircraft Tail using Structural Optimization*, Master Thesis, 2003.
- [4] Valakos, I.M., Ntipteni, M.S., Nikolos, I.K.: *Structural optimization of Centrifugal Impeller Using Differential Evolution in CATIA Environment*, Operational Research, Vol. 17, No.2, pp. 185-212, 2007.
- [5] Guan, H, Chen, Y.J., Loo, Y.C., Xie, Y.M., Steven, G.P.: *Bridge topology optimization with stress, displacement and frequency constraints*, Computer and Structures, Vol 81., No. 3, pp. 131-145, 2003.
- [6] Herrera, A., Ibarz, E., Cegoñino, J., Lobo-Escolar, A., Puértolas, S., López, E., Mateo, J., Gracija, L.: *Applications of Finite Element Simulation in Orthopedic and Trauma Surgery*, World Journal of Orthopedics, Vol. 3, No. 4, pp. 25-41, 2012.
- [7] Žitňanský, M., Reháč, L., Nadř, M., Ďuriš, R.: *Stress-strain analysis of the femoral component of ZIREMA total hip endoprosthesis*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 379-384, 2010.
- [8] Gordon, J.G.: *Structures or Why Things Don't Fall Down*, Penguin Books, Baltimore, 1978.
- [9] Christensen, P.W., Klarbring, A.: *An introduction to Structural Optimization*, Springer Netherlands, Sweden, 2009.
- [10] Kirsch, U.: *Structural optimization-Fundamental and Applications*, Springer – Verlag, 1993.

**Jovičić, G., Tabaković, S., Zeljković, M., Mladenović, C.**

### **STRUCTURAL OPTIMIZATION OF MOVABLE PLATFORM OF MULTI-PURPOSE MACHINE TOOLS WITH HYBRID KINEMATICS**

**Abstract:** *Designers today have great challenges in process of designing elements of main structure of the product. In fact, very often it is necessary to design products, which fully meet the requirements of exploitation, minimum of weight and dimensions, which is demanding task.*

*The paper presents the results of optimization process of movable platform of machine tools with hybrid kinematics. After its concept, displayed machine tools should ensure high-speed movement of the movable platform in the direction of the individual axes, so in this case in structural optimization objective function is minimum weight.*

**Key words:** *structural optimization, product design, finite element method, hybrid kinematics.*



Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., Babić, B.<sup>1)</sup>

## INTELEGENCIJA ROJA ČESTICA I TEORIJA HAOSA U INTEGRISANOM PROJEKTOVANJU I TERMINIRANJU FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA<sup>2)</sup>

### Rezime

U radu je prikazan pristup za integrisano projektovanje i terminiranje fleksibilnih tehnoloških procesa obrade delova primenom algoritma baziranog na inteligenciji roja čestica i teoriji haosa (cPSO algoritam). Pored metoda kodiranja/dekodiranja parametara planova terminiranja u jedinke cPSO algoritma, u radu je predložen matematički model za minimizaciju ukupnog vremena za obradu svih delova čije se terminiranje vrši, maksimizaciju uravnoteženog iskorišćenja mašina alatki i minimizaciju transportnih tokova materijala. Takođe, u cilju prevazilaženja nedostataka vezanih za brzu konvergenciju algoritma u ranim fazama optimizacije, predložena je implementacija haotičnih mapa u PSO algoritam. Predloženi pristup je eksperimentalno verifikovan na primeru dobijanja optimalnih planova terminiranja realnih delova.

**Ključne reči:** integrisano projektovanje i terminiranje tehnoloških procesa, inteligencija roja čestica, teorija haosa, optimizacija

### 1. UVOD

Tokom poslednjih godina, integracija proizvodnih funkcija kao što su projektovanje i terminiranje tehnoloških procesa privlači sve veću pažnju istraživača. Iako su ove oblasti tradicionalno najčešće razmatrane i istraživane nezavisno, što je obezbeđivalo dekoplovane modele za rešavanje problema optimizacije ovih funkcija, zahtevi za smanjenjem proizvodnih troškova, povećanjem efektivnosti proizvodnih sistema, kao i boljim iskorišćenjem proizvodnih resursa dovode do formiranja integrisanih modela za ove funkcije.

Problem integrisanog projektovanja i terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa može se definisati na sledeći način: za svaki od  $n$  delova, koji se dobijaju alternativnim tehnološkim procesima obrade na  $m$  mašina alatki, uz poštovanje zadatih tehnoloških ograničenja, potrebno je naći odgovarajuće optimalne ili približno optimalne tehnološke procese obrade delova, kao i redoslede obrade datih delova na datim alternativnim mašinama alatkama, tako da su zadovoljena tehnološka ograničenja, a dobijeni redosledi operacija optimalni prema zadatim kriterijumima performansi.

S obzirom na alternativna rešenja za proizvodne resurse za svaku od operacija, kao i varijantnost tehnoloških operacija, integrisano projektovanje i terminiranje optimalnih tehnoloških procesa pripada klasi nedeterminističkih polinomnih problema tzv. *NP-hard* optimizacionih problema (engl. *non deterministic polynomial optimization problems*). Konvencionalne neheurističke metode ne rešavaju efikasno ovaj tip kombinatornog problema pa se iz tog razloga ovakvi problemi rešavaju novim biološki inspirisanim optimizacionim algoritmima. Najviše objavljenih radova za rešavanje problema integrisanog optimalnog projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa *IPPS* (engl. *Integrated process planning and scheduling*) je

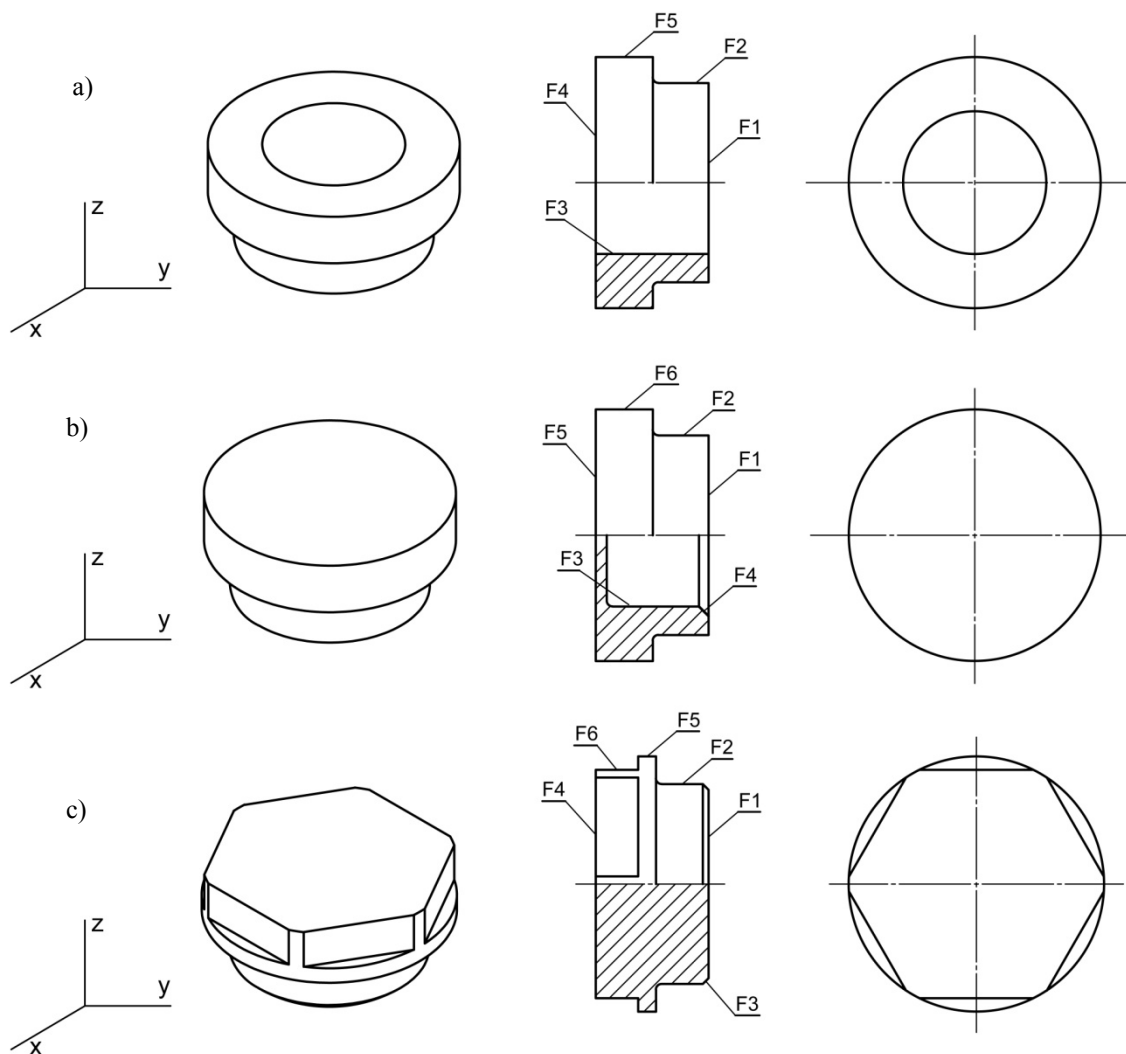
<sup>1)</sup> Milica Petrović, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, [mmpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmpetrovic@mas.bg.ac.rs),  
Jelena Petronijević, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, [jpetronijevic@mas.bg.ac.rs](mailto:jpetronijevic@mas.bg.ac.rs),  
dr Marko Mitić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, [mmitic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmitic@mas.bg.ac.rs),  
dr Najdan Vuković, naučni saradnik, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, [nvukovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nvukovic@mas.bg.ac.rs),  
dr Zoran Miljković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, [zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs),  
dr Bojan Babić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, [bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs).

<sup>2)</sup> Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativni pristup u primeni inteligentnih tehnoloških sistema za proizvodnju delova od lima zasnovan na ekološkim principima“ (evid. br. TR-35004) Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, 2011-2016.

bazirano na primeni genetičkih algoritama – *GA* [1]. Takođe, pristup baziran na metodologiji simulirano kaljenje – *SA* [2] korišćen je za optimizaciju pri integrisanom projektovanju tehnoloških procesa i terminiranju proizvodnje. Dalje, u radovima [3] i [4], problem *IPPS* je razmatran kao kombinatorno optimizacioni, a modifikovani algoritam baziran na teoriji rojeva – *PSO* je korišćen za njegovo efikasno rešavanje. Ponovno planiranje (engl. *replanning*) u slučaju kvara mašine alatke ili u slučaju dospeća nove narudžbine detaljno je dato u [5]. Hibridni algoritmi bazirani na multiagentnoj metodologiji korišćeni su za rešavanje problema *IPPS* u literaturi [6] i [7]. Problem *IPPS* je rešavan i primenom teorije igara [8], gramatičke optimizacije [9], imperijalističkog algoritma [10], kao i brojnih hibridnih algoritama.

## 2. FLEKSIBILNOST I PREDSTAVLJANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA

U ovom radu je korišćeno pet tipova fleksibilnosti pri predstavljanju tehnoloških procesa i njihovih planova terminiranja: fleksibilnost mašina alatki, alata, orijentacija alata, procesa i redosleda operacija. U cilju pojašnjenja ovih tipova fleksibilnosti, na slici 1 su predložena tri realna dela, za koje je neophodno generisati planove terminiranja. Deo 1 se sastoji iz 5 tehnoloških formi koje se dobijaju izvršavanjem 16 operacija, deo 2 se sastoji iz 6 tehnoloških formi koje se dobijaju izvršavanjem 18 operacija, a deo 3 iz 6 tehnoloških formi koje se dobijaju izvršavanjem 14 operacija. Tehničke karakteristike delova, koje uključuju klase tolerancije, klase hrapavosti sa odgovarajućim vrednostima parametra hrapavosti  $R_a$ , alternativne operacije, alternativne mašine alatke, alate, orijentacije alata i odgovarajuća vremena obrade dati su u tabeli 1 za deo 1, tabeli 2 za deo 2 i tabeli 3 za deo 3. Mreže alternativnih tehnoloških procesa obrade delova prikazane su na slici 2.

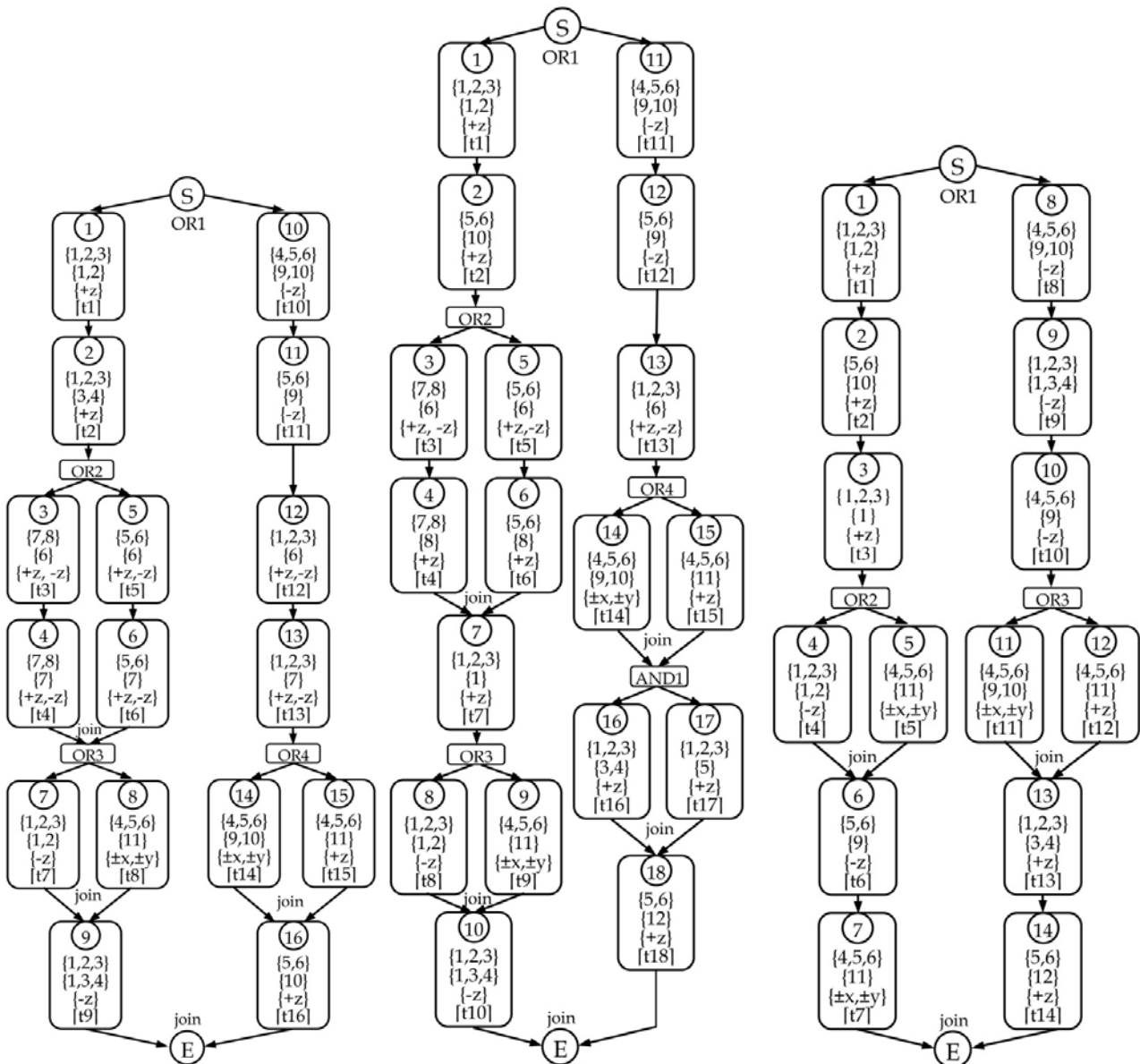


**Slika 1.** Primer tri reprezentativna dela za terminiranje a) deo 1 sa pet tehnoloških formi, b) deo 2 sa šest tehnoloških formi i c) deo 3 sa pet tehnoloških formi

Tabela 1. Tehnička specifikacija dela 1						
Tehn. forma	Tolerancije (R <sub>a</sub> )	Alternativne operacije	Alternativne mašine alatke	Alternativni alati	Alternativne orij. alata	Vremena obrade
F1	IT11 (6.3)	struganje (operacija 1) glodanje (operacija 14) glodanje (operacija 15)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T9, T10 T11	+z ±x, ±y +z	t1=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t14=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.9,2.4] t15=[5.7, 4.2, 2.8]
F2	IT11 (6.3)	struganje (operacija 2) glodanje (operacija 16)	M1, M2, M3 M5, M6	T3, T4 T10	+z +z	t2=[1.2,1.0,1.9,1.5,2.0,1.6] t16=[3.1, 3.2]
F3	IT10 (3.2)	bušenje (operacija 3) proš. (operacija 4)	M7, M8 M7, M8	T6 T7	+z, -z +z, -z	t3=[5.5, 3.8] t4=[4.8, 8.1]
F3	IT10 (3.2)	bušenje (operacija 5) proš. (operacija 6)	M5, M6 M5, M6	T6 T7	+z, -z +z, -z	t5=[3.3, 3.4] t6=[10.7, 24.1]
F3	IT10 (3.2)	bušenje (operacija 12) proš. (operacija 13)	M1, M2, M3 M1, M2, M3	T6 T7	+z, -z +z, -z	t12=[3.3, 4.8, 3.3] t13=[13.4, 26.6, 30.2]
F4	IT11 (6.3)	struganje (operacija 7) glodanje (operacija 8) glodanje (operacija 10)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T11 T9, T10	-z ±x, ±y -z	t7=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t8=[5.7, 4.2, 2.8] t10=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.8,2.5]
F5	IT11(6.3)	struganje (operacija 9) glodanje (operacija 11)	M1, M2, M3 M5, M6	T1, T3, T4 T9	-z -z	t9=[0.5,0.7,0.4,1.0,1.4, 0.8,0.8,1.1,0.7] t11=[4.6, 7.2]

Tabela 2. Tehnička specifikacija dela 2						
Tehn. forma	Tolerancije (R <sub>a</sub> )	Alternativne operacije	Alternativne mašine alatke	Alternativni alati	Alternativne orij. alata	Vremena obrade
F1	IT11 (6.3)	struganje (operacija 1) glodanje (operacija 14) glodanje (operacija 15)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T9, T10 T11	+z ±x, ±y +z	t1=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t14=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.9,2.4] t15=[5.7, 4.2, 2.8]
F2	IT11 (6.3)	struganje (operacija 2) glodanje (operacija 16)	M5, M6 M1, M2, M3	T10 T3, T4	+z +z	t2=[3.1, 3.2] t16=[1.2,1.0,1.9,1.5,2.0,1.6]
F3	IT8 (1.6)	bušenje (operacija 3) proš. (operacija 4)	M7, M8 M7, M8	T6 T8	+z, -z +z	t3=[5.5, 3.8] t4=[34.3,13.7]
F3	IT8 (1.6)	bušenje (operacija 5) unut. str. (operacija 6)	M5, M6 M5, M6	T6 T8	+z, -z +z	t5=[3.3, 3.4] t6=[30.2,13.4]
F3	IT8 (1.6)	bušenje (operacija 13) proš. (operacija 17)	M1, M2, M3 M1, M2, M3	T6 T5	+z, -z +z	t13=[3.3, 4.8, 3.3] t17=[1.1, 1.5, 1.8]
F4	IT11 (6.3)	struganje (operacija 7) glodanje (operacija 18)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z	t7=[0.7, 0.8, 0.9] t18=[0.5, 0.6]
F5	IT11 (6.3)	struganje (operacija 8) glodanje (operacija 9) glodanje (operacija 11)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T11 T9, T10	-z ±x, ±y -z	t8=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t9=[5.7, 4.2, 2.8] t11=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.8,2.5]
F6	IT11(6.3)	struganje (operacija 10) glodanje (operacija 12)	M1, M2, M3 M5, M6	T1, T3, T4 T9	-z -z	t10=[0.5,0.7,0.4,1.0,1.4,0.8, 0.8,1.1,0.7] t12=[4.6, 7.2]

Tabela 3. Tehnička specifikacija dela 3						
Tehn. forma	Tolerancije (R <sub>a</sub> )	Alternativne operacije	Alternativne mašine alatke	Alternativni alati	Alternativne orij. alata	Vremena obrade
F1	IT11 (6.3)	struganje (operacija 1) glodanje (operacija 11) glodanje (operacija 12)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T9, T10 T11	+z ±x, ±y +z	t1=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t11=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.9,2.4] t12=[5.7, 4.2, 2.8]
F2	IT11 (6.3)	struganje (operacija 2) glodanje (operacija 13)	M5, M6 M1, M2, M3	T10 T3, T4	+z +z	t2=[3.1, 3.2] t13=[1.2,1.0,1.9,1.5,2.0,1.6]
F3	IT10 (3.2)	struganje (operacija 3) glodanje (operacija 14)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z	t3=[0.6, 0.7, 0.8] t14=[0.4, 0.5]
F4	IT11 (6.3)	struganje (operacija 4) glodanje (operacija 5) glodanje (operacija 8)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T11 T9, T10	-z ±x, ±y -z	t4=[2.3,3.3,4.6,6.5,3.8,5.5] t5=[5.7, 4.2, 2.8] t8=[2.7,2.8,2.9,2.4,2.8,2.5]
F5	IT11(6.3)	struganje (operacija 6) glodanje (operacija 9)	M5, M6 M1, M2, M3	T9 T1, T3, T4	-z -z	t6=[4.6, 7.2] t9=[0.5,0.7,0.4,1.0,1.4,0.8, 0.8,1.1,0.7]
F6	IT11(6.3)	glodanje (operacija 7) glodanje (operacija 10)	M4, M5, M6 M4, M5, M6	T11 T9	±x, ±y -z	t7=[10.8, 9.7, 7.4] t10=[4.3, 3.5, 6.8]



Slika 2. Mreže alternativnih tehnoloških procesa obrade reprezentativnih delova

### 3. MATEMATIČKI MODELI ZA OPTIMIZACIJU PLANOVA TERMINIRANJA

U ovom radu se predstavljaju matematički modeli za određivanje tri funkcije cilja (*object1*, *object2* i *object3*) pri optimizaciji planova terminiranja tehnoloških procesa. Prva funkcija cilja (*object1*) se odnosi na minimizaciju ukupnog vremena neophodnog za obradu svih delova čije se terminiranje vrši (engl. *makespan*) i predstavljena je jednačinom (1):

$$object1 = \max(c_{ij})(c_{ij} \in T_a(s_{ij}, c_{ij})), \quad (1)$$

Druga funkcija cilja (*object2*) se odnosi na maksimizaciju uravnoteženog iskorišćenja mašina alatki (engl. *balanced level of machine utilization*) koje se koriste za operacije svih delova čije se terminiranje vrši i data je jednačinama (2) i (3):

$$object2 = \min \left( object1 + \sum_{a=1}^m \left| \sum p_{ij} - avgmt \right| \right), (o_{ij} \in M_a) \quad (2)$$



$$object2 = \min \left( object1 + \sum_{a=1}^m \left| \sum p_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{a=1}^m \sum p_{ij} \right| \right), (o_{ij} \in M_a) \quad (3)$$

Treća funkcija cilja (*object3*) se odnosi na minimizaciju srednjeg vremena transportnih tokova materijala (engl. *mean flow time*) i data je jednačinom (4).

$$object3 = \min \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n c_i \right) \quad (4)$$

gde je  $o_{ij}$  j-ta operacija i-tog dela,  $c_{ij}$  je najranije vreme završetka operacije  $o_{ij}$ ,  $s_{ij}$  je najranije vreme početka operacije  $o_{ij}$ ,  $m$  je ukupan broj mašina alatki,  $\sum p_{ij}$  je ukupno vreme obrade na svakoj pojedinačnoj mašini alatki,  $avgmt$  je prosečno vreme trajanja obrade na svim mašinama alatkama i  $n$  je ukupan broj delova čije se terminiranje vrši.

#### 4. KODIRANJE I DEKODIRANJE JEDINKI PLANOVA TERMINIRANJA

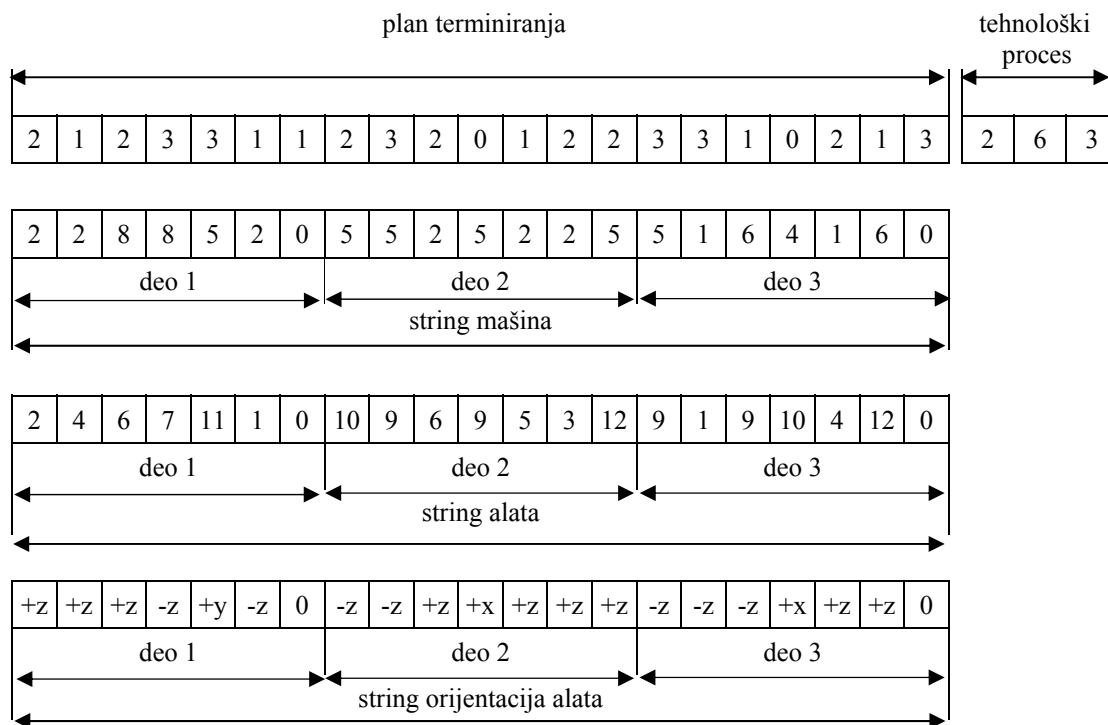
Svaka jedinka u planu terminiranja sastoji se iz pet delova različitih dužina. Prvi deo predstavlja string alternativnih tehnoloških procesa. Dužina ovog stringa je određena brojem delova čije se terminiranje vrši; kako se u ovom radu predlaže primer terminiranja tehnoloških procesa tri dela sa slike 1, to je dužina ovog stringa takođe tri. Dalje, svaki broj u okviru ovog stringa predstavlja odabran alternativni tehnološki proces; na osnovu mreže na slici 2, može se videti da za deo 1 postoji šest linkova tj. putanja alternativnih tehnoloških procesa (prva putanja predstavljena je operacijama {1, 2, 3, 4, 7, 9}, druga je {1, 2, 3, 4, 8, 9}, treća je {1, 2, 5, 6, 7, 9}, četvrta je {1, 2, 5, 6, 8, 9}, peta je {10, 11, 12, 13, 14, 16} i šesta je {10, 11, 12, 13, 14, 16}). Tako vrednost 2 u prvom stringu alternativnog tehnološkog procesa ukazuje na to da je druga putanja tehnoloških procesa tj. putanja {1, 2, 3, 4, 8, 9} slučajno odabrana.

Drugi deo čini string za plan terminiranja. Dužina ovog stringa određena je brojem delova i maksimalnim brojem operacija  $q$  ( $n \times q = 3 \times 7 = 21$ ). Parametar  $q$  predstavlja maksimalan broj operacija za sve alternativne tehnološke procese ( $q = 7$ ). Plan terminiranja se sastoji od ID broja delova, a njihov broj zavisi od broja operacija tehnološkog procesa svakog od delova. Deo  $i$  se pojavljuje onoliko puta u stringu tehnološkog procesa koliko operacija ima izabran tehnološki proces obrade tog dela. Za deo 1, drugi alternativni tehnološki proces se sastoji od šest operacija, tako da je šest elemenata u planu terminiranja jednako 1. Na sličan način, za deo 3 je slučajno odabran treći alternativni tehnološki proces, koji se sastoji od 6 operacija, tako da će 6 elemenata u planu terminiranja biti jednako 3. Na taj način, string plana terminiranja je formiran od šest jedinica, sedam dvojk i šest trojki. Preostali elementi ovog stringa su popunjeni nulama, broj nula je 2 ( $21 - 6 - 7 - 6 = 2$ ). Svi ovi elementi su slučajno raspoređeni i formiraju string za plan terminiranja, kao što je prikazano na slici 3.

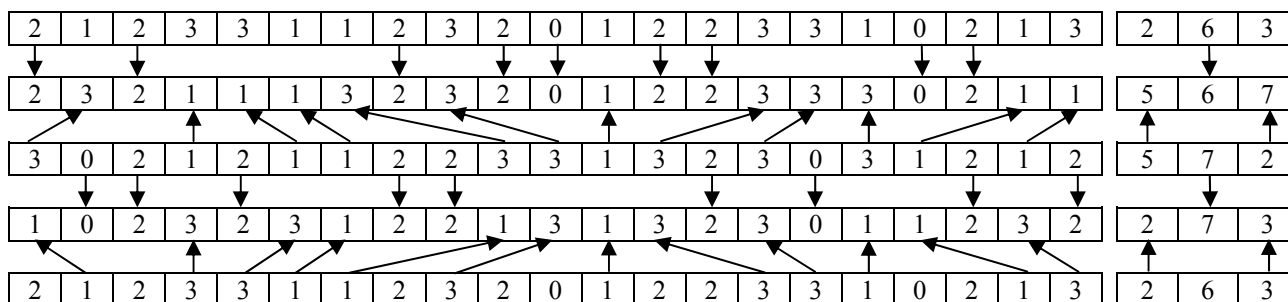
Treći deo jedinice predstavlja string mašina alatki. Ovaj string se odnosi na odabrane mašine alatke za odgovarajuće operacije alternativnih tehnoloških procesa obrade svih delova. Dužina ovog stringa je jednaka dužini stringa plana terminiranja. Za svaki deo u okviru ovog stringa prikazane su mašine za svaku od operacija. Na primer, alternativne mašine za operacije tehnološkog procesa dela 1 su {2, 2, 8, 8, 5, 2}.

Četvrti deo jedinice predstavlja string alata i označava odabrane alate za operacije svih delova, dok peti deo jedinice predstavlja string orijentacija alata i označava odabrane orijentacije alata za sva tri dela čije se terminiranje vrši. Primer stringa alata za deo 2 je {10, 9, 6, 9, 5, 3, 12}, dok je primer stringa orijentacija alata za deo 3 {-z, -z, -z, +h, +z, +z}, slika 3.

Nakon generisanja šeme za kodiranje plana terminiranja, a na osnovu definisane verovatnoće ukrštanja  $p_c$ , na jedinke je primenjen operator ukrštanja, slika 4. Na ovaj način je izvršeno generisanje dve nove jedinice u jatu za stringove tehnoloških procesa i planova terminiranja.



Slika 3. Kodiranje jedinici cPSO algoritma za plan terminiranja



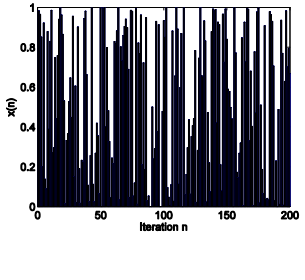
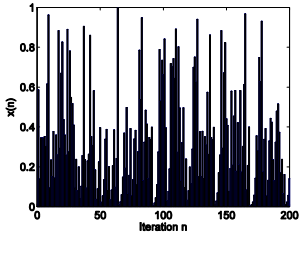
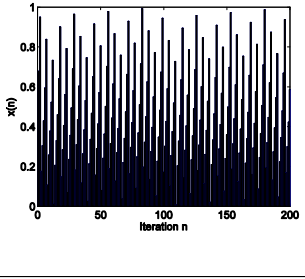
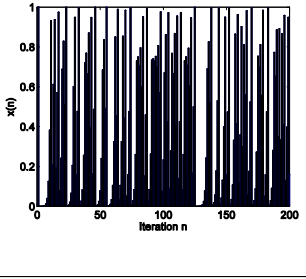
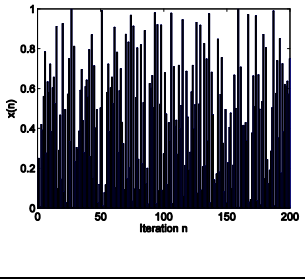
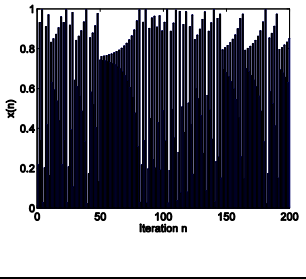
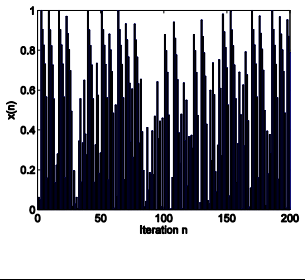
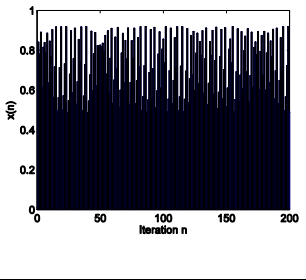
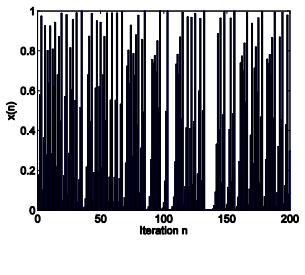
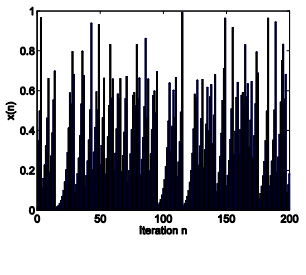
Slika 4. Operator ukrštanja za dve jedinice cPSO algoritma za plan terminiranja

## 5. OPTIMIZACIJA PRIMENOM INTELIGENCIJE ROJA I TEORIJE HAOSA

Metod optimizacije rojem čestica (PSO) pripada grupi biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije i originalno je predložen 1995. godine. Istraživanje i razvoj u oblasti inteligencije rojeva ukazuju da, u odnosu na ostale metaheurističke algoritme, PSO algoritam poseduje mnoge prednosti (jednostavan matematički model, relativno jednostavna mogućnost implementacije, ne zahteva računanje prvog izvoda funkcije), ali i poteškoće u primeni na probleme diskretne optimizacije zbog kontinualne prirode samog algoritma, kao i nedostatke vezane za konvergenciju ka lokalnom optimalnom rešenju u ranim fazama optimizacije. Jedan od načina da se prevaziđu pomenuti nedostaci vezani za brzu konvergenciju algoritma jeste integracija PSO algoritma sa haosom [11] i [12] tj. implementacija haotičnih mapa u jednačine tradicionalnog PSO algoritma (cPSO algoritam).

„Ugrađivanje“ haosa tj. haotičnih mapa u PSO algoritam vrši se tako što se umesto slučajnih brojeva  $rand()$  i  $Rand()$  koriste generatori  $chaos()$  i  $Chaos()$ , jednačine (7)-(12). Na taj način, stohastičkim generisanjem alternativnih resursa (mašine alatke, alati, orijentacije alata) se postiže dobijanje većeg prostora alternativnih rešenja u svakoj iteraciji algoritma i mogućnost izbegavanja „zarobljavanja“ algoritma u lokalnom optimumu. Deset haotičnih mapa za problem optimalnog terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa usvojeno je kao što je prikazano u tabeli 4.

Tabela 4. Mape haosa

<p>1) Chebyshev map</p> $x_{n+1} = \cos(n \cos^{-1}(x_n))$		<p>6) Piecewise map</p> $x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{P} & 0 \leq x_n < P \\ \frac{x_n - P}{0.5 - P} & P \leq x_n < \frac{1}{2} \\ \frac{1 - P - x_n}{0.5 - P} & \frac{1}{2} \leq x_n < 1 - P \\ \frac{1 - x_n}{P} & 1 - P \leq x_n < 1 \end{cases}, 0 < P < 0.5$	
<p>2) Circle map</p> $x_{n+1} = x_n + b - (a / 2\pi) \sin(2\pi x_n) \text{ mod}(1)$ $a = 0.5; b = 0.2;$		<p>7) Sine map</p> $x_{n+1} = \frac{a}{4} \sin(\pi x_n),$ $0 < a \leq 4$	
<p>3) Gauss/Mouse</p> $x_{n+1} = \begin{cases} 0 & x_n = 0 \\ 1 / x_n \text{ mod}(1) & \text{otherwise} \end{cases}$ $1 / x_n \text{ mod}(1) = \frac{1}{x_n} - \left[ \frac{1}{x_n} \right]$		<p>8) Singer map</p> $x_{n+1} = \mu(7.86x_n - 23.31x_n^2 + 28.75x_n^3 - 13.302875x_n^4)$ $0.9 < \mu < 1.08$	
<p>4) Iterative map</p> $x_{n+1} = \sin\left(\frac{a\pi}{x_n}\right),$ $a \in (0, 1)$		<p>9) Sinusoidal map</p> $x_{n+1} = ax_n \sin(\pi x_n),$ $a = 2.3$	
<p>5) Logistic map</p> $x_{n+1} = ax_n(1 - x_n);$ $a = 4;$		<p>10) Tent map</p> $x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{0.7} & x_n < 0.7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_n) & x_n \geq 0.7 \end{cases}$	

U skladu sa procedurom kodiranja/dekodiranja jedinki ovog algoritma i generatorima *chaos()* i *Chaos()*, predložene su matrice dimenzije  $3 \times n$  za određivanje brzina i položaja jedinki u populaciji cPSO algoritma, jednačine (5)-(6):

$$V_{id}^{t+1} = [V_{id\_m}^{t+1}; V_{id\_t}^{t+1}; V_{id\_tad}^{t+1}] \quad (5)$$

$$X_{id}^{t+1} = [X_{id\_m}^{t+1}; X_{id\_t}^{t+1}; X_{id\_tad}^{t+1}] \quad (6)$$

Brzine  $V_{id\_m}^{t+1}$ ,  $V_{id\_t}^{t+1}$ ,  $V_{id\_tad}^{t+1}$ , kao i položaji  $X_{id\_m}^{t+1}$ ,  $X_{id\_t}^{t+1}$ ,  $X_{id\_tad}^{t+1}$  se određuju na osnovu jednačina (7)-(12):

$$V_{id\_m}^{t+1} = W \cdot V_{id\_m}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{ld\_m}^t - X_{id\_m}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_m}^t - X_{id\_m}^t) \quad (7)$$

$$X_{id\_m}^{t+1} = X_{id\_m}^t + V_{id\_m}^{t+1} \quad (8)$$

$$V_{id\_t}^{t+1} = W \cdot V_{id\_t}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{ld\_t}^t - X_{id\_t}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_t}^t - X_{id\_t}^t) \quad (9)$$

$$X_{id\_t}^{t+1} = X_{id\_t}^t + V_{id\_t}^{t+1} \quad (10)$$

$$V_{id\_tad}^{t+1} = W \cdot V_{id\_tad}^t + C_1 \cdot \text{chaos}() \cdot (P_{ld\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) + C_2 \cdot \text{Chaos}() \cdot (P_{gd\_tad}^t - X_{id\_tad}^t) \quad (11)$$

$$X_{id\_tad}^{t+1} = X_{id\_tad}^t + V_{id\_tad}^{t+1} \quad (12)$$

gde je  $t$  broj generacije;  $V_{id\_m}^t$  i  $V_{id\_m}^{t+1}$  su brzine za string mašina jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $V_{id\_t}^t$  i  $V_{id\_t}^{t+1}$  su brzine za string alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $V_{id\_tad}^t$  i  $V_{id\_tad}^{t+1}$  su brzine za string orijentacije alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $X_{id\_m}^t$  i  $X_{id\_m}^{t+1}$  predstavljaju položaje za string mašina jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $X_{id\_t}^t$  i  $X_{id\_t}^{t+1}$  predstavljaju položaje za string alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $X_{id\_tad}^t$  i  $X_{id\_tad}^{t+1}$  predstavljaju položaje za string orijentacije alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $P_{ld\_m}^t$  i  $P_{gd\_m}^t$  su lokalno i globalno najbolja rešenja položaja za string mašina jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $P_{ld\_t}^t$  i  $P_{gd\_t}^t$  su lokalno i globalno najbolja rešenja položaja za string alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $P_{ld\_tad}^t$  i  $P_{gd\_tad}^t$  su lokalno i globalno najbolja rešenja položaja za string orijentacija alata jedinke  $i$  u generacijama  $t$  i  $t+1$ ;  $W$  je parametar inercije;  $C_1$  i  $C_2$  su kognitivni i socijalni koeficijent učenja;  $\text{rand}()$  i  $\text{Rand}()$  su dva slučajno izabrana broja iz intervala  $[0,1]$ . Glavni koraci  $cPSO$  algoritma za integrisano projektovanje tehnoloških procesa i planova terminiranja, opisani su na sledeći način:

### Koraci za određivanje optimalnih tehnoloških procesa

- Korak 1: inicijalizovati parametre  $cPSO$  algoritma za optimizaciju tehnoloških procesa;
- Korak 2: inicijalizovati brzine i položaje jedinki u jatu;
- Korak 3: odrediti funkciju cilja svake jedinke u jatu;
- Korak 4: odrediti globalno i lokalno najbolja rešenja tehnoloških procesa;
- Korak 5: generisati novo jato ažuriranjem brzina i položaja jedinki;
- Korak 6: zaokružiti pozicije mašina, alata i orijentacija alata;
- Korak 7: odrediti funkciju cilja svake jedinke u roju;
- Korak 8: odrediti nova globalno i lokalno najbolja rešenja;
- Korak 9: ažurirati globalno najbolje rešenje u jatu i lokalno najbolje rešenje za svaku jedinku;
- Korak 10: ponoviti korake 5-10 zadati broj iteracija;
- Korak 11: sačuvati s optimalnih alternativnih tehnoloških procesa;

### Koraci za određivanje optimalnih planova terminiranja

- Korak 12: inicijalizovati parametre  $cPSO$  algoritma za IPPS problem;
- Korak 13: selektovati alternativne tehnološke procese gederisane u fazi optimizacije tehnoloških procesa;
- Korak 14: inicijalizovati jato jedinki u inicijalnoj populaciji;
- Korak 15: generisati novo jato primenom operatora ukrštanja i ažuriranjem brzina i položaja jedinki;
- Korak 16: zaokružiti položaje mašina, alata i orijentacija alata;
- Korak 17: odrediti funkciju cilja svake jedinke u roju;
- Korak 18: odrediti nova globalno i lokalno najbolja rešenja;
- Korak 19: ažurirati globalno najbolje rešenje u jatu i lokalno najbolje rešenje za svaku jedinku;
- Korak 20: ponoviti korake 13-19 za terminiranje tehnoloških procesa;
- Korak 21: rezultati optimizacije su optimalni planovi terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa.

## 6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U cilju verifikacije predloženog algoritma i dobijanja optimalnih planova terminiranja korišćena su tri reprezentativna dela prikazana na slici 1. Vreme transporta dela između mašina alatki prikazano je u tabeli 5, a informacije o mašinama alatkama, alatima, kao i odgovarajućim troškovima i indeksima troškova date u tabeli 6. Cilj optimizacije je minimizacija funkcija cilja *object1* i *object3* i maksimizacija funkcije cilja *object2*. Parametri *cPSO* algoritama su postavljeni na sledeći način: veličina populacije je 80, maksimalan broj generacija je 200, parametar inercije  $W$  se linearno smanjuje od 1.2 do 0.4, a koeficijenti  $C_1$  i  $C_2$  su 2. Algoritam je implementirani u *Matlab* programskom paketu i desktop računaru (3.10 GHz procesor; 2 GB RAM) sa *Windows 7* operativnim sistemom.

Nakon faze optimalnog projektovanja tehnoloških procesa [11], sledi faza njihovog terminiranja. Faza terminiranja počinje slučajnim izborom jednog od tri alternativna tehnološka procesa za svaki od delova. Srednja generacija konvergencije 10 haotičnih mapa nakon 10 ponavljanja je prikazana je u tabeli 7. Performanse *cPSO* algoritma su upoređenje sa *GA* i *SA* algoritmom, a eksperimentalni rezultati za sve tri funkcije cilja i stepene poboljšanja su prikazani u tabeli 8, pri čemu su korišćeni tehnološki procesi sa minimalnim proizvodnim vremenaom ( $f_1$ ) i minimalnim troškovima ( $f_2$ ).

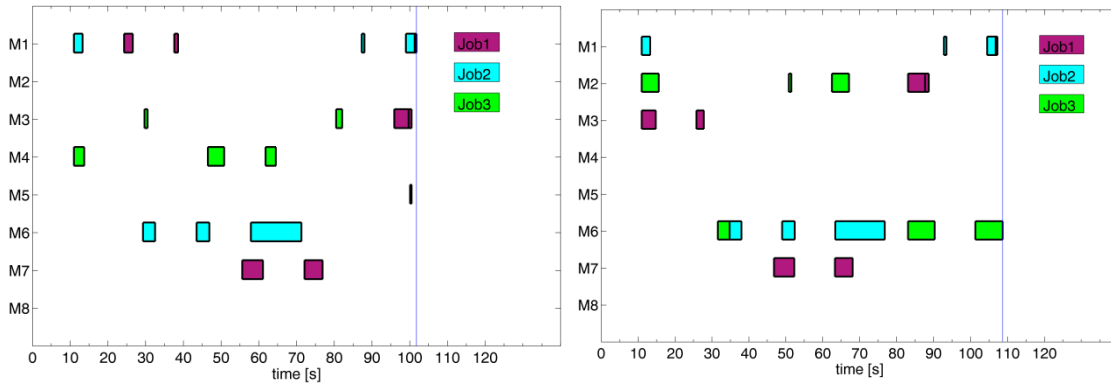
Tabela 5. Vreme transporta između mašina alatki								
mašina	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	4	8	10	12	5	6	14
2	4	0	3	7	11	5	4	6
3	8	3	0	5	7	9	8	4
4	10	7	5	0	4	14	12	6
5	12	11	7	4	0	18	12	10
6	5	5	9	14	18	0	6	8
7	6	4	8	12	12	6	0	3
8	14	6	4	6	10	8	3	0

Tabela 6. Raspoloživi resursi, troškovi i vremenski indeksi						
Mašine			Alati			
Br.	Tip	MCI	Br.	Tip	TCI	
M1	CNC strug	20	T1	stugarski nož 1	12	
M2	Univerzalni strug	10	T2	stugarski nož 2	12	
M3	Produkcioni strug	20	T3	stugarski nož 3	12	
M4	Univerzalna glodalica	30	T4	stugarski nož 4	12	
M5	CNC glodalica	80	T5	stugarski nož 5	15	
M6	CNC glodalica	50	T6	burgija	6	
M7	Bušilica	10	T7	proširivač 1	15	
M8	Koordinatna bušilica	15	T8	proširivač 2	20	
			T9	glodalo 1	20	
			T10	glodalo 2	12	
Troškovi i vremenski indeksi			T11	glodalo 3	30	
MCCI = 80; SCI = 100; TCCI = 20;			T12	glodalo 4	15	
TCTI = 60; SCTI = 50;						

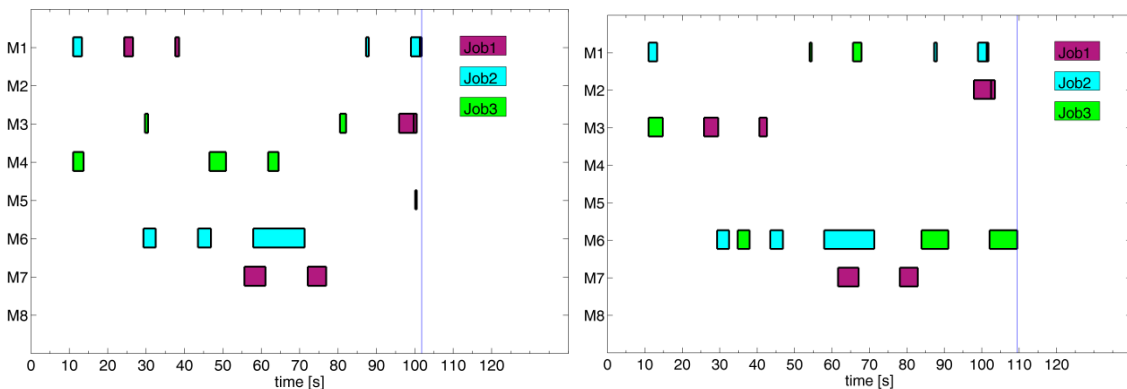
Tabela 7. Srednja generacija konvergencije 10 mapa nakon 10 ponavljanja			
mapa	Planovi terminiranja (funkcije cilja)		
	<i>makespan</i>	<i>machine utilization</i>	<i>mean flow time</i>
Chebyshev	21.0	-	-
Circle	17.5	-	-
Gauss/Mouse	21.1	-	-
Iterative	18.2	-	-
Logistic	24.3	40.3	-
Piecewise	17.1	<b>38.2</b>	-
Sine	<b>15.1</b>	51.0	30.5
Singer	15.9	80.0	35.2
Sinusoidal	20.0	-	38.2
Tent	-	-	-

Tabela 8. Eksperimentalni rezultati dobijeni primenom GA, SA i cPSO algoritma									
tehnološki procesi (fun. cilja)	planovi terminiranja (funkcija cilja)	najbolji rezultati			srednji rezultati			$IR_{max}$ (%)	$IR_{avg}$ (%)
		cPSO	GA	SA	cPSO	GA	SA		
$f_1$	<i>makespan</i>	<b>101.8000</b>	102.800	107.3000	<b>116.1738</b>	116.4989	129.2777	5.13	10.14
	<i>machine utilization</i>	<b>143.5000</b>	145.275	151.5500	<b>163.1626</b>	163.3294	184.8326	5.31	11.72
	<i>mean flow time</i>	<b>96.2667</b>	96.6000	100.1667	<b>106.9170</b>	107.0470	114.2022	3.89	6.38
$f_2$	<i>makespan</i>	<b>108.7000</b>	109.500	109.5000	<b>129.3619</b>	130.4930	133.6116	0.73	3.18
	<i>machine utilization</i>	<b>170.9000</b>	171.000	175.4000	<b>196.7695</b>	200.7952	204.9702	2.57	4.00
	<i>mean flow time</i>	<b>98.7667</b>	100.700	101.8000	<b>114.0945</b>	117.9162	120.0854	2.98	4.99

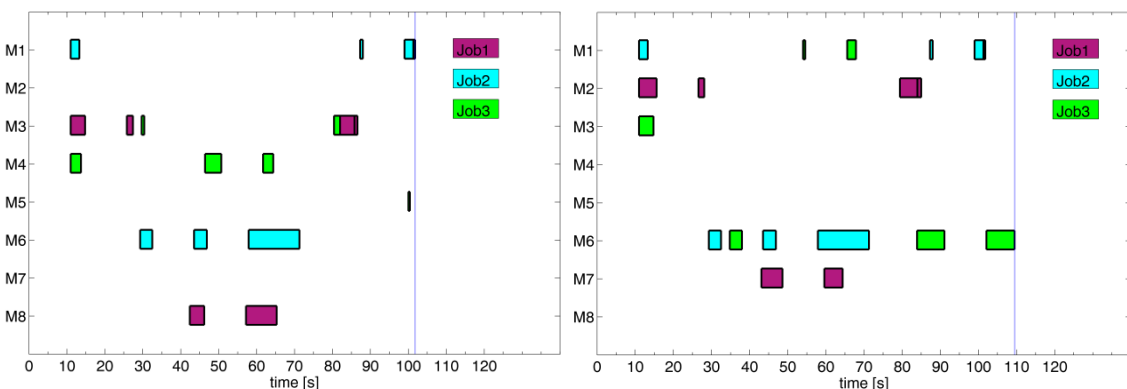
Slike 5, 6 i 7 ilustruju ostvarene eksperimentalne rezultate planova terminiranja predstavljene u formi Gantovih dijagrama.



Slika 5. (a) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_1$  (*makespan* = 101.8); (b) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_2$  (*makespan* = 108.7)



Slika 6. (a) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_1$  (*machine utilization* = 143.5); (b) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_2$  (*machine utilization* = 170.9)



Slika 7. (a) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_1$  (*mean flow time* = 96.2667); (b) Gantov dijagram za eksperiment 4.1 pri  $f_2$  (*mean flow time* = 98.7667)

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan pristup u optimizaciji planova terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa primenom algoritma baziranog na inteligenciji roja i teoriji haosa – *cPSO* algoritam. Za odabrane reprezentativne delove, prikazan je metod predstavljanja tehnoloških procesa pomoću *AND/OR* mreža, predstavljen je matematički model za minimizaciju ukupnog vremena za obradu svih delova čije se terminiranje vrši, maksimizaciju uravnoteženog iskorišćenja mašina alatki i minimizaciju transportnih tokova materijala. Dat je i princip kodiranja i dekodiranja jedinki *cPSO* algoritma. U cilju prevazilaženja nedostataka vezanih za konvergenciju algoritma u ranim fazama optimizacije, haotične mape su implementirane u jednačine *PSO* algoritma. Eksperimentalni rezultati, dobijeni premenom *GA*, *SA* i *cPSO* algoritma, pokazuju da se optimalni planovi terminiranja dobijaju primenom *cPSO* algoritma.

## 8. LITERATURA

- [1] Shao, X., Li, X., Gao, L., Zhang, C., Integration of process planning and scheduling - a modified genetic algorithm-based approach, *Computers & Operations Research*, 36(6), pp. 2082-2096, 2009.
- [2] Li, W.D., McMahon, C.A., A simulated annealing-based optimization approach for integrated process planning and scheduling, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(1), pp. 80-95, 2007.
- [3] Guo, Y.W., Li, W.D., Mileham, A.R., Owen, G.W., Applications of particle swarm optimisation in integrated process planning and scheduling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), pp. 280-288, 2009.
- [4] Guo, Y.W., Li, W.D., Mileham, A.R., Owen, G.W., Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach, *International Journal of Production Research*, 47(14), pp. 3775-3796, 2009.
- [5] Wong, T.N., Leung, C.W., Mak, K.L., Fung, R.Y.K., Integrated process planning and scheduling/rescheduling - an agent-based approach, *International Journal of Production Research*, 44(18-19), pp. 3627-3655, 2006.
- [6] Li, X., Zhang, C., Gao, L., Li, W., Shao, X., An agent-based approach for integrated process planning and scheduling, *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1256-1264, 2010.
- [7] Wong, T.N., Leung, C.W., Mak, K.L., Fung, R.Y.K., An agent-based negotiation approach to integrate process planning and scheduling, *International journal of production research*, 44(7), 1331-1351, 2006.
- [8] Li, X., Gao, L., Li, W., Application of game theory based hybrid algorithm for multi-objective integrated process planning and scheduling, *Expert Systems with Applications*, 39(1), pp. 288-297, 2012.
- [9] Baykasoğlu, A., Özbakır, L., A grammatical optimization approach for integrated process planning and scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(2), pp. 211-221, 2009.
- [10] Lian, K., Zhang, C., Gao, L., Li, X., Integrated process planning and scheduling using an imperialist competitive algorithm, *International Journal of Production Research*, 50(15), pp. 4326-4343, 2012.
- [11] Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015. DOI 10.1007/s00170-015-7991-4
- [12] Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., Miljković, Z., Chaotic fruit fly optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 89, 446-458, 2015.

**Petrović, M., Petronijević, J., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z., Babić, B.**

### **PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM AND CHAOS THEORY FOR INTEGRATION OF PROCESS PLANNING AND SCHEDULING**

**Abstract:** *This paper presents an approach for integration of process planning and scheduling based on the particle swarm optimization algorithm and chaos theory (cPSO). Besides scheduling plans representation and particle encoding/decoding scheme, mathematical model for the minimization of makespan, maximization of balanced level of machine utilization and minimization of mean flow time was presented. Also, we proposed implementation of chaotic maps in PSO algorithm in order to prevent algorithm from converging prematurely. Experimental verification of the proposed algorithm was done through the optimal scheduling of real parts.*

**Key words:** *integrated process planning and scheduling, particle swarm intelligence, chaos theory, optimization*





Pjević, M.<sup>1)</sup>, Tanović, Lj.<sup>2)</sup>, Mladenović, G.<sup>3)</sup>

## UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODİRANJA KOD MIKROREZANJA KRTIH MATERIJALA<sup>4)</sup>

### Rezime

*Poznato je da se kod mikrorezanja krtih materijala javlja režim plastičnog deformisanja, kao i režim krtog loma. Pored geometrije alata, strukture materijala i režima obrade, na kritičnu dubinu prodiranja, koja predstavlja granicu između ova dva režima, utiče i putanja alata. U ovom radu prikazan je uticaj putanje alata na vrednost kritične dubine prodiranja. Pored pravolinijske i lučne putanje alata, predstavljena je i eliptična putanja alata, kao i sistem držača alata koji obezbeđuju eliptično kretanje alata.*

**Ključne reči:** mikrorezanje, krti materijali, kritična dubina prodiranja, putanja alata

### 1. UVOD

Ukoliko se napravi osvrt na razvoj industrije u proteklih sto godina, može se zaključiti da je fokus bio na povećanju proizvodnosti, sa tendencijom smanjenja cena proizvoda, ali posledičnom povećanju konkurentnosti na tržištu. Sa druge strane, prezasićenost tržišta dovela je do uspostavljanja novih proizvodno/tehnoloških zahteva. Pored toga što se insistira da se proizvod pravi u što većoj seriji, u što kraćem vremenskom intervalu, zadaju se i dodatni uslovi. Jedan on njih je da sam proizvod, kao i način njegove proizvodnje bude energetski efikasniji od prethodne generacije. Minijaturizacijom proizvoda postiže se veća energetska efikasnost, međutim javljaju se i nove prepreke. Da bi se napravili minijaturizovani proizvodi, neophodno je preći iz domena makro u domen mikro obrade. Fenomeni i zakoni koji su nekada važili kod makrorezanja, prelaskom na mikrorezanje više ne važe. Dodatno, ukoliko je reč o mikrorezanju krtih materijala, može se reći da proces stvaranja strugotine kod mikrorezanja nema ni najmanje podudarnosti sa makrorezanjem. Dok se kod makrorezanja za proces stvaranja strugotine vezuju smičuće napone duž ravni smicanja, kod mikrorezanja strugotina nastaje odvaljivanjem materijala u vidu odlomaka, što je posledica razvoja prslina unitar materijala.

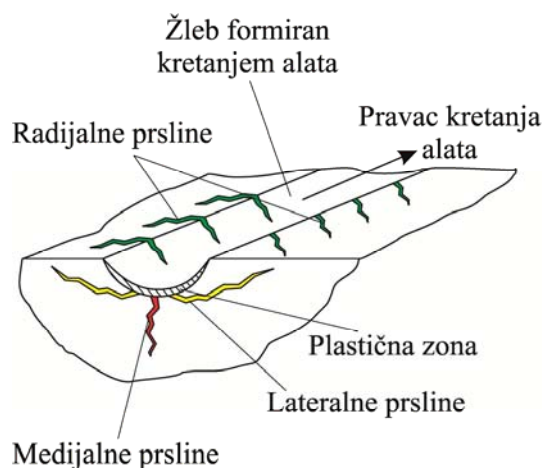
Pre nego što nastane razaranje materijala, na malim dubinama koje su manje od neke kritične vrednosti nije primetno odvajanje materijala. U ovoj fazi, obrada se vrši plastičnim deformisanjem gde su prisutne povratne elastične i plastične deformacije. Povećanjem dubine rezanja iznad kritične vrednosti prelazi se iz režima plastičnog deformisanja u režim krtog loma. Strugotina koja ovde nastaje nije kontinualna. Materijal se odvaja ispred alata, a manjim delom sa njegove bočne strane. Pored ovoga, prisutno je i drobljenje materijala ispod i ispred samog alata. Za odvajanje materijala zaslužne su lateralne prslinae koje imaju trend rasta ka površini materijala (slika 1). Pored sistema lateralnih prslina, u zoni rezanja su prisutne i radijalne i medijalne prslinae sa tendencijom rasta od bočnih strana alata na samoj obrađivanoj površini, odnosno unutar materijala normalno na obrađivanu površinu. Ove prslinae su jednim delom prisutne i u zoni plastičnog deformisanja gde nije prisutno odvajanje materijala. Medijalne prslinae se povezuju sa kvalitetom obrađene površine i sa integritetom konstrukcije formiranog dela.

<sup>1)</sup> Asistent Miloš Pjević, master inž. maš., (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

<sup>2)</sup> Prof. dr Ljubodrag Tanović, dipl. inž. maš., (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

<sup>3)</sup> Asistent dr Goran Mladenović, dipl. inž. maš., (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

<sup>4)</sup> U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja koji su realizovani u okviru projekta TR 35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansiraju Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.



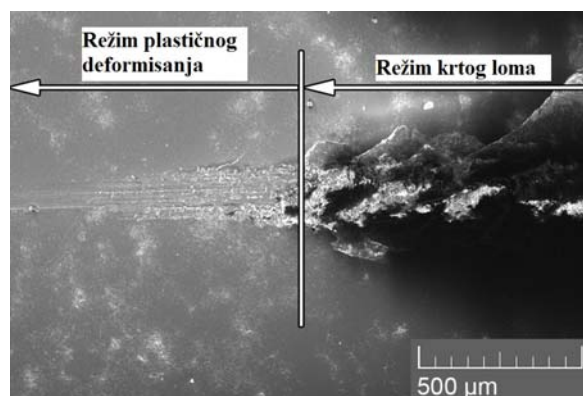
*Slika 1. Razvoj sistema prslina unutar obrađivnoga materijala.*

Na kritičnu dubinu prodiranja, koja predstavlja granicu između režima plastičnog deformisanja i režima krtog loma, utiče vrsta (svojstvo) materijala koji se obrađuje, režim i uslovi obrade, kao i geometrija alata. U prethodnim istraživanjima koja su sprovedena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Begoradu, pokazano je da usled izrazitog radijusa vrha alata koji se više ne može zanemarivati, grudni ugao je izrazito negativan [1]. Veličina, orijentacija i svojstva zrna unutar materijala takođe imaju dominantan uticaj na vrednost kritične dubine. Na njenu vrednost dosta može uticati i već postojeće prsline unutar materijala.

Pred istraživače se postavlja pitanje potrebe definisanja kritične dubine. Posmatrano sa aspekta kvaliteta obrađene površine, u plastičnom režimu prisutan je znatno manji procentualni udeo prslina, nego u režimu krtog loma. Na ovaj način se obezbeđuje daleko bolji kvalitet obrađene površine, gde se u nekim slučajevima može eliminisati potreba za naknadnim obradama (poliranjem, ...). Takođe, u literaturnim izvorima [2,3], utvrđeno je da je za uklanjanje jedinične zapremine materijala potrebno daleko više energije u režimu plastičnog deformisanja, nego u režimu krtog loma. Ovo predstavlja jednu kontradiktornost, s obzirom da je obrađena zapremina veća u režimu krtog loma. Međutim, kada se izvrši analiza procesa, može se doneti zaključak da je ovo posledica nekontrolisanog rasta prslina unutar materijala koje olakšavaju uklanjanje materijala pri obradi na većim dubinama od kritične vrednosti. Ukoliko je u interesu da se postigne što je moguće veća proizvodnost, potrebno je i znati koje su to kritične dubine na kojima se javlja duktilni prelaz.

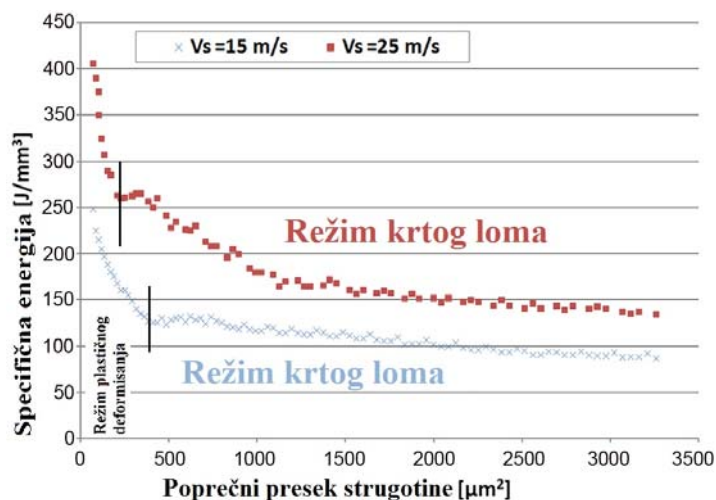
## 2. ODREĐIVANJE KRITIČNE DUBINE PRODIRANJA

Potreba za detaljnim poznavanjem vrednosti kritične dubine prodiranja alata u ispitivani materijal, povukla je za sobom pitanje na koji način je odrediti. Jedan od načina određivanja kritične dubine prodiranja je pomoću utiskivanja alata (utiskivači tipa Rokvel, Vickers i Brinell) normalno u ispitivani materijal na određenu dubinu, a zatim posmatranjem utisnutog traga uz pomoć mikroskopa, kako bi se utvrdilo da li su prisutne prsline na generisanoj površini. Ovaj princip nije u potpunosti merodavan jer je prisutno dejstvo samo normalne sile. Dodavanjem još jednog kretanja čime se formira dejstvo i tangencijalne sile, dobija se verodostojnija slika o dva režima koja su prisutna. Primer traga u kome se jasno vidi prisustvo plastičnog režima i režima krtog loma prikazan je na slici 2.



*Slika 2. Prikaz plastičnog režima i krtog režima rezanja [2].*

U radu [2], objašnjava se postupak kako da se pomoću geometrije dođe do kritične dubine prodiranja u slučaju kada se dijamantski alat nalazi na obrtnom disku. Takođe, kao i što je pomenuto, na dijagramu specifične energije prodiranja (slika 3), jasno se može uočiti granica između ova dva režima.



Slika 3. Specifična energija rezanja u funkciji od dubine rezanja [2].

### 3. UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODİRANJA

Neke od korišćenih putanja alata u dosadašnjim istraživanjima su linearne, gde se obrada vrši rendisanjem. Na drugoj strani, brušenje karakteriše kretanje alata po kružnici. Osnovna razlika ova dva tipa kretanja alata jeste u brzini rezanja koja se ostvaruje. Kod linearne putanje alata, brzina rezanja se kreće do 10 m/min [4], dok kod kretanja alata po kružnici može ići i preko 30 m/sek.

U prethodnim istraživanjima koja su sprovedena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, dokazano je da sa povećanjem brzine rezanja, vrednost kritične dubine prodiranja se smanjuje (Slika 3).

U oba ova slučaja, alat je u stalnom kontaktu sa obratkom. U poslednje vreme, istraživači su stavili akcenat na prekidno rezanje, obezbeđujući na taj način uslove rezanja pri kojima alat nije u stalnom kontaktu sa obratkom, takozvana obrada potpomognuta vibracijama. Iz ovoga su proistekla dva tipa rezanja gde alat pored glavnog kretanja ostvaruje još i vibraciono [5]. Prvo je 1D VAM (“Vibration – Assisted Machining”), a drugo je 2D VAM. Ovakav tip obrade ne samo da obezbeđuje manje habanje alata, već dovodi do povećanja vrednosti kritične dubine prodiranja.

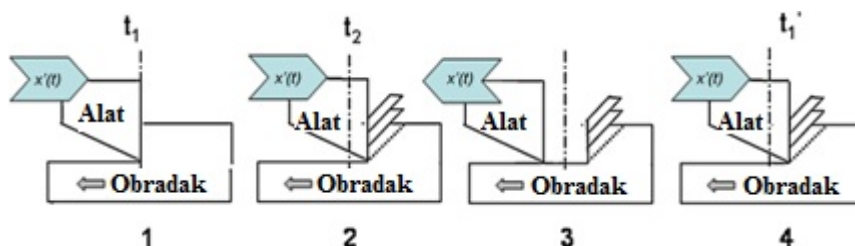
U prvom slučaju, alat pored glavnog kretanja ostvaruje i linearno oscilatorno kretanje (slika 4). Kako bi se ostvarilo prekidno kretanje alata, relativna pozicija i brzina alata u odnosu na obradak mora biti:

$$x(t) = A \sin(\omega t) + Vt, \quad (1)$$

$$x'(t) = \omega A \cos(\omega t) + V, \quad (2)$$

gde je  $t$  vreme,  $A$  amplituda oscilovanja alata i  $f$  frekvencija oscilovanja. Da bi se ostvarilo prekidno rezanje, iz jednačine (2), može se izvesti kritična brzina koju alat mora da ostvari:

$$V_{krit} = 2\pi f \cdot A. \quad (3)$$



Slika 4. 1D VAM [5].

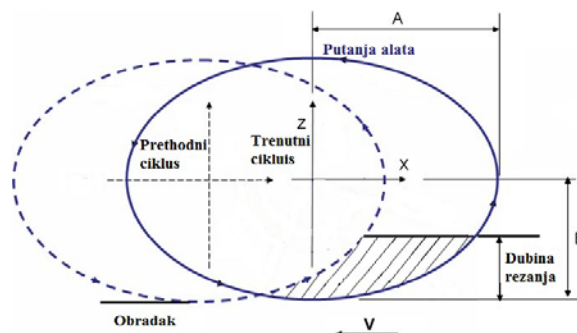
Bez obzira na brzinu kretanja alata, grudni ugao je uvek konstantan. Ovim vidom obrade, gde alat ostvaruje pravolinijsko oscilatorno kretanje, ostvaruje se duži radni vek alata. Ovo je posledica manjih sila koje se javljanju u zoni rezanja.

Kod 2D vibraciono potpomognute obrade, alat ostvaruje oscilatorno kretanje po elipsi. Ovo se ostvaruje dodavanjem vibracija po još jednoj ravni. Sumiranjem vibracija u dva pravca, nastaje eliprično kretanje alata. Relativne brzine alata u dva pravca u odnosu na obradak mogu se predstaviti kao:

$$x'(t) = \omega A \cos(\omega t) + V, \quad (4)$$

$$z'(t) = -\omega B \cos(\omega t), \quad (5)$$

gde  $A$  i  $B$  predstavljaju poluprečnike ose elipse, a ostali parametri su isti kao i kod 1D obrade.



Slika 5. 2D VAM [5].

Pravac kretanja alata više nije konstantan i može se predstaviti izrazom:

$$\chi(t) = \arctan\left(\frac{-\omega B \cos(\omega t)}{\omega A \sin(\omega t) + V}\right), \quad (6)$$

Što, takođe, dovodi do promene vrednosti grudnog ugla tokom procesa rezanja:

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \chi(t). \quad (7)$$

Promena efektivne vrednosti grudnog ugla, usled složenog kretanja alata, može se objasniti smanjenjem preseka strugotine. Sa smanjenjem njegove vrednosti, postiže se povećanje pritisnih napona, koji utiču na smanjenje faktora intenziteta napona  $K_I$ . Njegovim smanjenjem, smanjuje se verovatnoća nastanka prslina u zoni rezanja (razlog  $K_I < K_{IC}$ ), a povećava se udeo dislokacija, što dovodi do povećanja kritične dubine proditanja.

1D vibraciono potpomognuta obrada može se koristiti, kako kod obrade sa dijamantskim zrnem gde se zahteva izuzetna mala hrapavost obrađene površine, tako i kod konvencionalne obrade gde dubine rezanja idu i do 1 mm. 2D vibraciono potpomognuta obrada može se koristiti samo u slučajevima kada dubina rezanja ne prelazi 50  $\mu\text{m}$ .

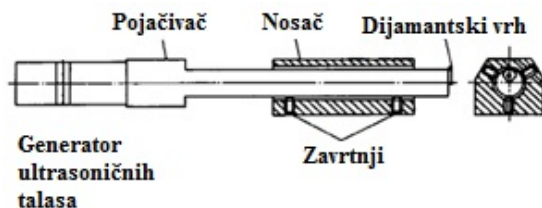
#### 4. TIPOVI DRŽAČA ALATA ZA MIKROREZANJE VIBRACIONIM KRETANJEM ALATA

Vibraciono kretanje alata nije moguće ostvariti interpolacijom osa mašine, već je neophodno imati dodatni mehanizam. U ovom slučaju to je držač alata, koji omogućava takvo kretanje. U zavisnosti od tipa putanje alata koji taj mehanizam obezbeđuje, vibracione mehanizme za vibraciono mikrorezanje delimo na 1D VAM sisteme i na 2D VAM sisteme.

##### 4.1 1D VAM sistemi

1D VAM sistemi se koriste kod mikrorezanja potpomognutog vibracijama u slučaju kada se zahteva oscilovanje alata po lineranoj putanji, kao što je to prikazano na slici 4. On se obično sastoji od generatora

ultrasoničnih talasa, sonde u obliku trube koja služi da pojača vibracije, i osnove na kojoj se sve to nalazi. Alat se postavlja na kraj pojačivača talasa. Jedan takav sistem razvijen je od strane T. Moriwaki-a i E. Shamoto-a [6], a prikazan je na slici 6. Frekvencija oscilovanja ovakvog tipa sistema kreće se u granicama od 20 do 40 kHz, dok amplituda oscilovanja obično iznosi do 20  $\mu\text{m}$ . Ono što je bitno naglasiti je da ovakav tip vibracionog sistema nije rezonantan, odnosno krajnje kretanje vrha alata nije posledica poklapanja više modova oscilovanja dela senzora.

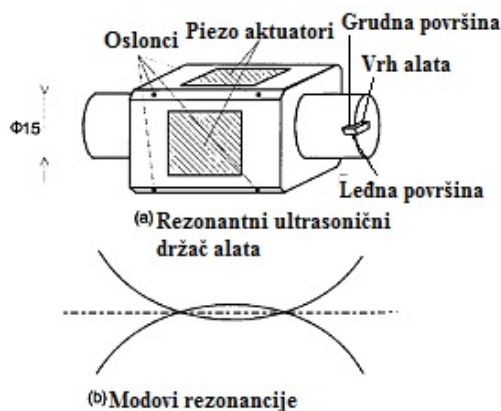


Slika 6. Šematski prikaz 1D VAM sistema [6].

#### 4.1 2D VAM sistemi

Kako bi se ostvarilo eliptično vibraciono kretanje alata, neophodno je da držač alata ima kretanje u dva pravca. Odatle su i proistekla dva tipa 2D VAM vibracionih sistema.

U prve spadaju rezonantni sistemi. Vibraciono kretanje vrha alata kod ovakvih sistema ostvaruje se kada se poklopi više modova oscilovanja alata. Obično se kao pogonski sistem koriste piezo aktuatori. Jedan ovakav sistem razvijen je ponovo od strane T. Moriwaki-a i E. Shamoto-a [7], slika 7. Kao i kod prethodno pomenutog 1D VAM sistema, frekvencija oscilovanja se kreće u rasponu od 20 do 40 kHz, dok operativna vrednost amplituda u dva pravca može biti i duplo veća od 1D VAM sistema. Ovo je samo jedan tip ovakvog sistema, što znači da se u literaturnim izvorima mogu naći i drugačije konstrukcije 2D rezonantnih VAM sistema.



Slika 7. Šematski prikaz 2D rezonantnog VAM sistema [7].

Za razliku od 2D VAM sistema, na Pusan Univerzitetu razvijen je nerezonantni 2D VAM sistem [8] (slika 8). Ovakav sistem se pogoni pomoći piezo aktuatora koji se kontrakuju i ekspanduju. Specijalnom konstrikcijom tela držača, omogućeno je eliptično kretanje vrha alata koje je posledica kretanja piezo aktuatora. Bitno je napomenuti da frekvencija oscilovanja aktuatora mora biti manja od prvog moda oscilovanja, u suprotnom, može doći do rezonantnog oscilovanja cele konstrukcije, potencijalno prouzrokujući neželjenu putanju alata. Frekvencija oscilovanja se kreće oko 1 kHz, dok je vrednost amplitude oko 5  $\mu\text{m}$ . Od strane drugih istraživača razvijeni su slični sistemi, koji rade na većoj frekvenciji oscilovanja.

Prethodno opisanim složenim oscilatornim kretanjem alata, može se postići povećanje kritične vrednosti prodiranja alata, ali u slučaju da se brzine rezanja kreću u opsegu do 1 m/min. Ovo je posledica frekvencije oscilovanja vrha alata. Da bi se postiglo vibraciono rezanje gde se brzine kreću do 30 m/sek, neophodno je razviti novi sistem generisanja vibracija čije će brzine oscilovanja daleko prelaziti dosadašnja ograničenja. U skladu sa navedenim, otvara se novi problem koji se prvenstveno odnosi na mernu opremu. Odnosno, postojanje mernog sistema koji može da evidentira sve promene koje nastaju u malom vremenskom intervalu.





Slika 8. Šematski prikaz 2D ne-rezonantnog VAM sistema [8].

## 5. ZAKLJUČAK

1. Složenim oscilatornim kretanjem alata, povećava se vek trajanja alata usled redukcije vrednosti sila u zoni rezanja.
2. U slučaju da se koristi 2D VAM sistem gde alat ostvaruje eliptičnu putanju relativno na obradak, postiže se promena vrednosti grudnog ugla, koja može dodatno uticati na vrednost kritične dubine prodiranja, usled smanjenja faktora intenziteta napona  $K_I$ .
3. U zavisnosti od tipa pogona i putanje alata, postoji više tipova VAM sistema (1D, 2D – rezonantni i nerezonantni). U ovom trenutku svi oni postavljaju ograničenje da brzina rezanja ne prelazi 1 m/min.

## 6. LITERATURA

- [1] Pjević, M., Tanović, Lj., "Pregled stanja istraživanja u domenu mikro-rezanja krutih materijala", XIII Međunarodna konferencija Održavanje i proizvodni inženjering "KODIP - 2015", Zbornik radova, ISBN 978-9940-669-01-0, s.21-s.26, Inženjerska akademija Crne Gore, Budva, 24-28 juna, 2015.
- [2] Mladenovic, G., et al. "Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Oxide Ceramic CM332 Grinding." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137.3 (2015): 034502.
- [3] Tanovic, L. J., et al. "Experimental investigation of microcutting mechanisms in marble grinding." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 131.6 (2009): 064507.
- [4] Nath, C., M. Rahman, and K. S. Neo. "A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide." *Journal of Materials Processing Technology* 209.9 (2009): 4459-4464.
- [5] Brehl, D. E., and T. A. Dow. "Review of vibration-assisted machining." *Precision engineering* 32.3 (2008): 153-172.
- [6] Moriwaki, Toshimichi, and Eiji Shamoto. "Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 40.1 (1991): 559-562.
- [7] Moriwaki, Toshimichi, and Eiji Shamoto. "Ultrasonic elliptical vibration cutting." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 44.1 (1995): 31-34.
- [8] Ahn, Jung-Hwan, Han-Seok Lim, and Seong-Min Son. "Improvement of micro-machining accuracy by 2-dimensional vibration cutting." *Proc ASPE*. Vol. 20. 1999.

Pjević, M., Tanović, Lj., Mladenović, G.

### INFLUENCE OF THE TOOL MOTION ON THE UNDEFORMED CHIP THICKNESS WHEN PERFORMING MICRO CUTTING BRITTLE MATERIALS

**Abstract:** It is well known that during micro cutting brittle materials, there is two types of regimes. One where is dominant plastic deformation, and other where chip is formed due to crack propagation. Along the tool geometri, structure of material and cutting regimes, undeformed chip thickness depends on tool path motion. This paper presents how type of tool's path motion effects on value of undeformed chip thickness. Moreover, beside straight and arched tool paths, it is shown elliptical tool path motion, and also tool holder systems that provides such motion, that is used by researchers.

**Key words:** micro cutting, brittle materials, undeformed chip thickness, tool path motion



Slavković, N., Milutinović, D., Živanović, S. <sup>1)</sup>

## METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA IZAZVANIH SILAMA REZANJE PRI OBRADI ROBOTIMA <sup>2)</sup>

### Rezime

*U ovom radu je prikazan deo rezultata istraživanja u oblasti razvoja rekonfigurabilnih obradnih sistema na bazi robota. U ovom radu je predstavljen razvijeni metod kompenzacije grešaka nastalih pod dejstvom sila rezanja pri obradi robotima usled statičke popustljivosti robota. Metod je verifikovan kroz nekoliko eksperimenata konturnih obrada, sa i bez kompenzacije grešaka, na test delovima od aluminijuma.*

**Ključne reči:** višeosna obrada robotima, popustljivost robota, kompenzacija grešaka.

### 1. UVOD

U poslednjoj deceniji se intenzivno radi na istraživanju i razvoju robota za višeosnu obradu glodanjem prvenstveno složenijih delova, većih dimenzija od mekših materijala i niže klase tačnosti. Primena industrijskih robota, za ovu klasu zadataka, je danas uveliko prepoznata kao alternativa relativno skupim 5-osnim mašinama alatkama [1-4]. Intenzivna istraživanja, koja se danas sprovode u svetu, se odnose na rešavanje dve grupe problema koje predstavljaju glavne ograničavajuće faktore za širu primenu robota u obradi. To su kompleksnost programiranja [5,6] i nezadovoljavajuća krutost serijske strukture robota [1-4,7].

Istraživanja u oblasti razvoja rekonfigurabilnih obradnih sistema na bazi robota, na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu, su obuhvatila dve grupe problema:

- razvoj sistema upravljanja i programiranja robota u G-kodu i
- povećanje tačnosti obrade kroz identifikaciju, modeliranje i kompenzaciju grešaka usled statičke popustljivosti robota.

Za razvoj rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota i metoda kompenzacije grešaka pri obradi robotima, u okviru ovih istraživanja, korišćen je raspoloživi 6-osni robot *LOLA50* vertikalne zglobove konfiguracije domaće proizvodnje nosivosti 50kg. Blokiranjem šeste ose emuliran je 5-osni specijalizovani robot za obradu koji je dalje posmatran kao 5-osna vertikalna glodalica konfiguracije ( $X, Y, Z, A, B$ ). Robot je opremljen motornim vretenom sa maksimalnim brojem obrtaja od 18000 min<sup>-1</sup> [8,9].

Kako se zbog popustljivosti robota pri obradi velikim brzinama javljaju statičke greške i greške izazvane oscilacijama niskih i visokih frekvenci [10], to je njihova identifikacija i kompenzacija od odlučujuće važnosti za uspešnu primenu robota u obradi. Polazeći od činjenice da je pri obradi velikim brzinama statička sila, odnosno srednja vrednost otpora rezanja prema [11,12], u pravcu normale na obrađenu površinu pri glodanju višestruko veća od amplitude dinamičke komponente otpora rezanja, to se njome izazvani pomeraji, odnosno greške, direktno odražavaju na tačnost obrade.

U užem smislu, istraživanja u okviru razvoja metoda kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja pri obradi robotima su obuhvatila [13-16]:

- modeliranje popustljivosti robota u prostoru spoljašnjih koordinata (Dekartovom prostoru) na bazi rezultujućih popustljivosti zglobova sa mogućnošću analize njihovih pojedinačnih uticaja na popustljivost vrha alata u radnom prostoru,
- eksperimentalno analitičku identifikaciju rezultujuće popustljivosti zglobova kao neophodnog preduslova za modeliranje popustljivosti robota i

<sup>1)</sup> Doc. dr Nikola Slavković, ([nslavkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nslavkovic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Dragan Milutinović, ([dmilutinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Saša Živanović, ([szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

<sup>2)</sup> U ovom radu se saopštavaju rezultati istraživanja koji su realizovani u okviru projekta TR35022 „Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.



- razvoj metoda kompenzacije grešaka položaja vrha alata usled statičke popustljivosti robota pri obradi.

## 2. MODELIRANJE POPUSTLJIVOSTI ROBOTA U PROSTORU SPOLJAŠNJIH KOORDINATA

Ukupna krutost robota zavisi od krutosti segmenata, krutosti prenosnika, elemenata konstrukcije zgloba, aktuatora i upravljanja. S obzirom da je krutost segmenata današnjih industrijskih robota dovoljno velika, to se za glavne izvore popustljivosti smatraju prenosnici, elementi konstrukcije zgloba (vratila i ležajevi) i aktuatori sa svojim servo upravljanjem. Njihov zbirni uticaj se naziva krutošću zgloba koja se može modelirati kao krutost opruge  $k$ . Zavisno od toga da li je zglob obrtni ili translatorni krutost  $k$  može biti torziona (ugaona)  $[Nm/rad]$  ili linearna  $[N/m]$ . Za dalja razmatranja se uvodi i pojam popustljivosti zgloba,  $c = 1/k$ , koja predstavlja recipročnu vrednost krutosti zgloba. S obzirom da na statičku popustljivost robota najveći uticaj imaju rezultujuće popustljivosti zglobova, razvijen je model statičke popustljivosti robota primenom principa virtuelnog rada i Jakobijan matrice [13,14] dat jednačinom

$$C_X(\theta) = J(\theta) \cdot C_\theta \cdot J^T(\theta) \quad (1)$$

gde  $C_X(\theta)$  predstavlja matricu popustljivosti vrha robota u spoljašnjim (Dekartovim) koordinatama,  $J(\theta)$  Jakobijan matricu robota i  $C_\theta$  matricu statičke popustljivosti zglobova robota. Dijagonalni članovi matrice  $C_X(\theta)$  predstavljaju direktne, dok nedijagonalni članovi ove matrice predstavljaju indirektnu popustljivost vrha robota. S obzirom da je  $C_\theta$  dijagonalna matrica popustljivosti zglobova, matrica statičke popustljivosti robota u Dekartovim koordinatama  $C_X(\theta)$ , jednačina (1), se može posmatrati kao suma matrica popustljivosti koje potiču od svakog pojedinačnog zgloba, odnosno

$$C_X(\theta) = C_{X1}(C_{\theta1}) + \dots + C_{Xn}(C_{\theta n}) = \sum_{i=1}^n C_{Xi}(C_{\theta i}), n = 1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

gde  $C_{Xi}(C_{\theta i})$  predstavlja matricni sabirak matrice statičke popustljivosti robota,  $C_X(\theta)$ , koji potiče od popustljivosti  $i$ -tog zgloba,  $C_{\theta i}$ . Jednačina (2) daje uvid u uticaj statičke popustljivosti svakog pojedinačnog zgloba na statičku popustljivost robota u Dekartovom prostoru. Ovaj pristup može biti koristan za proizvođače robota u fazi projektovanja odnosno ispitivanja prototipskih verzija robota kako bi se postigla željena krutost odnosno popustljivost zglobova robota. Takođe, ovaj pristup omogućava i analitičko eksperimentalnu identifikaciju popustljivosti zglobova.

## 3. EKSPERIMENTALNO ANALITIČKA IDENTIFIKACIJA REZULTUJUĆE POPUSTLJIVOSTI ZGLOBOVA

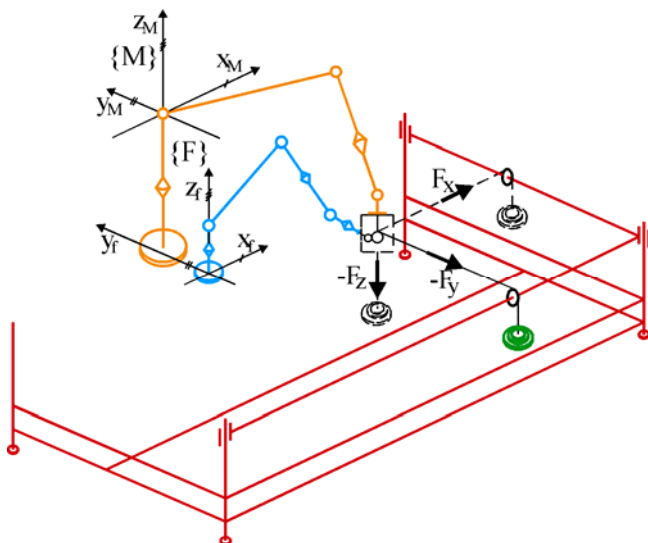
Eksperimentalno analitički pristup identifikacije rezultujuće popustljivosti zglobova, prema [15,16], obuhvata :

1. merenje pomeraja vrha robota  $\delta \mathbf{x} = [\delta_x \quad \delta_y \quad \delta_z]^T$  izazvanih statičkom silom  $\mathbf{F} = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$  u sva tri ortogonalna pravca,
2. izračunavanje direktnih i indirektnih popustljivosti robota u Dekartovom prostoru preko izmerenih pomeraja  $\delta \mathbf{x}$  prema jednačini
 
$$\begin{aligned} C_{xx} &= \delta x(F_x)/F_x & C_{xy} &= \delta x(F_y)/F_y & C_{xz} &= \delta x(F_z)/F_z \\ C_{yx} &= \delta y(F_x)/F_x & C_{yy} &= \delta y(F_y)/F_y & C_{yz} &= \delta y(F_z)/F_z \\ C_{zx} &= \delta z(F_x)/F_x & C_{zy} &= \delta z(F_y)/F_y & C_{zz} &= \delta z(F_z)/F_z \end{aligned} \quad (3)$$
3. formiranje sistema jednačina pomoću izračunatih direktnih i indirektnih popustljivosti iz prethodnog koraka i odgovarajućih elemenata matrice popustljivosti  $C_X(\theta)$  iz jednačine (2) u kojima figurišu tražene popustljivosti zglobova,  $C_{\theta i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ,
4. identifikaciju popustljivosti zglobova  $C_{\theta i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ , rešavanjem formiranog sistema jednačina i
5. verifikaciju identifikovanih popustljivosti zglobova robota.

### 3.1 Merenje pomeraja vrha robota

Pomeraji vrha robota su mereni u šest ravni od ravni  $z_M = -400mm$  do ravni  $z_M = 100mm$ . U svakoj

ravni je određeno 15 mernih tačaka. Ovo znači da je merenje vršeno u 90 tačaka u usvojenom radnom prostoru. Pri merenju pomeraja u svih 90 tačaka alat je bio upravan na ravan  $x_M y_M$ , odnosno  $A = 0^\circ$  i  $B = 0^\circ$ . Zamisao izvođenja eksperimenta merenja pomeraja vrha robota je šematski pokazana na slici 1. Primeri merenja pomeraja vrha robota u sva tri Dekartova pravca izazvanih statičkom silom su pokazani na slici 2.



Slika 1. Šematski prikaz eksperimenta merenja pomeraja vrha robota



Slika 2. Merenje pomeraja vrha robota u sva tri Dekartova pravca

### 3.2 Izračunavanje direktnih i indirektnih popustljivosti robota u Dekartovom prostoru i formiranje sistema jednačina

Na osnovu izmerenih pomeraja i jednačine (3) su izračunate direktne i indirektne popustljivosti vrha robota u svih 90 tačaka raspoređenih u usvojenom delu radnog prostora, a potom je formiran sistem jednačina [15,16]. Na osnovu ovako eksperimentalno analitički određenih direktnih i indirektnih popustljivosti robota se, razvijanjem jednačina (2), formira sistem od 9 jednačina sa pet nepoznatih  $C_{\theta_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$  za svaku tačku merenja u radnom prostoru. Kompletan formirani sistem se sastoji od 810 jednačina iz kojih se identifikuju popustljivosti zglobova  $C_{\theta_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ . Ovako izveden sistem jednačina je preodređen. S obzirom da sistem jednačina pokriva celokupan usvojeni radni prostor, identifikacija popustljivosti zglobova na ovaj način omogućava adekvatno određivanje popustljivosti zglobova u Dekartovom prostoru.

### 3.3 Identifikacija popustljivosti zglobova

Iz ovako izvedenog sistema jednačina popustljivosti zglobova robota su identifikovane koristeći Matlab funkciju *lsqcurvefit*. Funkcija *lsqcurvefit* rešava problem nelinearnog fitovanja krivih (fitovanja podataka) metodom najmanjih kvadrata [13,15]. Izračunate popustljivosti zglobova su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Identifikovane vrednosti popustljivosti zglobova robota

Zglob $i$	1	2	3	4	5
Popustljivost $C_{\theta_i} [\text{rad/Nm}] \cdot 10^{-7}$	9.03	11.17	14.74	27.65	97.58

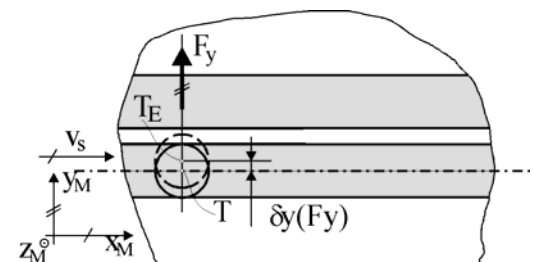
### 3.4 Verifikacija identifikovanih popustljivosti zglobova robota

Za verifikaciju identifikovanih popustljivosti zglobova, odnosno kompletno postavljenog modela popustljivosti robota, urađeni su eksperimenti izrade žljeba u aluminijumu [16]. Cilj eksperimenata je bio da se pri izradi žljeba izmeri statička sila koja deluje na alat i na osnovu izmerene sile i identifikovanih popustljivosti zglobova izračuna pomeraj vrha robota, odnosno alata, koji bi se kasnije uporedio sa izmerenom greškom izrade na žljebu. Kompletna instalacija za merenje sile i akviziciju podataka pokazana

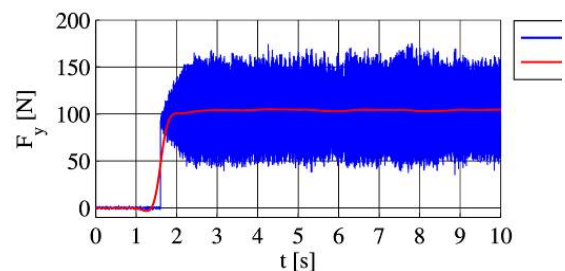
je na slici 3. Jedan od eksperimenata je bio takav da je programirana linearna putanja alata bila u ravni  $z_M = 0mm$  dok se alat kretao u pozitivnom  $x_M$  pravcu pri konstantnoj  $y_M$  koordinati ( $y_M = -1300mm$ ). Pri izvođenju eksperimenta merena je sila u pravcu upravnom na pravac kretanja, odnosno sila  $F_y$ , slika 4. Na slici 5 je prikazana izmerena sila u  $y_M$  pravcu, odnosno pravcu normalnom na pravac pomoćnog kretanja alata. Pri merenju je signal filtriran sa frekvencijom od  $f_c = 50Hz$ . Kao što se može videti sa slike 5 srednja vrednost merene sile, kao statičke sile, je oko  $F_{ySR} = 100N$ . Nakon merenja sile rezanja u pravcu upravnom na pravac kretanja, kao primer, je izračunat pomeraj vrha robota u tački  $x_M = 0mm$ ,  $y_M = -1300mm$  i  $z_M = 0mm$ , a na osnovu identifikovanih popustljivosti zglobova datih u tabeli 1. Izračunata vrednost ovog pomeraja je  $0.257mm$ . Žljeb dobijen obradom je pokazan na slici 6 sa koje se može videti da su greške obrade normalne na pravac pomoćnog kretanja duž putanje alata približno oko  $0.3mm$ . Ove greške su određene pomoću mikroskopske kamere *DigiMicro 2.0 Scale* rezolucije  $2Mpix$  i uvećanja do 200 puta. Na osnovu ovog jednostavnog eksperimenta se može zaključiti da su izračunati pomeraji na osnovu izmerene sile rezanja i identifikovanih popustljivosti robota približno jednaki izmerenim greškama obrade na radnom predmetu.



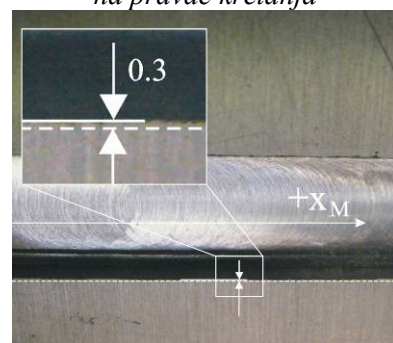
**Slika 3.** Eksperiment izrade žljeba glodanjem



**Slika 4.** Greška obrade u pravcu normalnom na pravac kretanja



**Slika 5.** Izmerena sila u pravcu normalnom na pravac kretanja

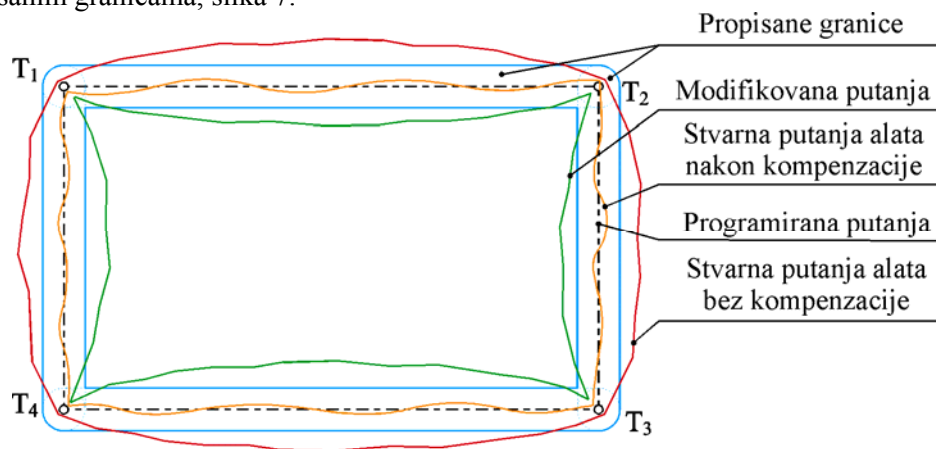


**Slika 6.** Izmerena greška obrade u pravcu normalnom na pravac pomoćnog kretanja pri izradi žljeba

#### 4. METOD KOMPENZACIJE GREŠAKA POLOŽAJA VRHA ALATA NASTALIH PRI OBRADI ROBOTIMA

Polazeći od postavljenog pristupa kinematičkog modeliranja robota *LOLA50* i na osnovu njega razvijenog sistema upravljanja i programiranja u *G*-kodu, razmatrani su problemi modeliranja, analize i identifikacije statičke popustljivosti robota. Za ovako razvijen metod analize i identifikacije statičke popustljivosti robota kao i mogućnosti da se robot za obradu programira u *G*-kodu u okviru ovih istraživanja razvijen je metod kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja [15,16]. Razvijen metod je baziran na

mogućnosti izračunavanja sila rezanja, postojećim modelima razvijenim u literaturi [17,18], na osnovu kojih se izračunavaju statički pomeraji vrha alata koji izazivaju greške obrade. Kompenzacija ovih grešaka se vrši modifikacijom programirane putanje odnosno korekcijom  $G$ -koda. Korekcija  $G$ -koda se vrši primenom razvijenog algoritma za modifikaciju programiranog segmenta putanje uvođenjem pravila „polovljenja segmenta”. Ovo pravilo je izvedeno analizom mogućnosti modifikacije programiranog linearnog segmenta koristeći analogiju sa poznatim algoritmom koji se koristi kod nekih 5-osnih mašina alatki zbog korekcije grešaka koje se javljaju pri linearnoj interpolaciji osa orijentacije u unutrašnjim koordinatama. Koncept razvijenog metoda za *off-line* kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja je pokazan na slici 7. Neka je programirana putanja alata za obradu pravougaonika opisana tačkama  $T_1$  do  $T_4$  u  $G$ -kodu. Unošenjem ovako napisanog programa u upravljački sistem robota vrh alat bi se, pod dejstvom sila rezanja, umesto da se kreće po programiranoj putanji kretao po stvarnoj putanji alata bez kompenzacije. Zamisao metoda kompenzacije grešaka je da se na osnovu programirane putanje alata i statičkih pomeraja vrha alata generiše modifikovana putanja odnosno korigovani program. Unošenjem ovako korigovanog programa u upravljački sistem robota vrh alata bi se, pod dejstvom vektora sila rezanja, umesto da se kreće po modifikovanoj putanji ustvari kretao po stvarnoj putanji alata nakon kompenzacije, odnosno dovoljno blizu programirane putanje alata tj. u unapred propisanim granicama, slika 7.



**Slika 7.** Koncept razvijenog *off-line* metoda kompenzacije

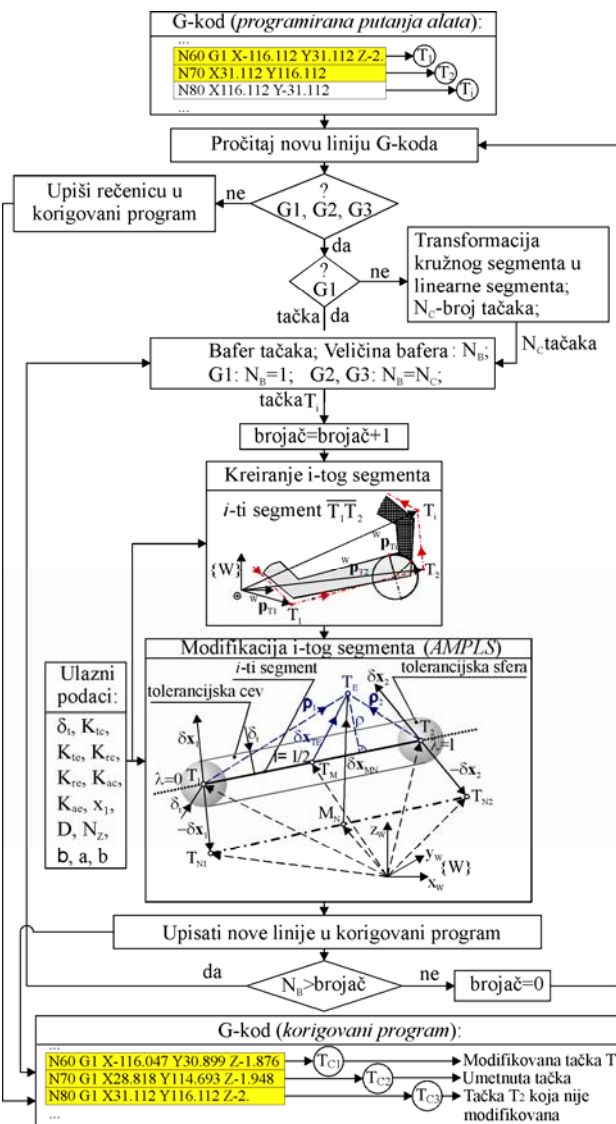
Algoritam za korekciju  $G$ -koda je dat na slici 8. Algoritam čita jednu po jednu liniju  $G$ -koda iz programirane putanje alata. Svaka linija se analizira da bi se proverilo da li u njoj postoji  $G$  funkcija ili ne. Ako postoji  $G$  funkcija onda se proverava da li se odnosi na linearnu ili kružnu interpolaciju. Ako je  $G$  adresa linearna interpolacija ( $G1$ ) iz te linije se izdvaja jedna tačka i zapisuje u bafer (međumemoriju) tačaka. Ako je  $G$  adresa kružna interpolacija ( $G2$  ili  $G3$ ) onda se ona prevodi u niz linearnih segmenata na osnovu veličine koraka definisanog od strane korisnika. Nakon transformisanja kružne interpolacije,  $N_C$  tačaka se izdvaja iz linije programirane putanje i zapisuje u bafer tačaka. Dalje se čita po jedna tačka iz bafera i na osnovu prethodne dve pročitane tačke programirane putanje alata kompletiraju se podaci potrebni za kreiranje  $i$ -tog segmenta. Tako formirani  $i$ -ti segment se zatim modifikuje u nekoliko novih segmenata koji se pretvaraju u nove rečenice  $G$ -koda, koje se zatim zapisuju u korigovani program. Nakon što su novi segmenti, odnosno nove linije  $G$ -koda zapisane, proverava se da li je bafer tačaka prazan. Ako bafer nije prazan učitava se sledeća tačka iz bafera. Ukoliko je bafer prazan učitava se sledeća linija iz programirane putanje i čitava procedura se ponavlja.

## 5. VERIFIKACIJA RAZVIJENOG METODA ZA KOMPENZACIJU GREŠAKA

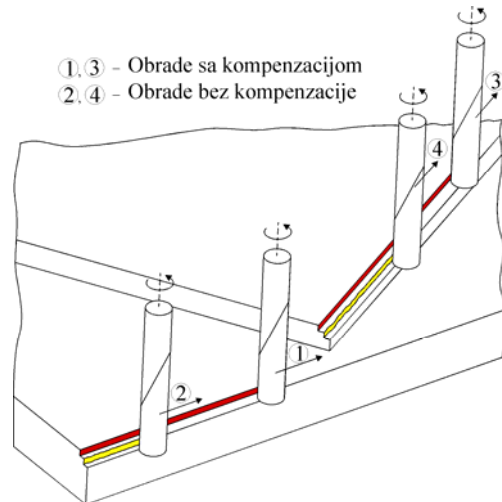
U cilju verifikacije razvijenog *off-line* metoda za kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja, kroz nekoliko eksperimenata obrada kontura na radnim predmetima od aluminijuma, prvo je napisan program za korekciju  $G$ -koda [16]. Program je napisan u *Matlab* softverskom paketu. Za verifikaciju razvijenog *off-line* metoda za kompenzaciju grešaka nastalih pod dejstvom sila rezanja pri obradi robotima vršeni su eksperimenti obrade na test radnim delovima od aluminijuma. Da bi se prikazali efekti primene metoda za kompenzaciju grešaka vršeni su eksperimenti obrade spoljašnje konture sa i bez kompenzacije. Kako se pri obradi spoljašnje konture bez kompenzacije alat neželjeno udaljava od programirane konture usled statičke popustljivosti robota, to su prvo vršene obrade sa kompenzacijom, a zatim bez kompenzacije, slika 9, da bi efekti primene razvijene metode za kompenzaciju grešaka bili uočljivi. Obrade sa i bez kompenzacije su



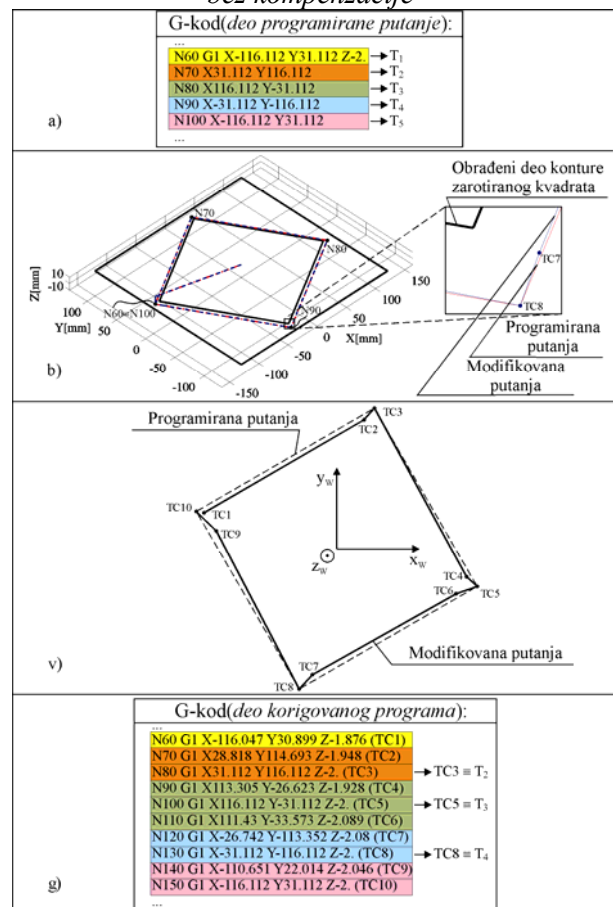
vršene istim režimom obrade i istim dubinama i širinama glodanja tako da se kompenzovani deo greške može lako uočiti i izmeriti. Konturne obrade bez kompenzacije su vršene kretanjem alata po programiranoj putanji u G-kodu, dok su konturne obrade sa kompenzacijom vršene kretanjem alata po modifikovanoj putanji generisanoj primenom razvijenog *off-line* kompenzacionog metoda, odnosno kretanjem vretenastog glodala putanjom definisanom korigovanim programom, slika 7. Na programirane putanje alata za obradu spoljašnjih kontura primenjen je razvijen metod za *off-line* kompenzaciju grešaka izazvanih silama rezanja. Programirane putanje alata su modifikovane primenom razvijenog programa za korekciju G-koda. Na osnovu ovako modifikovanih putanja softver generiše korigovane programe u G-kodu. Kretanjem alata po ovako korigovanim programima greške obrade bi trebale da budu u propisanim granicama, odnosno u okviru definisane tolerancijske cevi, slike 7,8 i 10.



Slika 8. Algoritam za korekciju G-koda

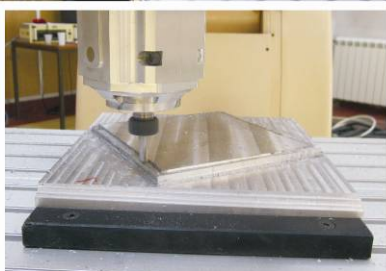


Slika 9. Plan eksperimenta obrade kontura sa i bez kompenzacije

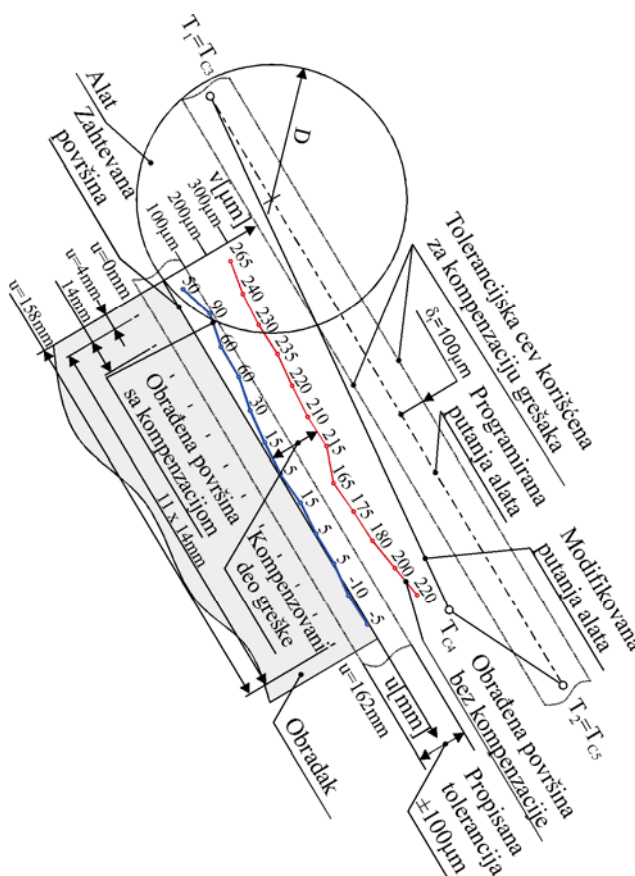


Slika 10. Korigovani i nekorigovani programi za obradu konture zarotiranog kvadrata na test radnom delu

Rezultati obrade konture zarotiranog kvadrata sa i bez kompenzacije, slika 11, koristeći korigovani program sa slike 10(g) i nekorigovani program sa slike 10(a) su dati na slici 12.



Slika 11. Obrada konture zarotiranog kvadrata



Slika 12. Greške pri obradi konture zarotiranog kvadrata

## 6. ZAKLJUČAK

Dobijeni eksperimentalni rezultati su pokazali da se primenom razvijenog metoda kompenzacije grešaka može ostvariti zadata tačnost obrade u očekivanim granicama za robote, s obzirom da na greške obrade takođe utiču i dinamika robota, krutost motornog vretena sa alatom, itd. Razvoj ovakvog metoda *off-line* kompenzacije grešaka obrade izazvanih silama rezanja kod robota koji se proramliraju u *G*-kodu stvara realne pretpostavke za njihovu praktičnu primenu. Razvijeni metod ne zahteva ulaganja u softver, adaptaciju upravljačkog sistema i nabavku senzora, a pri tom omogućava primenu postojećih *CAD/CAM* sistema za programiranje 5-osnih mašina alatki baziranih na *G*-kodu. Ovo znači da je direktno primenljiv od strane programera i operatera koji imaju iskustva u *CNC* tehnologiji i programiranju u *G*-kodu.

## 7. LITERATURA

- [1] E. Abele, M. Weigold, S. Rothenbucher (2007) Modeling and identification of an industrial robot for machining applications, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 56(1):387–390. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.090.
- [2] A. Klimchik, A. Pashkevich, D. Chablat, G. Hovland (2013) Compliance error compensation technique for parallel robots composed of nonperfect serial chains, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2):385–393. doi: 10.1016/j.rcim.2012.09.008.
- [3] C. Lehmann, M. Pellicciari, M. Drust, J. W. Gunnink (2013) Machining with Industrial Robots: The COMET Project Approach, in: *Robotics in Smart Manufacturing*, editors: P. Neto, A.P. Moreira, 371:27–36, Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- [4] Z. Pan, H. Zhang (2008) Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control, *Industrial Robot: An International Journal*, 35(5):400–409. doi: 10.1108/01439910810893572.

- [5] J. DePree, C. Gesswein (2008) Robotic machining white paper project-Halcyon Development, URL: <http://www.halcyondevelop.com/>.
- [6] W. Li, E. Red, G. Jensen, M. Evans (2007) Reconfigurable mechanisms for application control (RMAC): applications, *Computer-Aided Design and Applications*, 4(1-4):549–556.
- [7] G. Alici, B. Shirinzadeh (2005) Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators, *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4):554–564. doi: 10.1109/TRO.2004.842347.
- [8] D. Milutinovic, M. Glavonjic, N. Slavkovic, Z. Dimic, S. Zivanovic, B. Kokotovic, L. Tanovic (2011) Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12):1217–1229. doi: 10.1007/s00170-010-2888-8.
- [9] D. Milutinović, M. Glavonjić, N. Slavković, Z. Dimić, B. Kokotović, S. Živanović (2010) Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za višeosnu obradu delova većih gabarita sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama od mekših materijala srednje i niže klase tačnosti, Tehničko rešenje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] M. Stelzer, O. Von Stryk, E. Abele, J. Bauer, M. Weigold (2008) High speed cutting with industrial robots: towards model based compensation of deviations, *Proceedings of Robotik*, 143–146, Munich, Germany.
- [11] C. Lehmann, M. Halbauer, D. Euhus, D. Overbeck (2012) Milling with industrial robots: Strategies to reduce and compensate process force induced accuracy influences, *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 17th Conference on IEEE, 1–4, IEEE.
- [12] C. K. Toh (2004) Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel, *Materials and design*, 25(1):41–50.
- [13] N. Slavkovic, D. Milutinovic, B. Kokotovic, M. Glavonjic, S. Zivanovic, K. Ehmann (2013) Cartesian Compliance Identification and Analysis of an Articulated Machining Robot, *FME Transactions*, 41(2):83–95.
- [14] N. Slavkovic, S. Zivanovic, D. Milutinovic, M. Glavonjic (2012) Compliance Analysis of an Articulated Machining Robot, *Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 54(3):229-235, ISSN 0562-1887.
- [15] N. Slavkovic, D. Milutinovic, M. Glavonjic (2014) A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9-12):2083–2096. doi: 10.1007/s00170-013-5421-z.
- [16] Identifikacija, modeliranje i kompenzacija grešaka usled statičke popustljivosti robota za obradu (2015) Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [17] Y. Altintas (2000) *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [18] E. Budak (2006) Analytical models for high performance milling. PartI: cutting forces, structural deformations, and tolerance integrity, *International journal of machine tools and manufacture*, 46(12-13):1478–1488. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009.

**Slavkovic, N., Milutinovic, D., Zivanovic, S.**

### **METHOD FOR COMPENSATION OF CUTTING FORCE-INDUCED ERRORS IN ROBOTIC MACHINING**

**Abstract:** *This paper presents the part of the results in the field of development of robotic machining systems. This paper presents a developed method for compensation of cutting force-induced errors due to machining robot static compliance. The method has been verified through several experiments of contour machining, with and without error compensation, at the aluminum test parts.*

**Key words:** *multi-axis robotic machining, robot compliance, error compensation.*





Vasilić, G., Živanović, S.<sup>1)</sup>

## ANALIZA RADNOG PROSTORA REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA<sup>2)</sup>

### Rezime

*U ovom radu je analiziran radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizam MOMA. Razmatrani mehanizam je rekonfigurabilan, a u samom radu su prikazane neke od mogućih konfiguracija mehanizma koje je moguće realizovati. Za mehanizam MOMA su izvedene jednačine koje predstavljaju rešenja geometrijskih problema. Jednačine su generalizovane i važe za svaku moguću konfiguraciju paralelnog mehanizma MOMA. Dobijene jednačine se koriste za dalje analize paralelnog mehanizma. U okviru ovoga rada, jednačine su korišćene za analizu radnog prostora različitih konfiguracija paralelnog mehanizma i to primenom jednačina inverznog geometrijskog problema i primenom jednačina direktnog geometrijskog problema.*

**Ključne reči:** Paralelni mehanizam, rekonfigurabilni mehanizam, inverzni i direktni geometrijski problem, radni prostor

### 1. UVOD

Mašine alatke postoje da bi se koristile za neku transformaciju kretanja primenjenog mehanizma radi obavljanja nekog planiranog zadatka obrade. Svaka mašina alatka sadrži i mehanizam koji je u ovom radu sa paralelnom kinematikom. Kada mehanizam mašine ima paralelnu kinematiku, tada su oblik i veličina radnog prostora slabost većine takvih mašina, pa je analiza i određivanje radnog prostora ovakvih mašina vrlo bitan projektni zadatak, što je i predmet ovog rada. Oblik radnog prostora posledica su koncepcije mehanizma, a njegove mere mogu biti naknadno podešavane pomoću parametara mehanizma, a da se ne otvara posebno problem generalne sinteze paralelnog mehanizma. Mehanizmi sa paralelnom kinematikom su iskazali niz prednosti u odnosu na serijske mehanizme te su predmet mnogih istraživanja [1-6]. Kod mašina alatki sa paralelnim mehanizmom, geometrija mehanizma utiče na: oblik i veličinu radnog prostora, postojanje singulariteta, krutost mehanizma, pokretljivost mehanizma, itd. Promenom geometrije paralelnog mehanizma se značajno utiče na navedene karakteristike.

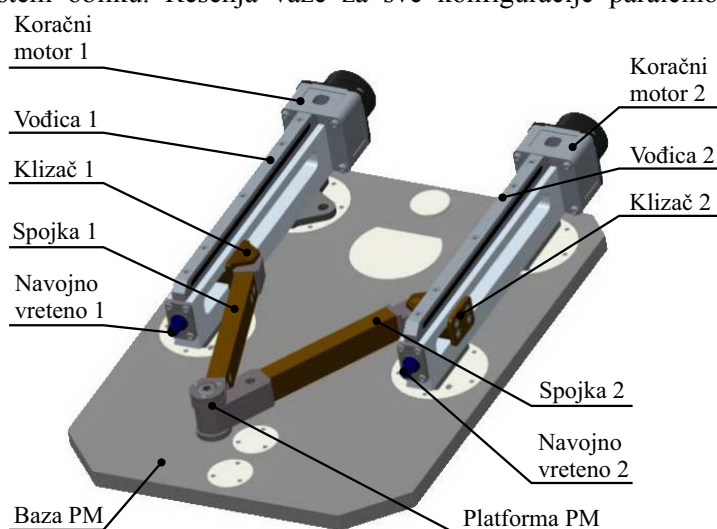
Posebnu grupu mehanizama čine rekonfigurabilni mehanizmi kojima se lako, brzo i bez dodatnih troškova može promeniti konfiguracija [7]. Karakteristika rekonfigurabilnih sistema je mogućnost prilagođavanja trenutnim potrebama na ekonomski prihvatljiv način [8]. U ovu grupu mehanizama se svrstava i dvoosni paralelni mehanizam MOMA (Modularna Mašina Alatka) otvorene arhitekture upravljanja, koja je predmet razmatranja u ovom radu. Mašina MOMA je rekonfigurabilna i omogućava rekonfigurisanje i hardverskog i softverskog sistema. Razmatrani rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam MOMA (slika1) se može prepoznati u sledećim primerima: (i) horizontalnom obradnom centru Trijoint[1] koji sadrži dvoosni paralelni mehanizam; (ii) paralelnom mehanizmu sa dva paralelograma [2]; (iii) mašini za troosnu obradu sa dvoosnim paralelnim mehanizmom i dodatom serijskom osom [3]; (iv) redundantnom paralelnom ravanskom mehanizmu sa tri stepena slobode [4]. Razmatrani mehanizam je nastao uopštavanjem paralelnog mehanizma 2D TeMoPaM (Tehnološki Modul sa Paralelnim Mehanizmom) koji je pokazan u radovima [5] i [6].

U okviru rada je dat opis rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA i postavljen opšti geometrijski model na osnovu koga su rešeni inverzni geometrijski problem (IGP) i direktni geometrijski

<sup>1)</sup> Vasilić Goran, dipl.maš.inž, student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (goran.v.vasilic@gmail.com), prof dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs)

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

problem (DGP), čija su rešenja data u opštem obliku. Rešenja važe za sve konfiguracije paralelnog mehanizma koje se mogu realizovati po uspostavljenom programu gradnje [9] i uz odgovarajuće parametre koji definišu geometriju paralelnog mehanizma. Izvedene jednačine se koriste za konfigurisanje upravljačkog softvera otvorene arhitekture na PC Linux platformi i EMC2 softveru [10,11]. Osim za konfigurisanje upravljanja za paralelni mehanizam, izvedene opšte jednačine IGP-a i DGP-a se koriste za analizu paralelnog mehanizma, a u ovom radu su iskorišćene za analizu radnog prostora različitih konfiguracija paralelnog mehanizma MOMA. Takođe, izvedene jednačine se koriste i za druge analize prema kojima se na osnovu nekog od kriterijuma dobija optimalna konfiguracija za postavljene zahteve, na primer optimalna dužina spojki paralelnog mehanizma [12].



*Slika 1. CAD model jedne konfiguracije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*

## 2. OPIS REKONFIGURABILNOG DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

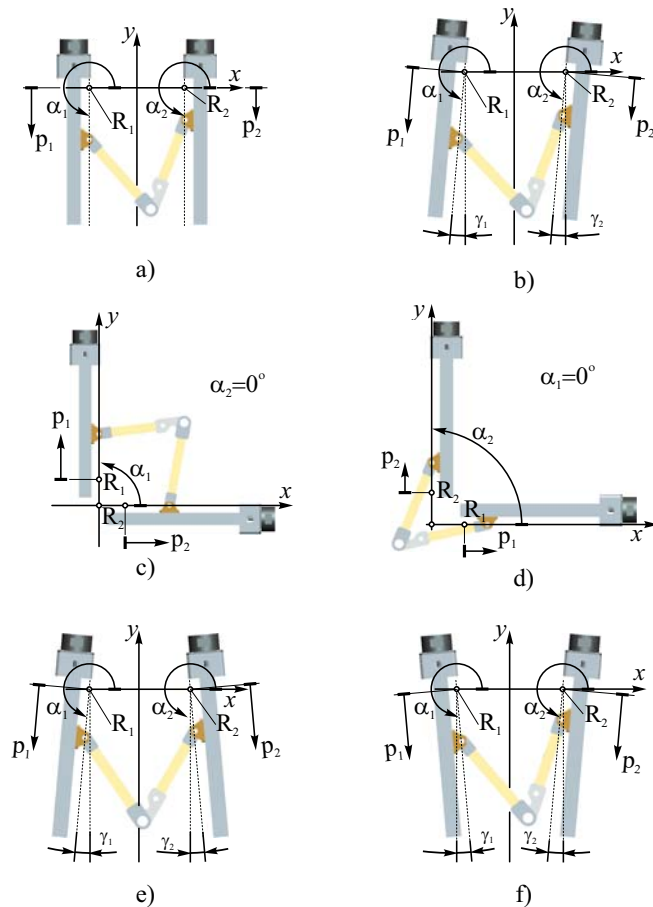
Rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA je ravanski paralelni mehanizam sa dva stepena slobode. CAD model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je prikazan na slici 1. Pogonske ose paralelnog mehanizma su translatorne i svaku od osa čine po jedan koračni motor, zavojno vreteno i vodica. Pogonske ose obezbeđuju translatorno kretanje klizača duž vodica. Za svaki od klizača je vezana po jedna spojka konstantne dužine pomoću obrtnog zgloba. Spojke paralelnog mehanizma su takođe međusobno povezane obrtnim zglobovom. Zglobna veza između spojki predstavlja platformu paralelnog mehanizma čije se kretanje ostvaruje pomeranjem dva klizača duž vodica.

Paralelni mehanizam MOMA je modularnog tipa i svaki od modula predstavlja jedan podsklop celokupnog sklopa mehanizma. Moduli od kojih je sačinjen paralelni mehanizam su: baza paralelnog mehanizma; sklopovi pogonskih osa koju čine koračni motori, vodice i zavojna vretena i sklopovi spojki sa obrtnim zglobovima. Ovakav način gradnje omogućava brzo i jednostavno rekonfigurisanje, odnosno zamenu pojedinih modula kao i promenu geometrije paralelnog mehanizma promenom položaja jednog modula paralelnog mehanizma u odnosu na bazu. U ovome se ogleda hardverska rekonfigurabilnost dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA te se konfiguracija mehanizma može prilagoditi različitim potrebama.

Konfiguracije paralelnog mehanizma MOMA se međusobno razlikuju po orijentaciji vodica određenih uglovima  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  prikazanih na slici 2 i po dužinama spojki  $l_1$  i  $l_2$ . Uglovi orijentacija spojki su definisani preko pomoćnih uglova  $\gamma_i$  i iznose  $\alpha_i = 3\pi/2 + \gamma_i$  pri čemu uglovi  $\gamma_i$  mogu imati vrednosti  $\gamma_i = 0^\circ$ ,  $\gamma_i = +5^\circ$  i  $\gamma_i = -5^\circ$ . Rekonfigurisanjem paralelnog mehanizma promenom orijentacije pogonskih osa, cela pogonska osa sa svojim sastavnim elementima rotira oko referentne tačke  $R_i$  (slika 2) za ugao  $\gamma_i$ . Po ovom principu se realizuju konfiguracije sa slike 2a, b, e i f. Promenom baze paralelnog mehanizma realizuju se konfiguracije sa slike 2c i d. Dužine spojki paralelnog mehanizma mogu imati vrednosti  $l_i = 180$  [mm],  $l_i = 195$  [mm] i  $l_i = 250$  [mm]. Programom gradnje je definisana svaka moguća konfiguracija paralelnog mehanizma, a konfiguracije su prema geometriji mehanizma podeljene u pet tipova i to:

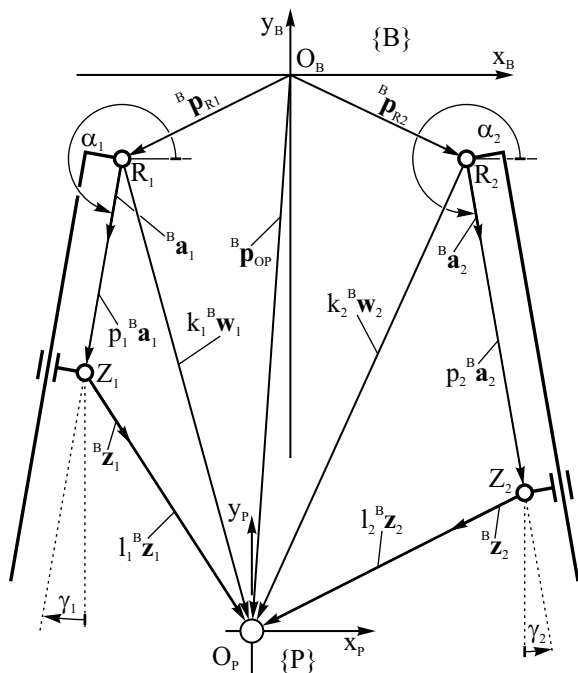
- MOMA M1 – Pogonske ose su međusobno paralelne a pomoćni uglovi orijentacije osa mogu imati vrednosti  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0^\circ$  (slika 2a),  $\gamma_1 = \gamma_2 = -5^\circ$  (slika 2b) i  $\gamma_1 = \gamma_2 = +5^\circ$ ;
- MOMA M2 – Pogonske ose su paralelne osama koordinatnog sistema Oxy pri čemu se platforma paralelnog mehanizma nalazi u I kvadrantu koordinatnog sistema Oxy (slika 2c);
- MOMA M3 – Pogonske ose su paralelne osama koordinatnog sistema Oxy pri čemu se platforma paralelnog mehanizma nalazi u III kvadrantu koordinatnog sistema Oxy (slika 2d);
- MOMA M4 – Konfiguracija kod koje se pogonske ose razilaze (slika 2e). Mehanizam se može konfigurisati u tri varijante i to: i)  $\gamma_1 = -5^\circ$   $\gamma_2 = +5^\circ$ , ii)  $\gamma_1 = 0^\circ$   $\gamma_2 = +5^\circ$ , iii)  $\gamma_1 = -5^\circ$   $\gamma_2 = 0^\circ$ ;

- MOMA M5 – Konfiguracija kod koje se pogonske ose sučeljavaju (slika 2f). Mehanizam se može konfigurirati u tri varijante i to: i)  $\gamma_1 = +5^\circ$   $\gamma_2 = -5^\circ$ , ii)  $\gamma_1 = 0^\circ$   $\gamma_2 = -5^\circ$ , iii)  $\gamma_1 = +5^\circ$   $\gamma_2 = 0^\circ$ ;



*Slika 2. Osnovne konfiguracije rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*

### 3. GEOMETRIJSKI MODEL I REŠAVANJE GEOMETRIJSKIH PROBLEMA DVOOSNOG PARALELNOG MECHANIZMA MOMA



*Slika 3. Geometrijski model rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*

Kako je dvoosni paralelni mehanizam MOMA rekonfigurabilan, od značaja je formirati opšti geometrijski model kojim se može opisati bilo koja konfiguracija paralelnog mehanizma uz odgovarajuće vrednosti određenih geometrijskih veličina. Na osnovu uopštenog geometrijskog modela dobijaju se i opšta rešenja geometrijskih problema (inverznog i direktnog) paralelnog mehanizma. Dobijena opšta rešenja geometrijskih problema uz određene vrednosti geometrijskih veličina se koriste za analizu radnog prostora bilo koje konfiguracije ali i za formiranje upravljanja paralelnog mehanizma [11]. Opšti geometrijski model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je prikazan na slici 3.

Prema slici 3, za geometrijski model rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA je definisan nepokretni koordinatni sistem {B} vezan za bazu mehanizma kao i pokretni koordinatni sistem {P} vezan za platformu mehanizma. Uvedene veličine prikazane na slici 3 su:

- ${}^B \mathbf{p}_{R_i} = [x_{R_i} \ y_{R_i}]^T$  – vektori položaja referentnih tačaka  $R_i$  u odnosu na nepokretni koordinatni sistem  $\{B\}$ ;
- ${}^B \mathbf{p}_{OP} = [x_P \ y_P]^T$  – vektori položaja platforme paralelnog P u odnosu na nepokretni koordinatni sistem  $\{B\}$ ;
- ${}^B \mathbf{a}_i = [a_{x_i} \ a_{y_i}]^T$  – jedinični vektori koji određuju orijentaciju vođica paralelnog mehanizma;
- $p_i {}^B \mathbf{a}_i$  – vektori unutrašnjih koordinata, dok je  $p_i$  skalarna veličina kontrolisana aktuatorima;
- $l_i {}^B \mathbf{z}_i$  – vektori određeni pozicijom, orijentacijom i dužinom spojki. Vektori  $\mathbf{z}_i$  su jedinični vektori i određeni su orijentacijom spojki;
- $k_i {}^B \mathbf{w}_i$  – vektori koji definišu poziciju platforme paralelnog mehanizma u odnosu na referentne tačke  $R_i$ .

Za dalju analizu a prema geometrijskom modelu sa slike 3 formiraju se sledeće vektorske jednačine:

$$k_i {}^B \mathbf{w}_i = {}^B \mathbf{p}_{OP} - {}^B \mathbf{p}_{R_i} \quad (1)$$

$$l_i {}^B \mathbf{z}_i = k_i {}^B \mathbf{w}_i - p_i \mathbf{a}_i \quad (2)$$

Kvadriranjem jednačine (2) se potom od tako dobijene jednačine formira implicitna jednačina koja je oblika:

$$p_i^2 - 2p_i ({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i) + (k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad (3)$$

## 2.1 Rešenje inverznog geometrijskog problema

Rešavanjem kvadratne jednačine (3) po unutrašnjim koordinatama  $p_i$ , dobija se sledeća jednačina:

$$p_i = ({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i) \pm \sqrt{({}^B \mathbf{a}_i k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 - (k_i {}^B \mathbf{w}_i)^2 + l_i^2} \quad (4)$$

na osnovu koje se nakon zamene poznatih veličina dobija:

$$p_i = B_i - \sqrt{B_i^2 - C_i}, \quad (i = 1, 2), \quad (5)$$

pri čemu su uvedene sledeće smene:

$$\begin{aligned} B_i &= a_{x_i} (x_P - x_{R_i}) + a_{y_i} (y_P - y_{R_i}) \\ C_i &= (x_P - x_{R_i})^2 + (y_P - y_{R_i})^2 - l_i^2, \end{aligned} \quad (i = 1, 2), \quad (6)$$

Koristeći jednačinu (5) na osnovu poznate geometrije dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA, za zadate vrednosti spoljašnjih koordinata  $x_P$  i  $y_P$  se izračunavaju vrednosti unutrašnjih koordinata  $p_1$  i  $p_2$ , pa samim time jednačina (5) predstavlja rešenje inverznog geometrijskog problema za svaku konfiguraciju rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA.

## 2.2 Rešenje direktnog geometrijskog problema

Zamenom parametara paralelnog mehanizma u jednačinu (3), dobijaju se sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} p_1^2 - 2p_1 [a_{x_1} (x_P - x_{R_1}) + a_{y_1} (y_P - y_{R_1})] + \\ + (x_P - x_{R_1})^2 + (y_P - y_{R_1})^2 - l_1^2 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p_2^2 - 2p_2 [a_{x_2} (x_P - x_{R_2}) + a_{y_2} (y_P - y_{R_2})] + \\ + (x_P - x_{R_2})^2 + (y_P - y_{R_2})^2 - l_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Rešavanjem sistema jednačina (7) i (8) po spoljašnjim koordinatama  $x_P$  i  $y_P$  se dobijaju jednačine (9) i (10). U jednačinama (9) i (10) figurišu veličine koje opisuju geometriju paralelnog mehanizma ali i unutrašnje koordinate  $p_i$  ( $i=1,2$ ). Samim time se na osnovu poznatih unutrašnjih koordinata  $p_i$  mogu izračunati vrednosti spoljašnjih koordinata  $x_P$  i  $y_P$  pa izvedene jednačine (9) i (10) predstavljaju rešenja direktnog geometrijskog problema rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA.

$$x_p = v_7 + y_p v_8 \quad (9)$$

$$y_p = \frac{-v_{10} \pm \sqrt{v_{10}^2 - 4v_9 v_{11}}}{2v_9} \quad (10)$$

U jednačini (10) umesto dvoznaka "±" koristi se znak "+" za konfiguraciju paralelnog mehanizma sa slike 2c, dok se znak "-" koristi za sve ostale konfiguracije sa slike 2. Smene koje figurišu u jednačinama koje predstavljaju rešenje direktnog geometrijskog problema su date grupom jednačina (11) i (12).

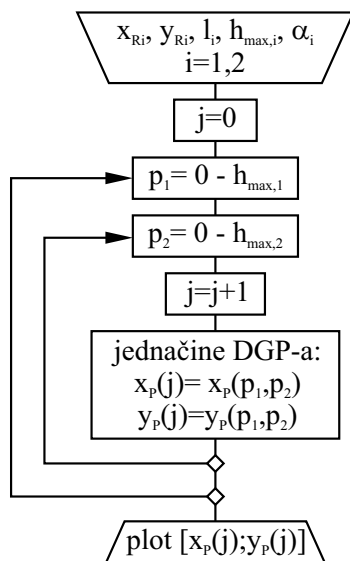
$$\begin{aligned} v_1 &= 2(p_1 a_{x1} + x_{R1}) \\ v_2 &= 2(p_1 a_{y1} + y_{R1}) \\ v_3 &= p_1^2 + 2p_1(a_{x1} x_{R1} + a_{y1} y_{R1}) - l_1^2 + x_{R1}^2 + y_{R1}^2 \\ v_4 &= 2(p_2 a_{x2} + x_{R2}) \\ v_5 &= 2(p_2 a_{y2} + y_{R2}) \\ v_6 &= p_2^2 + 2p_2(a_{x2} x_{R2} + a_{y2} y_{R2}) - l_2^2 + x_{R2}^2 + y_{R2}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v_7 &= (v_6 - v_3)/(v_4 - v_1) \\ v_8 &= (v_2 - v_5)/(v_4 - v_1) \\ v_9 &= 1 + v_8^2 \\ v_{10} &= 2v_7 v_8 - v_1 v_8 - v_2 \\ v_{11} &= v_7^2 - v_1 v_7 + v_3 \end{aligned} \quad (12)$$

#### 4. ANALIZA RADNOG PROSTORA DVOOSNOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

Prethodno izvedene jednačine se koriste za sve analize paralelnog mehanizma pa samim time i za analizu radnog prostora. Pri analizi radnog prostora, koriste se ili jednačine koje predstavljaju rešenje direktnog geometrijskog problema ili jednačine koje predstavljaju rešenje inverznog geometrijskog problema. I jedan i drugi pristup imaju svoje prednosti i mane a za različite konfiguracije dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA će biti primenjena oba pristupa.

##### 4.1 Analiza radnog prostora primenom jednačina direktnog geometrijskog problema

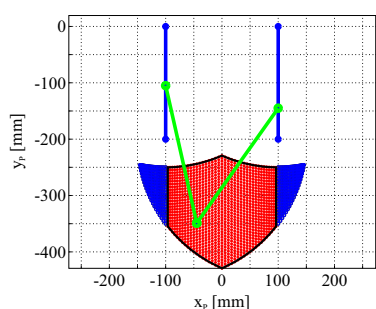


**Slika 4.** Algoritam za određivanje radnog prostora paralelnog mehanizma koristeći jednačine DGP-a

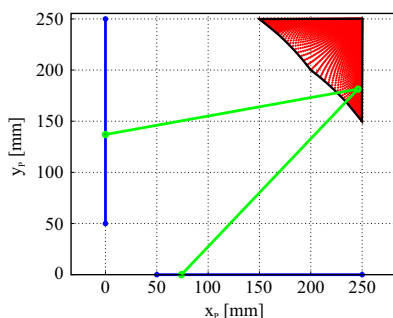
Koristeći jednačine (9) i (10) sa odgovarajućim smenama (11)-(12) i parametrima koji definišu geometriju paralelnog mehanizma, izračunava se pozicija platforme mehanizma u koordinatnom sistemu {B} za sve vrednosti unutrašnjih koordinata p<sub>i</sub>. Skup tačaka koje imaju koordinate (x<sub>Pj</sub>, y<sub>Pj</sub>) predstavlja dostizivi radni prostor mehanizma. Algoritam kojim se određuje radni prostor na osnovu jednačina direktnog geometrijskog problema je prikazan na slici 4.

Ova metoda nije iterativna tako da se sa njom ne vrše prekomerna i bespotrebna izračunavanja pa se u ovome i ogleda njena prednost. Bitan nedostatak ove metode je taj što se kod složenijih mehanizama ne može doći do analitičkog rešenja direktnog geometrijskog problema pa određivanje radnog prostora ovim pristupom postaje znatno složenije. Koristeći ovu metodu određeni su radni prostori za konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 2a, c i d. Za sve tri konfiguracije, maksimalni hod pogonskih osa iznosi h<sub>max</sub>=200 [mm], dužine spojki su l<sub>1</sub>=l<sub>2</sub>=250 [mm]. Ostali geometrijski parametri za navedene konfiguracije su: α<sub>1</sub>=α<sub>2</sub>=3π/2, y<sub>R1</sub>=y<sub>R2</sub>=0 [mm], x<sub>R1</sub>=-100[mm] i x<sub>R2</sub>=100 [mm] za konfiguraciju sa slike 2a; α<sub>1</sub>=π/2, α<sub>2</sub>=0, x<sub>R1</sub>=y<sub>R2</sub>=50 [mm],

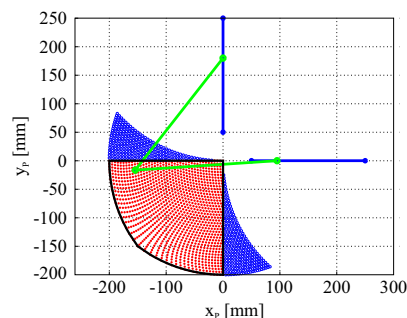
y<sub>R1</sub>=x<sub>R2</sub>=0 [mm] za konfiguraciju sa slike 2c; α<sub>1</sub>=0, α<sub>2</sub>=π/2, x<sub>R1</sub>=y<sub>R2</sub>=50 [mm], y<sub>R1</sub>=x<sub>R2</sub>=0 [mm] za konfiguraciju sa slike 2d. Radni prostori dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA određeni ovom metodom su prikazani na slikama 5, 6 i 7 i to za konfiguracije mehanizma MOMA M1, MOMA M2 i MOMA M3, respektivno.



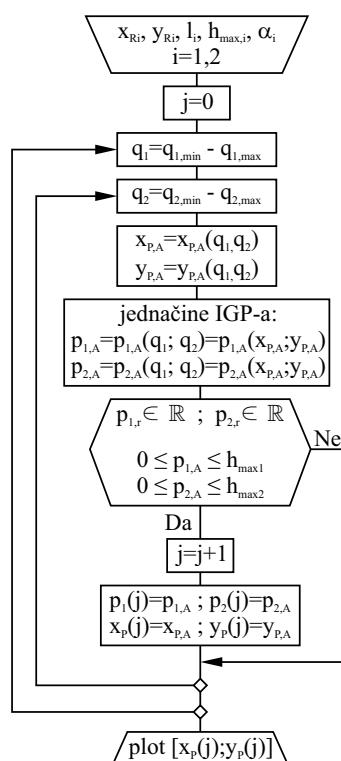
**Slika 5.** Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M1



**Slika 6.** Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M2

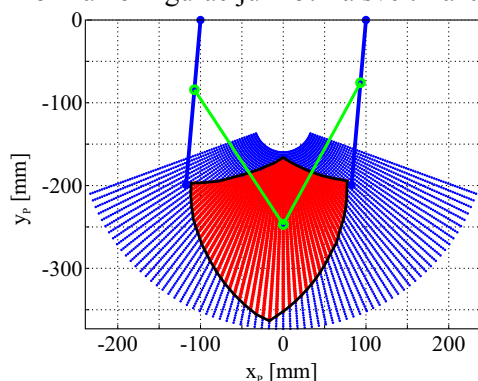


**Slika 7.** Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M3

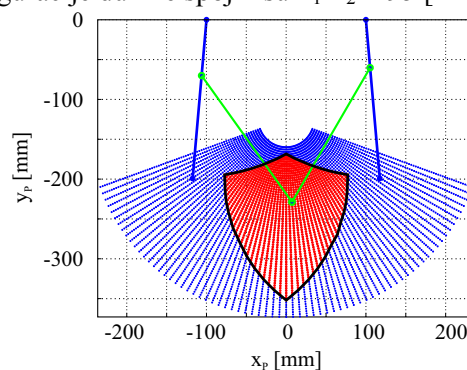


**Slika 8.** Algoritam za određivanje radnog prostora primenom izvedenih jednačina inverznog geometrijskog problema

$\alpha_1 = \alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$  za konfiguraciju M1;  $\alpha_1 = 3\pi/2 - 5^\circ$  i  $\alpha_2 = 3\pi/2 + 5^\circ$  za konfiguraciju M4;  $\alpha_1 = 3\pi/2 + 5^\circ$  i  $\alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$  za konfiguraciju M5. Za sve tri analizirane konfiguracije dužine spojki su  $l_1 = l_2 = 195$  [mm].



**Slika 9.** Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M1



**Slika 10.** Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M4

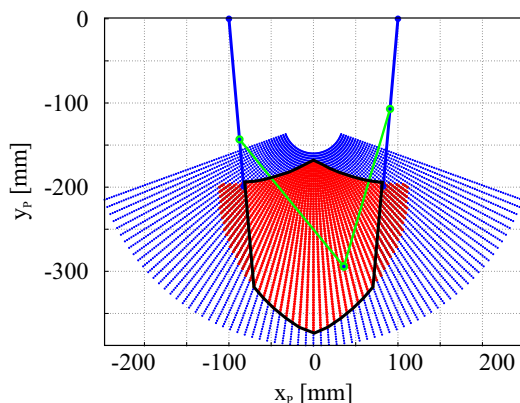
## 4.2 Analiza radnog prostora primenom jednačina inverznog geometrijskog problema

Analiza radnog prostora paralelnog mehanizma MOMA primenom jednačina inverznog geometrijskog problema je iterativna metoda. Za svaku tačku dela ispitivanog prostora se izračunavaju vrednosti unutrašnjih koordinata na osnovu jednačine (5) i odgovarajućih smena (6). Ukoliko za određenu tačku postoje realna rešenja za obe unutrašnje koordinate  $p_i$ , pri čemu je ispunjen uslov  $0 \leq p_i \leq h_{maxi}$ , tačka je deo dostizivog radnog prostora paralelnog mehanizma. U suprotnom, tačka ne pripada radnom prostoru paralelnog mehanizma. Na slici 8 je prikazan algoritam po kome se određuje radni prostor po opisanoj metodi. Prema algoritmu, koordinate tačaka  $x_{P,A}$  i  $y_{P,A}$  u nepokretnom koordinatnom sistemu  $\{B\}$  su određene koordinatama  $q_1$  i  $q_2$  koje mogu biti ili Dekartove ili polarne koordinate. Za analizu radnog prostora paralelnog mehanizma MOMA su korišćene i polarne koordinate, slike 9, 10 i 11a i Dekartove koordinate, slika 11b.

Na slikama 9, 10 i 11 su prikazani radni prostori dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA određeni ovom metodom i to za konfiguracije MOMA M1, MOMA M4 i MOMA M5, respektivno. Geometrijski parametri koji definišu navedene konfiguracije su:  $x_{R1} = -100$  [mm],  $x_{R2} = 100$  [mm],  $y_{R1} = y_{R2} = 0$  [mm] za sve tri konfiguracije paralelnog mehanizma;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$  za konfiguraciju M1;  $\alpha_1 = 3\pi/2 - 5^\circ$  i  $\alpha_2 = 3\pi/2 + 5^\circ$  za konfiguraciju M4;  $\alpha_1 = 3\pi/2 + 5^\circ$  i  $\alpha_2 = 3\pi/2 - 5^\circ$  za konfiguraciju M5. Za sve tri analizirane konfiguracije dužine spojki su  $l_1 = l_2 = 195$  [mm].

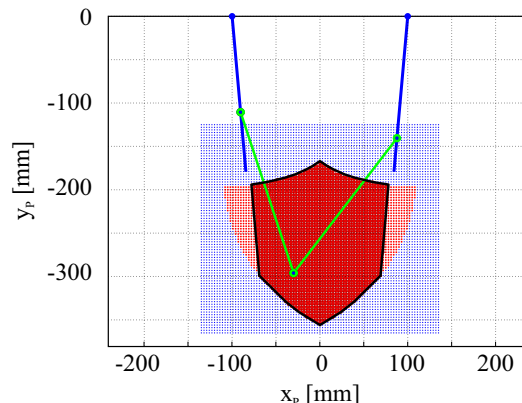


*mehanizma konfiguracije MOMA M1*



a) *Određivanje radnog prostora primenom polarnih koordinata*

*mehanizma konfiguracije MOMA M4*



b) *Određivanje radnog prostora primenom Dekartovih koordinata*

**Slika 11.** *Radni prostor dvoosnog paralelnog mehanizma konfiguracije MOMA M5*

Za određivanje radnog prostora različitih konfiguracija dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA prema algoritmima prikazanim na slikama 4 i 8, korišćen je Matlab® programski paket. Na slikama 5 do 7, i slikama 9 do 11, crvenom bojom je označen računski dobijen radni prostor paralelnog mehanizma. Međutim zbog geometrije mehanizma i konačnih vrednosti dimenzija sastavnih delova mehanizma, platforma se ne može naći u svakoj tački dostizivog radnog prostora. Iz tog razloga se za pojedine konfiguracije realni dostizivi radni prostor razlikuje od proračunskog radnog prostora. Realni radni prostor je na svim slikama uokviren crnom bojom, a na slikama 5, 7 i 11 se primećuje razlika između proračunskog i realnog radnog prostora.

Kako je u radu i pokazano, opšte jednačine IGP-a i DGP-a su uz opisane metode korišćene za analizu radnog prostora pojedinih konfiguracija paralelnog mehanizma. Osim oblika i veličine radnog prostora, na osnovu grafički prikazanih rezultata se donosi zaključak kako se uz određene vrednosti parametara paralelnog mehanizma fizički eliminišu određeni delovi radnog prostora. Kombinacijom analize radnog prostora sa drugim analizama (određivanje Jakobijan matrice, određivanje singulariteta, optimizacija paralelnog mehanizma...) dolazi se do optimalne konfiguracije koja treba da ispunjava postavljene zahteve, što je već razmatrano u prethodnim radovima [12, 13].

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada je bio da prikaže neke od mogućih analitičkih načina za određivanje radnog prostora dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma MOMA primenom rešenja DGP i IGP, iako je za razmatrane mehanizme radni prostor moguće jednostavnije odrediti i geometrijski. Za razmatrani rekonfigurabilni paralelni mehanizam postoji veliki broj mogućih konfiguracija za koje je pripremljeno opšte rešenje IGP i DGP, pa se na bazi opštih modela dobijaju i adekvatni radni prostori jednostavnom promenom parametara mehanizma, čime se njihovo određivanje maksimalno pojednostavljuje i automatizuje.

U daljoj realizaciji ove teme planira se konceptijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki sa osobinama rekonfigurabilnosti i multifunkcionalnosti, u cilju dobijanja stone edukacione mašine alatke za rad sa studentima, koja bi bila korišćena za edukaciju u: konfigurisanju mašina, konfigurisanju upravljanja, i programiranju. Planira se razvoj stonih mašina sa paralelnom i/ili hibridnom kinematikom, a koje u sebi sadrže bar jedan dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA, kao i nadogradnja ovog mehanizma na troosni mehanizam dodavanjem jedne ili više serijskih osa.

## 6. LITERATURA

- [1] Šika Z., Hamrle V., Valášek M., Beneš P.: *Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 50, p.48-63, 2012.
- [2] Jinson W., Tiemin L., Liping W.: *Dynamic analysis of the 2-DOF planar parallel manipulator of a heavy duty hybrid machine tool*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, p. 413-420, 2007.

- [3] Hanrath G., Stengele B.: *Machine tool for triaxial machining of workpieces*. United States Patent. Patent number: 6,328,510. Date of Patent: dec. 11. 2001.
- [4] Jun W., Jinson W., Liping W.: *Optimal Kinematic Design and Application of a Redudantly Actuated 3DOF planar Parallel Manipulator*, Journal of Mechanical design, Vol 13, 2008.
- [5] Živanović S., Glavonjić M.: *Edukaciona 2D paralelna mašina alatka kao tehnološki modul*, 26. JUPITER konferencija, 22. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str. 3.247-3.254, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.
- [6] Živanović S.: *Parallel Kinematic Machines*, International Journal of Production Engineering and Computers, Vol. 3, No. 3, p.49-54, 2000.
- [7] Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y.: *Reconfigurable Manufacturing Systems and Their Enabling Technologies*, Int.J.of Manufacturing Technology and Management, Vol.1, No.1 pp.114-131, 2000.
- [8] Landers G., Mid K., Koren Y.: *Reconfigurable Machine Tools*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 50, No.1, pp. 269-274, 2001.
- [9] Živanović S., Vasilic G., *Variants of configuring the 2-axis reconfigurable parallel mechanism - MOMA*, Proceedings of 2nd International Scientific Conference Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2014, pp.33-40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2-5. December 2014.
- [10] LinuxCNC, EMC's webpage, <http://www.linuxcnc.org/>, april, 2015.
- [11] Živanović S., Glavonjić M., Kokotović B., Dimić Z.: *Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA*, Tehničko rešenje (Novi laboratorijski proizvod, M82), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [12] Vasilic G., Živanović S., Kokotović B., Glavonjić M.: *Optimizacija dužina spojki dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma - MOMA*, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.28-3.35, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [13] Vasilic G., Živanović S.: *Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo, Broj 1, str. 57-63, 2016.

Vasilic, G., Zivanovic, S.

## WORKSPACE ANALYSIS OF RECONFIGURABLE 2-DOF PARALLEL MECHANISM MOMA

**Abstract:** *This paper analyzes the workspace of 2 DOF parallel mechanism MOMA. The mechanism can be reconfigured, and the paper shows some of the possible configurations of the mechanism that can be implemented. For mechanism MOMA presents the equations that represent the solution of geometric problems. The equations are generalized and can be used to every possible configuration of parallel mechanism MOMA. The governing equations are used for further analysis of parallel mechanisms. In this paper, equations were used for the analysis of working space for different configurations of parallel mechanisms and applying the equation of inverse geometric problems and applying equations using direct geometrical problem.*

**Key words:** *parallel mechanism, reconfigurable mechanism, inverse and direct geometric problem, workspace*



Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Milutinović, D. <sup>1)</sup>

## KONFIGURISANJE MULTIFUNKCIONALNIH I REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI I METODI ZA NJIHOVO PROGRAMIRANJE I VERIFIKACIJU PROGRAMA OBRADE <sup>2)</sup>

### Rezime

U radu su pokazane koncepcije rekonfigurabilnih mašina alatki, kao mašina sa serijskom i kao mašina sa hibridnom kinematikom. Razmatrani su metodi za njihova programiranja na bazi G koda (ISO 6983) i novog metoda programiranja na bazi STEP-NC standarda (ISO10303, ISO14649). Pripremljena su i pokazana okruženja za off-line programiranje u izabranom CAD/CAM sistemu (u G kodu) i softveru STEP-NC Machine za novi metod programiranja na bazi STEP-NC programa. Za oba okruženja su realizovani virtuelni modeli razmatranih stonih rekonfigurabilnih mašina alatki za potrebe simulacije rada mašina po zadatom programu u okruženju za programiranje.

**Ključne reči:** CAD/CAM, STEP-NC, rekonfigurabilna mašina alatka

### 1. UVOD

Istraživanja multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki su intenzivna i imaju dosta kompletiranih rezultata [1-5]. Predmet ovog rada je konfigurisanje i metodi programiranja za familiju stonih rekonfigurabilnih mašina alatki sa serijskom i hibridnom kinematikom čiji je razvoj tema na projektu Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema TR35022 [6,7]. Za realizaciju multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki ovde je uspostavljen sistem sastavnih elemenata pomoću kojeg se može konfigurisati više različitih mašina. Svaka od razmatranih mašina se može konfigurisati na osnovu raspoložive baze modula, čime se kompletira struktura mašine alatke. Osnovni deo strukture mašine alatke čine: noseća struktura, pogoni, prenosnici, aktuatori, upravljanje i programiranje. Tokom rada na temi Multifunkcionalna mašina alatka razmatran je veći broj različitih konfiguracija i tipova rekonfigurabilnih troosnih, četvorosnih i petoosnih mašina alatki za koje je uspostavljen sistem sastavnih elemenata na modularnom principu za njihovo konfigurisanje, što je pokazano u poglavlju 2 i prethodnim radovima [8-10].

Pored konfigurisanja tema rada je i priprema odgovarajućeg CAD/CAM okruženja za programiranje rekonfigurabilnih mašina alatki (poglavlje 3), koje ima mogućnost za uključivanje virtuelnih prototipova za simulaciju rada mašine koja radi po zadatom programu (poglavlje 4) u cilju verifikacije programa obrade. Pored toga, u cilju pripreme za programiranje mašina primenom novog metoda programiranja na bazi protokola STEP-NC [11], u poglavlju 5 je pokazana i simulacija rada mašina koje rade po zadatom programu u STEP-NC Machine okruženju.

### 2. KONFIGURISANJE STONIH REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI

Za ovaj rad prikazano je nekoliko klasa razmatranih rekonfigurabilnih mašina alatki, koje su pokazane na slici 1. Mašine prvo delimo u dve grupe: mašine sa serijskom i mašine sa hibridnom kinematikom, koje imaju deo strukture sa serijskom, a deo sa paralelnom kinematikom. Analizom osnovnih komponenata (modula) mašina alatki i metodologije za konfigurisanje novih mašina alatki [12], omogućeno je uspostavljanje sistema sastavnih elemenata rekonfigurabilnog hardvera mašina, koji je u vidu jedne morfološke matrice pokazan na slici 1.

<sup>1)</sup> Prof. dr Saša Živanović, ([szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)), doc dr Branko Kokotović, ([bkokotovic@mas.bg.ac.rs](mailto:bkokotovic@mas.bg.ac.rs)), doc. dr Nikola Slavkovic, ([nslavkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nslavkovic@mas.bg.ac.rs)), prof. Dr Dragan Milutinović ([dmilutinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.rs)), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.





Pokazane su realizacije sistema sastavnih elemenata za postolja, stubove, obrtne stolove, glavna vretena i deo plana uzoraka za razmatrane mašine, koje predstavljaju neke od do sada razmatranih polaznih koncepcija za projekat razvoja rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke. Prolaskom kroz morfološku matricu i skupljanjem odgovarajućih realizacija za osnovne funkcije mašine, dobija se plan uzoraka mogućih mašina. Na slici 1.1 su pokazane varijante za četiri klase rekonfigurabilnih mašina alatki:

- (i) multifunkcionalne rekonfigurabilne petoosne mašine alatke (4 varijante),
- (ii) vertikalne rekonfigurabilne petoosne mašine (2 varijante),
- (iii) rekonfigurabilne mašine alatke sa 3, 4 i 5 serijskih osa i varijanta 5-osne sa hibridnom kinematikom
- (iv) petoosna mašina sa hibridnom kinematikom za koju su tri ose sa paralelnom kinematikom, a dve sa serijskom.

Prolaskom kroz morfološku matricu, sa slike 1.1, može se izvršiti opis realizacije svake od razmatranih mašina na sledeći način:

- mašina tipa S1 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module  $S1 = P1 \wedge BB \wedge JSM \wedge GV \wedge SV$ ,
- mašina tipa S3 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module  $S3 = P1 \wedge ST \wedge JSM \wedge DOS \wedge GV \wedge SV$ ,
- mašina tipa S4 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module  $S4 = P1 \wedge ST \wedge DSH \wedge GV_{HG} \wedge SV$ ,
- mašina tipa S5 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module  $S5 = P3 \wedge T1 \wedge DSV \wedge UFO$ , itd.

Prva klasa multifunkcionalne rekonfigurabilne petoosne mašine alatke obuhvata 4 varijante struktura: S1, S2, S3 i S4. Alternative za stubove za svaku mašinu su pokazane ili kao „Box in Box” (S1), ili kao stub (S2, S3 i S4). Druga klasa vertikalne rekonfigurabilne petoosne mašine obuhvata dve varijante struktura S5 i S6. Kod ovih mašina je planirana portalna osnovna mašina strukture VXYZ sa dodavanjem dvoosnog nagibno-obrtnog stola (A,C), za S5 ili (B,C), za S6, ispred osnovne mašine.

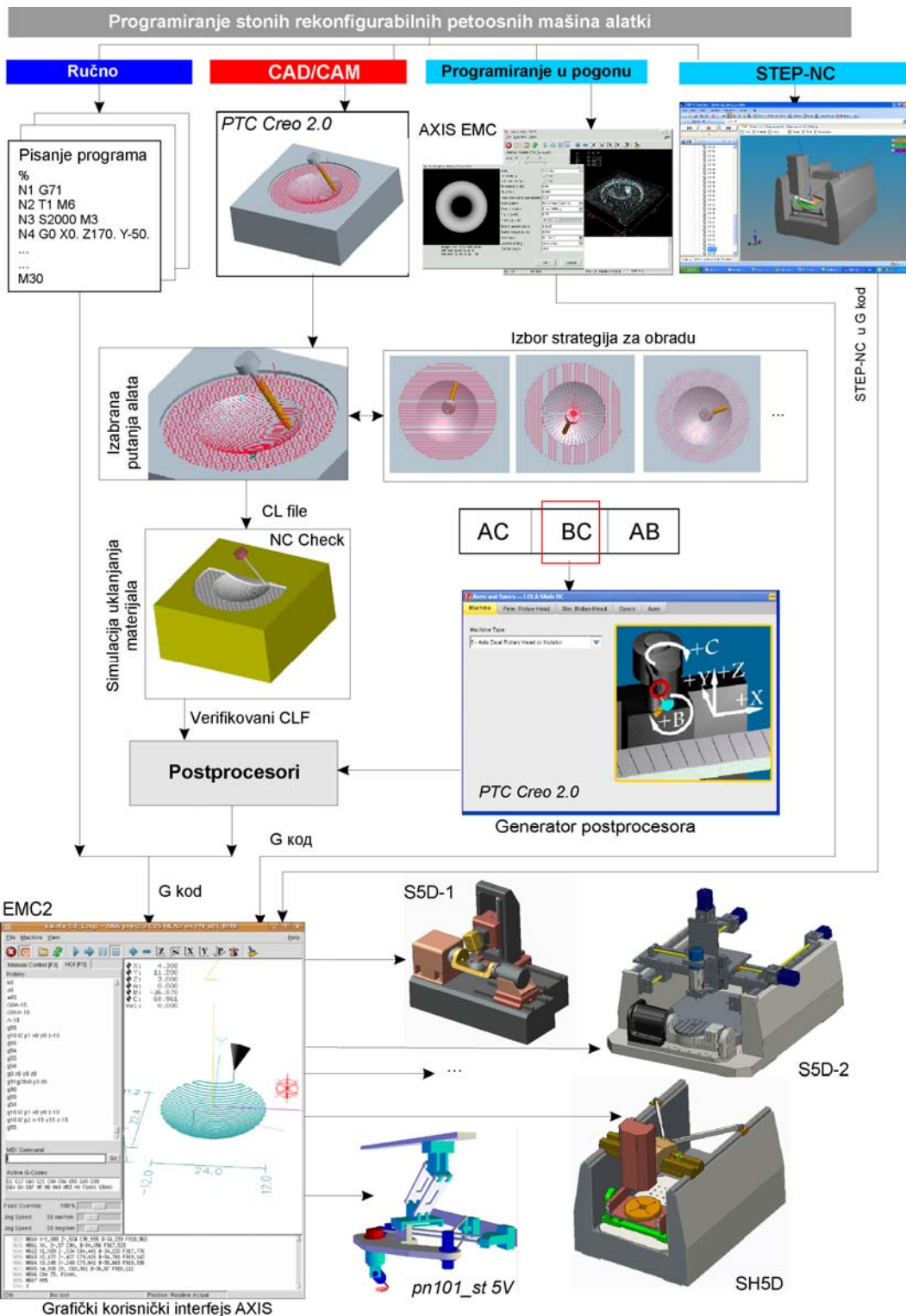
Treća klasa rekonfigurabilne mašine alatke obuhvata varijante mašine sa serijskom i hibridnom kinematikom. Osnovna mašina je troosna portalna glodalica strukture VXYZ (S3D). Dodavanjem dvoosnog nagibno obrtnog stola (B,C) ispred osnovne mašine, ova mašina postaje petoosna (S5D), strukture WCBVXYZT [8]. Fiksiranjem ose  $B=0^\circ$  ili  $B=90^\circ$ , uz zadržavanje upravljive ose C, mašina postaje četveroosna na kojoj je moguća i obrada struganjem (S4D). Četvrta moguća koncepcija podrazumeva osnovnu mašinu sa hibridnom kinematikom i to: dvoosni paralelni modul MOMA, koji ostvaruje pomeranje u ravni (X,Y) preko pasivnog translatorskog modula, dok je Z osa serijska. Na ovakvoj osnovnoj mašini ostaje i dvoosno obrtni nagibni sto, čime je dobijena i petoosna mašina sa hibridnom kinematikom (H5D).

Četvrta klasa petoosne mašine sa hibridnom kinematikom predstavlja nadogradnju stone troosne mašine sa paralelnim kinematikom pn101\_st na petoosnu, dodavanjem serijske dvoosne glave na pokretnu platformu mehanizma. U okviru svake od klasa stonih rekonfigurabilnih mašina alatki uspostavljen je sistem sastavnih elemenata, na modularnom principu, u cilju rekonfigurisanja kako hardverskog tako i softverskog (upravljačkog) dela sistema. Za razmatrane mašine je planirano upravljanje otvorene arhitekture na PC Linux platformi i EMC2 upravljačkom softveru [8,13].

Za rekonfigurabilne mašine, prikazane u ovom radu, razmatrani su metodi za njihovo programiranje i odgovarajuća okruženja u poglavlju 3. Na bazi pripremljenih odgovarajućih virtuelnih prototipova u CAD/CAM okruženju ostvarena je simulacija rada kompletnih modela mašina po zadatom programu i to u dva okruženja. Prvo, u CAD/CAM okruženju na bazi CLF (Cutter Location File) i G koda, poglavlje 4, i okruženju STEP-NC Machine softvera na bazi \*.stpnc programa, poglavlje 5, kao novog pristupa u programiranju numerički upravljanih mašina alatki [11].

### 3. OKRUŽENJE ZA OFF-LINE PROGRAMIRANJE STONIH REKONFIGURABILNIH PETOOSNIH MAŠINA ALATKI

Programiranje stonih rekonfigurabilnih petoosnih mašina alatki se vrši pomoću G koda, bez ograničenja u odnosu na pripremne i pomoćne funkcije, koordinatne sisteme i korekcije alata. Ilustracija metoda i okruženja za programiranje rekonfigurabilnih petoosnih mašina alatki, prikazana je na slici 2. Zadržana je i mogućnost ručnog i parametarskog programiranja, kao i programiranja u pogonu. Za programiranje je izabrano okruženje PTC Creo 2.0 koje ima mogućnost korišćenja generatora postprocesora, za konfigurisanje odgovarajućih postprocesora prema konfiguraciji osa petoosnih mašina alatki, što je od velike važnosti za uspešno generisanje G koda. U okruženju za programiranje je moguće vršiti izbore različitih strategija za obradu i njihovu simulaciju putanje alata, koja uključuje i mogućnost simulacije uklanjanja materijala (NC Check).



**Slika 2.** Metodi i softverska okruženja za programiranja rekonfigurabilnih mašina

Za primenu novog metoda programiranja je izabrano okruženje *STEP-NC Machine* u kombinaciji sa izabranim *CAD/CAM* okruženjem za programiranje. Komunikacija između softvera se obavlja na bazi modela izratka, priprema, alata u STEP formatu, kao i dobijenih putanja alata (CLF). Pošto još uvek ne raspolažemo mašinama čije upravljačke jedinice mogu da interpretiraju *STEP-NC* programe, softver ima veliku bazu postojećih postprocesora, kojim se programi iz *STEP-NC* formata mogu postprocesirati u odgovarajući G kod.

Simulacija obrade u cilju verifikacije programa, pre same obrade na mašini su za mašine alatke u višeosnoj obradi vrlo značajne. U tom cilju je i *CAD/CAM* okruženje za programiranje, pripremljeno da može da uključi i simulaciju rada kompletnog virtuelnog prototipa mašine. Ova simulacija podrazumeva, mogućnost da prilikom simulacije putanje alata, budu pokretne sve ose mašine, odnosno da virtuelna mašina

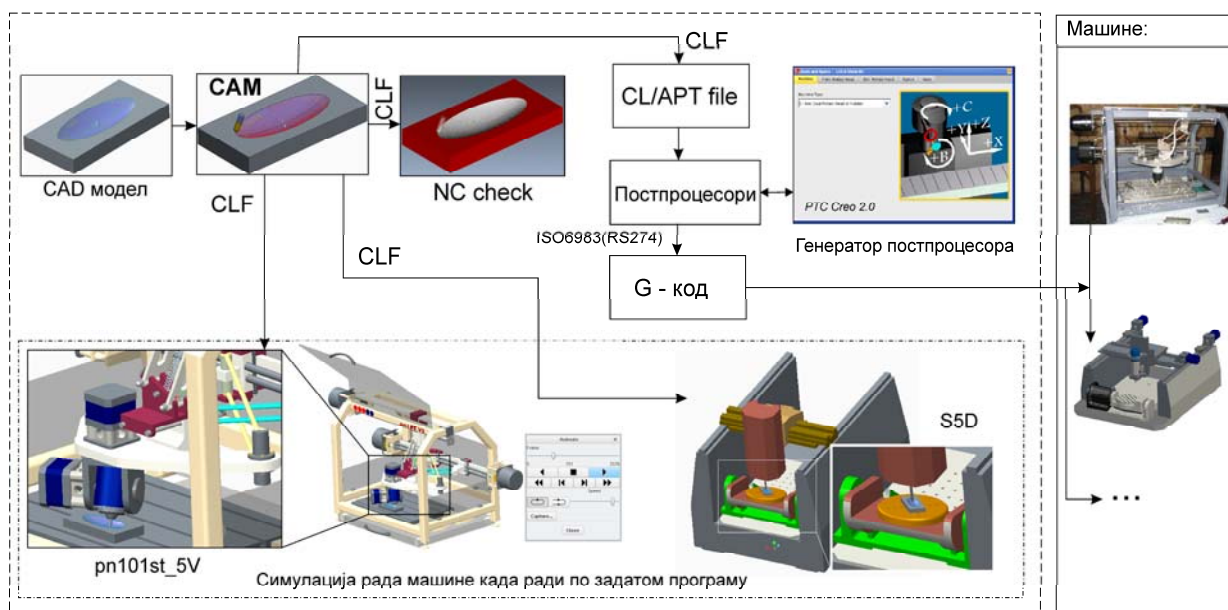


radi po zadatom programu na bazi CLF-a. Ova simulacija se može realizovati kako u CAD/CAM sistemu PTC Creo 2 tako i u okruženju VeriCUT-a, koji se koristi za simulacije uklanjanja materijala, a integrisan je sa pomenutim CAD/CAM sistemom.

#### 4. SIMULACIJA RADA MAŠINE U REŽIMU RADA\_PO ZADATOM PROGRAMU U CAD/CAM OKRUŽENJU

U ovom odeljku je pokazano izabrano okruženje za programiranje i dva izabrana prototipa (pn101\_st\_5V i S5D) sa primerima simulacije rada mašina prema zadatom programu za obradu probnog dela sa elipsoidnim udubljenjem, slika 3. Simulacija kinematike virtuelnog prototipa omogućava kretanje modeliranih segmenata, sa alatom na kraju, koji na ekranu iscrtava putanju alata, koja je nastala kao rezultat izvršenja zadatog programa u CLF formatu [12,14]. Primenjeni metodi za verifikaciju programa su: simulacija putanje alata, simulacija uklanjanja materijala (NC Check) i simulacija rada mašine po zadatom programu. Jedan isti tehnološki postupak se može koristiti za obradu na različitim konfiguracijama mašine izborom različitih konfigurisanih postprocesora, čime se G kod prilagođava formatu konkretne izabrane mašine. Format programa, koji koriste razmatrane mašine koje se upravljaju pomoću sistema EMC2, zasniva se na G kôdu po standardu RS 274 (ISO6983). Odabrana je verzija koja je slična formatu programa koje koriste Fanuc CNC sistemi, za koje postoje pouzdani postprocesori.

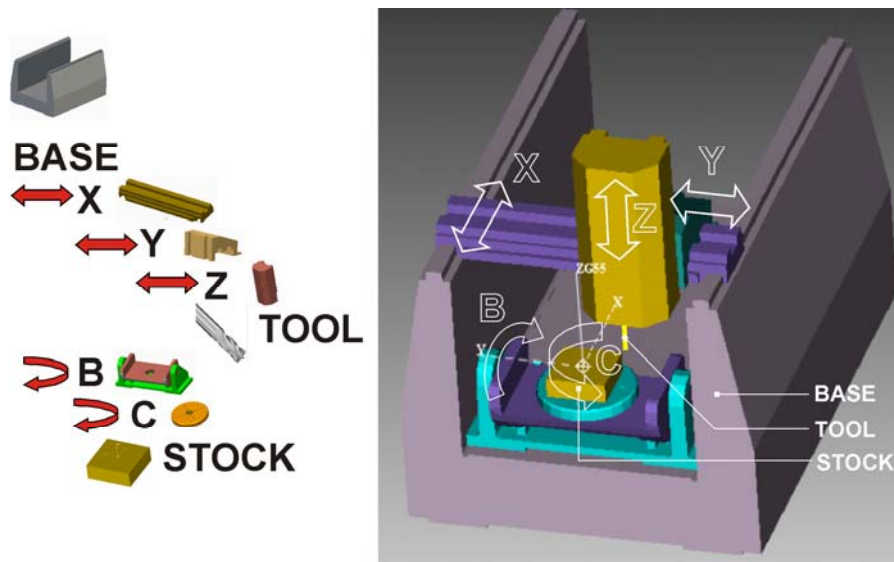
CAD/CAM систем - PTC Creo 2.0



*Слика 3. Okruženje za programiranje i simulacija rada mašina prema zadatom programu*

Simulacija rada mašine primenom virtuelne mašine je najbezbedniji i najisplativiji način verifikacije programa za višeosnu obradu. Za završnu verifikaciju programa u G kôdu korišćen je i softver za simulaciju uklanjanja materijala VeriCUT. Pored uobičajene simulacije uklanjanja materijala, u ovom radu je pokazan primer integrisanja virtuelnog prototipa mašine u simulaciju na primeru mašine SH5D.

Prvi korak za pripremu virtuelnog prototipa mašine za simulaciju je priprema skeleton modela koji definiše kinematičku strukturu mašine, odnosno opisuje način povezivanja linearnih i obrtnih osa, slika 4. Za svaku mašinu treba uočiti i definisati način vezivanja komponenata baze, alata i priprema (BASE, TOOL i STOCK) [4]. Hijerarhijsko drvo komponenata mašine je pokazano na slici 4. Baza (BASE) je prva komponenta, za koju se prvo povezuje klizač za X osu, za nju klizač za Y osu, i za nju klizač za Z osu. Poslednja komponenta na ovoj grani je alat, koji je povezan za modul Z ose. Druga grana, koja je takođe povezana sa bazom, počinje sa modulom obrtne ose B, za koju je vezan modul obrtnog stola C, na koji se postavlja pripremak (STOCK). Ovaj opis kinematike predstavlja osnovnu uprošćenu strukturu mašine na bazi skeleton modela, bez suvišnih detalja. Većina softvera koji omogućavaju simulaciju rada mašine, koriste STL fajlove za konfigurisanje virtuelne mašine, što je i ovde slučaj. U okruženje VeriCUT-a, su učitavane komponente mašine u STL formatu i povezivane odgovarajućim kinematičkim vezama, saglasno strukturi mašine alatke.

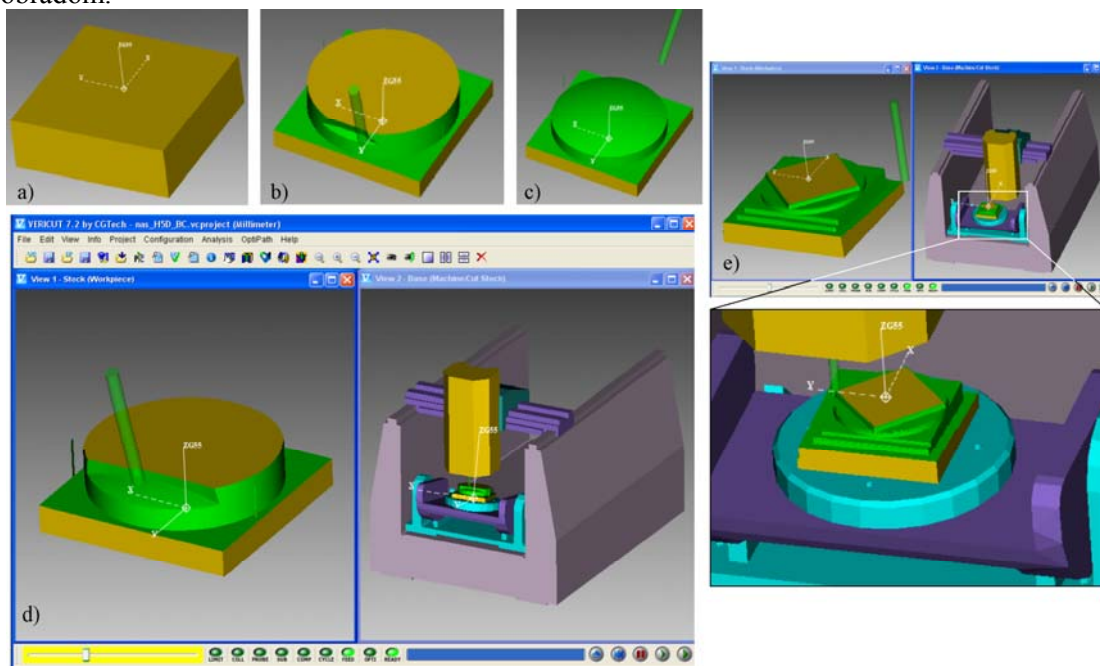


Slika 4. Konfigurisana virtuelna mašina i simulacija rada u VeriCUT-u [14]

Primer verifikacije programa koja uključuje i rad virtuelne mašine simulacijom uklanjanja materijala u VeriCUT okruženju pokazan je na slici 5, za mašinu SH5D.

Pokazana su dva primera i to:

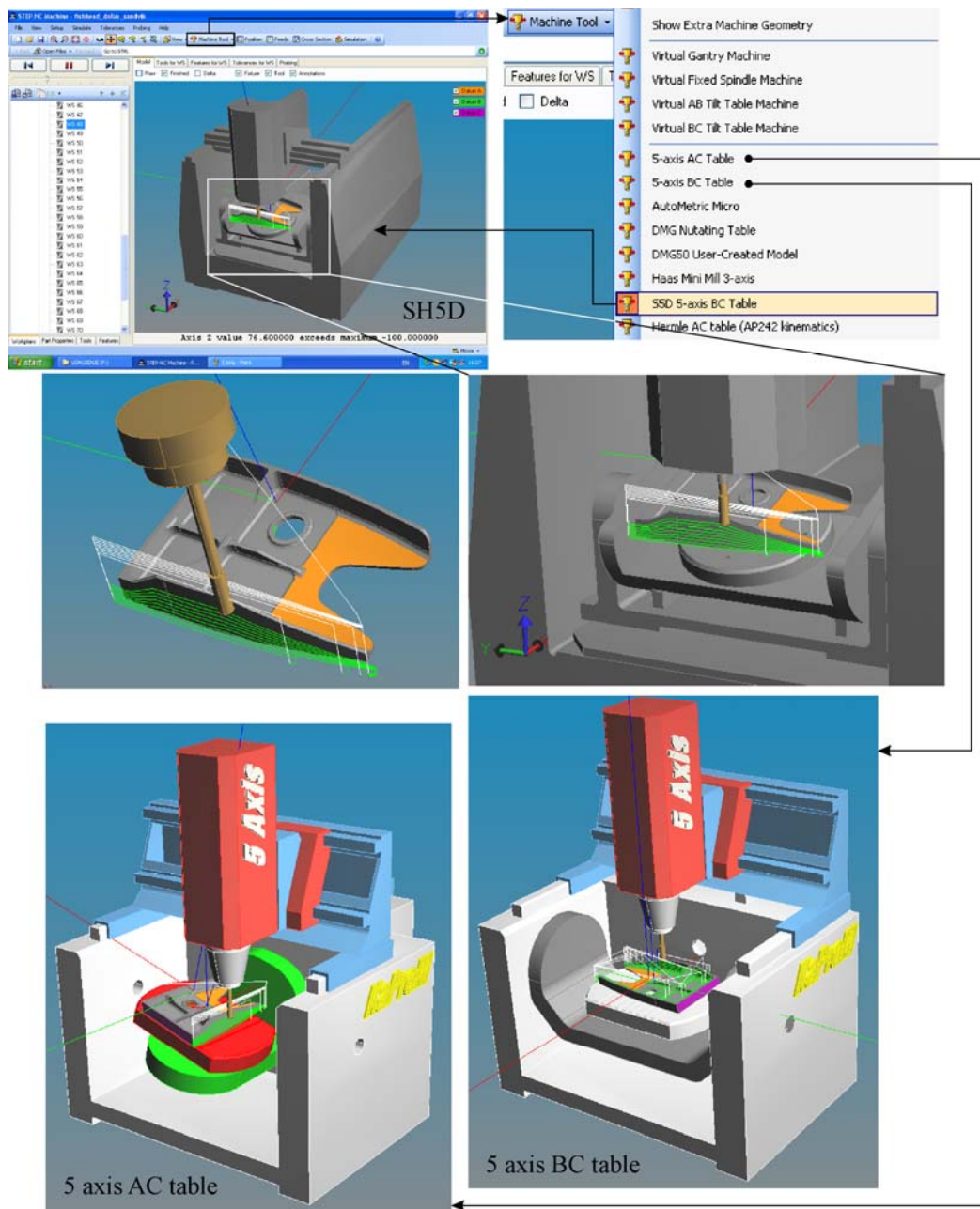
- (1) probni deo oblika kalote (slike 5a-d) na cilindričnoj osnovi, gde je predobrada ostvorena troosnom obradom, dok je završna obrada kalote ostvorena petoosnom obradom i
- (2) primer obrade probnog dela po standardu *NAS979* (slika 5e), koja je kompletno urađena troosnom obradom.



Slika 5. Konfigurisana virtuelna mašina i simulacija rada u VeriCUT-u

## 5. SIMULACIJA RADA MAŠINE U REŽIMU RADA PO ZADATOM PROGRAMU U STEP-NC MACHINE OKRUŽENJU

U cilju pripreme za novi metod programiranja primenom *STEP-NC* standarda, takođe su konfigurisane i inegrirane virtuelne mašine koje rade po programu u *STEP-NC* formatu u okruženju softvera *STEP-NC Machine*. Za ilustraciju je na slici 6 pokazan primer simulacije rada na bazi *STEP-NC* programa rekonfigurabilnih petoosnih mašina SSD, 5-axis AC table i 5-axis BC table. Mašine su konfigurisane i uključene u bazu raspoloživih mašina ovog softvera, pa se mogu izabrati iz menija (*Machine Tool*) i pratiti njihov rad.



**Slika 6.** Virtuelne mašine S5D, 5-axi $c$  AC table i 5-axis BC table u okruženju STEP-NC Machine

Može se očekivati da će se projektovanje proizvoda i u budućnosti odvijati primenom CAD sistema, dok bi se programiranje numerički upravljanih mašina alatki moglo odvijati i po novim procedurama zasnovanih na formatizovanju integrisnog modela mašinskog dela po STEP-NC protokolu i standardima ISO 10303 i/ili ISO 14649.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane četiri klase rekonfigurabilnih mašina alatki kao i 11 varijanti ovih mašina. Uspostavljen je sistem sastavnih elemenata za konfigurisanje ovakvih mašina sa formalizmom za opis konfiguracije mašine, prolaskom kroz morfološku matricu.

Razmotreni su metodi za programiranje rekonfigurabilnih mašina alatki, kao i simulacija rada mašina po zadatom programu za verifikaciju programa obrade i uočavanje eventualnih kolizija u toku obrade, radi kompletiranja okruženja za programiranje.

Primena rekonfigurabilnih mašina je značajna za dalja istraživanja u oblasti višeosne obrade i rekonfigurabilnih petoosnih mašina, kao i za edukaciju za programiranje, što je posebno značajno za obrazovne ustanove, prilikom sticanja znanja o kompleksnim rekonfigurabilnim višeosnim mašinama. Do sada su za neke od mašina pripremljena i odgovarajuća upravljanja sa integrisanim virtuelnim mašinama



(pn101\_st i pn101\_5V) u EMC2 upravljačkom softveru. U sklopu daljih istraživanja razmatraće se i realizacija virtuelnih petoosnih mašina integrisanih u sistem upravljanja za one koncepcije koje budu izabrane za realizaciju.

## 7. LITERATURA

- [1] Moriwaki T.: *Multi-functional machine tool*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, p.736-749, 2008.
- [2] Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Brussel H.V.: *Reconfigurable Manufacturing Systems*, Annals of the CIRP, Vol. 48/2, p. 527-540. 1999.
- [3] Lee, R.S., She C.H., *Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools*, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 13, No. 9, p. 658–665, 1997.
- [4] Apro, K., *Secrets of 5-axis machining*, Industrial Press Inc., ISBN 978-0-8311-3375-7, Printed by Thomson Press India Limited, 2008.
- [5] She, C-H., Lee, R-S.: *A Postprocessor Based on the Kinematics Model for General Five-Axis Machine Tools*, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 2, No. 2, p.131-141, 2000.
- [6] Tanović, Lj., Bojanić, P., Glavonjić, M., Milutinović, D., Majstorović, V., Puzović, R., Kokotović, B., Popović, M., Živanović, S., Slavković, N., i drugi, *Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema*, TR-035022, Godišnji izveštaj o realizaciji projekta za period 01.01. 2014. do 31.12.2014., Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [7] Tanović, Lj., Milutinović, D., Majstorović, V., Puzović, R., Živanović, S., Kokotović, B., Popović, M., Slavković, N., i drugi, *Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema*, TR-035022, Godišnji izveštaj o realizaciji projekta za period 01.01.2015. do 31.12.2015., Mašinski fakultet, Beograd, 2015.
- [8] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Konfigurisanje stonih petoosnih mašina alatki*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo 62, Broj 5, str 857-863, Godina LXVIII 2013.
- [9] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Koncepcije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki*, Infotech 2014, Zbornik radova, str. 857-863, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Jahorina, 2014.
- [10] Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B., *Development of Multifunctional Reconfigurable Desktop Machine Tool with Hybrid Kinematics*, TECHNICS special edition, Magazine of the Union of Engineers and Technicians of Serbia, Mechanical Engineering, pp. 71-80, Year LXX 2015.
- [11] STEP-NC Machine for CAM/CNC, <http://www.steptools.com/products/stepncmachine/>, 2016.
- [12] Živanović S., *Konfigurisanje novih mašina alatki*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.
- [13] Linux CNC, <http://linuxcnc.org/>, 2016.
- [14] Zivanovic, S., Kokotovic, B., *Configuring a virtual desktop 5-axis machine tool for machine simulation*, Proceedings of the 12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2015, ISBN 978-99938-39-53-8, pp 255-262, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, 29-30 May, 2015.

**Zivanovic, S., Kokotovic, B., Slavkovic, N., Milutinovic, D.**

### **CONFIGURING OF MULTIFUNCTIONAL AND RECONFIGURABLE MACHINE TOOLS AND METHODS FOR THEIR PROGRAMMING AND PROGRAM VERIFICATION**

**Abstract:** *The paper presents the concept of reconfigurable machine tools, as a machine with serial and hybrid kinematics. The methods for their programming based on G codes (ISO 6983) and the new method of programming based on STEP-NC standard (ISO10303, ISO14649), are considered. Environment for off-line programming in selected CAD/CAM system (in G code) and software STEP-NC Machine for the new programming method based on STEP-NC program, have been prepared and demonstrated. In both environments are implemented virtual models for considered desktop reconfigurable machine tools for the purpose of machine simulation when the virtual machine working by running program in environment for programming.*

**Key words:** *CAD/CAM, STEP-NC, desktop reconfigurable machine tools*



Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., Miljković, Z.<sup>1)</sup>

## MULTIAGENTNI I HOLON TEHNOLOŠKI SISTEMI U PROJEKTOVANJU TEHNOLOŠKIH PROCESA I TERMINIRANJU PROIZVODNJE<sup>2)</sup>

### Rezime

Projektovanje tehnoloških procesa predstavlja određivanje postupka proizvodnje uz zadovoljenje prethodno definisanih ciljeva i ograničenja. Terminiranjem proizvodnje se na osnovu proizvodnog plana i prethodno određenih tehnoloških postupaka dodeljuju optimalni proizvodni resursi za odgovarajući vremenski period. Uvođenjem koncepta masovne kastomizacije, već ranije ključne funkcije, projektovanje i terminiranje proizvodnje, sada imaju krucijalnu ulogu u tehnološkom sistemu zbog sve većih zahteva koje se pred ove funkcije postavljaju. Rad se bavi uvođenjem koncepta multiagentnih i holon tehnoloških sistema uz pregled stanja u oblasti projektovanja tehnoloških procesa i terminiranja proizvodnje. Radom je obuhvaćen tradicionalni, sledstveni, pristup projektovanju i terminiranju, ali i integrisan prilaz problematici.

*Ključne reči:* multiagentni sistemi, holon tehnološki sistemi, projektovanje tehnoloških procesa, terminiranje proizvodnje, integrisano projektovanje tehnoloških procesa i terminiranje proizvodnje

### 1. UVOD

Pojavom potrebe za masovnom kastomizacijom proizvoda, razvojem i definisanjem *Lean* proizvodnje sa konceptom *Just-in-Time* zahtevi koji se postavljaju pred projektovanje i terminiranje tehnoloških procesa sve su veći. Rokovi su kraći, varijacije proizvoda veće, a serije manje. Decentralizovan pristup problemu jedan je od načina na koji savremena preduzeća teže da ostvare konkurentnost na modernom tržištu. S tim u vezi, sistemi zasnovani na agentima, zajedno sa holon tehnološkim sistemima, poslednjih godina zauzimaju sve veću pažnju u naučnoj javnosti. Razvoj i primena sistema zasnovanih na agentima, kao i holon tehnoloških sistema, ogleđa se u kreiranju sistema za projektovanje tehnoloških procesa i terminiranje proizvodnje, kao i za integraciju dva pomenuta procesa.

Rad predstavlja pregled stanja u oblasti projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa uz akcenat na primenu multiagentnih i holon sistema za rešavanje pomenutog problema. Pregled stanja organizovan je kroz osam poglavlja. U uvodnom poglavlju definisana je potreba za primenom decentralizovanih sistema u oblasti planiranja i terminiranja. U drugom poglavlju detaljnije je definisan sam problem projektovanja tehnoloških procesa i terminiranja proizvodnje. Treće poglavlje bavi se definisanjem i komparativnom analizom multiagentnih i holon tehnoloških sistema. Četvrto poglavlje tretira literaturne izvore iz oblasti projektovanja tehnoloških procesa zasnovanih na multiagentnoj metodologiji, dok se u petom poglavlju akcenat stavlja na pregled literature iz oblasti terminiranja proizvodnih procesa. Šesto poglavlje obrađuje literaturne izvore vezane za integraciju planiranja i terminiranja proizvodnje uz primenu multiagentnih i holon tehnoloških sistema. U sedmom poglavlju dat je zaključak i analiza trenutnog stanja u oblasti istraživanja. Korišćena literatura je navedena u poslednjem poglavlju.

<sup>1)</sup> Jelena Petronijević, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, e-mail: [jpetronijevic@mas.bg.ac.rs](mailto:jpetronijevic@mas.bg.ac.rs),

Milica Petrović, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, e-mail: [mmpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmpetrovic@mas.bg.ac.rs),

dr Najdan Vuković, naučni saradnik, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, e-mail: [nvukovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nvukovic@mas.bg.ac.rs)

dr Marko Mitić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, e-mail: [mmitic@mas.bg.ac.rs](mailto:mmitic@mas.bg.ac.rs),

dr Bojan Babić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, e-mail: [bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs),

dr Zoran Miljković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, e-mail: [zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs).

<sup>2)</sup> Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativni pristup u primeni inteligentnih tehnoloških sistema za proizvodnju delova od lima zasnovan na ekološkim principima“ (evid. br. TR-35004) Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, 2011-2016.

## 2. FORMULACIJA PROBLEMA

Koncept masovne kastomizacije proizvoda, zajedno sa drugim konceptima pomenutim u prethodnom poglavlju doveo je do individualizacije proizvoda i promene od tržišta okrenutog prodaji, do tržišta okrenutog kupcu [1]. Sve to prouzrokovalo je izuzetno promenljivo okruženja u kom preduzeća posluju i na čije promene je potrebno odgovoriti u veoma kratkom vremenskom okviru. Potreba za sve većom fleksibilnošću i produktivnošću, uz manju predikciju procesa, čini upravljanje tehnološkim sistemima veoma kompleksnim. Ako se uzme u obzir i smanjenje rokova i serija, kao i povećanje varijabilnosti proizvoda zahtevi koji se stavljaju pred ključne funkcije u tehnološkim sistemima, planiranje i terminiranje proizvodnje, rastu u svakom pogledu. Preduzeće može biti konkurentno na tržištu samo ako dve pomenute funkcije uz uvedene promene na tržištu ne ugrožavaju cenu i kvalitet proizvoda, kao i dostavu u zadatom vremenskom roku.

Strogo gledajući, projektovanje tehnološkog procesa predstavlja transformaciju tehnološke informacije u proces proizvodnje. Jedan od najtežih zadataka koji se stavlja pred ovaj sistem je i konzistencija i optimizacija tehnoloških procesa [2].

Jedan od najkompleksnijih problema terminiranja svakako je onaj koji se vezuje za proces proizvodnje. Poznati problem terminiranja iz ove oblasti svakako je problem terminiranja proizvodnje orijentisane procesu (*job shop scheduling*). Ovaj vid proizvodnje se prema [2] može definisati kao problem sa zadatim brojem mašina alatki i delova. Svaka mašina alatka može vršiti obradu samo jednog dela u određeno vreme. Svaki deo sastoji se iz niza objekata međuoperacione manipulacije čija obrada mora biti izvedena bez prekida u određenom vremenskom periodu i na određenoj mašini alatki. Osnovni zadatak terminiranja proizvodnje je nalaženje optimalnog plana tako da se obezbedi minimalno vreme za izradu svih delova pri čemu je broj mogućih rešenja za  $n$  delova i  $m$  mašina latak jednak  $(n!)^m$ .

Sveobuhvatno posmatrano planiranje i terminiranje proizvodnje prema [2, 3] postaje složenije uzimajući u obzir sledeće:

- a) Kada se uvrste ostali proizvodni resursi, kao što su ljudstvo i alati, problem terminiranja u procesu orijentisanoj proizvodnji (*job shop*). Tako za  $n$  delova,  $m$  mašina alatki i  $k$  operatera, broj mogućih rešenja problema dostiže  $((n!)^m)^k$ .
- b) Kada se projektovanje tehnoloških procesa i terminiranje proizvodnje izvodi istovremeno. Tradicionalna proizvodnja procese planiranja i terminiranja posmatra posebno što može dovesti do rešenja koja nisu optimalna. Takođe, terminiranje proizvodnje na osnovu fiksnih tehnoloških procesa može uzrokovati neizbalansirana opterećenja resursa sa posledičnom pojavom uskih grla. Planiranje tehnoloških procesa naglašava tehnološke zahteve za obradu delova, dok process terminiranja uzima u obzir vremenski aspekt i deljenje zajedničkih resursa. Ako ne postoji koordinacija pri izvođenju ova dva procesa, različiti ciljevi koji se pred funkcije postavljaju mogu dovesti do konflikta. Integracija faze projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa dovodi do postizanja globalnog optimuma, ali sa druge strane značajno povećava prostor rešenja.
- c) Kada se posmatraju dinamičke promene okruženja. Dinamičke promene u realnom tehnološkom okruženju veoma su česta pojava. S jedne strane mogu se posmatrati promene samih zadataka koje se stavljaju pred sistem. Tako se mogu dodati zadaci, uvrstiti promene na postojećim zadacima ili zahtevati da se isključe određeni zadaci. S druge strane, resursi samog sistema mogu biti predmet promene. Određeni resursi mogu biti nedostupni ili dodatni resursi mogu biti uvedeni. Vreme potrebno za izvođenje zadatka i vremena početka izvođenja zadataka promenljiva su. Ostale nesigurnosti samog sistema uključuju otkaze mašina, nedostatke materijala, alata ili ljudstva i ostale. Kada se sve to posmatra, prethodno formirani optimalni plan terminiranja vrlo lako može postati neodgovarajuć nakon pojave neke od dinamičnih promena u sistemu. Pomenuti problem se smatra dinamičkim terminiranjem ili terminiranjem u realnom vremenu.

Shodno prethodnom, a prema [4], proizilazi definicija problema integrisanog planiranja i terminiranja tehnoloških procesa: Za skup od  $n$  delova koji se obrađuju na mašinama alatkama uzimajući u obzir alternativne tehnološke resurse, odabrali odgovarajući resurs i tehnološki proces sa ciljem definisanja plana terminiranja koji poštuje pravila prethodjenja između obrade objekata međuoperacione manipulacije i u kojem su zadovoljeni zadati ciljevi. Ulaz u sistem predstavljaju alternativni tehnološki postupci za svaki deo kojima se u problem implementiraju tri vrste fleksibilnosti:



- a) Operativna fleksibilnost omogućuje izvedejne obrade objekata međuoperacione manipulacije na različitim mašinama alatkama.
- b) Fleksibilnost sekvence procesa omogućuje obradu različitim redosledom.
- c) Fleksibilnost procesa omogućuje alternativne obrade jednog geometrijskog primitiva.

Jedna od metoda prikazivanja fleksibilnosti je I/ILI mreža (*AND/OR network*). Takođe, za razliku od statičkog okruženja gde su parametri poznati pre početka procesa kod dinamičkog projektovanja i terminiranja to nije slučaj. Iz tog razloga pri rešavanju dinamičkog problema treba uzeti u obzir i različite dinamičke promene koje su u prethodnom pasusu rada detaljnije obrađene i navedene.

Zbog svega navedenog veliki broj autora poslednjih godina teži razvoju novi tehnoloških paradigmi sa ciljem rešavanja navedenih problema i postizanjem veće fleksibilnosti, autonomije, adaptibilnosti i inteligencije sistema. Kao jedno od rešenja navode se decentralizovani i heterarhijski tehnološki sistemi u kojima se upravljanje proizvodnjom obavlja korišćenjem inteligentnih resursa od kojih je svaki predstavljen odgovarajućim softverskim entitetom [1]. Navedene karakteristike ispunjavaju multiagentni i holon tehnološki sistemi o kojima će više biti reč u narednom poglavlju rada.

### 3. MULTIAGENTNI I HOLON TEHNOLOŠKI SISTEMI

Novi koncepti inteligentnog upravljanja i odlučivanja zasnivaju se na otklanjanju problema koji se javljaju pri centralizovanom odlučivanju [5]. Leitão i Colombo navode da se pomoću distribuiranog pristupa složen problem deli na manje problema, od kojih svaki može biti definisan kao inteligentni blok, odnosno upravljačka jedinica. Svaka upravljačka jedinica je autonomna i poseduje svoje ciljeve, znanja i veštine, međutim nijedna od njih ne poseduje globalni pregled sistema. Globalne odluke, kao što su terminiranje, nadzor i dijagnostika, moraju se donositi kolaboracijom upravljačkih jedinica. Određene upravljačke jedinice povezane su sa fizičkim resursima, kao što su roboti i CNC mašine. Upravljačke jedinice treba da poseduju nekoliko važnih karakteristika od kojih se izdvajaju sledeće: rekonfigurabilnost, robusnost, uključivanje i isključivanje, učenje i ponovna upotreba. Shodno prethodnom, može se izvesti definicija agenta koji obuhvata karakteristike inteligentnih i decentralizovanih sistema upravljanja. Agent se definiše kao nezavisna fizička ili logička komponenta sistema sposobna da deluje u skladu sa svojim ciljevima, kao i da interaguje sa drugim agentima u slučajevima kada ne poseduje znanja i veštine da samostalno ostvari zadatak [6]. Monostori [7], s druge strane, ističe da svaki agent deluje u ime svog projektanta kako bi ispunio svoju svrhu. Svoje interno i eksterno ponašanje samostalno kontroliše te se može smatrati autonomnim. Takođe, agent poseduje određeni nivo inteligencije i mogućnost adaptacije te može prilagoditi svoje ponašanje promeni u okruženju bez intervencije projektanta.

Multiagentni sistemi predstavljaju mrežu agenata koji interaguju i komuniciraju međusobno [7]. Sveobuhvatna operativnost multiagentnih sistema bazirana je na organizaciji sistema koja potiče od karakteristika individualnog aganta. Organizacija definiše sferu delovanja agenata, kao i njihovu interakciju. Kolaboracija takođe je jedna od karakteristika multiagentnog sistema i odnosi se na delovanje agenata prema ostvarenju zajedničkih ciljeva. Rezultat međusobne interakcije agenata u multiagentnim sistemima su odluke i akcije. Donošenje odluke agenta zavisi od akcija drugih agenata. Ostvarenje koordinisanog rada moguće je isključivo na osnovu postojanja određenog vida komunikacije između agenata. Zbog svega navedenog multiagentni sistemi predstavljaju sisteme koji su sposobni da rešavaju probleme čija se rešenja ne mogu direktno izvesti iz mogućnosti pojedinačnih agenata [7, 8].

Holon tehnološki sistemi nastali su tokom devedesetih godina prošlog veka iz ideje koja je bazirana na društvenom organizovanju [6]. Arthur Koestler [9] uočio je da u složenim sistemima ne postoje celine i delovi, već da ista jedinica može biti i celina i deo. Iz tog razloga stvorio je kovanicu dveju grčkih reči, "holos" koja predstavlja celinu i sufiksa "on" koji se odnosi na česticu. Na taj način i samim nazivom istaknuta je dvojaka priroda svake jedinice sa dvema osnovnim karakteristikama, autonomnošću i kooperacijom. Autonomnost se ogleda u stabilnosti holona koja omogućava istom da deluje nezavisno u nepredviđenim okolnostima. Kooperacija je glavna karakteristika koja međusobnom saradnjom pojedinačne holone transformiše u aktivne komponente veće celine.

Tehnološki sistem se, gledano kroz definiciju holona, vidi kao skup autonomnih modula, holona, sa distribuiranim upravljanjem, [10]. Na ovaj način sistem predstavlja hijerarhijsku strukturu čije jedinice koordinisanim dejstvom uz individualna znanja i veštine postižu ciljeve sistema. U sistemima postoje

definisana pravila i direktive. Svaki holon, za razliku od tradicionalne definicije hijerarhije, može svojim dinamičnim dejstvom biti deo više sistema. Holon sistemi su tako sistemi koji kombinuju stabilnost hijerarhijskih struktura i fleksibilnost heterarhije. Svaki holon u sistemu je autonomna kooperativna jedinka za transformaciju, prenošenje, skladištenje i/ili proveru podataka ili fizičkih objekata. Posедуje logičku jedinicu za procesiranje informacija, a može imati i fizičku jedinicu. Prema definiciji, svaki holon može biti deo drugog holona, [6, 10].

Holon tehnološki sistemi i multiagentni sistemi predstavljaju dva veoma slična koncepta. Oba koncepta čvrsto se oslanjaju na autonomnost i kooperaciju svojih jedinki. Ipak, postoje određene razlike [6]. U pogledu porekla, agenti se vezuju za veštačku inteligenciju (artificial intelligence), dok je holon nastao iz rešavanja problema fleksibilnih tehnoloških sistema te svoje poreklo nalazi u konceptu računarski integrisanih tehnologija (computer integrated manufacturing – CIM). Holon je koncept, dok agenti predstavljaju i koncept i tehnologiju. Za razliku od agenata, holon može biti predstavljen sa više holona nižeg nivoa. U smislu modeliranja, agenti uobičajeno predstavljaju softverske komponente i fokus im nije na fizičkoj integraciji, što nije slučaj sa holonima. Takođe, za razliku od agenata, holon mora imati mogućnost da deluje na ograničenja u realnom vremenu. Koncept holon tehnoloških sistema može se implementirati primenom agenata. Tako posmatrano, holon je reaktivni agent koji deluje u realnom vremenu i ima vezu sa fizičkim svetom.

#### **4. PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA**

Projektovanje tehnoloških procesa uz dodelu odgovarajućih resursa prema [7] ostvaruje se na nekoliko različitih načina prijemnom agenata. Jedan od vidova dodeljivanja resursa pri projektovanju tehnoloških postupaka izdvaja kreiranje klasa resursa sa ostvarenjem dinamičkih veza istih i između entiteta planiranja. Drugi način koji se navodi obuhvata primenu mehanizma pregovaranja po ugledu na tržišni mehanizam. Tako razlikujemo agente za projekat, projektne aktivnosti, zadatak, resurse i koordinaciju koji pregovaranjem ostvaruju zajednički cilj. Sekvencijalna dodela resursa takođe je jedan od načina koji se primenjuje. Virtualno planiranje takođe je jedan od načina primene agenata u ovoj oblasti. Ovde klasteri agenta povezani u mreže imaju zadatak da reše tehnološke probleme koji se pred njih postavljaju. Tom prilikom takođe se koristi mehanizam aukcije, pregovaranja i ugovaranja.

#### **5. TERMINIRANJE PROIZVODNJE**

Primena multiagentne metodologije može imati nekoliko prednosti u odnosu na različite tradicionalne pristupe rešavanja problema terminiranja tehnoloških procesa među kojima se prema [2] ističu sledeće: (a) ovi sistemi primenjuju paralelnu obradu podataka tako da mogu biti izuzetno efikasni; (b) omogućuju prilagođavanje individualnih resursa globalnom cilju što dovodi do kooperativnog terminiranja; (c) agenti mogu biti direktno povezani sa fizičkim resursima te na taj način omogućuju terminiranje u realnom vremenu; (d) planiranje se vrši po mehanizmima sličnim onima u lancu snabdevanja tako da se može izvršiti povezivanje i optimizacija na oba nivoa; (e) multiagentni sistemi omogućavaju implementaciju drugih algoritama u svoj sistem. Različite metodologije i tehnike primenjene su na problem terminiranja na bazi agenata. Tako prema [2] razlikujemo tehnike po ugledu na tržište sa terminiranjem u napred i u nazad. Takođe, razlikujemo metode koordinacije između agenta za resurse i agenata koji definišu pravila prethodjenja i rokove. Autori rada [11] razmatrali su dinamički rekonfigurabilni tehnološki sistem korišćenjem multiagenata. Poseban akcenat stavljen je na kreiranje decentralizovanje politike terminiranja za robota koji u zavisnosti od zahteva vezanih za različite proizvode prilagođava svoje akcije. U radu je razvijen i primenjen iterativni protokol pregovaranja i metod za ažuriranje cena potrebnih resursa.

#### **6. INTEGRISANO PROJEKTOVANJE I TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA**

Prilaz integrisanom projektovanju i terminiranju tehnoloških procesa primenom multiagentnih i holon tehnoloških sistema može biti različit. Radovi koji obuhvataju integrisano planiranje i terminiranje proizvodnje prvo su se bavili koordinacijom i statičkim okruženjem multiagentnih sistema. U [12] autori kao podršku logistici i planiranju proizvodnje koriste sistem agenata. U radu je razvijen komunikacioni protokol koji uzima u obzir dostupnost i cenu akcije. U [13] autori razvijan je hibridni multiagentni sistem za dinamičko terminiranje proizvodnje. Dve arhitekture agenata su razmatrane u radu. Prva je jednostavna multiagentna arhitektura koje se sastoji od agenta za mašine i agenta za delove. Druga arhitektura na

prethodnu dodaje i agenta za nadzor, te na taj način stvara hibridnu struktru sistema. Za potrebne hibridnog sistema autori razvijaju i hibridni protokol za pregovaranje koji omogućava pregovaranje na nivou više zadataka i između više zainteresovanih strana istovremeno. Rezultati pokazuju da ovaj vid hibridnog multiagentnog sistema može dati bolje rezultate. Grupa autora koja se bavila dinamičkim terminiranjem proizvodnje u svom sledećem radu [14] razvijala je sistem agenata koji uzima u obzir dinamičko integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa. Tom prilikom korišćen je *on-line* hibridno pregovaranje na bazi agenata (*Online Hybrid Agent-based Negotiation*). Autori rada [15] razmatraju sistem za integrisano planiranje i terminiranje koji se zasniva na minimalnom vremenu obrade i dve vrste dinamičkih promena okruženja, dolaska dela na obardu i otkaza mašine. U [16] autori su predstavili hijerarhijsku strukturu agenata sa mehanizmom akcije koja ima za cilj povećanje operativne fleksibilnosti u dinamičkom okruženju tehnološkog sistema za *Make-to-Order* probleme. Rad se zasniva na samoorganizovanju proizvodnih resursa u granicama tehnološkog okruženja. Organizacija proizvodnih resursa odvija se uz minimizaciju troškova i shodno zahtevima kupaca. U slučaju da se u postojećoj organizaciji zahtev ne može ispuniti, projektovani mehanizam dozvoljava fleksibilno grupisanje u granicama sistema. U [17] autori razmatraju adaptivne sisteme bazirane na agentima i biološki inspirisanim algoritmima za dinamičko rutiranje paleta.

Sličnom problematikom bave se i radovi bazirani na holon tehnološkim sistemima. U radu [18] autori predlažu implementaciju virtualne fabrike za implementaciju holon tehnoloških sistema sa naročitim fokusom na mala i srednja preduzeća. Cilj je da se na ovaj način prikaže i testira upravljanje bazirano na holon sistemima pre same implementacije u tehnološko okruženje. Studija slučaja u radu izvršena je za dinamičko terminiranje proizvodnje. U [1] autori prikazuju koncept pametnih proizvoda za dinamičke promene u tehnološkom okruženju. Razvijeno rešenje bazirano je na holon tehnološkim sistemima i RFID tehnologiji za upravljanje potrebnim informacijama. Autori rada [19] primenjuju holon sisteme u dinamičkom ogruženju u slučajevima pojave prioritnog proizvoda i promene plana proizvodnje u vidu veličine serije i vrsti proizvoda. U radu [20] autori koriste multiagentne sisteme za implementaciju holon tehnoloških sistema za upravljanje resursima u rekonfigurabilnim sistemima. Rezultati su prikazani u vidu kvantitativne i kvalitativne analize eksperimentalnog rekonfigurabilnog sistema. U [21] autori primenjuju virtualni pristup holon tehnoloških sistema za proizvodnju guma. Razvijeni metod omogućuje dinamičku reakciju sistema na nove zahteve optimizacije smanjujući uticaj promena na produktivnost sistema. Evolucija ranije razvijenog ADACOR sistema u polju samoorganizovanih holon tehnoloških sistema baziranih na agentima prikazana je u radu [22]. Dvodimenzionalno samoorganizovanje je postignuto korišćenjem agenata i biološki inspirisanih algoritama na nivou ponašanja (mikro nivo) i strukture sistema (makro nivo). Na ovaj način sistem je unapređen u polju rekonfigurabilnosti.

## 7. ZAKLJUČAK

Projektovanje i terminiranje tehnoloških procesa ključne su funkcije savremenih tehnoloških sistema. Sve zahtevnije tržište bazirano na kastomizaciji i individualizaciji proizvoda ispred ovih funkcija postavlja zahteve za manjim količinama, kraćim rokovima i većim varijetetom proizvoda. Kako bi tehnološki sistemi odgovorili na novonastale zahteve sve veći broj autora bavi se multiagentnim i holon tehnološkim sistemimama koji imaju dovoljan stepen autonomije, agilnosti i fleksibilnosti. U radu je prikazana problematika projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa sa isticanjem zahteva integracije. Definisani su multiagentni i holon tehnoloških sistemi. Izvršen je pregled stanja u oblasti projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa baziranih na multiagentnim i holon tehnološkim sistemima, sa naročitim isticanjem integrisanog projektovanja. Kao zaključak može se izvesti da se pomenuti sistemi široko primenjuju na softverskom i istraživačkom nivou, dok se u narednim godinama očekuje njihova veća primena u industriji.

## 8. LITERATURA

- [1] Zaeh, M.F., Reinhart, G., Ostgathe, M., Geiger, F. and Lau, C., *A holistic approach for the cognitive control of production systems*, Advanced Engineering Informatics, 24(3), 300-307, 2010.
- [2] Shen, W., Wang, L., Hao, Q., *Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey*, Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 36(4), 563-577, 2006.
- [3] Li, X., Zhang, C., Gao, L., Li, W., Shao, X., *An agent-based approach for integrated process planning and scheduling*, Expert Systems with Applications, 37(2), 1256-1264, 2010.
- [4] Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., Owen, G. W., *Applications of particle swarm and optimization in*

- integrated process planning and scheduling*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25, 280-288, 2009.
- [5] Leitão, P., Colombo, A.W., *Petri net based methodology for the development of collaborative production systems*, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'06), Prague, Czech Republic, 819-826, 2006.
- [6] Leitão, P., *Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(7), 979-991, 2009.
- [7] Monostori, L., Váncza, J., Kumara, S. R., *Agent-based systems for manufacturing*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 55(2), 697-720, 2006.
- [8] Shen, W., Hao, L., Yoon, H.J., Norrie, D.H.: *Applications of agent-based system in intelligent manufacturing: An updated review*, Advanced Engineering Informatics, 20, 415-431, 2006.
- [9] Koestler, A., *The Ghost in the Machine*, Arkana Books, London, 1969.
- [10] Giret, A. Botti, V., *Engineering holonic manufacturing systems*, Computers in industry, 60(6), 428-440, 2009.
- [11] Giordani, S., Lujak, M., Martinelli, F., *A decentralized scheduling policy for a dynamically reconfigurable production system*, in: *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*, Springer Berlin Heidelberg, 102-113, 2009.
- [12] Karageorgos, A., Mehandjiev, N., Weichhart, G., Hämmerle, A., *Agent-based optimisation of logistics and production planning*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16(4), 335-348, 2003
- [13] Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., Fung, R. Y., *Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems*, Expert Systems with Applications, 31(3), 486-494, 2006.
- [14] Wong, T. N., Leung, C. W., Mak, K. L., Fung, R. Y. K., *Integrated process planning and scheduling/rescheduling — an agent-based approach*, International Journal of Production Research, 44(18-19), 3627-3655, 2006.
- [15] Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., Miljković, Z., *Integrated Process Planning and Scheduling Using Multi-Agent Methodology*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 834, pp. 193-198, 2016.
- [16] He, N., Zhang, D. Z., Li, Q., *Agent-based hierarchical production planning and scheduling in maketo-order manufacturing system*, International Journal of Production Economics, 149, 117-130, 2014.
- [17] Leitão, P., Barbosa, J., Trentesaux, D., *Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25(5), 934-944, 2012.
- [18] Bal, M. and Hashemipour, M., *Virtual factory approach for implementation of holonic control in industrial applications: A case study in die-casting industry*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25(3), 570-581, 2009.
- [19] Jana, T.K., Bairagi, B., Paul, S., Sarkar, B., Saha, J., *Dynamic schedule execution in an agent based holonic manufacturing system*, Journal of Manufacturing Systems, 32(4), 801-816, 2013.
- [20] Kruger, K. and Basson, A.H., *Multi-Agent Systems vs IEC 61499 for Holonic Resource Control in Reconfigurable Systems*, Procedia CIRP, 7, pp.503-508, 2013..
- [21] Jovanovic, M., Zupan, S., Starbek, M., Prebil, I., *Virtual approach to holonic control of the tyre-manufacturing system*, Journal of Manufacturing Systems, 33(1), 116-128, 2014.
- [22] Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., Trentesaux, D., *Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution*, Computers in Industry, 66, 99-111, 2015.

**Petronijević, J., Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B., Miljković, Z.**

## **MULTI-AGENT AND HOLONIC MANUFACTURING SYSTEMS FOR PROCESS PLANNING AND SCHEDULING**

**Abstract:** *Process planning can be defined as determination of manufacturing processes by achieving its goals and constraints. Scheduling process assigns optimal manufacturing resources over time based on production plan and previously determined process plans. With the mass customization concept, previously key functions in the production, process planning and scheduling, now become crucial for satisfaction of more demanding requirements. The paper introduces the concepts of multi-agent and holonic manufacturing systems and presents state of the process planning and scheduling area of research. It gives an overview on both, sequential and integrated, process planning and scheduling.*

**Key words:** *multi-agent systems, holonic manufacturing systems, process planning, scheduling, integrated process planning and scheduling*

**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE  
with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**



**42. simpozijum**

**UPRAVLJANJE PROIZVODNOM U**  
**INDUSTRIJI PRERADE METALA**

Beograd, maj 2016.

**UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI  
PRERADE METALA  
PRODUCTION CONTROL IN METALWORKING INDUSTRY**

<b>Jovanović, R. J., Đukić, D. R.</b> UTICAJ PROIZVODNO-TRANSPORTNE PARTIJE NA TRAJANJE TEHNOLOŠKOG CIKLUSA PROIZVODNE FAZE .....	4.1
<b>Marković, V., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.</b> SEGMENTACIJA JEDNE KLASÉ POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA: PROBLEM ODREĐIVANJA PRAGOVA.....	4.7
<b>Mitrović, S., Jakovljević, Ž., Dimić, Z., Miljković, Z.</b> UPRAVLJANJE MOBILNIM ROBOTOM ZA ZAOBILAŽENJE PREPREKA U 2D PROSTORU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA.....	4.18
<b>Papić, S., Klisura, F.</b> UTICAJ STEPENA STRUČNOSTI LJUDSKIH RESURSA NA KVALITET GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE .....	4.29
<b>Vujović, D., Nikšić, P., Nikšić, N.</b> УПРАВЉАЊЕ РИЗИКОМ У ПРОЦЕСИМА ЗАВАРИВАЊА, СА АСПЕКТА БЕЗБЕДНОСТИ НА РАДУ И ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ .....	4.35
<b>Bracanović, Z., Petrović, V., Grozdanić, B., Borak, Đ.</b> UTICAJI DOLAZNIH I ODLAZNIH PROCESA NA RAZVOJ KONKURENTSKE PREDNOSTI PREDUZEĆA.....	4.44





Jovanović, R. J.<sup>1)</sup>, Đukić, D. R.<sup>2)</sup>

## UTICAJ PROIZVODNO-TRANSPORTNE PARTIJE NA TRAJANJE TEHNOLOŠKOG CIKLUSA PROIZVODNE FAZE<sup>3)</sup>

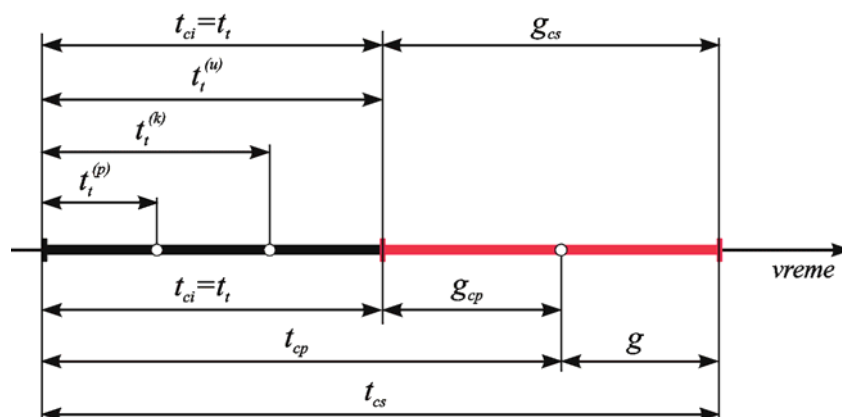
### Rezime

Istraživanje modela za proračun trajanja tehnološkog ciklusa od izuzetnog je značaja, jer oni predstavljaju osnovu za utvrđivanje gubitaka u ciklusu, sa jedne strane, ali i za projektovanje ciklusa proizvodnje, sa druge strane. Pored veličine proizvodne serije i projektovane tehnologije, na trajanje tehnološkog ciklusa utiču još veličina proizvodno-transportne partije i način kretanja predmeta rada u procesu proizvodnje. Imajući u vidu ovu činjenicu u radu je prikazan uticaj proizvodno-transportne partije na trajanje tehnološkog ciklusa proizvodne faze u zavisnosti od načina kretanja predmeta rada.

**Ključne reči:** tehnološki ciklus, način kretanja predmeta rada, proizvodno-transportna partija, proizvodna faza

### 1. UVOD

Sa aspekta teorijskih razmatranja, industrijske prakse i trajanja razlikuju se tri vrste ciklusa: tehnološki ciklus ili idealan proizvodni ciklus ( $t_t \equiv t_{ci}$ ), proizvodni (stvarni) ciklus ( $t_{cs}$ ) i projektovani ciklus proizvodnje ( $t_{cp}$ ), slika 1.



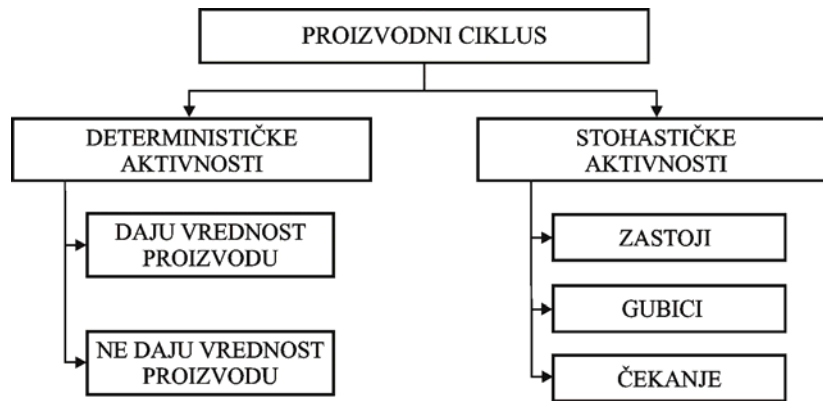
Slika 1. Vrste ciklusa u zavisnosti od trajanja

Za razliku od proizvodnog ciklusa (PC), slika 2, koga oblikuju determinističke i stohastičke aktivnosti u procesu proizvodnje, na tehnološki ciklus (TC) utiču samo determinističke aktivnosti koje su projektovane tehnološkim postupcima za izradu i montažu. Veličina proizvodne serije, stepen detaljisanja i kvalitet razrade tehnoloških postupaka presudno utiču na trajanje tehnološkog ciklusa. Što je proizvodnja masovnija stepen detaljisanja je veći, pa su, tehnološkim operacijama, obuhvaćeni i prirodni procesi, procesi kontrole i transporta.

<sup>1)</sup> Prof. dr Jelena R. Jovanović, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, ([jelena.jovanovic@vstss.com](mailto:jelena.jovanovic@vstss.com))

<sup>2)</sup> Prof. dr Radisav D. Đukić, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, ([radisav.djukic@vstss.com](mailto:radisav.djukic@vstss.com))

<sup>3)</sup> U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode u okviru Kabineta za proizvodni i inženjerski menadžment, Kompanije "Sloboda" Čačak



*Slika 2. Struktura proizvodnog ciklusa*

Kada se razmatra trajanje tehnološkog ciklusa, reperne tačke, između kojih teče vreme, su precizno definisane početkom proizvodnje prvog komada iz serije, na prvoj operaciji, i završetkom poslednjeg komada iz serije, na poslednjoj tehnološkoj operaciji. Proračun trajanja TC-a, u zavisnosti od načina kretanja predmeta rada (KPR) u procesu proizvodnje, zastupljen je u skoro svim radovima koji se bave ovom problematikom. Postoji više različitih modela za proračun trajanja TC-a, pri čemu je konfuzija naročito prisutna kod kombinovanog načina kretanja predmeta rada. Imajući u vidu ovu činjenicu u prvom delu rada dat je kratak osvrt na formule koje se koriste u aktuelnoj literaturi. U drugom delu rada prikazan je uticaj proizvodno-transportne partije na dužinu trajanja TC-a proizvodne faze u zavisnosti od načina KPR. Pod proizvodnom fazom (PF) podrazumeva se deo proizvodnog i tehnološkog procesa koju karakteriše podskup tehnoloških operacija pomoću kojih se predmet rada transformiše iz jednog u drugo kvalitativno stanje. Pod proizvodnom partijom podrazumeva se manja količina predmeta rada, u okviru proizvodne serije, koja se transportuje između ograničenog broja radnih mesta, sa ciljem da se obezbedi povezanost i kontinuitet u procesu proizvodnje, saglasno tehnološkom postupku i projektovanom režimu rada.

## 2. MODELI ZA PRORAČUN TEHNOLOŠKOG CIKLUSA PROIZVODNE FAZE

U literaturi postoji više različitih pristupa i formula za proračun trajanja TC-a PF-e u zavisnosti od načina KPR-a, koje može biti uzastopno ( $t_t^{(u)}$ ), paralelno ( $t_t^{(p)}$ ) i kombinovano ( $t_t^{(k)}$ ). Nezavisno od pristupa, kod svih modela za proračun trajanja TC-a figurišu sledeći parametri: veličina proizvodne serije ( $q$ ), projektovane tehnologije tj. vremena tehnoloških operacija ( $t_i, i = \overline{1, n}$ ) i način KPR-a u procesu proizvodnje.

U najnovijoj ruskoj literaturi [1,2] na trajanje TC-a utiču još veličina proizvodno-transportne partije ( $p$ ) i broj radnih mesta po operacijama ( $c_i$ ), relacije (1)-(3).

$$t_t^{(u)} = q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{c_i}, \quad (1)$$

$$t_t^{(p)} = p \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{c_i} + (q - p) \cdot \max_i \left\{ \frac{t_i}{c_i} \right\} \quad (2)$$

$$t_t^{(k)} = q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{c_i} - (q - p) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \min_i \left\{ \frac{t_i}{c_i}, \frac{t_{i+1}}{c_{i+1}} \right\} \quad (3)$$

U našoj literaturi formule za proračun tehnološkog ciklusa po uzastopnom  $t_t^{(u)}$  i paralelnom  $t_t^{(p)}$  načinu KPR-a su slične formulama (1) i (2), koje se koriste u ruskoj literaturi, s tim što je za veličinu proizvodno-transportne partije usvojeno  $p=1$  i broj radnih mesta je identičan broju tehnoloških operacija tj.  $c_i=1$ , relacija (4). Što se tiče kombinovanog načina KPR-a  $t_t^{(k)}$  u literaturi su prisutne formule (5) [3-5], (6) [6,7], (7) [8,9], (8) [10], (9) [11,12] i (10) [13-15]. Formula (5) je slična formuli (3) pod istim uslovima kao i formule za uzastopni i paralelni način.

Za proračun TC-a po kombinovanom načinu KPR-a, u stranoj literaturi [16], prisutna je i formula (11).

U formulama, relacije (4)-(11), polazi se od pretpostavke da proizvodno-transportna partija sadrži samo jedan komad ( $p=1$ ) predmeta rada, nezavisno od veličine proizvodne serije  $q$ .

$$(1), (2) \wedge p = 1 \wedge c_i = 1 \Rightarrow t_i^{(u)} = q \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad t_i^{(p)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot t_{i \max}, \quad t_{i \max} = \max\{t_i, i = \overline{1, n}\} \quad (4)$$

$$(3) \wedge p = 1 \wedge c_i = 1 \Rightarrow t_i^{(k)} = q \cdot \sum_{i=1}^n t_i - (q-1) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} t_{ki}, \quad t_{ki} = \min\{t_i, t_{i+1}\} \quad (5)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot \left[ t_{i \max} + \sum_{j=1}^s (t_{vj} - t_{mj}) \right], \quad t_{vj} > t_{j-1} \wedge t_{mj} < t_{j+1} \quad (6)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot \left( \sum_j t'_{oj} + \sum_j t''_{oj} \right), \quad t_{oj-1} < t'_{oj} > t_{oj+1} \wedge t_{oj-1} > t''_{oj} < t_{oj+1} \quad (7)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot \left( \sum_j t'_{oj} - \sum_j t''_{oj} \right), \quad t_{oj-1} < t'_{oj} > t_{oj+1} \wedge t_{oj-1} > t''_{oj} < t_{oj+1} \quad (8)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot t_{i \max} + (q-1) \cdot (t_{i \max} - t_{i \min}), \quad t_{i \min} = \min\{t_i, i = \overline{1, n}\} \quad (9)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{i=1}^n t_i + (q-1) \cdot \left( \sum_k t_k - \sum_j t_j \right), \quad t_{k-1} < t_k \geq t_{k+1}, \quad t_{j-1} \geq t_j < t_{j+1} \quad (10)$$

$$t_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n t_j + (q-1) \cdot \sum_{j=1}^n (t_j - t_{j-1}) \cdot I_j, \quad t_j \leq t_{j-1} \Rightarrow I_j = 0 \wedge t_j > t_{j-1} \Rightarrow I_j = 1 \quad (11)$$

U najnovijoj našoj literaturi [17,18] izvršena je provera validnosti postojećih relacija (1)-(11) i na osnovu dobijenih rezultata i odgovarajućih dokaza definisan je univerzalno primenljiv koncept za proračun trajanja TC-a proizvodne faze, relacija (12). U zavisnosti od vrednosti parametara  $p, q, y$  i načina KPR-a dobijaju se formule za uzastopni, paralelni i kombinovani način kretanja predmeta rada, relacije (13)-(16). U odnosu na rusku literaturu, koja u obzir uzima i broj radnih mesta ( $c_i$ ), u relacijama (12)-(16) njegov uticaj na TC je eliminisan, obzirom da se radi o organizacionom elementu koji je od uticaja na projektovanje ciklusa, uz pretpostavku da se svaka tehnološka operacija izvršava na jednom radnom mestu ( $c_i = 1$ ).

$$t_i = p \cdot \sum_{i=1}^n t_i + (q-p) \cdot y, \quad q \geq 1 \wedge 1 \leq p \leq q \quad (12)$$

$$(12) \wedge (q > 1 \wedge p = q) \Rightarrow t_i \equiv t_i^{(u)} = q \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (13)$$

$$(12) \wedge (q > 1 \wedge 1 \leq p < q \wedge y = \max\{t_i | i = \overline{1, n}\}) \Rightarrow t_i = t_i^{(p)} = p \cdot \sum_{i=1}^n t_i + (q-p) \cdot \max\{t_i | i = \overline{1, n}\} \quad (14)$$

$$(12) \wedge (q > 1 \wedge 1 \leq p < q) \wedge y = \left( \sum_k t_k - \sum_j t_j \right) \forall k, j \in (i = \overline{1, n}) \wedge \\ \wedge t_k \in (t_i | i = \overline{1, n}) \wedge k = \left\{ \left\{ k=1 | t_1 \geq t_2 \right\}, \left\{ k=2, n-1 | t_{k-1} < t_k \geq t_{k+1} \right\}, \left\{ k=n | t_n > t_{n-1} \right\} \right\} \wedge \\ \wedge t_j \in (t_i | i = \overline{2, n-1}) \wedge j = \left\{ \overline{2, n-1} | t_{j-1} \geq t_j < t_{j+1} \right\} \Rightarrow \\ t_i = t_i^{(k)} = p \cdot \sum_{i=1}^n t_i + (q-p) \cdot \left( \sum_k t_k - \sum_j t_j \right) \quad (15)$$

$$(12) \wedge (q > 1 \wedge 1 \leq p < q) \wedge y = \left( t_1 + \sum_{\alpha=2}^n (t_\alpha - t_{\alpha-1}) \cdot F_\alpha \right) \forall \alpha \in (i, i = \overline{1, n}) \wedge \\ \wedge \forall \alpha | t_\alpha > t_{\alpha-1} \Rightarrow F_\alpha = 1 \wedge \forall \alpha | t_\alpha \leq t_{\alpha-1} \Rightarrow F_\alpha = 0 \Rightarrow \\ t_i = t_i^{(k)} = p \cdot \sum_{i=1}^n t_i + (q-p) \cdot \left( t_1 + \sum_{\alpha=2}^n (t_\alpha - t_{\alpha-1}) \cdot F_\alpha \right) \quad (16)$$

Treba napomenuti da kod kombinovanog načina KPR-a zadovoljavajuće rezultate daju formula (10), formula (11) uz odgovarajuće dodatne uslove kao i formule (15) i (16), videti [17,18]. Relacija (15) zasniva se na poređenju vremena tri susedne operacije a relacija (16) na poređenju vremena dve susedne operacije.

### 3. UTICAJ PROIZVODNO-TRANSPORTNE PARTIJE NA TEHNOLOŠKI CIKLUS

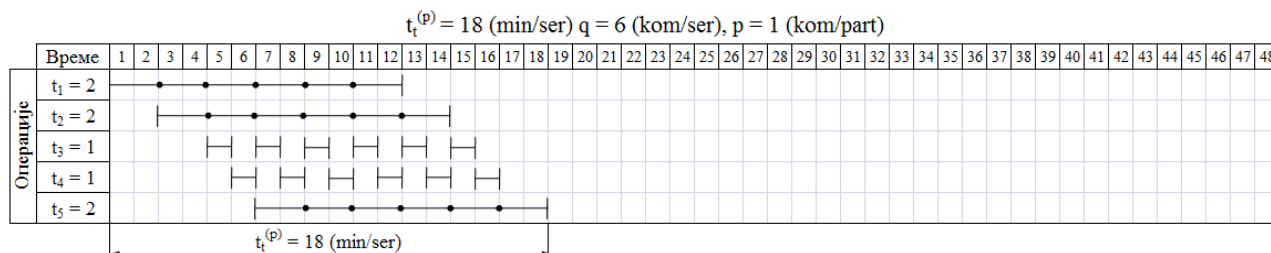
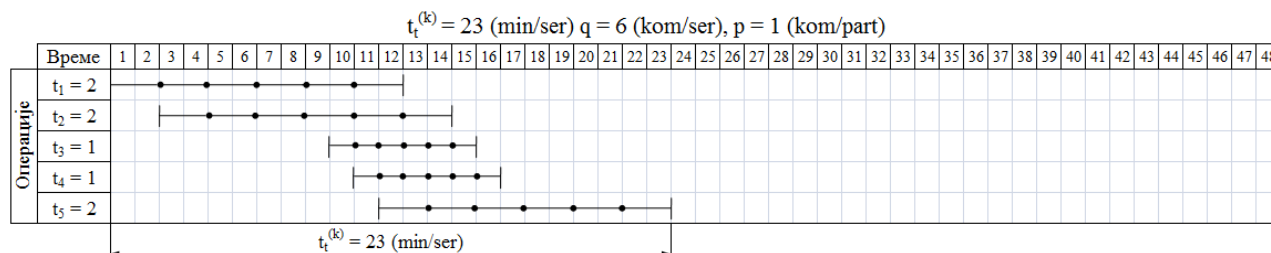
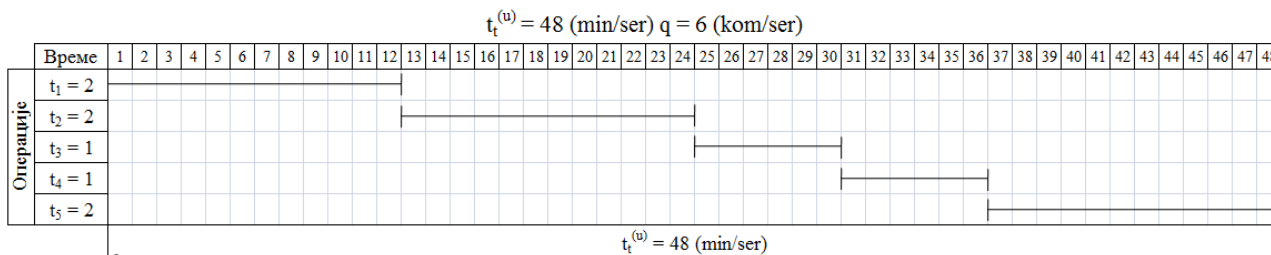
Veličina proizvodno-transportne partije ( $p$ ) zavisi od: tipa proizvodnje, veličine proizvodne serije, vrste tehnološkog procesa, metode organizacije proizvodnje (protočna, neprotočna), transportnih sredstava i trajektorije, sigurnosnih zaliha i obima nedovršene proizvodnje, ukupnog broja tehnoloških operacija i njihovog trajanja. Odnos između proizvodne serije i partije ( $N_p$ ) i granice u okviru kojih može da osciluje veličina partije definisani su pomoću relacije (17), sa nastojanjem da serija i partija teže svojim optimalnim vrednostima.

$$N_p = \frac{q}{p}, \quad 1 \leq p \leq q, \quad q \rightarrow q_o \wedge p \rightarrow p_o \quad (17)$$

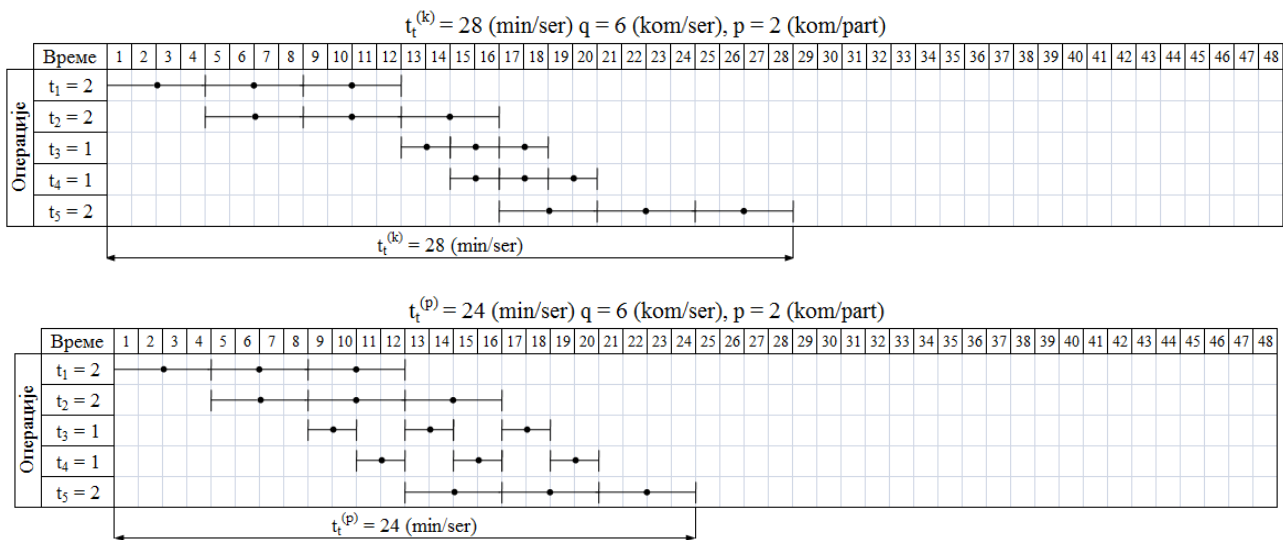
Nepoznanica koja do sada nije istraživana, a odnosi se na trajanje TC-a u zavisnosti od načina KPR i veličine proizvodno-transportne partije ( $p$ ), istražiće se na primeru PF-e koja sadrži  $n = 5$  operacija, tabela 1, slike 3 i 4. U tabeli su prikazani rezultati TC-a za konstantnu vrednost proizvodne serije ( $q = 6$  komada) koja se realizuje sa različitim brojem komada u proizvodnoj partiji ( $p = \overline{1,6}$ ).

**Tabela 1.** Vrednosti tehnološkog ciklusa (TC) u zavisnosti od načina KPR i veličine partije  $p$

TC (min/ser)		Proizvodna serija $q = 6$ , Proizvodna partija $p = \overline{1,6}$						$t_i, i = \overline{1,5}$ (min/kom)
Način KPR	Relacija	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$	$p = 6$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_t^{(u)}$	(13)	48	48	48	48	48	48	$t_1=2$
$t_t^{(k)}$	(14)	23	28	33	38	43	48	$t_2=2$
$t_t^{(p)}$	(15) i (16)	18	24	30	36	42	48	$t_3=1$
								$t_4=1$
								$t_5=2$



**Slika 3.** Gantovi dijagrami sa vrednostima TC-a:  $t_t = \{t_t^{(u)}, t_t^{(k)}, t_t^{(p)}\}, q = 6 \wedge p = 1 \wedge N_p = 6$



**Slika 4.** Gantovi dijagrami sa vrednostima TC-a:  $t_t = \{t_t^{(k)}, t_t^{(p)}\}, q = 6 \wedge p = 2 \wedge N_p = 3$

Na osnovu dobijenih vrednosti (slike 3 i 4, tabela 1) može se zaključiti da se sa povećanjem proizvodne partije povećava i trajanje TC-a po kombinovanom  $t_t^{(k)}$  i paralelnom  $t_t^{(p)}$  načinu KPR dok kod uzastopnog proizvodna partija ne utiče na trajanje ciklusa  $t_t^{(u)}$  jer se proizvodna serija  $q$  tretira kao jedna partija. Minimalne vrednosti TC-a po kombinovanom  $t_t^{(k)}$  i paralelnom  $t_t^{(p)}$  načinu KPR dobiće se za vrednosti proizvodne partije  $p = 1$  (tabela 1, kolona 3) a maksimalne vrednosti za  $p = q$  (tabela 1, kolona 8), relacija (18).

$$p = 1 \Rightarrow \min t_t^{(p)} \equiv \min t_t^{(k)}, p = q \Rightarrow \max t_t^{(p)} \equiv \max t_t^{(k)} = t_t^{(u)} \Rightarrow 1 \leq p \leq q \quad (18)$$

#### 4. ZAKLJUČAK

Analizirajući uticaj vremena tehnoloških operacija, veličine proizvodno-transportne partije i načina kretanja predmeta rada u procesu proizvodnje na trajanje tehnološkog ciklusa, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Pod uslovom da je proizvodna serija  $q$  konstantna, utvrđeno je da se sa povećanjem proizvodno-transportne partije  $p$  povećava trajanje tehnološkog ciklusa po kombinovanom i paralelnom načinu kretanja predmeta rada.
- Kod uzastopnog načina kretanja predmeta rada proizvodno-transportna partija ne utiče na trajanje ciklusa.
- Najmanji tehnološki ciklus proizvodne faze dobija se za vrednost partije  $p = 1$ , što je u praksi prihvatljivo kada se proces proizvodnje realizuje u velikim serijama i masovnoj proizvodnji.
- Ako je zastupljena maloserijska i srednjeserijska proizvodnja veličinu proizvodno-transportne partije, kao što je već istaknuto, treba optimizirati. Na optimalne vrednosti ( $p_o$ ) dominantno utiče veličina proizvodne serije ( $q_o$ ), obim nedovršene proizvodnje i sigurnosne zalihe koje obezbeđuju kontinuitet u proizvodnji.

#### 5. LITERATURA

- [1] Бичанин, В.В.: *Экономика, организация производства и менеджмент в машиностроении*, ПГУ, Новополюцк, 2014.
- [2] Кондратьева, М.Н., Баландина, Е.В.: *Экономика и организация производства*, УлГТУ, Ульяновск, 2013.
- [3] Илић, Л.Ј.: *Projektovanje postupka za utvrđivanje ciklusa proizvodnje složenog proizvoda*, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1978.
- [4] Илић, Л.Ј.: *Organizacija kao faktor uticaja na ciklus proizvodnje složenog proizvoda*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1991.

- [5] Rajković, Z.: *Interakcija proizvodnog ciklusa u uslovima proizvodnje više proizvoda*, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1974.
- [6] Bulat, V., Klarin, M.: *Menadžment proizvodnih procesa*, ICIM, Kruševac, 2001.
- [7] Klarin, M.: *Organizacija i planiranje proizvodnih procesa*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1996.
- [8] Bulat, V.: *Organizacija proizvodnje*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1987.
- [9] Bulat, V., Bojković, R.: *Organizacija proizvodnje*, ICIM, Kruševac, 2001.
- [10] Bulat, V.: *Organizacija proizvodnje – analiza i sinteza*, ICS Beograd, Beograd, 1976.
- [11] Kefer, P.: *Prilog organizaciji upravljanja proizvodnjom složenih proizvoda*, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1993.
- [12] Todorović, J.: *Upravljanje proizvodnjom*, Mrlješ Beograd, Beograd, 1999.
- [13] Đukić, R.: *Dinamičko uravnoteženje i upravljanje složenim poslovnno-proizvodnim sistemima*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2010.
- [14] Đukić, R., Đukić, R.J.: *Organizacija i ekonomika biznisa*, Viša tehnička škola Čačak, Čačak, 2006.
- [15] Đukić, R., Jovanović, R.J.: *Organizacija proizvodnje*, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Čačak, 2010.
- [16] Szendrovits, A.Z.: *Manufacturing cycle time determination for a multi-stage economic production quantity model*, Management Science, vol. 22, no. 3, pp. 298-308, 1975.
- [17] Jovanović, J.: *Istraživanje procesa upravljanja proizvodnim ciklusom složenog proizvoda*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2015.
- [18] Jovanović J., Đukić R.: *Establishing technological cycle time length of the production phase in the combined mode of workpiece move*, *Proceedings of the 6th International Symposium on Industrial Engineering - SIE2015*, pp. 355-358. Beograd, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, septembar 2015.

**Jovanović, R. J., Đukić, D. R.**

## **INFLUENCE OF PRODUCTION-TRANSPORT BATCH ON DURATION OF PRODUCTION PHASE TECHNOLOGICAL CYCLE**

**Abstract:** *Investigations of models for calculations of technological cycle duration is of critical importance, because models are a basis for establishing losses in the cycle, on one hand, but also for production cycle design, on the other hand. Apart from production series size and designed technology, technological cycle duration is affected by the size of production-transport batch and manner of workpiece move in the manufacturing process. Taking into account this fact, the paper presents influenec of production-transport batch on duration of production phase technological cycle, depending on the manner of workpiece move.*

**Key words:** *technological cycle time, manner of workpiece move, production-transport batch, production phase*





Marković, V., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.<sup>1)</sup>

## SEGMENTACIJA JEDNE KLASJE POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTURANOG OBLAKA TAČAKA: PROBLEM ODREĐIVANJA PRAGOVA<sup>2)</sup>

### Rezime

U radu je predstavljen metod automatskog izbora pragova segmentacije zasnovan na upotrebi veštačkih neuronskih mreža. Ovaj metod predstavlja dopunu algoritmu segmentacije jedne klase kvadrata iz strukturanih oblaka tačaka čime ga čini visoko autonomnim. Upotreba neuronskih mreža u ovom slučaju je bazirana na njihovom prethodnom obučavanju, a zatim korišćenju za automatsko generisanje pragova pri segmentaciji skeniranih kontura i strukturanih oblaka tačaka od interesa. Za obučavanje mreža korišćeni su odgovarajući parametri jednog broja  $G1$  kontinualnih sintetizovanih kontura koje sadrže eliptične segmente.

Korišćenjem istih uslova obučeni su određeni brojevi mreža različitih struktura koje su iskorišćene za segmentaciju jednog sintetizovanog strukturiranog oblaka tačaka. Izvršena je analiza rezultata segmentacije i izdvojena je mreža sa najboljim performansama. Njenom upotrebom su zatim automatski generisane vrednosti pragova za segmentaciju i jednog realnog oblaka tačaka čime je izvršena eksperimentalna verifikacija predloženog metoda.

**Ključne reči:** reverzno inženjerstvo, strukturirani trodimenzioni oblak tačaka, segmentacija skeniranih linija, segmentacija površi, veštačke neuronske mreže

### 1. UVOD

Savremene tehnike reverznog inženjerstva geometrijskih modela, pored standardne upotrebe u projektovanju proizvoda, nalaze primenu i u domenu upravljanja proizvodnim procesima. U ovoj oblasti one se primenjuju za potrebe navigacije mobilnih robota [1], automatizacije procesa zavarivanja [2,3], kontrole kvaliteta proizvoda [4] itd. Prema [5] reverzno inženjerstvo geometrijskih modela sprovodi se kroz sledeće četiri faze: skeniranje objekta, pretprocesiranje skeniranih podataka, prepoznavanje geometrijskih primitiva i formiranje kompjuterskog modela skeniranog objekta.

Skeniranje objekata se uglavnom vrši pomoću 3D (trodimenzionih) skenera. Savremeni 3D skeneri poseduju visoku rezoluciju i tačnost i njihovom upotrebom generišu se gusti oblaci tačaka koji su nosioci informacije o obliku površina skeniranog objekta [6].

Nakon skeniranja vrši se pretprocesiranje generisanog oblaka koje po pravilu podrazumeva spajanje većeg broja pogleda, integraciju podataka i generisanje mreže. Pretprocesiranje oblaka može biti različito u zavisnosti od namene. U ovoj fazi može se izvršiti redukcija broja tačaka gustog oblaka u cilju obezbeđenja lakšeg izvođenja narednih faza [7,8]. Najčešće se tokom pretprocesiranja oblaka tačaka generišu 3D trougaone mreže koje mogu na estetski adekvatan način reprezentovati skenirani objekat u CAD paketima. Međutim, ovako dobijene 3D mreže ne sadrže eksplicitno sve informacije o geometrijskoj strukturi skeniranog objekta, tj. ne sadrže informaciju o geometrijskim primitivima od kojih se površine objekta sastoje. Geometrijski primitivi mogu biti važni pri izradi replike skeniranog objekta kao i za definitivno dobijanje kompjuterskog modela objekta. Zbog navedenog, često se pristupa i pomenutoj trećoj fazi reverznog inženjerstva koju čini prepoznavanje geometrijskih primitiva na skeniranim površinama. Najvažniji koraci ove faze su: segmentacija oblaka tačaka na delove koji pripadaju jednom geometrijskom

<sup>1)</sup> M.Sc Veljko Marković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([markovicveljko@yahoo.com](mailto:markovicveljko@yahoo.com)), prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([zjakovljevic@mas.bg.ac.rs](mailto:zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Zoran Miljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs))

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektima pod evidencionim brojevima TR35004 i TR35020 koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori izražavaju zahvalnost kompaniji Topomatika za izvršenu uslugu skeniranja test dela

primitivu uz prepoznavanje samih primitiva i estimacija njihovih parametara. Ovi koraci se u savremenim CAD paketima vrše gotovo uvek u interakciji sa korisnikom.

Korisnik u interaktivnim metodama učestvuje pre svega u koraku segmentacije koja predstavlja uočavanje i izdvajanje iz oblaka grupa tačaka koje reprezentuju delove površina koje se izdvajaju po svojim geometrijskim osobinama [9]. Upravo razvoj praktično primenljivih potpuno automatskih (bez interakcije sa korisnikom) metoda za prepoznavanje primitiva danas predstavlja jedan od najvećih izazova u ovoj oblasti. Treba naglasiti da je najveći broj površina objekata u mašinstvu sačinjeno od delova ravni i delova površi drugog reda tzv. kvadrika (cilindar, sfera, konus, elipsoid, hiperboloid...) i da je prepoznavanje ovih klasa površi iz oblaka tačaka od najvećeg interesa.

U radu [9] predstavljen je algoritam za segmentaciju jedne klase kvadrika iz struktuiranih oblaka tačaka. Reč je o kvadrikama koje su u skeniranim linijama predstavljene eliptičnim segmentima – to su cilindri, sfere, eliptički cilindri, elipsoidi itd. Predstavljeni algoritam se pod određenim uslovima skeniranja može koristiti i za segmentaciju torusa (površ četvrtog reda). Značajna karakteristika ovog algoritma je da on može izvršiti efikasnu segmentaciju G1 kontinualnih površina što u oblasti automatskog prepoznavanja geometrijskih primitiva iz oblaka tačaka predstavlja poseban izazov. Sam algoritam, kao što će u nastavku biti detaljnije opisano, zahteva podešavanje tri praga koji se koriste pri segmentaciji. Pri tom se ni nakon velikog broja eksperimenata ne može uočiti korelacija između najpogodnijih vrednosti pragova i oblika i geometrijskih osobina površi čija se segmentacija vrši. U radu [9] pragovi za segmentaciju su određivani iterativnim postupkom uz intervenciju korisnika. Pored toga što je to naporan i vremenski zahtevan zadatak, ručno određivanje pragova je izuzetno nepovoljno sa aspekta primene algoritma u automatizaciji procesa. Naime, bilo bi neophodno za svaku novu klasu površi iznova ručno odrediti prag što ograničava autonomnost sistema i ima negativan uticaj na njegovu efikasnost.

Problem određivanja pragova u segmentaciji dvodimenzionih slika bio je predmet značajnog broja istraživanja. Predložen je određen broj tehnika među kojima se mogu izdvojiti tehnike zasnovane na maksimalnoj disperziji između klasa – tzv. Otsu tehnika određivanja praga [10] i tehnike zasnovane na entropiji [11] uz optimizaciju korišćenjem različitih algoritama među kojima su algoritam simuliranog kaljenja (engl. SA – Simulated Annealing) [12] ili algoritam na bazi inteligencije roja čestice (engl. PSO – Particle Swarm Optimization) [13]. S druge strane, segmentacija 3D oblaka tačaka je relativno novi istraživački pravac i problem određivanja pragova u ovoj oblasti još uvek nije dovoljno razmatran.

U ovom radu predlaže se metod za automatsko određivanje pragova pri upotrebi algoritma segmentacije koji je predstavljen u radu [9]. Metod je zasnovan na primeni veštačkih neuronskih mreža i predstavlja svojevrsan dodatak algoritmu segmentacije i čini ga potpuno automatskim u svim definisanim načinima upotrebe.

Nastavak ovog rada ima sledeću strukturu po poglavljima. U drugom poglavlju kratko je predstavljen metod za segmentaciju razmatrane vrste kvadrika i u njemu se bliže objašnjavaju pragovi koji se u algoritmu koriste, a čije je automatsko generisanje osnovni predmet ovog rada. Upotreba veštačkih neuronskih mreža za potrebe automatskog određivanja pragova segmentacije prikazana je u poglavlju 3. Četvrto poglavlje odnosi se na eksperimentalnu verifikaciju predloženog unapređenja na primeru segmentacije realnog struktuiranog oblaka tačaka. U poslednjem, petom poglavlju daju se zaključne napomene.

## 2. ALGORITAM ZA SEGMENTACIJU JEDNE KLASA KVADRIKA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA

Algoritam segmentacije iz [9] zasnovan je na segmentaciji eliptičnih regiona iz skeniranih linija [14]. U osnovi ove segmentacije je metod direktne regresije elipsi metodom najmanjih kvadrata koja će u daljem tekstu biti kratko opisana.

Jednačina elipse u implicitnom obliku može se predstaviti korišćenjem opšte jednačine konusnih preseka:

$$a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y + a_6 = 0 \quad (1)$$

pri čemu za elipsu mora biti zadovoljen i dopunski uslov:

$$a_2^2 - 4a_1a_3 < 0 \quad (2)$$

Parametri  $a_i$ ,  $i=1, \dots, 6$  mogu se predstaviti kao  $A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]^T$ , a promenljive kao vektor  $\mathbf{x} = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ , i tada jednačina (1) dobija oblik:

$$A^T \mathbf{x} = 0 \quad (3)$$

Da bismo pronašli elipsu koja najbolje aproksimira zadati skup tačaka potrebno je da za zadate vrednosti  $(x_n, y_n)$ ,  $n = 1, \dots, N$  odredimo vrednosti parametara elipse odnosno članove matrice A. Korišćenjem metoda najmanjih kvadrata problem pronalaženja vrednosti  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$  može se svesti na problem minimizacije:

$$\min_A \|DA\|^2 \quad (4)$$

gde je sa D obeležena matrica oblika:

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da bi proces minimizacije (4) učinili efikasnijim autori u [15] vrše normalizaciju uvodeći uslov:

$$4a_1 a_3 - a_2^2 = 1 \quad (6)$$

koji se u matricnoj formi može predstaviti kao:

$$A^T C A = 1 \quad (7)$$

gde je C matrica dimenzije  $6 \times 6$  sa  $C(1, 3) = C(3, 1) = 2$ ,  $C(2, 2) = -1$  i  $C(i, j) = 0$ , u suprotnom.

Pokazani problem minimizacije može se predstaviti sledećim sistemom jednačina:

$$\begin{aligned} SA &= \lambda CA \\ A^T C A &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

gde je  $S = D^T D$  tzv. informaciona matrica [16], a  $\lambda$  predstavlja uvedeni Lagranžov množilac.

U radu [15] autori su dokazali da sistem jednačina (8) ima tačno jedno rešenje. Ovo rešenje se interpretira u vidu matrice koja sadrži šest članova koji predstavljaju tražene parametre elipse  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ .

Ukoliko su uzorci tj. tačke  $(x_n, y_n)$ ,  $n = 1, \dots, N$  uzorkovane bez ikakvog šuma, odnosno u potpunosti unapred zadovoljavaju jednačinu određene elipse onda je informaciona matrica S singularna i ovakvom procedurom nije moguće utvrditi koeficijente jednačine (1). S druge strane, ukoliko skup tačaka aproksimativno predstavlja neku elipsu (što je slučaj sa tačkama koje su dobijene skeniranjem) informaciona matrica je bliska singularnoj. U ovom slučaju mogu biti ispunjena dva uslova: 1) recipročni faktor uslovljenosti informacione matrice je blizak nuli; 2) sopstvene vrednosti matrice  $S^{-1}C$  su bliske nuli ili čak manje od nule [17].

Opisana svojstva singularnosti matrice S za slučaj skupa tačaka koji aproksimira neku elipsu su direktno upotrebljena u algoritmu segmentacije eliptičnih regiona. Skenirane tačke se dodaju u skup jedna po jedna počev od prve u nizu. U svakom koraku odnosno pri svakoj dodatoj tački, računaju se vrednosti matrica D i S i proveravaju njihove vrednosti. Unapred je zadato dva praga ( $t_{rc}$  i  $t_{ov}$ ) za segmentaciju, po jedan za svaki slučaj singularnosti (recipročni faktor uslovljenosti i sopstvene vrednosti). Ukoliko su vrednosti recipročnog faktora uslovljenosti i sopstvene vrednosti u određenoj korelaciji (više ili niže) od odgovarajućih pragova, može se zaključiti da se matrica S udaljava od svoje singularnosti, odnosno da poslednje dodata tačka ne pripada skupu tačaka koje predstavljaju određeni eliptični segment konture odnosno deo neke elipse. Ta tačka se u tom trenutku proglašava granicom između dva eliptična segmenta i postaje ujedno i prva tačka narednog segmenta. Opisana metodologija prikazana je u pseudo kodu za jednu iteraciju algoritma segmentacije na slici 1.

---

**ULAZ:** N tačaka konture, koordinate x, y

---

```
for i=1:N
    x1=x(1 : i);
    y1=y(1 : i);
    D=[x1^2 x1*y1 y1^2 x1 y1 ones(i)]
    S=D'*D
    if rcond(S)>thr_rc
        trans=i; break
    else
        [svck, svr]=eig(inv(S)*C)
        ov=abs(svr(find(svr>0)))
        if ov< thr_ov
            trans=i; break; end; end
end;
```

---

**IZLAZ:** trans - detektovani prelaz između segmenata

---

*Slika 1. Proces segmentacije eliptičnih regiona*

---

**ULAZ:** x, y – koordinate tačaka konture

**prelaz** – vektor pozicija tačaka prelaza

---

```
k=1; j=trans(2);
for i=1:length(trans)
    x1=x(k : trans(i)); y1=y(k : trans(i));
    proceniti a1
    izračunati procenjene y1_e
    x2=x(trans(i) : j); y2=y(trans(i) : j);
    proceniti a2
    izračunati procenjene y2_e
    if abs(sum(abs(y1_e-y1))/length(y1)-
        abs(sum(abs(y2_e-y2))/length(y2))>thr_gr
        fin_trans(k)=trans(i);
    end;
    k=trans(i);
    if i<length(trans)-1
        j=trans(i+2);
    else
        j=length(x);
    end; end;
```

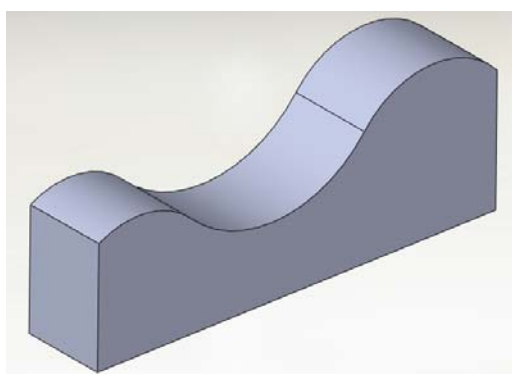
---

**IZLAZ:** fin\_trans - konačne pozicije tačaka prelaza nakon grupisanja

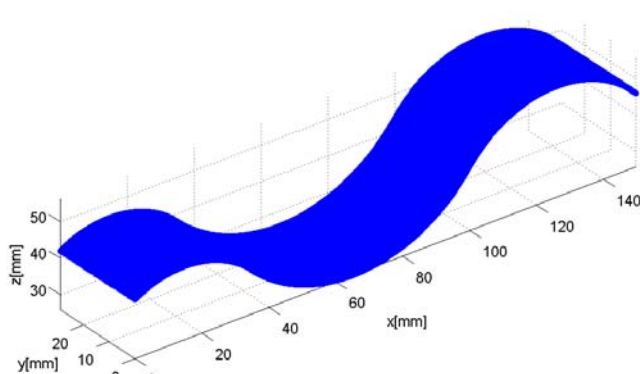
---

*Slika 2. Proces grupisanja eliptičnih segmenata*

U radu [9] pokazano je da je ovako izveden algoritam segmentacije podložan presegmentiranju kontura odnosno izdvajanju i više segmenata nego što kontura stvarno poseduje. Ovaj problem je rešen dodatnim procesom grupisanja segmenata nakon prve faze segmentacije. U tom procesu grupisanja uvodi se još jedan (treći) prag ( $t_{gr}$ ) na osnovu koga se donosi odluka o tome koja dva susedna segmenta je potrebno grupisati u jedan. Faza naknadnog grupisanja je interpretirana pseudo kodom na slici 2.



a)

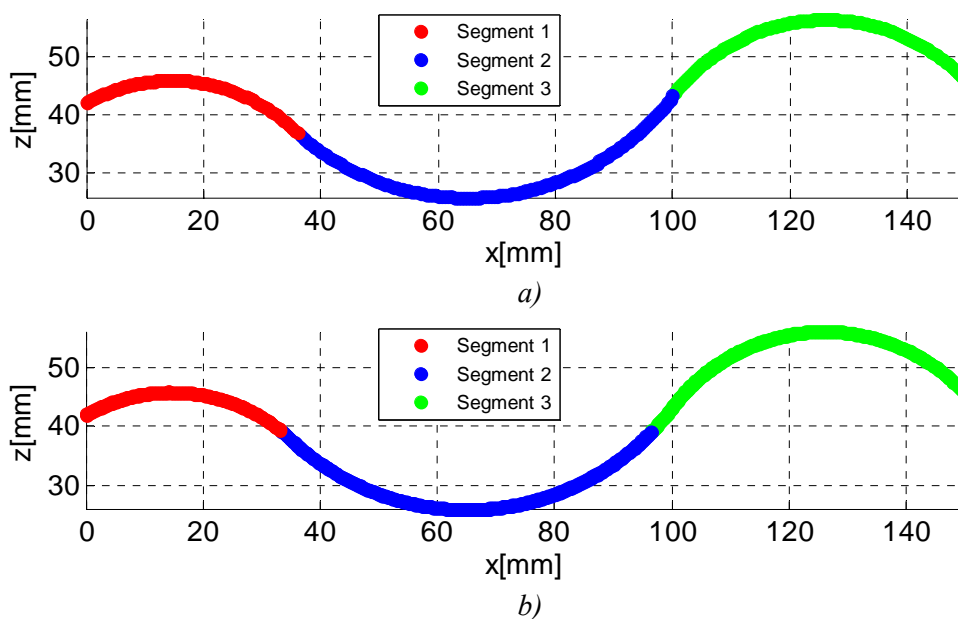


b)

*Slika 3. Sintetizovani objekat koji se sastoji od G1 kontinualanih delova tri cilindra: a) CAD model; b) sintetizovani oblak tačaka*

Za ilustraciju performansi opisanog algoritma u okviru ovog rada kreiran je oblak tačaka koji predstavlja objekat prikazan na slici 3, a koji se sastoji od delova površi tri cilindra. Prelazi između delova površi su G1 kontinualni. Kako bi se sintetisani oblak približio realnom skeniranom oblaku, on je kontaminiran šumom sa odnosom signala i šuma (SNR – signal-to-noise ratio) od 120dB. Raster između tačaka duž x ose oblaka je ekvidistantan i iznosi 0.2mm, čime se dobija po 750 tačaka u svakoj konturi. Iz oblaka je izdvojena jedna

kontura. Ova kontura predstavlja jednu skeniranu liniju površine objekta i sastoji se (u skladu sa geometrijom objekta) od tri eliptična segmenta odnosno tri kružna luka (krug se može smatrati specijalnim slučajem elipse pa se kao takav može uspešno segmentirati predstavljenim algoritmom). Radi ilustracije procesa segmentacije eliptičnih segmenata izdvojena kontura je procesirana opisanim algoritmom segmentacije i rezultati su grafički predstavljeni na slici 4. Slika 4.a. prikazuje rezultate segmentacije za sledeće vrednosti pragova za segmentaciju i grupisanje:  $t_{rc} = 0.15$ ,  $t_{ov} = 10^{-13}$  i  $t_{gr} = 30$ . Ovi pragovi su određeni ručno - pretraživanjem i za njih je algoritam konturu segmentirao na tri segmenta kao što je i bilo potrebno. Detektovane su prelazne tačke na 176-tom i 500-tom mestu počev od prve tačke konture i u ovom slučaju greška segmentacije je zanemariva i iznosi svega jedan uzorak (projektovani prelazi su 175 i 500). Međutim, predloženi algoritam je prilično osetljiv na promenu vrednosti pragova. Na slici 4.b. prikazani su rezultati segmentacije za blago izmenjene vrednosti pragova koji iznose:  $t_{rc} = 0.20$ ,  $t_{ov} = 1.1 \cdot 10^{-13}$  i  $t_{gr} = 35$ . Dobijeni prelazi su 167 i 483 čime se dobija značajna greška segmentacije koja iznosi 8 uzoraka na prvom i 17 uzoraka na drugom prelazu između segmenata. Ovi rezultati očigledno pokazuju da mala razlika u vrednosti pragova ima značajan uticaj na rezultate segmentacije.



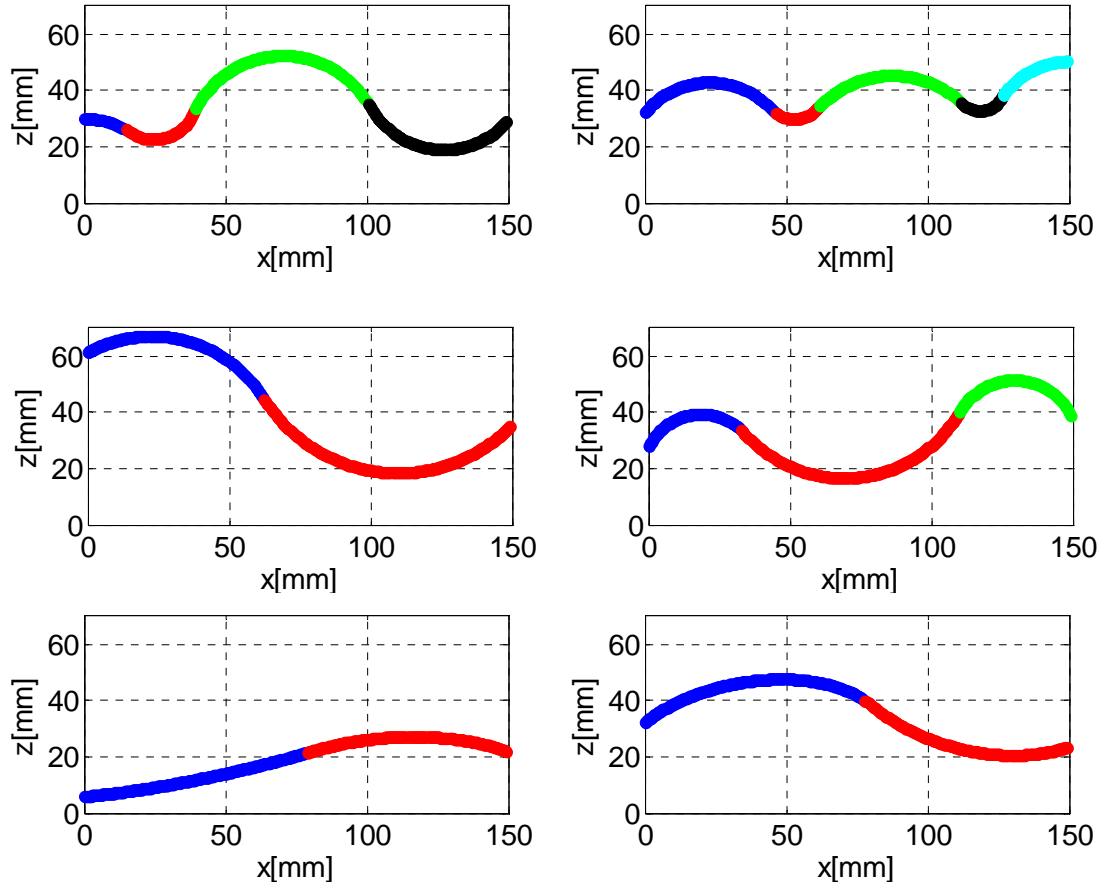
*Slika 4. Segmentirana kontura koja se sastoji od tri kružna segmenta: a) ručno određeni pragovi; b) promenjeni pragovi u cilju ilustracije osetljivosti segmentacije*

Dakle, kako bi se dobili zadovoljavajući rezultati segmentacije neophodno je podesiti vrednosti sva tri praga u zavisnosti od oblika konture i nivoa šuma u signalu (skeniranoj liniji). U radu [9] ovo podešavanje je heuristički vršio korisnik.

### 3. ODREĐIVANJE PRAGOVA SEGMENTACIJE UPOTREBOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Ručno podešavanje pragova za segmentaciju i grupisanje je dugotrajno, što je važan nedostatak ako je na osnovu algoritma potrebno vršiti automatizaciju nekog procesa. Ovi pragovi zavise od oblika konture čija se segmentacija vrši i od nivoa šuma u konturi. Međutim, tokom rada nije uočena jasna i formalno opisiva korelacija između vrednosti pragova i konture koja se segmentira. Da bi se podesile vrednosti parametara kojima bi se ostvarila zadovoljavajuća segmentacija obično se mora pribeći izvođenju nekoliko iteracija odnosno proba segmentacije.

Zbog navedenog problema javila se potreba za razvojem efikasnog i automatskog metoda izbora potrebnih pragova. U ovom radu se kao jedno od rešenja predstavljenog problema prezentuje metod izbora pragova segmentacije korišćenjem veštačkih neuronskih mreža. Osnovna ideja koncepta je da se koristi određena unapred obučena veštačka neuronska mreža koja bi mogla da, na osnovu određenih karakteristika konture čija je segmentacija potrebna, automatski proceni potrebne vrednosti pragova.



*Slika 5. Segmentirane reprezentativne konture za obuku veštačkih neuronskih mreža*

Obuka same mreže može se posmatrati kao poseban problem. U ovom radu za potrebe obuke mreže formirano je (sintetizovano) 6 reprezentativnih kontura. Konture se sastoje od različitih kružnih i eliptičnih segmenata i svaka od njih sadrži po 300 ekvidistantnih tačaka. Izabrani raster je 0.5mm, a SNR dodatog šuma iznosi 120dB. Na konture je primenjen algoritmom segmentacije koji je predstavljen u poglavlju 2 kao i u radu [9] i tom prilikom su za svaku konturu ručno određeni odgovarajući pragovi za segmentaciju. Grafički prikazi segmentiranih kontura za obučavanje mreža dati su na slici 5.

Kako bi se mreža za procenu pragova obučila potrebno je pre svega definisati obučavajuće parove odnosno ulazne i izlazne vektore. Izlazni vektori predstavljaju vrednosti procenjenih parametara za segmentaciju i grupisanje i izlazni vektori za svih 6 reprezentativnih kontura sa slike 5 mogu se predstaviti matricom:

$$O = \begin{bmatrix} t_{rc1} & t_{rc1} & \dots & t_{rc6} \\ t_{ov1} & t_{ov2} & \dots & t_{ov6} \\ t_{gr1} & t_{gr2} & \dots & t_{gr6} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Ulazni vektor, s druge strane treba da opiše oblik same konture i on se sastoji od: 1) skupa z koordinata tačaka reprezentativnih kontura (koje su poredane redom od prve ka poslednjoj - tristotoj u skeniranoj liniji), 2) srednje visine konture, i 3) parametra koji sadrži informaciju o valovitosti konture. Srednja visina konture se može opisati kao:

$$h_{sr} = \frac{\sum_{n=1}^N z_n}{N} \quad (9)$$

gde su  $z_n$ ,  $n=1, \dots, N$  - z koordinate tačaka konture, a N ukupan broj tačaka (u slučaju kontura za



obučavanje mreže  $N=300$  ).

S druge strane valovitost se definiše kao:

$$W = \frac{\sum_{n=1}^N |z_n - h_{sr}|}{N} \quad (10)$$

Na osnovu izloženog, ulazni vektori za obučavanje mreže za svih 6 kontura sa slike 5 mogu se predstaviti matricom:

$$I = \begin{bmatrix} h_{sr1} & h_{sr2} & \dots & h_{sr6} \\ W_1 & W_2 & \dots & W_6 \\ z_{11} & z_{12} & \dots & z_{16} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & z_{N2} & \dots & z_{N6} \end{bmatrix} \quad (11)$$

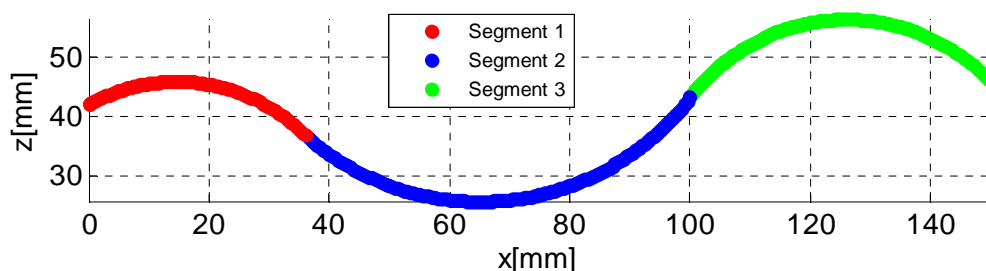
U ovom radu izabrane su neuronske mreže bazirane na algoritmima učenja sa prostiranjem greške unazad - “*backpropagation*“ neuronske mreže [18]. Formirano je i obučeno devet veštačkih neuronskih mreža. Struktura ovih mreža je sa jednim, dva i tri skrivena sloja neurona s tim što se razlikuju brojevi neurona u skrivenim slojevima. Brojevi neurona u skrivenim slojevima su proizvoljno izabrani. Nakon kreiranja sve mreže su obučene istim obučavajućim parovima i pri istim uslovima. Korišćen je Levenberg-Markeov algoritam učenja [19]. Aktivaciona funkcija neurona je bila sigmoidna. Maksimalni broj iteracija je postavljen na 100, a greška obučavanja na 0.001.

Nakon obučavanja mreža izvršeno je njihovo testiranje kroz dobijanje pragova segmentacije za slučaj kontura iz poglavlja 2. Ulazni vektor u neuronsku mrežu sadrži 300 tačaka sa konture. Kako je broj tačaka na konturi u opštem slučaju proizvoljan, nepochodno je usvojiti način za svođenje broja tačaka na 300. U ovom radu je usvojen sledeći princip. Ako je broj tačaka na konturi  $N > 300$ , uzima se prvih  $300 \times k$  tačaka gde je  $k$  celobrojni rezultat deljenja  $N$  sa 300, a zatim se vrši uniformno smanjenje broja tačaka sa faktorom  $k$ . S druge strane, ako je  $N < 300$ , vrši se uniformno dodavanje tačaka uz linearnu interpolaciju, sve dok broj tačaka ne postane veći od 300, a zatim se koristi već opisana procedura za smanjenje broja tačaka. Kontura sa slike 4 (kao i sve ostale konture oblaka sa slike 3) sadrži 750 tačaka što znači da se pri pozivanju mreže koristi svaka druga tačka od prvih 600 tačaka dok se poslednjih 150 ne uzima u razmatranje.

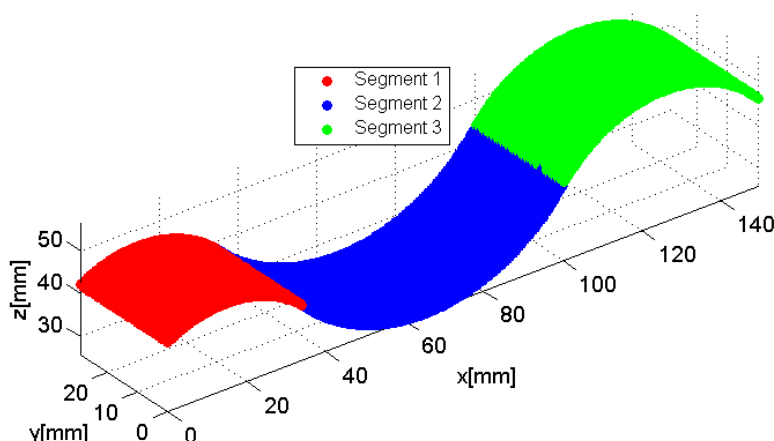
Tabela 1. Rezultati segmentacije sintetizovnog struktuiranog oblaka tačaka					
Mreža	Struktura	Srednja vrednost pozicija prelaza		Standardna devijacija pozicija prelaza	
		Prelaz 1	Prelaz 2	Prelaz 1	Prelaz 2
1.	[3]	190	286	0.5	0.4
2.	[7]	178	317	0.0	0.2
3.	[10]	192	288	0.0	0.0
4.	[5,3]	176	502	0.0	0.0
5.	[3,6]	202	305	0.0	0.0
6.	[6,6]	166.5	478.5	0.5	1.4
7.	[2,5,2]	182	268	4.4	1.0
8.	[3,6,3]	180	323	0.9	2.1
9.	[4,2,5]	186	503	0.2	0.3

Nakon upotrebe svih devet mreža za potrebe segmentacije celokupnog oblaka tačaka, dobijeni su rezultati koji su predstavljeni u tabeli 1. U ovoj tabeli su pored ostalog prikazane srednje vrednosti i standardne devijacije detektovanih prelaznih tačaka za sve konture na objektu. Može se uvideti da je pri upotrebi nekoliko mreža greška segmentacije i do 232 uzorka. Ipak, uočeno je da određene mreže daju očekivano dobre rezultate. Najbolji rezultati dobijeni su korišćenjem mreže sa dva skrivena sloja i to sa 5 neurona u prvom i 3 u drugom skrivenom sloju – mreža pod rednim brojem 4 u tabeli 1. Tom prilikom npr. pri segmentaciji prve konture oblaka (konture sa slike 4) dobijeni su pragovi za segmentaciju čije su vrednosti

$t_{rc} = 0.1762$ ,  $t_{ov} = 1.0546 \cdot 10^{-13}$  i  $t_{gr} = 26.5237$ . Lako je zapaziti da su ove vrednosti pragova bliske vrednostima koje su heuristički određene pri segmentaciji ove konture u poglavlju 2. Pri pronalaženju oba prelaza korišćenjem ove mreže algoritam segmentacije je detektovao prelazne tačke koji se nalaze na pozicijama 176 i 502. Ovo znači da je maksimalna greška segmentacije samo dva uzoraka (tačke) odnosno 0.4mm duž x-ose (raster konture je 0.2mm duž x-ose). Ovako nizak nivo greške može se smatrati odličnim rezultatom imajući u vidu nivo šuma prisutan u signalu. Radi ilustracije rezultata segmentacije korišćenjem automatskog izbora pragova na slici 6 grafički je prikazana segmentacija jedne konture oblaka. Pored toga, na slici 7. predstavljen je rezultat segmentacije kompletnog sintetizovanog oblaka objekta iz prethodnog poglavlja. Treba napomenuti da je izbor pragova vršen za svaku konturu struktuiranog oblaka pojedinačno.



*Slika 6. Rezultati segmentacije sintetizovane konture korišćenjem veštačke neuronske mreže [5,3]*



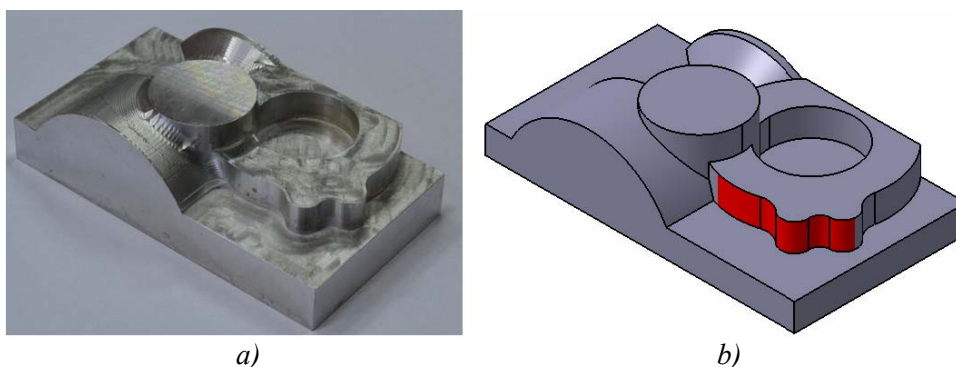
*Slika 7. Rezultati segmentacije sintetizovanog oblaka tačaka korišćenjem veštačke neuronske mreže [5,3]*

#### 4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA AUTOMATSKOG IZBORA PRAGOVA PRI SEGMENTACIJI REALNOG OBLAKA TAČAKA

Nakon predstavljanja metoda automatskog izbora pragova segmentacije i potvrde koncepta na primeru jednog sintetizovanog oblaka tačaka potrebno je verifikovati princip na primeru realnog oblaka tačaka. Za ovu priliku iskorišćen je realni oblak tačaka koji reprezentuje jednu specifičnu površinu objekta koji je prikazan na slici 8. Ovaj objekat predstavlja tipičan test deo koji je korišćen u mnogim radovima na temu segmentacije oblaka tačaka u reverznom inženjerstvu [20]. Test objekat je koncipiran tako da sadrži određeni broj ravnih površi kao i površi drugog reda. Skeniranje realnog dela je izvršeno ATOS Compact Scan 3D skenerom visoke rezolucije [21]. Oblak sadrži 141 konturu sa po 765 tačaka. Raster oblaka duž x ose je ekvidistantan i iznosi 0.05mm. Projektovani prelazi su tačke 85, 140, 285 i 400.

Da bismo bolje sagledali mogućnosti predstavljenog metoda izbora pragova za potrebe verifikacije na realnom oblaku tačaka iskorišćena je veštačka neuronska mreža koja je pokazala najbolje rezultate na sintetizovnom oblaku u prethodnom poglavlju. Izabrana mreža sastoji se od dva skrivena sloja - u prvom sloju nalazi se 5 neurona, a u drugom 3. Potrebno je napomenuti da je, zbog pomenutog ograničenja odnosno potrebe za korišćenjem samo 300 tačaka konture pri pozivanju mreže, izvršena transformacija informacije o skeiraniim linijama na isti način kao u prethodnom poglavlju. Naime, signal (skenirana linija) je redukovan

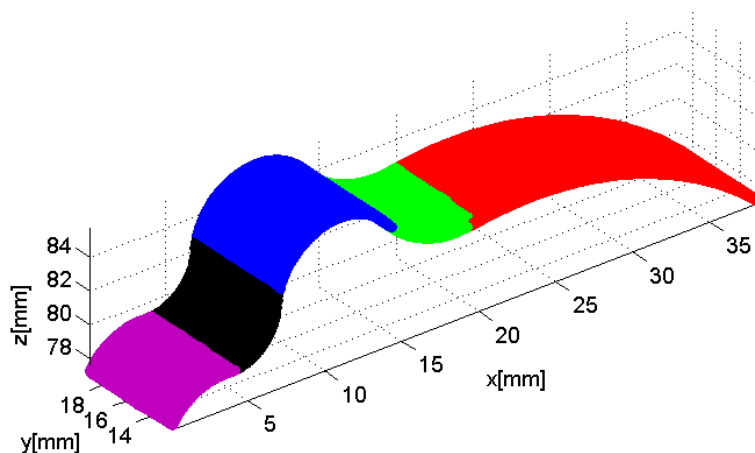
na dužinu od 300 tačaka - u obzir je uzeta svaka druga tačka pri čemu je poslednjih 176 tačaka izuzeto iz razmatranja.



**Slika 8.** Test objekat: a) realni deo; b) CAD model i izdvojena površina od interesa

Upotrebom predstavljene mreže dobijeni su odlični rezultati koji su prikazani u tabeli 2. Može se zaključiti da maksimalno odstupanje od idealnih prelaza postoji pri detektovanju prvog prelaza i iznosi 2 uzoraka. Ukoliko se posmatra po dužini duž x ose ova greška segmentacije iznosi 0.1mm (raster oblaka je 0.05mm). Na slici 9. grafički su prikazani rezultati opisane segmentacije na celom oblaku tačaka koji su dobijeni korišćenjem automatskog metoda izbora pragova.

<b>Tabela 2.</b> Rezultati segmentacije realnog struktuiranog oblaka tačaka									
Mreža	Struktura	Srednja vrednost pozicija prelaza				Standardna devijacija pozicija prelaza			
		Prelaz 1	Prelaz 2	Prelaz 3	Prelaz 4	Prelaz 1	Prelaz 2	Prelaz 3	Prelaz 4
4.	[5,3]	83	140	285	399	0.6	0.0	1.0	2.0



**Slika 9.** Rezultati segmentacije realnog oblaka tačaka korišćenjem algoritma sa automatskim izborom pragova

## 5. ZAKLJUČAK

Prilikom primene algoritma segmentacije jedne klase kvadraka iz struktuiranih oblaka tačaka koji je predstavljen u [9] zahteva se podešavanje određenog broja (tri) pragova. Dva praga se odnose direktno na proces segmentacije samih kontura, dok se treći prag koristi pri naknadnom koraku grupisanja segmenata u cilju dobijanja njihovog konačnog broja. Podešavanje pomenutih pragova se odvija iterativno uz asistenciju korisnika što implicira smanjenje nivoa autonomije samog algoritma segmentacije. Dodatni problem predstavlja činjenica da, prilikom primene algoritma, do sada nije uočena neka matematički formalno opisiva zavisnost nivoa samih pragova i geomertijskih osobina skeniranih kontura čija je segmentacija potrebna.

U ovom radu opisan je pomenuti problem izbora vrednosti pragova segmentacije i predstavljen je metod automatskog generisanja pragova segmentacije koji se temelji na upotrebi prethodno obučanih veštačkih neuronskih mreža. U ovom slučaju reč je o upotrebi neuronskih mreža koje su bazirane na algoritmima učenja sa prostiranjem greške unazad (engl. *backpropagation artificial neural network*). Za njihovu obuku

korišćeni su određeni parametri šest reprezentativnih sintetizovanih kontura. Određeno je da se pri obučavanju mreža kao ulazni parametri koriste srednja visina konture, valovitost kao i z koordinate tačaka svake reprezentativne konture posebno. Kao izlazni parametri korišćeni su pragovi segmentacije za svaku od kontura koji su unapred određeni od strane korisnika iterativnim korišćenjem algoritma segmentacije iz [9]. Pri istim uslovima obučeno je devet mreža različite strukture - po tri mreže sa po jednim, dva i tri skrivena sloja neurona. Broj neurona u svakom skrivenom sloju je izabran proizvoljno.

Nakon obučavanja potrebnih mreža izvršeno je testiranje predloženog metoda. Obučene mreže su iskorišćene za automatsko generisanje pragova pri segmentaciji kontura sintetizovanog struktuiranog oblaka tačaka. Pri njihovom pozivanju ulazi u mreže bili su istog formata kao i pri obuci, a mreže su generisale izlaze u vidu potrebnih pragova za adekvatnu segmentaciju kontura. Rezultati testiranja izloženi su tabelarno i izabrana je najbolja neuronska mreža. Ova mreža je zatim iskorišćena za eksperimentalnu verifikaciju metoda korišćenjem realnog struktuiranog oblaka tačaka koji reprezentuje površ koja se sastoji iz delova pet različitih cilindara.

Razvojem predstavljenog metoda automatskog izbora pragova izvršena je potrebna dopuna algoritma segmentacije jedne klase kvadrata iz struktuiranih oblaka što je obezbedilo njegovu visoku autonomiju pri upotrebi u definisanim uslovima. Dalja istraživanja na ovu temu će se odnositi na automatski izbor pragova pri korišćenju algoritama segmentacije nestruktuiranih oblaka tačaka.

## 7. LITERATURA

- [1] Fu, G., Coradi, P., Menciassi, A., Dario, P.: *An Integrated Triangulation Laser Scanner for Obstacle Detection of Miniature Mobile Robots in Indoor Environment*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16/4, pp.778 – 783, 2011.
- [2] Rodrigues, M., Kormann, M., Schuhler, C., Tomek, P.: *Structured Light Techniques for 3D Surface Reconstruction in Robotic Tasks*, Proceedings of the 8th International Conference on Computer Recognition Systems CORES, Advances in Intelligent Systems and Computing, 226, pp.805-814, 2013.
- [3] Fang, Z., Xu, D., Tan, M.: *A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16/3, pp.540 – 550, 2011.
- [4] Xu, J., Xi, N., Zhang, C., Shi, Q., Gregory, J.: *A Robot-Assisted Back-Imaging Measurement System for Transparent Glass*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 17/4, pp.779 – 788, 2012.
- [5] Varady, T., Martin, R., R., Cox, J.: *Reverse engineering of geometric models – an introduction*, Computer Aided Design, 29, pp. 255-268, 1997.
- [6] Savio, E., De Chiffre, L., Schmitt, R.: *Metrology of freeform shaped parts*, Annals of the CIRP, 56/2, pp.810-834, 2007.
- [7] Song, H., Feng, H.Y.: *A progressive point cloud simplification algorithm with preserved sharp edge data*, Int J Adv Manuf Technol, 45, pp.583-592, 2009.
- [8] Shi, B.Q., Liang, J., Liu, Q.: *Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering*, Computer Aided Design, 43/8, pp. 910-922, 2011.
- [9] Marković, V., Jakovljević, Ž.: *Segmentacija jedne klase površi drugog reda iz struktuiranog oblaka tačaka*, 39. Jupiter konferencija, str.4.13-4.22, Beograd, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [10] Otsu, N.: *A threshold selection method from gray-level histograms*, IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, 9, pp.62-66, 1979.
- [11] Kapur, J.N., Sahoo, P.K., Wong, A.K.C.: *A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram*, Computer Vision Graphics and Image Processing, 29, pp.273-285, 1985.
- [12] Karasulu, B., Korukoglu, S.: *A simulated annealing-based optimal threshold determining method in edge-based segmentation of grayscale images*, Applied Soft Computing, 11/2, pp.2246-2259, 2011.
- [13] Yin, P.Y.: *Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on particle swarm optimization*, Applied Mathematics and Computation, 184/2, pp.503-513, 2007.
- [14] Jakovljević, Ž., Marković, V., Miladinović, M.: *Recognition of elliptical segments in scanned lines*, Etikum, str.19-22, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2014.
- [15] Fitzgibbon, A., Pilu, M., Fisher, B.: *Direct Least Square Fitting of Ellipses*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21/5, pp.476-480, 1999.
- [16] Stanić, J., Metod inženjerskih merenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [17] Halir, R., Flusser, J.: *Numerically stable direct least squares fitting of ellipses*, 6th International

- Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, WSCG, pp.125-132, 1998.
- [18] Miljković, Z.: *Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama*, Mašinski fakultet, Beograd, 2003.
- [19] Miljković, Z., Aleksendrić, D.: *Veštačke neuronske mreže - zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije*, Mašinski fakultet, Beograd, 2009.
- [20] Petitjean, S.: *A Survey of Methods for Recovering Quadrics in Triangle Meshes*, ACM Computing Surveys, 34/2, pp.211-262, 2002.
- [21] GOM GmbH, "ATOS Compact Scan - The compact class of scanning," 2014 [Online]. Available: <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-compact-scan.html>.

Marković, V., Jakovljević, Ž, Miljković, Z.

## SEGMENTATION OF ONE CLASS OF QUADRIC SURFACES FROM STRUCTURED POINT CLOUDS: THRESHOLDS DETERMINATION ISSUE

**Abstract:** *This paper presents a method for automatic detection of thresholds in segmentation of quadrics from structured point clouds. The method employs artificial neural networks and it presents an addition to previously developed algorithm for segmentation of a class of quadric surfaces from structured 3D point clouds. Trained neural networks generate thresholds values for segmentation of scanned contours and point clouds. A number of G1 continuous synthesized contours with elliptical segments represent a basis for network training.*

*We have trained several neural networks with different structures under the same conditions. The best available neural network is chosen based on the results of segmentation of one synthesized structured point cloud. We have tested this neural network in estimation of thresholds for segmentation of one real world point cloud and it has shown excellent performance.*

**Key words:** *reverse engineering, structured 3D point cloud, segmentation of scanned lines, segmentation of surfaces, artificial neural networks*



Mitrović, S, Jakovljević, Ž, Dimić, Z, Miljković, Z.<sup>1)</sup>

## UPRAVLJANJE MOBILNIM ROBOTOM ZA ZAOBILAŽENJE PREPREKA U 2D PROSTORU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA<sup>2)</sup>

### Rezime

*U okviru ovog rada predstavljani su inicijalni rezultati istraživanja u kreiranju sistema za upravljanje mobilnim robotom za kretanje u 2D prostoru sa preprekama. Sistem je zasnovan na upotrebi veštačkih neuronskih mreža i infracrvenih senzora rastojanja. Softversko rešenje je primenjeno na mikrokontroleru, sa ciljem da se upotrebom minimalne hardverske konfiguracije postigne adekvatan nivo mogućnosti snalaženja u prostoru. Opisane su korišćene veštačke neuronske mreže, dati su algoritmi upravljačkog i pomoćnog softvera i opisani su eksperimentalni rezultati. Projektovani sistem upravljanja uspešno je testiran na mobilnom robotu „Buggy“ u okviru eksperimentalnog okruženja postavljenog u Lola institutu.*

**Ključne reči:** 2D prostor, veštačke neuronske mreže, mobilni robot, zaobilaženje prepreka, mikrokontroler.

### 1. UVOD

Kako bi odgovorile na velike fluktuacije u zahtevima tržišta, sve veći broj proizvodnih kompanija prinuđen je da primenjuje paradigmu masovne kustomizacije i personalizacije proizvodnje. Tehničko-tehnološki faktori koji treba da omoguće efikasnu implementaciju ove paradigme su rekonfigurabilni tehnološki sistemi i informacione tehnologije [1]. Rekonfigurabilni tehnološki sistemi zasnovani su na modularnoj opremi koja se po potrebi može brzo i lako integrisati [2]. Njihov značajan element predstavljaju autonomni mobilni roboti koji se, zahvaljujući svojoj autonomnosti i fleksibilnosti, mogu uključiti u izvršavanje različitih prostorno dislociranih proizvodnih zadataka, kada i gde je to potrebno.

Intenzivna su istraživanja u oblasti implementacije autonomnih mobilnih robota u zdravstvu, spasilačkim i istraživačkim misijama, vojnim i industrijskim aplikacijama [3]. Mobilni roboti danas se uspešno koriste u bolnicama, gde vrše manipulaciju uzorcima i medicinskim sredstvima [4]. U velikim proizvodnim sistemima koriste se za unutrašnji transport dokumenata i pošte. Nude se varijante mobilnih robota za obavljanje dostave po hotelskim sobama [5], a postoje i težnje da se letećim robotima vrše isporuke pošiljki [6].

I u oblasti proizvodnih tehnologija postoji značajan broj istraživanja u oblasti primene autonomnih mobilnih robota. Na primer, u [7], akcijama mobilnog robota tokom izvršavanja zadataka montaže upravlja se pomoću sistema veštačkog gledanja i praćenjem intenziteta sile na završnom uređaju. Primenom sistema veštačkog gledanja i tehnika mašinskog učenja u [8], robot je uspešno identifikovao i hvatačem prihvatio željeni objekat smešten u sopstvenoj okolini. U radu [9] predloženo je hibridno upravljanje mobilnom platformom, sadejstvom pozicionog upravljanja, sistema veštačkog gledanja i neuronskih mreža, čime se postiže kvalitetno globalno pozicioniranje robokolica, zajedno sa strogo artikulisanim kretanjem, koje je potrebno tokom orijentacije i prilaska objektu u proizvodnom okruženju.

Međutim, i pored brojnih istraživanja u ovoj oblasti, evidentan je nedostatak primene autonomnih mobilnih robota u realnom industrijskom okruženju [3, 10]. Jedan od najznačajnijih razloga za to odnosi se na bezbednost. Naime, industrijski mobilni roboti treba da rade u neodređenom okruženju u okviru rekonfigurabilnih tehnoloških sistema i neophodno je obezbediti odsustvo kolizije robota sa opremom, operaterima i drugim objektima koji se nalaze u pogonu. Svi navedeni problemi prisutni su i kod servisnih

<sup>1)</sup> M.Sc. Stefan Mitrović, istraživač pripravnik, Lola institut, Beograd (stefan.mitrovic@li.rs), Zoran Dimić, istraživač saradnik, Lola institut, Beograd (zoran.dimic@li.rs), dr Živana Jakovljević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Zoran Miljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zmiljkovic@mas.bg.ac.rs)

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektima pod evidencionim brojevima TR35004 i TR35020 koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori se zahvaljuju kompaniji Mikroelektronika iz Beograda na podršci prilikom nabavke eksperimentalne opreme.



autonomnih mobilnih robota koji se već implementiraju u zdravstvu, logistici i sl. Međutim, za industrijske mobilne robote, izuzetno je bitno da kombinuju fleksibilnost servisnih robota sa efikasnošću industrijskih robota [11].

U industrijskim aplikacijama okruženje je strukturirano. Kretanje mobilnog robota se zasniva na lokalizaciji i mapiranju prostora, kao i planiranju putanje. Međutim, zbog prisustva drugih agenata u okruženju i moguće promene okruženja nakon mapiranja, koja je naročito izražena u rekonfigurabilnim tehnološkim sistemima, neophodno je obezbediti i algoritme za zaobilazanje prepreka [12]. Detekcija prepreka vrši se korišćenjem različitih senzora, među kojima su kamere, laserski skeneri, sistemi veštačkog gledanja, ultrazvučni i infracrveni senzori rastojanja. Razvijani su različiti algoritmi za zaobilazanje prepreka koji su zasnovani na veštačkim neuronskim mrežama [13], fazi logici [14], inteligenciji roja čestica (engl. PSO – *Particle Swarm Optimization*) [15], učenju ojačavanjem (engl. RL – *Reinforcement Learning*) [15] i drugim tehnikama mašinskog učenja.

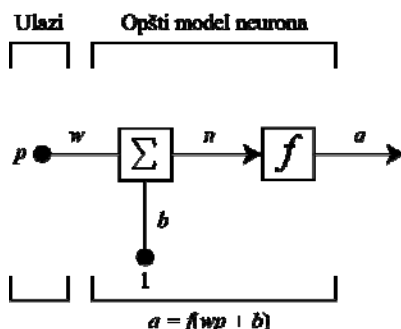
U okviru ovog rada biće predstavljen predlog rešenja upravljanja mobilnim robotom sa ciljem zaobilazanja prepreka u 2D prostoru, zasnovanog na primeni veštačkih neuronskih mreža i infracrvenih senzora rastojanja, sa upravljačkom jedinicom na bazi mikrokontrolera. Cilj rada je da demonstrira mogućnosti upravljanja, baziranog na hardveru ograničenih mogućnosti, pri rešavanju konkretnog problema primenom tehnika mašinskog učenja. Za razliku od složenih, naprednih sistema, koji koriste kamere i algoritme samolokalizacije [16], rešenje predloženo u ovom radu je minimalističko, pri čemu mobilni robot ima za zadatak da zaobiđe postavljenu prepreku i stigne do cilja samo obradom informacija koje dobija sa infracrvenih senzora rastojanja, uz primenu odometrije. Enkoderi, kamere, dinamometri i slični senzori nisu korišćeni.

Ovaj rad ima sledeću strukturu po poglavljima. U drugom poglavlju kratko se opisuju veštačke neuronske mreže, sa posebnim osvrtom na njihovu strukturu i elemente neophodne za kreiranje upravljačkog programa za rad u realnom vremenu, koji je baziran na veštačkim neuronskim mrežama. U trećem poglavlju opisuje se mobilna robotska platforma koja je obučavana za zaobilazanje prepreka. Obučavanje robotske platforme korišćenjem veštačkih neuronskih mreža opisano je u četvrtom, a softverska implementacija rezultata obučavanja u petom poglavlju rada. Eksperimentalna verifikacija izložena je u šestom poglavlju. Konačno, u sedmom poglavlju, date su zaključne napomene i smerince za dalja istraživanja.

## 2. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Veštačke neuronske mreže predstavljaju familiju računskih modela koji su inspirisani biološkim neuronskim mrežama, prvenstveno centralnim nervnim sistemom – mozgom. Koriste se kao univerzalni aproksimatori funkcija koje mogu zavisiti od većeg broja ulaza, pri čemu analitički oblik posmatrane funkcije nije poznat [17]. Uspostavljanje nepoznate zavisnosti postiže se obukom mreže pomoću skupa dostupnih eksperimentalnih podataka, na osnovu datih ulaza i željenih izlaza [17]. Obučavanje mreža izvodi se primenom algoritma za obuku koji se bira u zavisnosti od zahteva konkretnog zadatka. Neuronske mreže, kao i ostale tehnike mašinskog učenja, koriste se za prevazilaženje širokog opsega problema koje nije pogodno rešavati primenom konvencionalog, imperativnog programiranja [18].

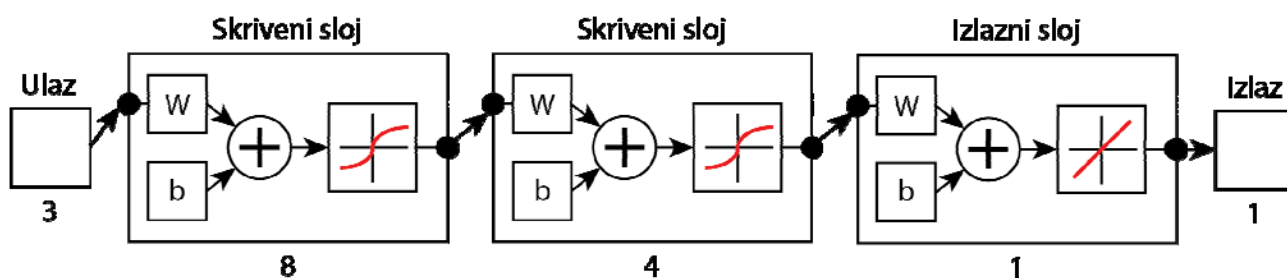
Veštačke, kao i biološke neuronske mreže, sastoje se iz većeg broja jednostavnih procesirajućih elemenata – neurona. Dve ključne sličnosti, građa sačinjena od visokopovezanih neurona i veze između neurona koje definišu funkciju mreže, omogućuju poređenje veštačkih i bioloških neuronskih mreža [19]. Jedan neuron, sa jednim ulazom, može se predstaviti pomoću sabirača koji prihvata ulaznu veličinu  $p_R$ , pomnoženu odgovarajućim težinskim faktorom  $w^{k_{i,j}}$  i sabira je sa biasom  $b_S$ . Dobijeni zbir  $n$  prosleđuje se aktivacionoj funkciji  $f$ , koja je za posmatrani neuron zadata. Izlaz  $a_S$  iz aktivacione funkcije predstavlja izlaz iz neurona. Šematski prikaz jednog neurona, sa jednim ulazom i jednim izlazom dat je na slici 1.



*Slika 1. Šematski prikaz jednog neurona, sa jednim ulazom i jednim izlazom.*

Bias predstavlja veličinu koja se određuje u toku obuke i transformiše vrednost izlaza iz sabirača u oblik koji je matematički pogodan za izabranu aktivacionu funkciju. Aktivaciona funkcija bira se u zavisnosti od potreba zadatka koji se rešava, a najčešće se koriste binarna, linearna ili sigmoidna funkcija [19, 20].

Neuroni najčešće imaju više od jednog ulaza. Rad sa jednim neuronom u velikom broju slučajeva ne može dati željene rezultate, nezavisno od broja ulaznih veličina. Za rešavanje konkretnih problema koristi se veći broj neurona, uređenih u jedan ili više slojeva. U okviru višeslojne neuronske mreže, svaki sloj ima sopstvenu matricu težinskih faktora  $\mathbf{W}^k$ , sopstveni vektor biasa  $\mathbf{b}_k$ , ulazni vektor u transfer funkciju  $\mathbf{n}_k$  i izlazni vektor  $\mathbf{a}_k$ . Sve veze koje učestvuju u građi neuronske mreže definisane su matricama težinskih faktora  $\mathbf{W}^k$ , pri čemu eksponent  $k$  ukazuje na koji sloj mreže se odnosi data matrica  $\mathbf{W}^k$ . Matrice težinskih faktora sadrže težinske faktore pojedinačnih veza između neruona,  $w_{ij}^k$ . Šematski prikaz višeslojne neuronske mreže dat je na slici 2.



*Slika 2. Šematski prikaz višeslojne neuronske mreže, sa 2 skrivena sloja, pri čemu prvi sloj ima 8, a drugi 4 neurona.*

Višeslojne mreže su moćnije od jednoslojnih [19]. Dvoslojna mreža sa sigmoidnom aktivacionom funkcijom u prvom sloju i linearnom aktivacionom funkcijom u drugom sloju može se obući da aproksimira proizvoljnu funkciju sa zadovoljavajućom tačnošću [19]. Prethodno navedeno ne znači da je najbolje koristiti višeslojne mreže. Arhitekturu mreže je potrebno prilagoditi problemu koji se rešava, najčešće uzastopnim pokušajima.

### 3. MOBILNA ROBOTSKA PLATFORMA

Mobilna platforma koja se koristi u ovom radu je proizvod kompanije Mikroelektronika iz Beograda, prikazana je na slici 3 i ima naziv „Buggy“ [21]. Platformu pokreće diferencijalni pogon sa četiri točka, pri čemu se točkovi na istoj strani, levoj ili desnoj, uvek kreću istim ugaonim brzinama, u istom smeru. Točkove pogone motori jednosmerne struje, a platforma ne raspolaže enkoderima. Skretanje se postiže zadavanjem različitih ugaonih brzina levog i desnog para točkova. Mobilnu platformu možemo smatrati mobilnim robotom tek po dodavanju upravljačkog modula „Clicker2“ [22], koji je baziran na mikrokontroleru ARM STM32F407VGT6 [23].

Navedeni mikrokontroler je 32-bitni, sa radnim taktom od 168 MHz i programskom memorijom od 1 MB. Veza između „Clicker2“ modula i „Buggy“ mobilne platforme ostvaruje se putem Clicker2/Mikromedia interfejsa [21], koji omogućava jednostavno povezivanje pomoću posebnog ležišta instaliranog na mobilnoj platformi i odgovarajućih kontakata na „Clicker2“ modulu.

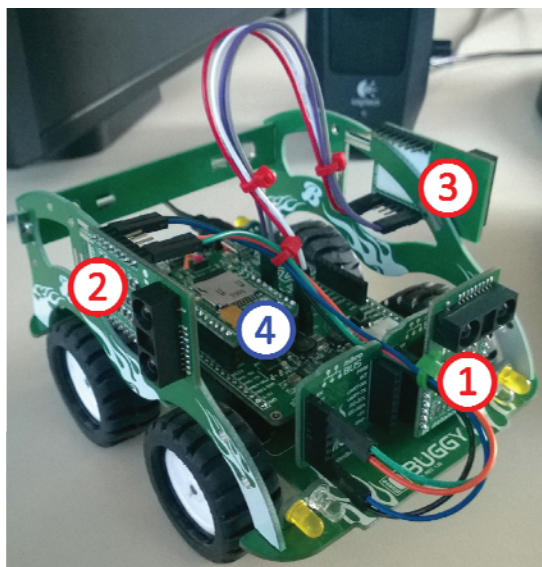
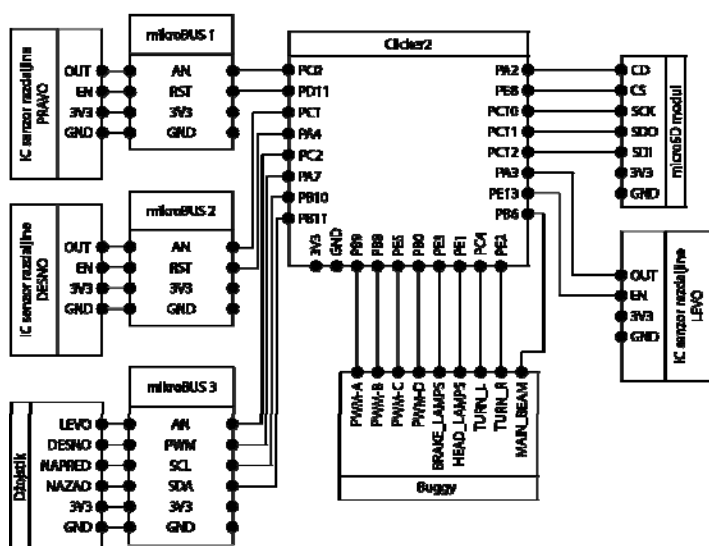
Za prikupljanje informacija o objektima u okruženju, mobilna platforma je opremljena sa tri, u odnosu na platformu stacionarna, infracrvena senzora rastojanja – „IR Distance click“ [24], sa radnim opsegom od 100 do 1500 mm. „IR Distance click“ na izlazu daje analogni napon proporcionalan rastojanju objekta od sočiva senzora, koji mikrokontroler pretvara u digitalni signal. Senzori su na platformu postavljeni tako da se maksimizuje njihov učinak. Jedan senzor je postavljen u pravcu podužne ose robota, usmeren ka napred, a dva preostala senzora su postavljena u pravcu upravnom na podužnu osu, orijentisani suprotno jedan drugom – jedan je usmeren levo, a drugi desno (slika 3).

Podaci prikupljeni tokom obučavanja robota se smeštaju na microSD memorijsku karticu, koja je sa mikrokontrolerom povezana korišćenjem modula za prihvatanje memorijskih kartica pomenutog tipa [25]. Veza ovog modula sa mikrokontrolerom je uspostavljena putem SPI (Serial Peripheral Interface) protokola za sinhronu serijsku komunikaciju.

Za potrebe ručnog upravljanja mobilnim robotom, koristi se namenski izrađen džojstik. Tokom prikupljanja podataka za obučavanje neuronske mreže, robot se pokreće ručno, a podaci sa senzora rastojanja upisuju se na memorijsku karticu.

Veza između mikrokontrolera i dodatnih modula – 3 senzora rastojanja, modula za prihvat memorijskih kartica i džojstika, ostvarena je putem mikroBUS interfejsa [26]. mikroBUS interfejs omogućava brzo i efikasno povezivanje raznovrsnih dodatnih hardverskih modula sa izabranom platformom. Na mobilnoj platformi „Buggy“ postoje 3 mikroBUS interfejsa, a postoje još 2 na „Clicker2“ modulu, što čini ukupno 5 dostupnih ležišta za povezivanje svih potrebnih hardverskih komponenti.

Modul za prihvat memorijskih kartica i levi senzor rastojanja direktno su priključeni na „Clicker2“ pločicu, preko mikroBUS1 i mikroBUS2 ležišta, respektivno. Senzori rastojanja usmereni napred i desno su priključeni na ležišta koja se nalaze na mobilnoj platformi, mikroBUS1 i mikroBUS2, respektivno. Džojstik je povezan preko mikroBUS3 ležišta na mobilnoj platformi. Detaljan opis povezivanja dat je na slici 3 levo. Ceo sistem se napaja pomoću jedne baterije (Li-Ion, 3,7 V , 2000 mAh).



*Slika 3. Levo – električna shema mobilnog robota. Desno – korišćen mobilni robot. 1, 2, 3 – IC senzori rastojanja, 4 – modul za prihvat memorijskih kartica.*

#### 4. OBUČAVANJE VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

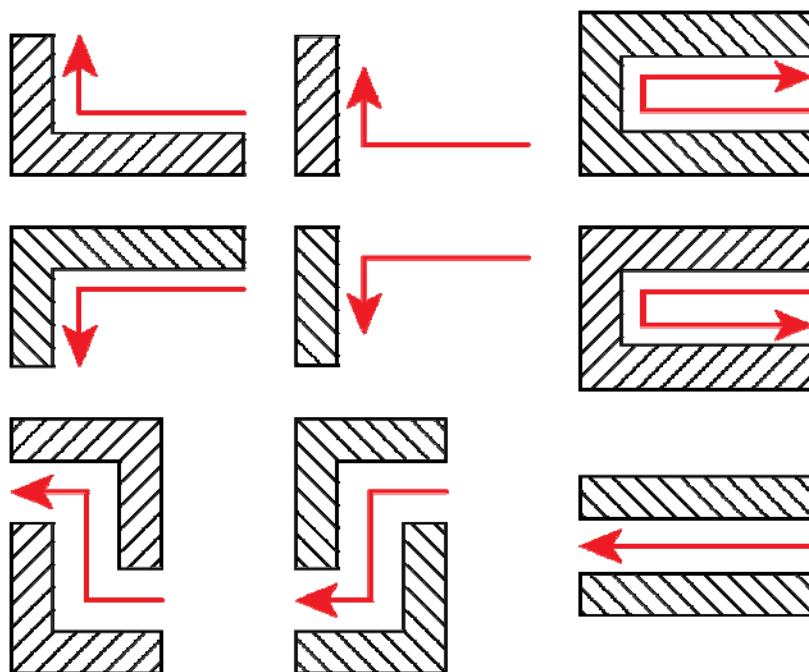
Veštačke neuronske mreže treba obučiti tako da mobilni robot, na osnovu informacija dobijenih sa tri infracrvena senzora rastojanja, obide postavljenu prepreku i stigne na cilj, koji se nalazi iza prepreke. Ulazni vektor sadrži rastojanja, očitana sa tri senzora. Usvojeno je da izlaz iz neuronske mreže bude instrukcija koja saopštava mikrokontroleru kakvo kretanje preduzeti za prelazak u naredni položaj, sa ciljem da se zaobide prepreka.

Pošto korišćen mobilni robot ne raspolaže enkoderima, već samo senzorima rastojanja, a točkove pokreću motori jednosmerne struje, u cilju vršenja obuke, kretanje je diskretizovano i razloženo na translaciju i rotaciju. U ovom slučaju, diskretizacija kretanja podrazumeva upravljanje motorima jednosmerne struje pomoću impulsa kratkog trajanja, kojima se postižu translatorni ili rotacioni pomeraji. Trajanje i intenzitet upravljačkih impulsa su empirijski utvrđeni tako da se postižu zadovoljavajući pomeraji. Omogućena je upotreba 4 različita upravljačka impulsa – napred, nazad, levo i desno. Levo i desno odnose se na rotaciju - ugaoni pomeraj mobilnog robota oko sopstvene vertikalne ose upotrebom diferencijalnog pogona. Napred i nazad su translatorni pomeraji.

Svaki od 4 moguća pomeraja vezan je za određeni kôd - numeričku vrednost, i to: 0 – napred, 1 – nazad, 2 – desno, 3 – levo. Kôd pomeraja, odnosno, kôd željene funkcije kretanja je izlaz koji se traži od veštačke neuronske mreže. Mreže će biti obučene tako da za ulazni vektor, koji čine podaci sa 3 senzora rastojanja, generišu ispravan pomeraj mobilnog robota, translatorni ili rotacioni, opisan navedenim kodom.

Upravljački softver, koji će biti detaljno opisan u narednom poglavlju, koncipiran je tako da omogući dva režima rada – automatski, u kom obučene veštačke neuronske mreže donose odluke o kretanju robota na osnovu podataka sa senzora i ručni režim, koji se koristi za snimanje obučavajućih parova za trening veštačkih neuronskih mreža, pri čemu upravljanje vrši korisnik pomoću džojstika. Obučavajući parovi – podaci sa senzora rastojanja i kôd pomeraja se tokom manualnog režima snimaju na memorijsku karticu, u okviru standardne ASCII datoteke. Prikupljanje obučavajućih parova vršeno je ručnim navođenjem robota oko niza prepreka upotrebom džojstika. Vođenje robota je inkrementalno, korak po korak.

Robot je obučavan u otvorenom prostoru, gde nije bilo nijednog objekta koji bi senzori rastojanja mogli detektovati. Zatim, robot je vođen kroz niz različitih, tipskih prepreka. Šematski prikaz prepreka i trajektorija robota dat je na slici 4. Robot je navođen kroz svaku od prikazanih 9 prepreka i svaku je po jedanput obišao putanjom koju označavaju crvene strelice, pri čemu je prikupljeno 2960 obučavajućih parova. Redosled obilazaka nije bitan.



**Slika 4.** Prikaz 9 karakterističnih prepreka korišćenih za obuku VNM.

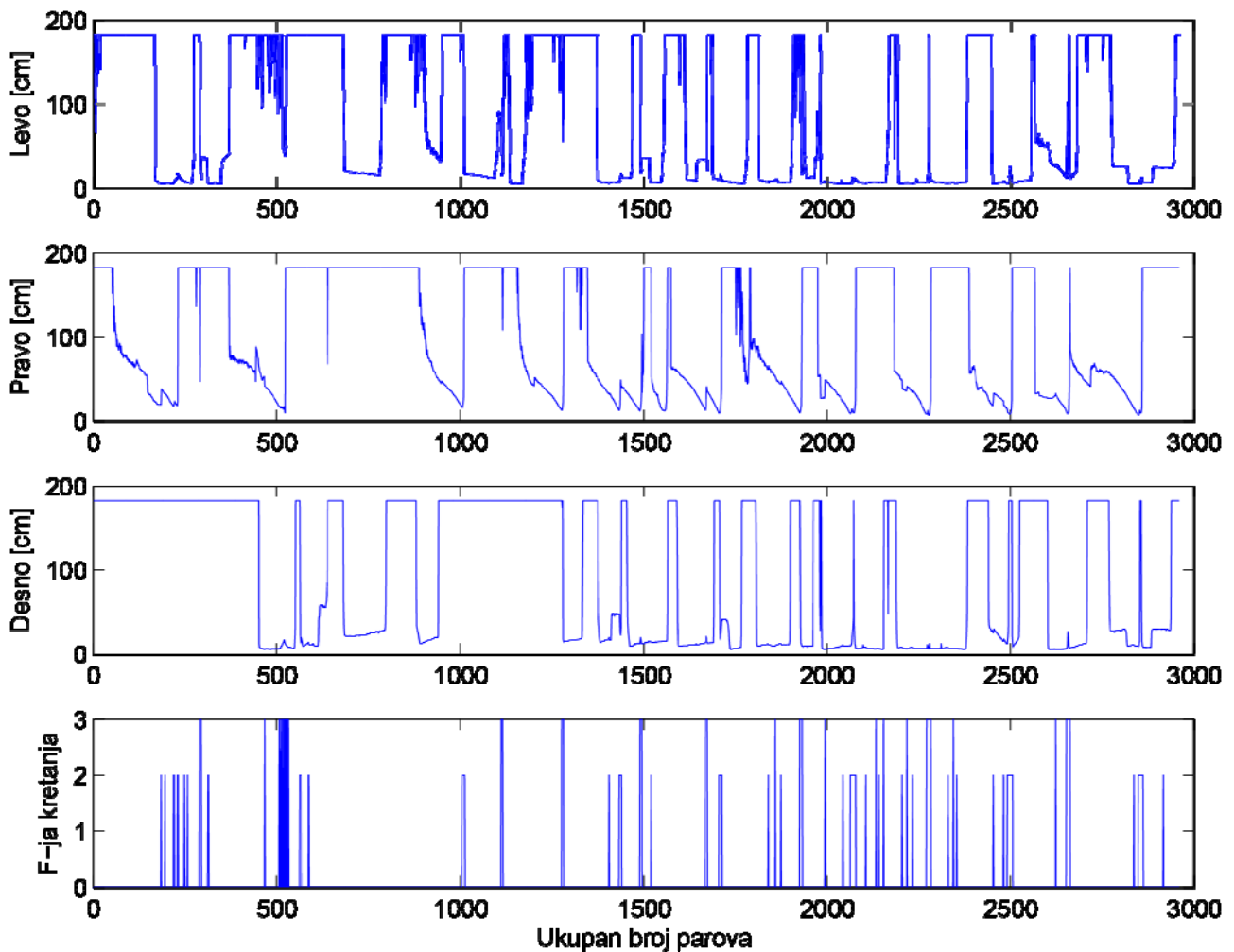
<i>Algoritam obučavanja VNM</i>	<i>Korišćeni akronim</i>
Levenberg-Marquardt	LM
Bayesian regularisation	BR
Resilient backpropagation	RP
Scaled conjugate gradient	SCG
BFGS quasi-Newton backpropagation	BFG
Variable learning rate backpropagation	GDX

**Tabela 1.** Prikaz korišćenih algoritama obučavanja i njihovih akronima

Mreže su obučavane u okviru alata koji je deo MatLab sistema, primenom algoritama za obuku datih u tabeli 1. U tabeli 2 prikazane su sve korišćene arhitekture mreža. Sve korišćene mreže u neuronima skrivenog sloja imaju sigmoidnu aktivacionu funkciju, dok je u neuronima izlaznog sloja linearna aktivaciona funkcija. Prikupljeni obučavajući parovi prikazani su grafički na slici 5.

	<i>Jednoslojne mreže</i>	<i>Dvoslojne mreže</i>
BROJ NEURONA	2	2-2
	3	3-2
	5	5-2
	8	8-4
	10	10-4

**Tabela 2.** Prikaz arhitektura korišćenih jednoslojnih i dvoslojnih VNM.



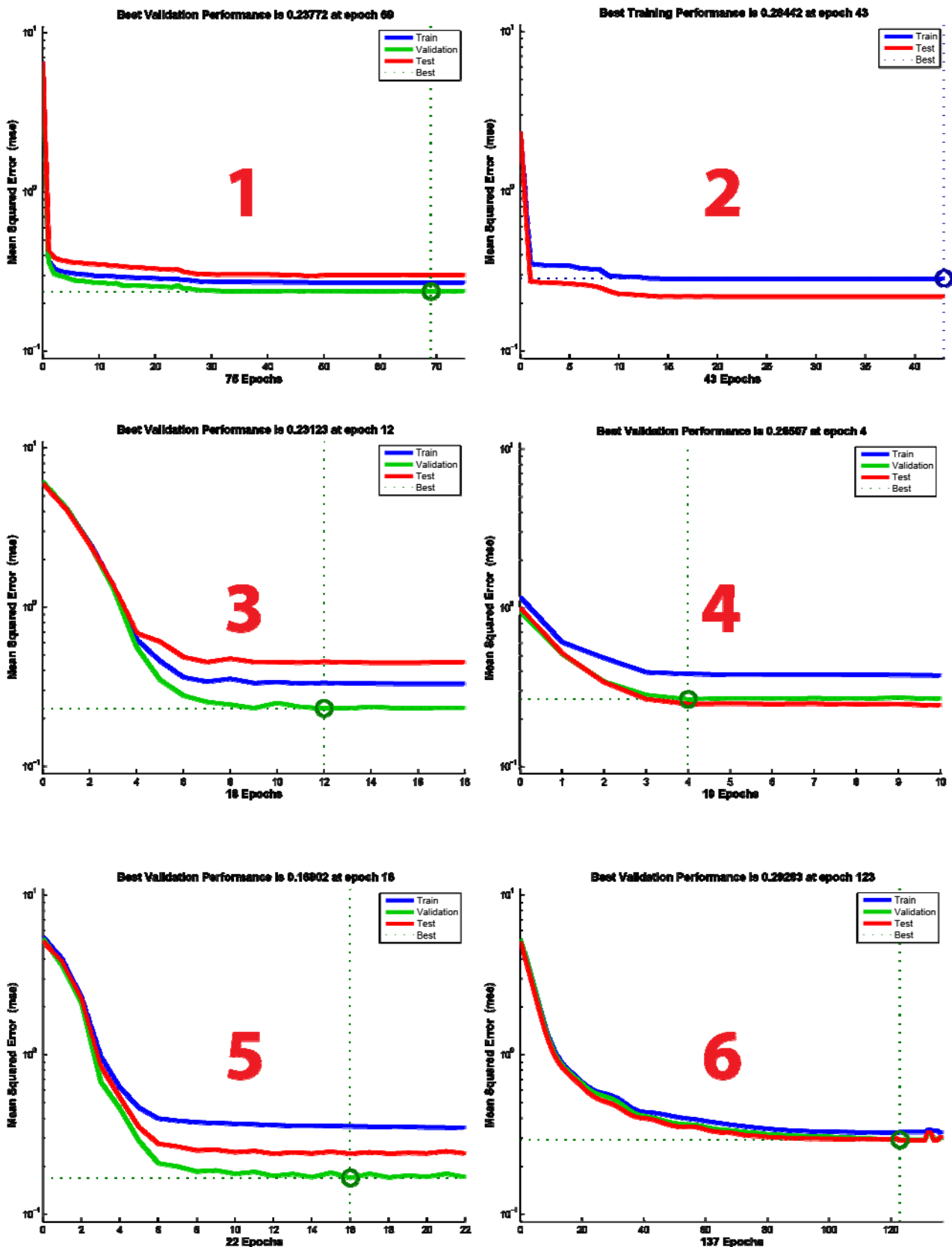
Slika 5. Grafički prikaz prikupljenih obučavajućih parova.

Od ukupno 2960 obučavajućih parova, 70% je izabrano za obuku mreža, 15% za testiranje, a 15% za validaciju. Primenom 6 algoritama obučavanja na 10 arhitektura dobijeno je 60 veštačkih neuronskih mreža. Svih 60 obučanih mreža biće provereno u eksperimentalnim uslovima na mobilnom robotu.

U tabeli 3 prikazane su performanse obučanih mreža, izraženih pomoću greške najmanjih kvadrata, odnosno, preko najmanjeg odstupanja validacione krive od zadate vrednosti koju mreža mora dostići. Dijagrami performansi mreža sa najmanjim odstupanjem od zadate vrednosti dati su na slici 6.

		Algoritam obučavanja						Red. br.
		LM	BR	RP	SCG	BFG	GDX	
Broj neurona	2	0.24201	0.20925	0.30221	0.3678	0.36921	0.34689	1
	3	0.27449	0.24865	0.38729	0.35432	0.32122	0.2943	2
	5	0.23772	0.22851	0.28349	0.37077	0.26434	0.32049	3
	8	0.27398	0.21951	0.26613	0.40834	0.30151	0.29283	4
	10	0.34466	0.34652	0.35434	0.36921	0.16902	0.39665	5
	2-2	0.30395	0.21197	0.31015	0.35943	0.37515	0.34489	6
	3-2	0.26023	0.29904	0.23123	0.26507	0.28332	0.58756	7
	5-2	0.24772	0.29312	0.32284	0.31861	0.30052	0.31095	8
	8-4	0.34675	0.30695	0.33364	0.35221	0.26229	0.69688	9
	10-4	0.32374	0.2737	0.30794	0.36142	0.40053	0.35602	10

Tabela 3. Prikaz performansi mreža nakon obuke. Žutom su obeležene mreže sa najmanjom validacionom greškom. Zelenim su označene neuronske mreže koje su se u realnim uslovima pokazale optimalno.



Slika 6. Grafici performansi dobijenih u toku obuke za 6 tipova korišćenih neuronskih mreža: 1 – LM, 2 – BR, 3 – RP, 4 – SCG, 5 – BFG, 6 – GDX. Prikazani su najbolji dobijeni rezultati.

## 5. UPRAVLJAČKI SOFTVER

Hardverska osnova upravljačke jedinice korišćenog mobilnog robota je mikrokontroler ARM STM32F407VGT6. Njegovo programiranje vrši se u mikroC jeziku [27], varijanti C jezika prilagođenoj za



rad sa mikrokontrolerima. Kao što je napomenuto, korisniku su dostupna dva načina rada, automatski i ručni, u zavisnosti od zahteva, pri čemu jedan program obavlja obe funkcije, bez potrebe za prenošenjem novog upravljačkog programa na mikrokontroler pri promeni režima rada. Mod rada se bira pritiskom na taster PE0 koji se nalazi na upravljačkom modulu.

U ovoj fazi razvoja sistema akcenat je stavljen na zaobilazanje prepreke, tako da postizanje željene pozicije i orijentacije nisu u fokusu. Iz navedenog razloga, izvršena je gruba procena ukupnog broja rotacionih i translacionih pomeraja – koraka, koje robot treba da izvede da bi stigao na cilj. Dobijena vrednost je upisana u promenljivu BROJ\_KORAKA koja određuje koliko pomeraja će robot ostvariti pre nego što se zaustavi. Algoritam upravljanja mobilnim robotom dat je u nastavku, u vidu pseudo-koda.

---

---

**Algoritam 1:** Upravljanje radom mobilnog robota

---

---

**ULAZ:**

**w(k)** – Matrice težinskih faktora za skrivene slojeve

**bias(k)** – vektori biasa za skrivene slojeve

**w\_o** – Matrica težinskih faktora za izlazni sloj

**bias\_o** – vektor bias za skriveni sloj

---

**Inicijalizacija** svih dodatnih i integrisanih modula.

**Beskonačna petlja**

**Taster PE0 pritisnut** – aktiviranje automatskog rada sa neuronskim mrežama.

**Ponavljaj:**

**Izmeri** distancu sa sva 3 senzora rastojanja i smesti vrednosti u vektor **temp**

Normiranje vrednosti **temp**

**Izračunaj vrednosti izlaza:**

```
for k=1:BROJ_SKRIVENIH_SLOJEVA
```

```
temp = bias(k) + W(k) * temp
```

```
temp = 2 / (1 + exp(-2 * temp)) - 1
```

```
end
```

```
out = bias_o + W_o * temp
```

skalirati vrednost **out**

```
out = round(out)
```

**pokreni** robota za inkrement prema vrednosti **out** (0 - napred, 1 - nazad, 2 - desno, 3 - levo)

**dok** ne dostigneš vrednost zadatu promenljivom BROJ\_KORAKA.

**Taster NAPRED pritisnut** – snimanje podataka sa 3 senzora na karticu, zajedno sa kodom kretanja 0.

Pomeranje robota napred za inkrement.

**Taster NAZAD pritisnut** – snimanje podataka sa 3 senzora na karticu, zajedno sa kodom kretanja 1.

Pomeranje robota unazad za inkrement.

**Taster LEVO pritisnut** – snimanje podataka sa 3 senzora na karticu, zajedno sa kodom kretanja 3.

Pomeranje robota ulevo za inkrement.

**Taster DESNO pritisnut** – snimanje podataka sa 3 senzora na karticu, zajedno sa kodom kretanja 2.

Pomeranje robota udesno za inkrement.

**Taster PE10 pritisnut** – zatvaranje tekuće i otvaranje nove datoteke za upis obučavajućih parova.

**Kraj petlje**

---

---

## 6. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Eksperimentalna provera izvršena je za svaku od 60 obučanih veštačkih neuronskih mreža, sa ciljem da se nađe grupa, ili u najnepovoljnijem slučaju, jedna mreža koja na zadovoljavajući način može upravljati mobilnim robotom. Za eksperimentalnu proveru, mreže su jedna po jedna prebacivane na mikrokontroler i isprobavane, prvo na otvorenom prostoru, uzastopnim nasumičnim postavljanjem prepreke pred mobilnog robota, a zatim unutar poligona sa slike 7.

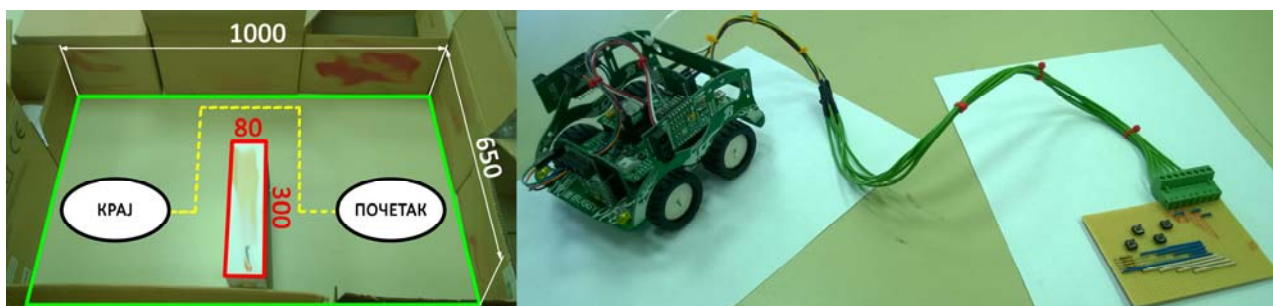
Mreže obučavane SCG i GDX algoritmima pokazale su najlošije rezultate. Uprkos kvalitetnim parametrima dobijenih obukom, prilikom obavljanja upravljačkog zadatka na mobilnom robotu, SCG i GDX mreže nisu uspele da obidu ni jednu prepreku, čak ni u trivijalnim slučajevima. Konstantno je bilo prisutno kretanje unapred. Dvoslojna 2-2 RP mreža je favorizovala okret udesno, što je dovelo do pojave zaglavlivanja i kolizija. Unutar poligona nije bilo moguće zaobilazanje prepreke, nego je robot ostajao sa jedne strane, praveći kružne trajektorije. Veoma slično su se ponašale i BFG mreže, jednoslojne, sa 2 i 3

neurona, kao i dvoslojne, 3-2 i 5-2. Preostale RP i BFG mreže su davale iste rezultate kao i SCG i GDX mreže – konstantno kretanje unapred, bez obzira na signale sa senzora. Tehnička ispravnost mobilnog robota je nekoliko puta proveravana, za slučaj da je došlo do pojave grube greške.

U praksi su se najbolje pokazale LM i BR mreže. U najvećem broju slučajeva, LM mreže su ispoljavale težnju ka desnom okretu, ali ne toliko drastično kao BFG varijanta. BR mreže su demonstrirale prihvatljiv nivo performansi još u jednoslojnoj izvedbi sa 8 neurona, u četvrtoj seriji eksperimenata. Od svih 60 testiranih mreža, samo 5 mreža je ispoljilo zadovoljavajuće karakteristike tokom oglada i označene su zelenom bojom u tabeli 3. Konačno, izabrana je dvoslojna BR mreža, sa 8 neurona u prvom i 4 neurona u drugom skrivenom sloju za upravljanje mobilnim robotom i svi dalji komentari odnose se na ovu mrežu.

U automatskom režimu rada, sa izabranom dvoslojnom BR mrežom, robot započinje snimanje rastojanja sa sva 3 senzora i upravlja se prema očitanim vrednostima na osnovu izlaza iz neuronske mreže. Pošto se program izvršava izuzetno brzo, kretanje je robota je kontinualno i teče glatko, iako je u svojoj osnovi isprekidano.

Važno je napomenuti da zbog pojave spekularne refleksije uglačani predmeti nepovoljno utiču na infracrvene senzore rastojanja u toku automatskog rada, što se manifestuje „zaslepljivanjem“ robota. Dolazi do gubitka informacije o prepreci, što za posledicu ima koliziju robota i prepreke. Mobilni robot opisan u ovom radu može se podjednako dobro koristiti i u otvorenom, i u zatvorenom prostoru, uz poštovanje hardverskih ograničenja sistema. Na slici 8 prikazani su rezultati oglada unutar poligona, gde je robot uspešno našao putanju od početne do krajnje pozicije.



*Slika 7. Levo – prikaz poligona za inicijalno testiranje. Desno – mobilni robot povezan sa džojstikom za ručno upravljanje.*



*Slika 8. Rezultati eksperimenta – mobilni robot uspešno zaobilazi prepreku primenom upravljanja na bazi veštačkih neuronskih mreža, primenom dvoslojne BR mreže, sa 8 neurona u prvom i 4 neurona u drugom skrivenom sloju.*

## 7. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovog rada je da istraži mogućnosti upotrebe veštačkih neuronskih mreža pri rešavanju problema upravljanja mobilnim robotom u 2D prostoru sa preprekama, uz primenu hardverske osnove skromnih karakteristika. Opisan je način funkcionisanja sistema, gde je mikrokontrolerska upravljačka jedinica programirana tako da u ručnom režimu prihvata komande od korisnika i zapisuje podatke sa senzora

rastojanja na memorijsku karticu, dok u automatskom režimu, na osnovu očitanih vrednosti sa senzora rastojanja, veštačke neuronske mreže donose odluku koji naredni pomeraj treba izvršiti da bi robot bio bliže cilju.

Predstavljena je procedura obučavanja neuronskih mreža pomoću parova prikupljenih uzastopnim kretanjem robota u ručnom režimu kroz otvoren prostor i kroz niz posebno postavljenih prepreka. Razmotrene su različite arhitekture mreža, pri čemu se težilo primeni mreže sa što manjim brojem slojeva i neurona, radi rasterećenja mikrokontrolera.

Opisana je eksperimentalna oprema, mobilni robot, sa odgovarajućom električnom šemom i svim korišćenim modulima. Rezultati ogleđa su zadovoljavajući, mobilni robot je ispunio zadatak uspešno, dostigavši zadatu lokaciju unutar postavljenog poligona. Infracrveni senzori su se pokazali kao nedovoljno robusni i nisu adekvatno funkcionisali u uslovima izražene spekularne refleksije.

Tokom narednih istraživanja neophodno je razviti algoritam za dostizanje željene pozicije i orijentacije inkrementalnim kretanjem bez upotrebe enkoderskih signala. Cilj je dostići nivo na kom se predstavljeni mobilni robot može samostalno kretati kroz strukturirani prostor bez rizika od kolizije ili gubljenja pozicije i orijentacije.

## 8. LITERATURA

- [1] F. Jovane, Y. Koren, and C. Bor, *Present and future of flexible automation: Towards new paradigms*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 52, no. 2, pp. 543 – 560, 2003.
- [2] Y. Koren and M. Shpitalni, *Design of reconfigurable manufacturing systems*, Journal of Manufacturing Systems, vol. 29, no. 4, pp. 130 – 141, 2010.
- [3] Bøgh, S, Hvilshøj, M, Kristiansen, M. and Madsen, O, *Identifying and evaluating suitable tasks for autonomous industrial mobile manipulators (AIMM)*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 61 Nos 5/8, pp. 713-72, 2011.
- [4] Mobilni robot za primenu u medicinskim ustanovama, proizvod preduzeća „Swisslog“ <http://www.swisslog.com/en/Products/HCS/Automated-Material-Transport/RoboCourier-Autonomous-Mobile-Robot>
- [5] Mobilni robot za primenu u ugostiteljstvu, proizvod preduzeća „Savioko“ <http://www.savioko.com/>
- [6] Беспилотна летелица за dostavu, projekat kompanije „Amazon“ <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>
- [7] Brad Hamner, Seth Koterba, Jane Shi, Reid Simmons, Sanjiv Singh, *An autonomous mobile manipulator for assembly tasks*, Autonomous Robot, 28: 131 – 149, 2010.
- [8] Marko Mitić, Zoran Miljković, *Neural network learning from demonstration and epipolar geometry for visual control of a nonholonomic mobile robot*, Soft Computing, 18:1011 – 1025, 2014.
- [9] Zoran Miljković, Najdan Vuković, Marko Mitić, Bojan Babić, *New hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles*, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 66:231 – 249, 2013.
- [10] Ole Madsen, Simon Bøgh, Casper Schou, Rasmus Skovgaard Andersen, Jens Skov Damgaard, Mikkel Rath Pedersen, Volker Kruger, *Integration of mobile manipulators in an industrial production*, Industrial Robot: An International Journal, Vol. 42, No. 1, pp. 11 – 18, 2015.
- [11] Hvilshøj, M, Bøgh, S, Nielsen, O.S. and Madsen, O, *Autonomous industrial mobile manipulation (AIMM): past, present and future*, Industrial Robot: An International Journal , Vol. 39 No. 2, pp. 120-135, 2012.
- [12] Christensen, H.I. and Case, P, *Mobile manipulation for everyday environments*, International Conference on Control, Automation and Systems, 2008.
- [13] A. Medina-Santiago, J.L. Camas-Anzueto, J.A. Vazquez-Feijoo, H.R. Hernández-de León, R. Mota-Grajales, *Neural Control System in Obstacle Avoidance in Mobile Robots Using Ultrasonic Sensors*, Journal of Applied Research and Technology, Volume 12, Issue 1, Pages 104-110, February 2014. ISSN 1665-6423, [http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71610-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71610-4).
- [14] Mohammed Faisal, Ramdane Hedjar, Mansour Al Sulaiman and Khalid Al-Mutib, *Fuzzy Logic Navigation and Obstacle Avoidance by a Mobile Robot in an Unknown Dynamic Environment*, Int J Adv Robot Syst, 10:37, 2013. DOI: 10.5772/54427
- [15] E. Di Mario, Z. Talebpour, and A. Martinoli, *A Comparison of PSO and Reinforcement Learning for Multi-Robot Obstacle Avoidance*, IEEE Conference on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 149–156, June 2013.
- [16] Marta Rostowska, Piotr Skrzypczyński, *Improving Self-localization Efficiency In a Small Mobile Robot*

by *Using a Hybrid Field of View Vision System*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 28 – 38, 2015.

- [17] Zoran Miljković, Dragan Aleksendrić, *Veštačke neuronske mreže, zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije*, Beograd, 2009.
- [18] Opšte o neuronskim mrežama [https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_neural\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network)
- [19] Hagan, Demuth, Beale, De Jesus, *Neural Network Design, 2nd Edition*, 2014, ISBN: 0971732116, 9780971732117.
- [20] Dr Zoran Đ. Miljković, *Sistemi veštačkih neuronskih mreža u proizvodnim tehnologijama*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2003.
- [21] Korisničko uputstvo – „Buggy“ <http://download.mikroe.com/documents/specials/educational/buggy/buggy-development-platform-manual-v102.pdf>
- [22] Korisničko uputstvo – „Clicker2“ <http://download.mikroe.com/documents/starter-boards/clicker-2/stm32f4/clicker2-stm32-manual-v100.pdf>
- [23] Korisničko uputstvo – ARM STM32F407VGT6 <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>
- [24] Korisničko uputstvo – IR Distance Click – infracrveni senzor rastojanja <http://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/irdistance/ir-distance-click-manual-v100.pdf>
- [25] Korisničko uputstvo – microSD Click – modul za prihvatanje microSD kartice <http://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/microsd/microsd-click-manual-v100.pdf>
- [26] mikroBUS specifikacija <http://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf>
- [27] mikroC – internet prezentacija <http://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/microsd/microsd-click-manual-v100.pdf>

Mitrović, S, Jakovljević, Ž, Dimić, Z, Miljković, Z.

## NEURAL NETWORKS BASED CONTROL SYSTEM OF A MOBILE ROBOT FOR OBSTACLE AVOIDANCE IN 2D SPACE

**Abstract:** *In this paper, a neural networks based control system of a mobile robot for obstacle avoidance in 2D space is proposed. The system utilizes infrared distance sensors and neural networks for navigation around obstacles. Developed control software is implemented within microcontroller for achieving the adequate level of space awareness while maintaining hardware configuration at a minimum. Developed neural networks will be described, along with control and auxiliary software and experimental results. Proposed control system has been successfully tested on a Mikroee Buggy mobile robot at Lola institute in Belgrade.*

**Keywords:** *2D space, artificial neural networks, mobile robot, obstacle avoidance, microcontroller.*



Sejfo Papić<sup>1</sup>, Fuad Klisura<sup>2</sup>

## UTICAJ STEPENA STRUČNOSTI LJUDSKIH RESURSA NA KVALITET GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE

### *Rezime*

*U radu je prikazan jedan od načina određivanja stepena stručnosti ljudskih resursa zaposlenih u glavnom procesu proizvodnje proizvodnih poslovnih sistema (GPPPPS) i dobijanje ukupne ocjene za stepen stručnosti ljudskih resursa. Zatim je predstavljen način mjerenja i ocjene kvaliteta GPPPPS. Na kraju je prikazan regresioni model uticaja stepena stručnosti ljudskih resursa na kvalitet GPPPPS. Ocjena kvaliteta GPPPPS je vršena pomoću nove metode koja je bazirana na indikatorima kvaliteta glavnog procesa proizvodnje.*

### 1. UVOD

Imajući u vidu neke činjenice, koje su proistekle kao plod dugogodišnjeg rada autora u procesima proizvodnje proizvodnih poslovnih sistema u BiH, javila se težnja da se pokaže kako nova metoda za ocjenu kvaliteta GPPPPS može nedvosmisleno pokazati uticaj pojedinih faktora GPP na ocjenu njegovog kvaliteta, (samim tim i na kvalitet GPP).

Posebno je aktuelno pitanje menadžmenta ljudskim resursima u procesu proizvodnje, koje nije dovoljno istraženo i definisano zbog složenosti relacija stepena stručne spreml kadrova i kvaliteta GPP. Ovaj rad ima za cilj da pokaže da je moguće naći relaciju kako stepen stručnosti ljudskih resursa uključenih u GPPPPS, utiče na kvalitet glavnog procesa proizvodnje.

Zato su na odabranom uzorku od trideset metaloprerađivačkih preduzeća u BiH prikupljeni podaci za stepen stručnosti ljudskih resursa i podaci o indikatorima kvaliteta GPP navedenih preduzeća. Da bi se prikupili što kvalitetniji podaci o stepenu stručnosti ljudskih resursa unutar GPP, sam GPP se podijeli na nekoliko dijelova i putem anketnog upitnika dobijaju se podaci o stepenu stručnosti ljudi koji upravljaju tim dijelovima. Pored toga, upitnik sadrži i pitanje o stručnoj spremi neposrednih izvršilaca. U tom cilju, pitanja koja su na upitniku treba da daju sliku o stepenu obrazovanosti ljudskih resursa zaduženih za pojedine dijelove GPP.

### 2. VRJEDNOVANJE STEPENA STRUČNOSTI LJUDSKIH RESURSA U GPP

Mjerljivost stepena stručne spreml je bitan uslov kojim se rukovalo pri izradi i odabiru pitanja i ponuđenih odgovora. Da bi pretvorili odgovore koje imaju atributivni karakter u ocjene, poslužili smo se Likertovom skalom ocjena od 1 do 8, pri čemu ocjena 1 ima najmanji stepen stručnosti (bez osnovne škole), a ocjena 8 najveći stepen stručnosti (dr. nauka).

Pregled i tumačenje dodijeljenih vrijednosti po Likertovoj skali ocjena predstavljen je vrijednosnom tablicom, tabela T-1. Klasifikacija prema ovoj tabeli odgovara stvarnom stanju klasifikacije stepena stručnosti u PPS BiH i ne slaže se sa standardnom klasifikacijom, ali se autor opredijelio za ovakvu klasifikaciju iz razloga toga što je na ovaj način jednostavnije prikupljanje podataka o stepenu stručnosti ljudskih resursa zaposlenih u GPP.

<sup>1</sup>Mr. sc. Sejfo Papić, dipl.ing, Internacionalni Univerzitet Travnik u Travniku, BiH, tel. +387 61 862816, e-mail: papicsejfo@bih.net.ba

<sup>2</sup>Doc. dr. sc. Fuad Klisura, dipl. ing, IPI – „INSTITUT ZA PRIVREDNI INŽENJERING“, d.o.o. Zenica, Bosna i Hercegovina



Ukupnu ocjenu računamo pe formuli [2; str. 51]: 
$$U_s = \frac{\sum V_i}{n} \quad (1)$$

gdje je:

- $U_s$  - ukupan stepen stručne spreme,
- $V_i$  - vrijednosti ocjene po Likertovoj skali za svako pitanje i
- $n$  - broj pitanja.

**Tabela 1: Vrijednosna tablica za ocjenu stepena stručnosti ljudskih resursa**

Pitanje:	Ponuđeni odgovor		Vrijednost
Redni broj pitanja	a	Bez osnovne škole	1
	b	Četiri razreda osnovne škole	2
	c	Osnovna škola	3
	d	Srednja škola III stepen	4
	e	Srednja škola IV stepen	5
	f	VKV –V stepen stručne spreme	6
	g	VŠS viša stručna sprema	7
	h	VSS visoka stručna sprema	8
	i	Mr. Magistar nauka	9
	j	Dr. Doktor nauka	10

## 2.1. pregled podataka o stepenu stručnosti ljudskih resursa

Nakon prikupljanja i sređivanja podataka o stepenu stručnosti ljudskih resursa uposlenih u GPP proizvodnih poslovnih sistema, dobija se tabela eksperimentalnih mjerenja čiji je pregled dat u tabeli T-2.

**Tabela 2: Pregled ocjena stručne osposoblenosti ljudi zaposlenih u GPP**

GPP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ocjena	6,50	6,77	6,42	6,39	6,31	7,15	6,05	6,39	6,21
GPP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ocjena	7,01	6,53	6,38	6,36	5,65	6,69	5,33	5,28	6,37
GPP	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Ocjena	6,43	5,79	6,82	6,63	6,34	5,62	5,17	6,22	6,38
GPP	28	29	30						
Ocjena	4,77	6,13	6,22						

## 3. OCJENA KVALITETA GPP

Ocjena kvaliteta GPPPPS reprezentnog uzorka je izvršena novom metodom koja je bazirana na sakupljanju bodova proizašlih iz vrijednosti indikatora kvaliteta glavnog procesa proizvodnje (IKGPP). Ova metoda je dosta složena, ali je zato veoma objektivna.

Nakon obrade podataka o IKGPP, te računanja vrijednosti mjerodavnih indikatora kvaliteta GPP (MIKGPP), a uzimajući u obzir idikatorski uticaj na ocjenu kvaliteta GPP, dolazi se do tabele T-4 koja predstavlja pregled sakupljenih bodova za ukupnu ocjenu kvaliteta GPP. Ukupna ocjena je dobijena kao zbir ocjena MIKGPP. Koeficijenti indikatorskog uticaja su određeni u predhodnom istraživanju [3] i iznose 0,6; 0,8 i 1,0. Ukupno ima jedanaest MIKGPP sa koeficijentom uticaja 1,0; osam MIKGPP sa koeficijentom uticaja 0,8 i jedanaest sa koficijentom uticaja 0,6. Oznake MIK i načini dobijanja nestandardnih MIKGPP, dati su u tabeli T-3.



**Tabela 3: Pregled MIKGPP**

Red. Br.	Naziv MIKGPP	Šifra MIKGPP
1.	Standardna devijacija procesa	MIK-01
2.	Potencijal procesa	MIK-02
3.	Indeks tačnosti procesa	MIK-03
4.	Koeficijent odstupanja srednje vrijednosti procesa od sredine tolerancijskog polja	MIK-04
5.	Relativna širina rasipanja procesa	MIK-05
6.	Troškovi plaćanja tzv. „penala“ zbog kašnjenja u isporuci/stvarni obim proizvodnje	MIK-06
7.	Procenat ispunjenja ostvarenosti rokova realizacije	MIK-07
8.	Procenat ostvarenih ciljeva	MIK-08
9.	Količina škarta /ukupani broj proizvoda	MIK-09
10.	Utrošeni/planirani proizvodni sati	MIK-10
11.	Broj sati reklamacija/stvarni utrošak sati	MIK-11
12.	Stvarni/planirani obim proizvodnje	MIK-12
13.	Broj ekscenih situacija/stvarni obim proizvodnje	MIK-13
14.	Količina neusaglašenih proizvoda/stvarni obim proizvodnje	MIK-14
15.	Ukupan broj administrativnih sati vezanih za proizvodnju/ukupni sati proizvodnje	MIK-15
16.	Ukupan broj sati zastoja/ukupni sati proizvodnje	MIK-16
17.	Utrošak sati za rješavanje neusaglašenih proizvoda/ukupni sati proizvodnje	MIK-17
18.	Broj projekata koji nisu realizovani u roku/ukupan broj projekata	MIK-18
19.	Broj novih proizvoda/ukupan broj proizvoda	MIK-19
20.	Količina škarta sirovina i repromaterijala/ukupna količina sirovina i repromaterijala	MIK-20
21.	Procenat iskorišćenja opreme	MIK-21
22.	Ukupan broj prekovremenih sati/Ukupan broj sati	MIK-22
23.	Utrošeni broj sati za preventivno održavanje/ukupan broj sati	MIK-23
24.	Utrošen broj sati za tekuće održavanje/Ukupan broj utrošenih sati	MIK-24
25.	Broj sati eksternog održavanja/Ukupan broj sati	MIK-25
26.	Odnos utrošena/planirana količina sirovina i repromaterijala	MIK-26
27.	Odnos utrošenih/planiranih sredstava za održavanje opreme	MIK-27
28.	Odnos stvarni/planirani utrošak energenata	MIK-28
29.	Troškovi održavanja, oštećenja i otuđenja imovine/Stvarni obim proizvodnje	MIK-29
30.	Vrijednost repromaterijala na zalihama/ukupan utrošak repromaterijala	MIK-30

Prvih pet MIKGPP spadaju u grupu standardnih i njihovo računanje je provedeno standardnim metodama [4], MIK-7 i MIK-8 se dobijaju pri sakupljanju podataka, dok se ostali računaju kao odnos navedenih IKGPP.

Svaki od MIKGPP može imati ocjenu od 0 do 5. Da se zaključiti da je moguće sakupiti maksimalno 120 bodova.

**Tabela 4: Pregled sakupljenih bodova za ocjenu kvaliteta GPP**

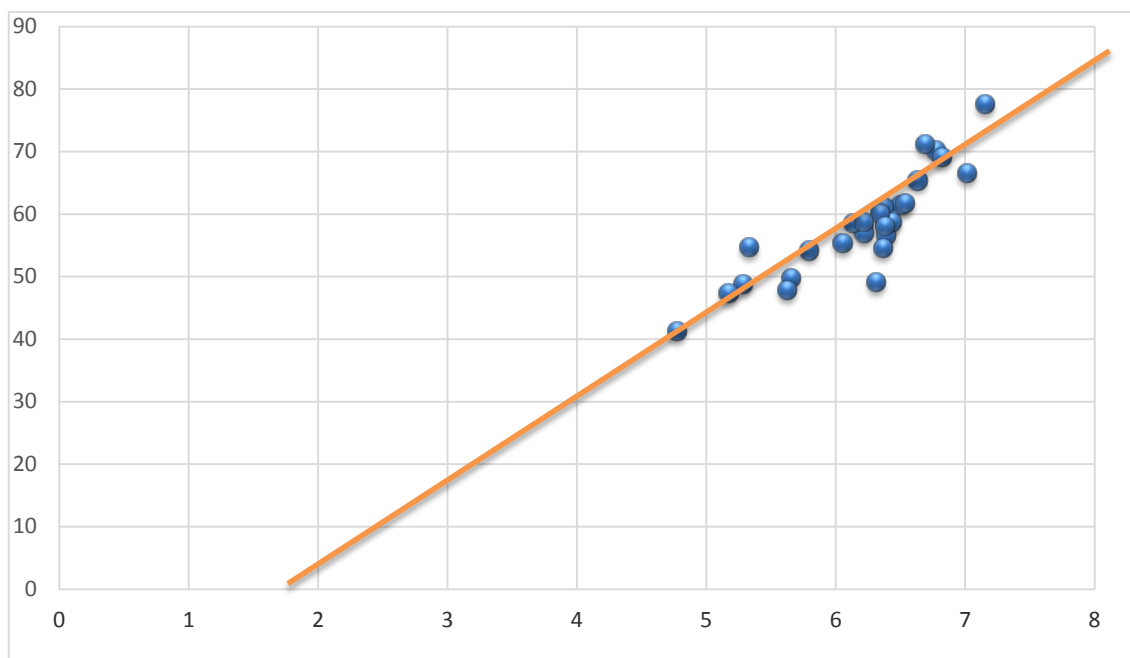
GPP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ocjena	61,5	70,2	59,2	56,6	49,2	77,6	55,4	58,4	57,8
GPP	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ocjena	66,6	61,8	58,4	54,6	49,8	71,2	54,8	48,8	61,2
GPP	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Ocjena	58,8	54,2	69,2	65,4	60,2	47,8	47,4	57	58,2
GPP	28	29	30						
Ocjena	41,4	58,6	58,8						

#### 4. REGRESIONI MODEL I KORELACIONA ANALIZA UTICAJA STEPENA STRUČNOSTI LJUDSKIH RESURSA NA OCJENU KVALITETA GPP

Ako posmatramo tabele T-2 i T-3 moguće ih je sastaviti u jednu tabelu –tabelu eksperimentalnih mjerenja pri čemu možemo rezultate u tabeli T-2, smatrati nezavisno promjenjivim varijablama X (ulazne veličine), dok su rezultati u tabeli T-3, zavisno promjenjive varijable Y (Izlazne veličine). Koristeći statističku izračunavamo jednačinu regresione prave (regresioni model):

$$y = -19,12 + 12,47 x \quad (2)$$

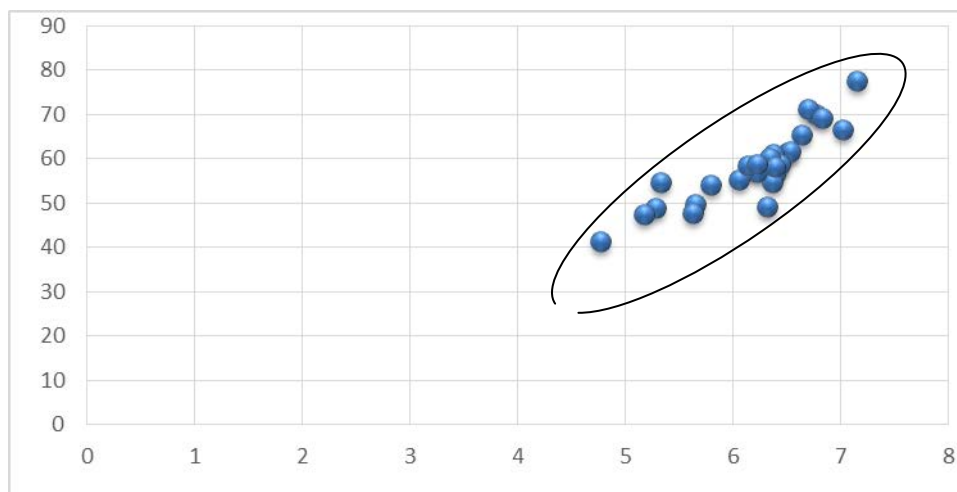
Rezultate mjerenja možemo predstaviti grafički i kao funkciju izlaznih veličina u zavisnosti od ulaznih, što je predstavljeno na slici 1.



**Slika 1. Grafičko predstavljanje podataka eksperimentalnog mjerenja i regresionog modela**

S obzirom na to da se ovim istraživanjem uzima uticaj stepena obrazovanosti ljudskih resursa na ocjenu kvaliteta GPPPPS, potrebno je korelacionom analizom utvrditi (pokazati) linearnu zavisnost između dvije promjenjive. To znači da je potrebno odrediti prosti koeficijent korelacije, što predstavlja mjeru korelacije.

Tačke u dijagramu rasipanja predstavljaju geometrijska mjesta uređenih dvojki, gdje su na apscisnoj osi vrijednosti stepena stručne spreme ljudskih resursa GPP, a na ordinati odgovarajući eksperimentalni podaci ocjene kvaliteta glavnog procesa proizvodnje.



*Slika 2: Dijagram rasipanja*

Zapažamo da su tačke, iako ne leže na istoj pravoj, što ukazuje da ne postoji potpuna korelacija, unutar elipse čija je velika osa mnogo veća od male. Ovaj dijagram rasipanja pokazuje da većim vrijednostima x odgovaraju veće vrijednosti y, što ukazuje na to da su posmatrana obilježja povezana, odnosno, postoji pozitivna korelacija ali je manje izražena u odnosu na funkcionalnu korelaciju.

Posmatrajući širinu polja rasipanja, možemo očekivati da koeficijent korelacije je relativno manji od 1.

Stepen slaganja će se definisati kao koeficijent korelacije. Riječ je o pozitivnoj korelaciji, što znači da je  $0 < r < 1$ , a to nam govori da se sa povećanjem jedne promjenjive povećava druga.

Daljnja analiza podrazumijeva određivanje kovarijanse, koja je definisana izrazom:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 3,63 \quad (3)$$

Dok su standardne devijacije pojedinih obilježja:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,54 \quad (4)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 7,68 \quad (5)$$

Kako je ranije navedeno, na osnovu dijagrama rasipanja, radi se o pozitivnoj korelaciji, pri čemu je  $r$  koeficijent korelacije koji se određuje na sljedeći način:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = 0,88 \quad (6)$$

Dobijena vrijednost pokazuje da postoji korelacija između x i y, odnosno, u ovom slučaju, postoji korelacija između stepena obrazovanosti ljudskih resursa zaposlenih u GPP i ocjene kvaliteta GPP

## 5. ZAKLJUČAK

Korelaciona analiza nam je pokazala da postoji signifikantna korelacija između dvije polazne variable. Prva varijabla je stepen stručnosti ljudskih resursa koji su uposleni u GPPPPS reprezentnog uzorka, dok je druga varijabla ocjena kvaliteta GPPPPS.

Iako je koeficijent korelacije veoma veliki, ovdje su potrebna dodatna objašnjenja, u cilju potpunog shvatanja zavisnosti dvije varijable. Dakle, ta zavisnost postoji u ovom intervalu mjerenja koji je prisutan u praksi. Međutim, taj interval za koji važi korelacija bi se morao precizno definisati. U protivnom, došlo bi se do jednog zaključka koji ne bi bio realan. Ta nerealnost se ogleda u sljedećem: Ako bi pretpostavili da u jednom GPP rade samo ljudi sa visokom stručnom spremom, onda sigurno ne bi dobili dobre rezultate.

Ovaj zaključak proizilazi iz samog načina bodovanja stručne spreme ljudskih resursa zaposlenih u GPP. Jer je za sve proizvodne radnike uzeta srednja ocjena stručne spreme, dok su ostale ocjene uzimane za stručnu spremu neproizvodnih ljudi unutar GPP, odnosno za rukovodeći i saradnički dio ljudskih resursa datog GPP.

Samo stepen stručnosti rukovodećeg kadra i kadra za logistiku unutar GPP ima uticaj na ocjenu kvaliteta GPP, onako kako je pokazano korelacionom i regresionom analizom.

Situacija u PPS BiH, je na neki način, primorala autore ovog rada, da odstupa od standardne klasifikacije stepena stručnosti ljudskih resursa, i datu klasifikaciju prilagodi postojećem stanju, a sve u cilju dobijanja što tačnijih podataka.

## 6. LITERATURA

- [1] Seferović, E., Bašić, H.: Osnovi metrologije i obrada rezultata mjerenja, Mašinski fakultet Sarajevo, 2005.
- [2] Papić, S.: „Uticaj stupnja primjene komunikacija podržanih intranetom na neprekidna poboljšanja glavnog procesa“, magistarski rad, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 2013.
- [3] Brdarević, S., Jašarević, S., Papić, S., 2015, „Određivanje vrijednosti indikatorskog uticaja na kvalitet glavnog procesa proizvodnje“, 9. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem”KVALITET 2015“-Zbornik radova, ISSN 1512-9268, I-28; str. 171 – 176; Neum, B&H, 10.-13. juni 2015.
- [4] Vulanović, V., Stanivuković, D., Kamberović, B., Radaković, N., Maksimović, R., Radlovački, V., Šilobad, M.: „Metode i tehnike unapređenja procesa rada“, IIS –Istraživački i tehnološki centar, COBISS.SR-ID 185424391, Novi Sad, 2003.

**Sejfo Papić, Fuad Klisura**

***Summary:** This paper presents a method for determining the level of expertise of human resources employed in the main production process manufacturing business systems (MPPMBS) and getting the total score for the level of expertise of human resources. It then presents a way of measuring and evaluating the quality of MPPMBS. At the end there is shown a regression model influential on the degree of expertise of human resources quality of MPPMBS. Assessment of quality of MPPMBS was done using a new method that is based on indicators of the quality of the main production processes.*



Д.Вујовић<sup>1</sup>, П. Никшић<sup>2</sup>, Н.Никшић<sup>3</sup>

## УПРАВЉАЊЕ РИЗИКОМ У ПРОЦЕСИМА ЗАВАРИВАЊА, СА АСПЕКТА БЕЗБЕДНОСТИ НА РАДУ И ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

### Резиме

*Рад третира проблематику управљања ризиком у процесима заваривања, применом стандарда „ISO 31000”, са аспекта безбедности на раду власника процеса и заштите животне средине. Рад садржи анализу и процену ризика, листу опасности и последице опасности, мере превенције и мере заштите у процесима заваривања.*

**Кључне речи:** Ризик, индефикација ризика, оцена ризика, процена ризика, методе оцене ризика.

### 1. УВОД

Безбедност на раду и заштита животне средине треба и мора да буду приоритет сваког процеса па и процеса заваривањем. Заштита на раду и заштита животне средине огледа се у три основне карактеристике и то:

- Спречавање могућности повређивања,
- Спречавање професионалних обољења и
- Спречавање смртних исхода.

Задатак менаџмента треба да се огледа у следећем:

- Поштовање законских норми, закон о безбедности и заштити на раду (новембар 2005),
- Примена међународних стандарда OHSAS 18001 и ISO 31000,
- Процена ризика, заштита у процесима и
- Заштита опреме-сигурна опрема
- Обука и тренинг

Ако ризике не нападнемо активно, они ће активно напасти нас. Идентификовање и приоритетизовање ризика омогућује менаџменту да се фокусира на области које имају највише утицаја на безбедност. Стандард ISO 31000 препоручује да организација развија, имплементира и константно унапређује оквир чија је сврха интеграција процеса управљања ризицима у читавој организацији. На компанијском нивоу у процесима управљања, дефинисања стратегије и планирања, процесима извештавања, политикама, вредностима компаније и корпоративној култури.

Управљање ризицима може бити примењено на свим нивоима организације – од компанијског нивоа, преко појединих организационих делова, па све до појединачних пројеката и активности. Стандард ИСО 31000 пружа генеричке смернице за управљање ризицима у целој организацији.

#### 1.1. Општи приступ управљању ризиком

Према ISO 31000, ризик је „ефекат неизвесности на циљеве“, а ефекат може да буде позитиван или негативан на оно што се очекује. ISO 31000 признаје да сви раде у неизвесном свету. Увек постоји шанса да ствари неће ићи по плану током кретања ка циљу. Сваки корак има елемент ризика којим би требало да се управља и сваки исход је неизвесан. Током достизања циља не добијају се

<sup>1</sup> мр Д. Вујовић спец. машинског инжењерства, Техничка школа-Пожега [vujoicdragan67@gmail.com](mailto:vujoicdragan67@gmail.com)

<sup>2</sup> проф. др. П. Никшић, дипл. Маш. инжењер, ВШТСС-Чачак. [petar.niksic@vstss.com](mailto:petar.niksic@vstss.com)

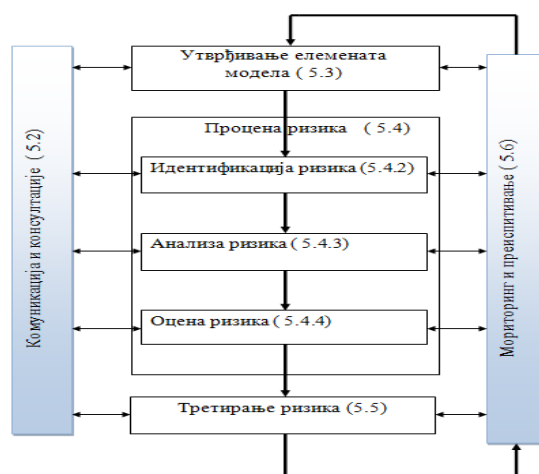
<sup>3</sup> Н. Никшић, магистар фарм., ЗУА Оаза здравља-Београд. [nemanja198@gmail.com](mailto:nemanja198@gmail.com)

увек очекивани резултати. Управо због тога, примена ISO 31000 треба да елиминише неизвесност што је више могуће, као и да обезбеди реализовање циља.

Управљање ризицима се односи на координиран скуп активности и метода које се користе да усмере организацију и за контролу многих ризика који могу да утичу на њену способност да оствари циљеве.

## 1.2. Оквир и процес управљања ризиком

У овом делу рада је укратко наведена и анализирана структура стандарда ISO 31000:2009, однос између принципа управљања ризиком, оквира у којима се то управљање обавља и процеса управљања ризиком. Процес управљања ризиком требало би да буде интегрални део менаџмента, саставни део културе и праксе, направљен по мери пословних процеса организације. Обухвата активности наведене по тачки од 5. 2 до 5. 6. Процес управљања ризиком је приказан на слици 1.



Слика 1. Процес управљања ризиком[1]

## 2. ИЕНТИФИКАЦИЈА И ПРОЦЕНА РИЗИКА, ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА МЕТОДА КОЈЕ СЕ МОГУ ПРИМЕНИТИ У ПРОЦЕСУ ЗАВАРИВАЊА

При заваривању су могуће несреће и оштећења здравља, ако не познајемо изворе опасности. Високе температуре електричног лука и других извора енергије за заваривање омогућавају хемијске реакције и појаве које не сусрећемо у обичајним индустријским уређајима, а последице ових појава могу штетно утицати на здравље човека, а посебно на очи, уши, дисајне путеве, кожу итд., због тога се мора извршити процена ризика.

Постоји много метода помоћу којих се може извршити процена ризика, правилно и реално индефиковати, анализирати и оценити ризик. Свака метода захтева да се прво изврши анализа опасности при одговарајућим операцијама изахватима процеса заваривања, његовим негативном утицајима на здравље и безбедност, а самим тим и на животну средину.

### 2.1 Сингапурски модел 3x3 и 5x5 за оцену ризика

За процену ризика у малим и средњим организацијама може се усвојити један од једноставнијих модела тзв. "сингапурски модел". Ризик се најједноставније изражава као производ вероватноће настанка повреде на раду кроз оштећења здравља и обољења у вези са радом (В) и последица тежине повреде, оштећења здравља и обољења у вези са радом (Т).

$$R = V \times T$$

**R** – ризик; **V** – вероватноћа настанка повреде на раду; **T** – последица тежине повреде на раду. У табели 1. приказан је матрични модел процене ризика 3x3 а у табели 2. је оцена ризика методом 5x5.



**Табела 1. Матрични модел процене ризика 3x3[5]**

Т		V		
		Мала	Средња	Велика
		1	2	3
Мале последице	1	Занема. Мали ризик 1	Врло мали ризик 2	Мали ризик 3
Средње последице	2	Врло мали ризик 2	Средњи ризик 4	Велики ризик 6
Велике последице	3	Мали ризик 3	Велики ризик 6	Врло велики ризик 9
Прихватљив ризик		Ризик који захтева редукцију		Неприхватљиви ризици

**Табела 2. Оцена ризика методом 5x5 [5]**

Степеновање вероватноће настанка повреде на раду или болести у вези са радом V		Оцена тежине могућих повреда на раду или болести у вези са радом Т				
		Врло лака	Лака	Средње тешка	Тешка	Колективна
		I	II	III	IV	V
Врло мали или занемарљив	A	Занемарљив	Занемарљив	Мали	Мали	Мали
Мали	B	Занемарљив	Мали	Средњи	Средњи	Велики
Умерен	C	Мали	Средњи	Средњи	Средњи	Велики
Велики	D	Мали	Средњи	Велики	Велики	Изразито велики
Изразито велики	E	Мали	Велики	Велики	Изразито велики	Изразито велики

## 2.2. Примена методе КИННИ у процени ризика

Једна од метода којом је могуће извршити оцену и управљање ризицима је и метода Киини. У методи Киини испуњење ризика посматра се као настанак опасности и штетности. Зато се идентификацијом потенцијалних опасности и штетности утврђују и потенцијални ризици по безбедност на раду.

Ризици се током времена мењају кроз три основне категорије које анализира метода Киини и то:

- вероватноћа појаве опасности и штетности Табела 3,
- тежина последица које које запослени трпе код појаве опасности и штетности,
- учесталост појављивања опасности и штетности.

Човек је немоћан пред елементарним непогодама као што су земљотреси, поплаве, вулканске ерупције и слично јер ничим не може спречити настанак ових ризика. Међутим, могуће је унапред се припремити и правовремено реаговати уколико се они заиста и догоде. На основу идентификације опасности и штетности на радном месту и у радној околини, статистичке обраде података о опасним догађајима (акцидентима и/или повредама на раду), опасним материјама и критичним тачкама процеса може се извршити процена ризика.

Поступком идентификације опасности и штетности и вредновања утицаја постиже се следеће:

- идентификују се све опасности и штетности које могу имати утицаја на радно место и радну околину,
- анализирају се утицаји опасности и штетности на радно место и радну околину,
- утврђује се систем вредновања сваке опасности и штетности,
- прописује се метод одређивања значаја сваке опасности и штетности.

Параметри анализе се нумерички вреднују, па је и коначна процена ризика на радном месту и радној околини изражена нумерички. Основна поставка методе Киини у функцији процене ризика на радном месту и радној околини је у суштини једноставна и лака за разумевање.

Суштина методе састоји се у реализацији следећих активности:

- а) утврђивање свих потенцијалних опасности и штетности који настају и/или могу настати као последица процеса или услуге,
- б) утврђивање могућих узрока настанка сваке опасности и штетности,
- ц) анализа сваке опасности и штетности са циљем да се аналитичким методама утврде:
  - вероватноћа појаве потенцијалне опасности и штетности,

- тежина последица које запослени трпи код појаве опасности и штетности,
  - учесталост појављивања опасности и штетности.
- д) вредновање нивоа ризика чине производ три фактора ризика и то:
- фактор ризика - **вероватноћа појаве опасности и штетности V**,
  - фактор ризика - **тежина последице које запослени трпи због појаве опасности и штетности P**,
  - фактор ризика - **учесталост појављивања опасности и штетности U**.

**Критеријум - вероватноћа (V)** рангира се почев од 0,1 – једва вероватно, до 10 која се сматра извесном, предвидивом односно сасвим очекиваном.

**Табела 3. Опис критеријума за вероватноћу појаве опасности и штетности[6]**

РАНГ	ОПИС КРИТЕРИЈУМА ЗА ПРОЦЕНУ ВЕРОВАТНОЋЕ
0,1	Једва појмљиво
0,2	Практично невероватно
0,5	Постоји, али само мало вероватно
1	Мала вероватноћа, али могућа у ограниченим случајевима
3	Мало могуће
6	Сасвим могуће
10	Предвидиво, очекивано

**Критеријум - последице (П)** (могућа штета) рангира се почев од 1 као најмање до 10 која се сматра катастрофалном, набројане су у табели 4.

**Табела 4. Опис критеријума за процену последица код појаве опасности и штетности[7]**

РАНГ	ОПИС КРИТЕРИЈУМА ЗА ПРОЦЕНУ ПОСЛЕДИЦА
1	Болест, повреда која захтева прву помоћ и никакав други третман
2	Медицински третман од стране лекара
3	Озбиљне-инвалидност, озбиљна појединачна повреда са хоспитализацијом и изгубљеним данима
6	Веома озбиљне-појединачне несреће са смртним исходом
10	Катастрофалне-са вишеструким смртним исходима

**Критеријум – учесталост појављивања опасности и штетности (U)** рангира се од ретко – један пута у години, до трајно – континуално 10, као што је приказано у табели 5.

**Табела 5. Опис критеријума за учесталост појављивања опасности и штетности[7]**

РАНГ	ОПИС КРИТЕРИЈУМА ЗА УЧЕСТАЛОСТ
1	Излаже се ретко (годишње)
2	Излаже се месечно
3	Излаже се недељно
6	Излаже се дневно
10	Излаже се трајно, континуално

е) Вредновање **ризика R** врши се по формули:

$$R = V \times P \times U$$

**Табела 6. Матрица процене ризика по методи Кинни[7]**

Идентификована опасност или штетност	ПРОЦЕНА РИЗИКА				Мере за контролу процењеног ризика
	V-Вероватноћа	P-Последица	U-Учесталост	P-Ниво ризика	

**Ниво ризика (R)** се рангира од прихватљивог, незнатног нивоа R I; до екстремног-недопустивог R V који изискује прекид радне активности и предузимања моменталних превентивних акција, као што је приказано у табели 7.

**Табела 7. Критеријуми за одређивање нивоа ризика[5]**

Укупна оцена	Ниво ризика	Класификација нивоа ризика	Опис класификације нивоа ризика
0,1 – 20	R I	<b>Занемарљиво мали ризик</b>	<i>Не захтева се никаква акција.</i>
21 – 70	R II	<b>Мали ризик</b>	<i>Нема потребе за додатним активностима при управљању операцијом. Може се размотрити економски исплативије решење или унапређење без додатних улагања. Потребно је пратити ситуацију, како би поседовали информације о спровођењу прописаних активности</i>
71 – 200	R III	<b>Средњи ризик</b>	<i>Потребно је уложити напор како би се смањило ризик, али трошкови превенције морају бити пажљиво планирани и ограничени до извесног нивоа. Потребно је дефинисати рок за спровођење унапређења. Код оних догађаја код којих могу наступити изузетно опасне последице, потребно је додатно проверити вероватноћу настанка таквог догађаја како би се дефинисао потребан ниво активности на ублажавању ризика.</i>
201– 400	R IV	<b>Високи ризик</b>	<i>Не сме се започети са датом активношћу док ниво ризика не буде снижен. Могу бити потребна знатна средства како би се ризик смањило. Ако се ризик односи на све започете активности, потребно је предузети хитне акције на смањењу нивоа ризика</i>
<b>Преко 400</b>	<b>R V</b>	<b>Екстремно високи ризик</b>	<i>Активност не сме бити започета ни настављена, све док се ниво ризика не смањи. Ако ни улагањем неограничених средстава није могуће смањити ниво ризика, активност мора остати забрањена.</i>

На основу матрице за оцену ризика дефинише се карактеризација процене ризика као што је то приказано у Табели 8.

**Табела 8. Критеријуми за карактеризацију ризика[5]**

Процена нивоа ризика	Класификација нивоа ризика	Карактеризација ризика
R I	Занемарљиво мали ризик	<b>Прихватљив ризик</b>
R II	Мали ризик	<b>Прихватљив ризик</b>
R III	Средњи ризик	<b>Повећани ризик</b>
R IV	Висок ризик	<b>Неприхватљив ризик</b>
R V	Екстремно висок	<b>Неприхватљив ризик</b>

### 3. УТИЦАЈ НА НА БЕЗБЕДНОСТ НА РАДУ И ЖИВОТНУ СРЕДИНУ ПРИ ПРОЦЕСУ ЗАВАРИВАЊА

При заваривању су могуће несреће и оштећења здравља, ако не познајемо изворе опасности. Високе температуре електричног лука и других извора енергије за заваривање омогућавају хемијске реакције и појаве које не сусрећемо у обичајеним индустријским уређајима, а последице ових појава могу штетно утицати на здравље запослених тако и на животну средину. Најчешћи штетни утицаји су објашњени у следећим поглављима.

#### 3.1. Гасови штетни за здравље који се појављују при заваривању

Озон (O<sub>3</sub>), нитрозни гасови (NO, NO<sub>2</sub>), гасовити флуор (F<sub>2</sub>), угљен диоксид (CO<sub>2</sub>) који до високих концентрација није опасан за здравље, угљен моноксид (CO) се јавља при CO<sub>2</sub> (MAG) заваривању, али у концентрацијама, које нису опасне. Аргон (Ar) и хелијум (He) као гасови нису биолошки опасни, али могу проузроковати и смрт ако их човек удише без кисеоника. У Табели 9 дате су допуштене концентрације гасова у ваздуху на радном месту за 8 сати, а у табели 10 емисије гасова за три врсте челичних електрода.

**Табела 9- Допуштене концентрације гасова у ваздуху на радном месту за 8 сати рада[2]**

ГАС	Максимална дозвољена концентрација	
	(ppm)	(mg/m <sup>3</sup> )
CO	50,0	55,0
CO <sub>2</sub>	5000,0	9000,0
COCl <sub>2</sub>	-	0,4
Cl <sub>2</sub>	0,5	1,5
HCl	5,0	7,0 C
F <sub>2</sub>	0,1	0,2
HF	-	2,0
NO	25,0	30,0
NO <sub>2</sub>	5,0	9,0 C
O <sub>3</sub>	0,1	0,2

Код гасног и електролучног заваривања у скученим просторима јавља се опасност од NO, NO<sub>2</sub>, па треба проветравати такве просторе. NO<sub>2</sub> је опаснији од NO. Не напада очи нос и грло па не осетимо његово присуство. Можемо инхалирати критичне количине и добити запаљење плућа, које траје сатима или данима.

**Табела 10. Емисије гасова за три врсте челичних електрода [6]**

Тип електроде пречник 4 mm јач. струје, А	В	Р	Р (с)
	базична 170	рутилна 185	рутилно-целулозна 185
CO	0,036	0,087	0,25
CO <sub>2</sub>	3,56	3,23	4,70
NO	0,053	0,047	0,015
NO <sub>2</sub>	0,009	0,003	0,0016

### 3.2. Димови и паре

Димови су суспензије малих чврстих честица у околном гасу, који се код ручног електролучног заваривања обложеном електродом највише развијају. У диму се налази само 5% честица, које потичу од основног материјала, а 95% се развија из обложене електроде. Честице димова садрже кондензоване металне паре, оксиде и сложене спојеве. Пример количине емитираних честица при заваривању измичном струјом нелегираних челичних електрода дат је у табели 11.

**Табела. 11 Емисија димова[6]**

Електрода пречник 4 mm јач. струје, А	В	Р	Р (С)
	базична 170	рутилна 185	рутилноцелулозна 175
Емисија дима mg/min	354	185	170
mg/g депозита	17,4	6,7	9,4

Опасни материјали у диму су:

Mn (Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), F (KF, NaF, CaF<sub>2</sub>), Ba (BaO, BaF<sub>2</sub>), V (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Ni (NiCO<sub>4</sub>), Cr.

Сматра се да је гранична вредност садржаја честица 5 mg/m<sup>3</sup> (MDK). Пуно честица може узроковати надражајни бронхитис (кашаљ) без трајних последица. Честице жељезног оксида делују на плућа, таложе се и узрокују сидерозу, а честице SiO<sub>2</sub> силикозу. Док се при заваривању могу јавити безопасни облици сидерозе, силикоза се не јавља при заваривању, јер се SiO<sub>2</sub> разара при високим температурама. Силикоза је професионална болест у ливењу.

Металне паре

Оксиди Zn, Sn, Cu, Ni и Fe могу узроковати металну грозницу. Та грозница наступа неколико сати након удисања металних пара, брзо пролази и не оставља штетне последице. Опасније су паре Cd, F и Mn. Код појаве грознице, због ових елемената, потребно је мировање, топлина и лекарска помоћ с лековима. Посебан опрез је потребан када је присутан Cr<sup>VI</sup>, јер се његови хромати сматрају

канцерогеним стварима. Код заваривања високолегираних челика, Ni i Cr су опасни као канцерогени елементи с другим инкубацијским периодом од 20 до 30 година.

Метална грозница се појављује углавном након неколико сати удисања пара. Наступајућа краткотрајна грозница има за последицу тромост, онемоћалост, утученост, надражај дисајних путева, евентуално надражај на повраћање. Ти симптоми јењавају након неколико сати и не остављају трајну штету. Међутим, паре као што су Cd, F i Mn паре, су много опасније. У овом случају може након временског периода од 36 сати исто тако наступити помањкање ваздуха, температура изазвана надражајем дисајних путева и оток плућа.

### 3.3. Заштита заваривача од гасова, димова и пара

Заштита се постиже добром вентилацијом простора у коме се изводи заваривање. Локално проветравање на радном месту заваривача је најповољније решење.

Слично, код гасног резања, долази до развијања гасова и честица с прашином, па је добро, ако се реже изнад воде. Најбољу заштиту даје заштитна гасне маска са улошком од активног угља.

### 3.4. Зрачење

При заваривању долази до електромагнетског зрачења у подручима ултравиолетног, видљивог и инфрацрвеног дела спектра табела 12. Ако очи нису заштићене долази до запаљења, а евентуално и до оштећења очију. UV и IC зрачења нису видљива људском оку, па се зеница не сужава при јачем зрачењу. За заштиту очију од зрачења морају се применити филтер тамна стакла, која смањују интензитет сва три зрачења на дозвољене вредности. Уједно ова филтер стакла заштићују и од механичких оштећења очију (прскања, искре). Стакла су стандардизирана с разним затамњењима. Зрачења, а посебно UV зрачења (ултравиолетна) узрокују опекотине на кожи, па незаштићене делове коже треба заштити заштитном одећом. Околину треба штитити параванима.

**Табела 12.** Електромагнетска зрачења, која настају при заваривању[6]

Зрачење	Таласна дужина	$10^{-8}$ cm
Екстремно	ултраљубичасто (UV)	20-2000
	ултраљубичасто (UV)	2000-4000
	видљиво	4000-7500
	инфрацрвено	7500-13000
Високо	инфрацрвено	више од 13000

### 3.5. Бука

Разни поступци заваривања и сродних техника производе буку према табели 13, а у табели 14 приказ дозвољених нивоа буке .

**Табела 13.** Емисија звука код заваривања и резања[6]

	Јачина звука dB (A)							
	80	90	100	110	120			
Гасно заваривање топљењем		█						
Гасно резање		█						
Грејање пламеном			█	█	█			
Претварач – агрегат	█							
Исправљач	█							
РЕЛ заваривање		█						
MIG / MAG поступак		█	█	█				
ТИГ наизменичном струјом		█	█	█				
ТИГ једносмерном струјом	█							
Тачкасто заваривање		█	█	█	█			
ARC – AIR жљепљење					█	█	█	█

Радионица, заваривање									
Чекићање, равњање									
Пнеуматски алати									

Ниво буке до 95 dB је максимално дозвољен, али треба тежити да 85 dB не прекорачујемо као трајни ниво буке у којој раде људи, јер може доћи до оштећења слуха. Као мерило интензитета буке користе се изрази[4]:

$L = 20 \log (p/p_0)$ , dB;  $p_0 = 2 \times 10^{-4}$ ,  $\mu\text{bar}$ ... чујни праг буке

$L = 20 \log (J/J_0)^{1/2} = 10 \log (J/J_0)$ ;  $L = p^2 / v$ , W/m<sup>2</sup> ...интензитет звука

**Табела. 14 Допуштена експозиција буке[2]**

Дневно у сатима	Ниво буке у dB (A)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1,0	105
0,5	110
0,25	115

### 3.6. Удар електричне струје

Деловање електричне струје на људско тело зависи од:

- Јачине струје,
- Пута кроз тело,
- Фреквенције и
- Времена деловања.

Код проласка неизменичне струје кроз тело долази до грчења мишића већ код струје од 15mA. Када струја пролази телом дугим путем од руку до ногу 80 mA узрокује смрт.

**Табела 15. Листа опасности[4]**

ОПАСНОСТИ И ШТЕТНОСТИ	ПОСЛЕДИЦЕ ПОСТОЈЕЋИХ ОПАСНОСТИ И ШТЕТНОСТИ
1.1.	Преломи костију, пригњечења и др.- последице опасне
1.2	Прикљештење шаке, посекотине, подеротине - последице незнатне
1.3	Опекотине, повреде очију-последице опасне
1.4	Опекотине, гушења због продуката сагоревања - последице опасне
1.5	Падови у истој равни преломи костију, контузије - последице опасне
2.1	Удар струје - последице опасне
2.2	Опекотине шаке или лица - последице опасне
3.1	Јак бљесак доводи до заслепљења и заблештавања. Веома честа заслепљења могу оштетити очно дно, - последице опасне
3.2	Оштећења коже и очију - последице опасне
3.3	Наопасније и штетно делује на очи и кожу , прекомерно излагање коже УВ зрачењу доводи до прераног старења коже и ризика од малигних обољења. Изазива акутно обољење очију - у виду печења и "песка" у очима, сузења и болова - последице опасне
4.1	Бронхитис и друга обољења дисајних органа - последице опасне
4.1	Бронхитис и друга обољења дисајних органа - последице опасне
5.1	Оштећење слуха - зависно од нивоа буке - последице опасне
6.1	Прехладе, пад имунитета и друга обољења - последице у зависности од постојећих услова



7.1	Напрезање чула вида и повећана опасност од повреда - последице незнатне
8.1	Обољења коштаног мишићног система - последице опасне

Табела 16. Пример анализе ризика по сингапурској методи

ОПАСНОСТ И ШТЕТНОСТ	ОПИС ОПАСНОСТИ	ВЕРОВАТНОЋА (V)	ПОСЛЕДИЦЕ (T)	НИВО РИЗИКА (RX)
1.МЕХАНИЧКЕ ОПАСНОСТИ	1.1	2	2	R4(Средњи риз.)
	1.2			
	1.3			
	1.4			
	1.5			
2.ОПАСНОСТИ ОД ЕЛ. ЕНЕР.	2.1			
	2.2			
3.ШТЕТНОСТИ ОД ЗРАЧЕЊА	3.1			
	3.2			
	3.3			
4.ХЕМИЈСКЕ ШТЕТНОСТИ	4.1			
5.ФИЗИЧКЕ ШТЕТНОСТИ	5.1			
6.МИКРОКЛИМА	6.1			
7.ОСВЕТЉЕНОСТ	7.1			
8.ФИЗИОЛОШКИ НАПОРИ	8.1			

$$R = V \times T$$

#### 4.ЗАКЉУЧАК

Заваривање не би требао да буде ни ризичан ни опасан процес како за власника процеса тако и за животну средину, ако се познају сви извори опасности и примене превентивне мере које спречавају или умањују негативне појаве. Сваки ризик треба благовремено напасти (идентификовати, анализирати, вредновати, проценити ранг, третирајући и применити одговарајуће мере), јер ако ми не нападнемо њега онда ће он нас. Тада је већ касно за било какве превентивне и корективне мере.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] SRPS ISO 31000: 2009 *Risk management – Upravljanje rizicima – Principi i smernice*
- [2] Законска регулатива из области заштите животне средине Републике Србије, 2011.
- [3] П.Никшић, Управљање квалитетом, ВШТСС, Чачак 2010.
- [4] П.Никшић, Заштита животне средине, ВШТСС, Чачак 2014.
- [5] web: <http://iproduct.masfak.ni.ac.rs>
- [6] *Metodologije za sprovođenje postupka procene rizika* (kompletan materijal je radna verzija iz doktorske teze prof.B.Gemović)
- [7] T. Karkoszka, M. Sokovic, INTEGRATED RISK ESTIMATION OF METAL INERT GAS MAG AND METAL ACTIVE GAS (MAG) WELDING PROCESSES- ISSN 0543-5846, 2012

Д.Вујовић, П. Никшић, Н.Никшић

#### RISK MANAGEMENT, HEALTH SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION DURING THE WELDING PROCESS

**Abstract:** *The paper treats the issue of risk management in the process of welding example standard ISO 31000, as well as the protection of health and the owner of the process and environmental protection. Risk analysis and risk assessment, a list of the dangers and consequences of hazards, measures of prevention and protection measures.*



Bracanović, Z., Petrović, V., Grozdanić, B., Borak, Đ.<sup>1)</sup>

## UTICAJ DOLAZNIH I ODLAZNIH PROCESA NA RAZVOJ KONKURENTSKE PREDNOSTI PREDUZĆA

### *Rezime*

Za usmeravanje konkurentske prednosti preduzeća ka rastu i održivom razvoju potrebno je odrediti uticajne parametre za aktuelnu situaciju. Definisanjem pozicije preduzeća na tržištu možemo usmeravati i formirati posmatrane procese. Istovremeno se dozvoljava kreiranje učešće određenog uticaja procesa na drugi proces. Kako procesi povezuju resurse, inovacije, tržište, klijente i definišu konkurentsku prednost preduzeća. U ovom radu biće dat pokušaj unapređenja konkurentske prednosti sa promenom procentualnog udela odlaznih i dolaznih procesa. Međusobne veze između procesa u cilju stabilne konkurentske prednosti moguće je korigovati.

**Ključne reči:** odlazni i dolazni procesi, učešće, korekcija.

### 1. UVOD

Sve buduće razvojne tendencije preduzeća su ograničene socijalnim, političkim i ekonomskim prilikama. Gašenje velikih firmi dovelo je do formiranja malih i srednjih preduzeća. Nastala situacija zahteva brzo prilagođavanje i traži načine, da se određenim metodama i modelima sačuvaju postojeći kapaciteti i održi pozicija na konkurentskom tržištu. Istovremeno od preduzeća zahtevaju se brze adaptacije odnosno promene koje su kvalitativne, inovativne i fleksibilne. Rast i razvoj konkurentske prednosti na tržištu usklađen je sa promenama u ekonomiji i društvu, što u prvi plan stavlja čoveka, njegovo znanje, informisanost i kreativnost. Za unapređenje konkurentske prednosti posmatranog preduzeća neophodno je analizirati stanje kapaciteta tržišta, klijente, aktivne resurse preduzeća, inovacije, kapacitete inovacija i načine upravljanja preduzeća. Svi pomenuti činioci povezani su dolaznim i odlaznim procesima i uslovljeni su međusobnom vezom istih. U ovom radu akcenat je na prikazu zadatih procesa koji povezuju potrebne činioce ekonomskog subjekta preduzeća a koji doprinose profitabilnosti. Kako je promena procesa uvek moguća usled unutrašnjih i spoljnih faktora, konkurentska prednost je promenljiva veličina. Ovaj rad će ukazati na moguće teoretike načine posmatranja i povezivanja procesa sa činionicima preduzeća u cilju pozicioniranja na tržištu i razvoju konkurentske prednosti.

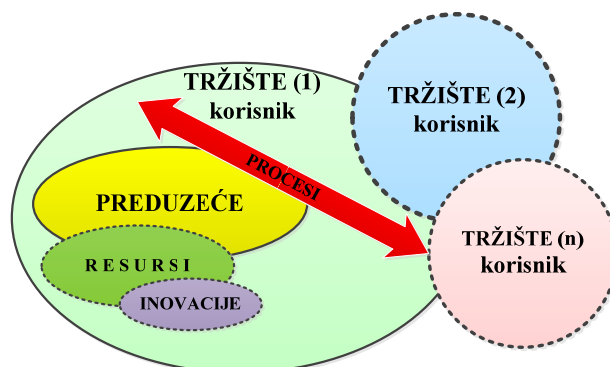
### 2. ANALIZA TRŽIŠTA

Tržište je ograničeno raznim ekonomskim i političkim faktorima koji ga usmeravaju da bude promenljivo, zahtevno i dinamično. Kao takvo tržište ima svoje varirajuće granice i preduzeća moraju da se prilagođavaju kako bi i dalje opstale na tržištu. S'obzirom da je tržište izuzetno kompleksno i samo po sebi veoma nestabilno, posmatranje tržišta postaje izuzetno složen problem. Lako se može dogoditi da preduzeće ne može da odgovori na novonastale tržišne uslove.

Istraživanja vezana za tržišta odnose se na segmentaciju, privredne segmente, konkurente, klijente, poslovne planove kao i slobodan udeo na tržištu. Procentualno učešće konkurenata na tržištu, njihovi poslovni planovi kao i tendencija smera njihovih kretanja. Dalja istraživanja se odnose na potrebe klijenata i njihovo iskustveno za određeni proizvod/uslugu. Podaci vezani za klijente ukazuju na buduću osnovu za inovacije ili inoviranja proizvoda/usluge [1]. Pravilnom raspodelom odnosa slobodnog tržišta, kapaciteta

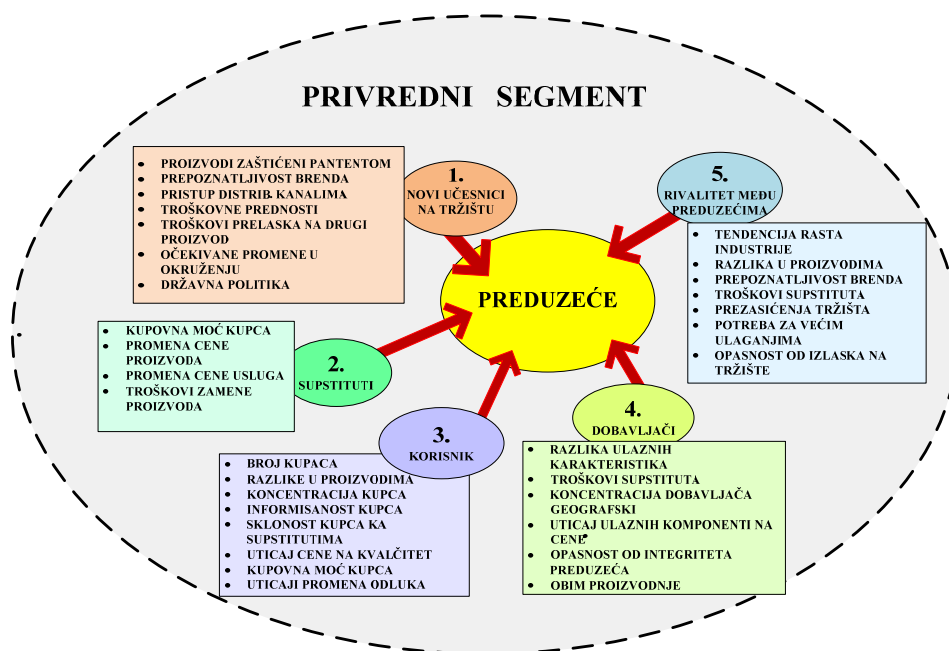
<sup>1)</sup> mr Zlata Bracanović, Institut IMR-a, Beograd, ([zlatabracanovic@mts.rs](mailto:zlatabracanovic@mts.rs)), dr Velimir Petrović, Institut IMR-a, Beograd, ([institut-mr@Eunet.rs](mailto:institut-mr@Eunet.rs)), mr Branka Grozdanić, Institut IMR-a, Beograd, ([institut-imr@Eunet.rs](mailto:institut-imr@Eunet.rs)), mr Đuro Borak, Institut IMR-a, Beograd, ([institut-imr@Eunet.rs](mailto:institut-imr@Eunet.rs))

inovacija i resursa, usmerava se preduzeće ka željenoj poziciji i sigurnom sticanju profitabilnosti. Dalji tok istraživanja trebalo bi da obuhvati analiziranje procentualnog učešća konkurenata u odnosu na slobodno tržište za svaki poslovni plan pojedinačno u zadatom vremenskom intervalu. Preduzeća kod kojih je usledila transformacija, poželjno je da kapacitet upravljanja i aktuelne resurse stavljaju u prvi plan, kako bi poređenjem sa tržišnim potrebama, formirali vrednosti i pozicionirali preduzeće [2]. Upravljački menadžment preduzeća tako pristupa operativnom a potom strateškom upravljanju tokovima znanja odnosno počinje da kreira nove mogućnosti koje uvećavaju kapital, što je veoma kompleksan i vrlo odgovoran zadatak. Takvom stavu prema znanju u preduzeća bi trebao da se priklone svi zaposleni. Potrebno je da se uspostave kontinualne razmene znanja u okviru samoga preduzeća kao i sa okruženjem. Preduzeća sa takvim pristupom prema sopstvenim resursima su konstruktivnija jer stvaraju kulture znanja zasnovane na ideji da je znanje moć. Na slici 1. prikazano je okruženje sa naznačenom baznom osnovom pogodnom za bilo koju aktivnost preduzeća, bilo da je u pitanju novi ili inovirani posao/usluga.



*Slika 1. Prikaz posmatranog okruženja za poslovni plan -proizvod/usluga*

Kada se želi produžiti proizvodnja postojećeg proizvoda/usluge, projektovati novi ili inovirati već postojeći proizvod/usluga, prevashodno je ispitivanje zahteva tržišta i korisnika [3]. Najkompleksnija su istraživanja tržišta kada se radi o oceni moguće potražnje za novim proizvodom, jer su tu najveće nepoznanice a i rizik. Pitanja koja postavljamo tržištu su brojna, raznovrsna koja se uglavnom svode i upućuju na potrebe korisnika. Da bi se tržište istraživalo i posmatralo moramo da ga segmentiramo i kao takvog analiziramo po segmentima u zavisnosti od potreba preduzeća. Na slici 2. data je blok šema privrednog segment sa pet faktora koji ga karakterišu.

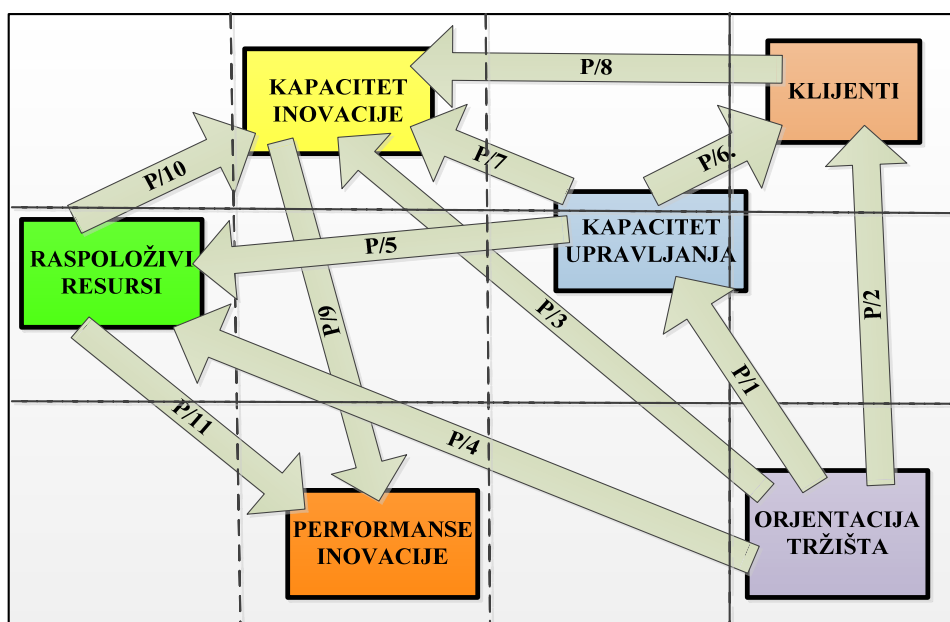


*Slika 1. Segmentacija tržišta sa pripadajućim parametrima koji utiču na poslovanje preduzeća*

Za svaki privredni segment, kao što se vidi na priloženoj slici 2. sačinjavaju sledeći faktori: novi učesnici na tržištu, supstituti, korisnik, dobavljač i rivalitet među preduzećima. Navedeni faktor prikazani su i naznačeni sa pripadajućim parametri, koji svojim promenama menjaju i definišu odgovarajući faktor [4]. Analizom segmentiranog tržišta pratimo rast tržišta koji je značajan parametar za plasman proizvoda/usluge kao i za planirani obim proizvodnje. Na brzo rastućem tržištu, šanse za prodaju proizvoda/usluge su mnogo veće, nego na sporo rastućem tržištu.

### 3. ANALIZA PROCESA

Zahtevi savremenog inovativnog poslovanja usmereni su ka stalnom poboljšanju kapaciteta ljudskih resursa, sticanju novih znanja zaposlenih i menadžmenta kako bi se stvorila i realizovala vrednost preduzeća. Pretvaranje znanja u suštinski resurs, menadžment ljudskih resursa delegira nove zadatke, izazove, zahteve i odgovornosti za očuvanje tržišne konkurentnosti i ostvarivanje pozitivnog poslovnog rezultata. Pristup i sagledavanje stanja, načini analiziranja i donošenja odluka koji su u ovom radu navedeni, samo su smernice koje će omogućiti preduzećima da upravljaju svojim bilansima stanja [5]. Oni ukazuju na načine usmeravanja za pojedine vrste upravljačkih procesa koji su potrebni ukoliko firma hoće da osigura zdravu budućnost i stekne konkurentsku prednost [6]. Jedan od mogućih načina je dat na slici 3. gde je prikazana blok šema sa pripadajućim činiocima i procesima koji povezuju iste.



*Slika 1. Blok šema dolaznih i odlaznih procesa*

Prikazani činioci su raspoloživi resursi: kapacit inovacije, performanse inovacije, kapacitet upravljanja, klijenti i orijentacija tržišta povezni su procesima sa sledećim karakteristikama:

- **Proces/1** predstavlja smernice za tržište i pozitivno utiče na upravljačke sposobnosti, ljudske resurse, povećava orijentaciju tržišta. Dovodi do izgradnje kapaciteta veze sa kupcima, lansira nove proizvode/usluge kao i tržište inovacija
- **Proces/2** predstavlja nivo smernica koje stvaraju mogućnosti povezivanja sa klijentima
- **Proces/3** je skup smernica za tržište kapaciteta inovacija kao i direktan uticaj na nivo posvećenosti i zadovoljstvo među zaposlenima odnosno raspoloživi resursi
- **Proces/4** su smernice koje otvaraju tržištu mogućnost pozitivnog uticaja na raspoložive ljudske resurse, upravljanje ljudskim resursima, marketing, povezivanje sa klijentima, integracija preko funkcija i timski rad
- **Proces/5** je nivo menadžerske sposobnosti preduzeća sa participacijom kapitala ljudskih resursa
- **Proces/6** su menadžerske sposobnosti upravljanja da se preduzeće poveže sa klijentima
- **Proces/7** predstavljaju menadžerske sposobnosti upravljanja tako da preduzeće ima uticaj na tržište kapaciteta inovacija. Bitno je zadovoljstvo i lojalnost kupca. Mogućnost povezivanja kupca kao uticaj na razvoj veština i pokretanja novih proizvoda/usluga
- **Proces/8** su suštinske smernice ka sposobnosti povezivanja sa klijentima i usmeravanje na tržište

inovativnosti. To za posledicu ima razvoj novih ili inoviranih proizvoda/uslug. Kroz uspeh novih proizvoda dovodi do efikasnijeg nivoa zadovoljstva korisnika, bolji obim prodaje, udeo na tržištu i uvećan finansijski dobitak

- **Proce/9** daje pregled efekta i direktnog uticaja performansi inovacija na tržište inovacija. Za implementaciju najboljeg i najkreativnijeg proizvoda /usluge odgovorne su osobe koje moraju biti motivisane kao fizički tako i mentalno, kako bi sprovele marketing strategiju. To je direktna interakcija tržišta i klijenta. Tako zaposleni stvaraju vrednost za korisnika odnosno klijenta
- **Proces/10** su sredstva raspoloživih resursa koji imaju direktan uticaj na kapacitet inovacija
- **Proces/11** su sredstva raspoloživih resursa imaju direktan uticaj na performance inovacija

Svaki proces ima svoje varijable koje u ovom radu nisu navedene. Varijable se usvajaju, definišu i menjaju shodno zahtevima predućea. U tabeli 1. prikazani su dolazni i odlazni procesi za svaki činioc. Tako možemo da sagledamo gde je mogući veći odnosno manji uticaj promenljivih varijabli određenih procesa. Takođe se može slikovito sagledati, koji je od činioca promenljiv i u kojoj meri. Da li ta promena utiče na druge činioce?

**Tabela 1. Prikaz ulaznih i izlazni procesa za svaki činioc**

	raspoloživi resursi	kapacitet inovacije	performanse inovacije	kapacitet upravljanja	orijentacija tržišta	klijenti
raspoloživi resursi		P/1	P/11	P/5	P/4	
kapacitet inovacije	P/10		P/9	P/7	P/3	P/8
performanse inovacije	P/11	P/9				
kapacitet upravljanja	P/5	P/7			P/1	P/6
orijentacija tržišta	P/4	P/3		P/1		P/2
klijenti		P/8		P/6	P/2	

odlazni procesi
  dolazni procesi

Tabela 2. prikazuje međusobnu zavisnost svih procesa za posmatrani činioc, gde sa promenom uticaja pripadajućih procesa menja direktno sam uticaj, za konkretan primer, raspoloživih resursa. To istovremeno ima i indirektni uticaj na ostale činioce koji figuriraju

**Tabela 2. Indirektni i direktni uticaji između procesa za posmatrani činioc raspoloživi resursi**

proces	P/1	P/2	P/3	P/4	P/5	P/6	P/7	P/8	P/9	P/10	P/11
P/1											
P/2											
P/3											
P/4	•	•	•								
P/5											
P/6											
P/7											
P/8											
P/9											
P/10			•				•	•			
P/11									•		

Za primer koji je dat i prikazan u tabeli 2. za posmatrani činioc, raspoloživi resursi, ima dva dolazna procesa P/3 i P/4/ i dva odlazna procesa P/10 i P/11. Kako su za **raspoloživi resurs** vezani činioci **kapacitet inovacije** i **performance inovacija**, očigledno je da nastaje direktan uticaj promene procesa.

- Na dolazni proces **P/4** direktan uticaj imaju procesi **P/1; P/2 i P/3.**
- Na odlazni proces **P/10** direktan uticaj imaju procesi **P/3; P/7 i P/8.**
- Na odlazni proces **P/11** direktan uticaj imaju proces **P/9.**

Dolazni procesi formiraju odlazne procese odnosno svaka promena dolaznog procesa stvara novu situaciju i novo stanje na odlazne procese. Što ima za posledicu pomenu uloge pripadajućih činioca. Svi ostali procesi takođe utiču indirektno.

Upotrebom odgovarajućeg softvera može se odrediti matematički model uticaja procesa na proces i činioce promenom varijabli. Rezultati uključuju razmatranje između dve varijable ili više varijabli u okviru istog ili drugog procesa prema istraživanju [7]. U slučaju pozitivne ili zadovoljavajuće evaluacije mera podešavanja naglašava intuitivnu validnost modela prema (Garver i Mentzer, 1999). Koristeći strukturne jednačine modeliranja po navodima (Hoile, 1995) koje se obično koriste u istraživačkim odnosima na osnovu preseka istraživanja i konstruktivnog odnosno početnog stanja. To omogućava testiranje odnosa posmatranih i latentnih varijabli po tvrdnjama (Hoile, 1995). Ovaj postupak se zasniva na pretpostavci da postoji snažna korelacija između informacija od ključnih informacija kod ispitanika i više ispitanika, pokazala su istraživanja (Homburg, Vorkman, 1999). Ovako izveden model je pogodan za procentualnu procenu varijabli sa osvrtom na veličinu uzorka i kompleksnost modela. Koficijenti za podešavanje modela prilagođavaju se prema isptivanjima.

#### 4. ZAKLJUČAK

Fleksibilna blok šema modela doprinosi kreiranju pozicije konkurentske prednosti svakog preduzeća. U savremenom poslovanju procesi u preduzeću, težište aktivnosti pomeraju na skup varijabli koji oblikuju proizvode/usluge. Usmerenja procesa se odnose na određivanje i realizaciju postavljenih ciljeva preduzeća u oblastima istraživanja i razvoja, uvođenjem inovacija i kontinualna poboljšanja performansi inovacija. Cilj je zadovoljstvo korisnika kao i identifikovanje neidentifikovanih potreba i želja potrošača.

Ovaj rad ukazuje na teoretske predloge i pravce uticaja raspoloživih resursa sa akcentom na performanse inovacija u stvaranju konkurentske prednosti preduzeća. Istovremeno ostavlja prostor za neprekidno analiziranje glavne dimenzije kapaciteta inovacija. Sve to sa posebnim osvrtom preduzeća u upravljanju internim resursima sa aspekta orijentacije ka tržištu, u cilju unapređenja trenutnog i trajnog položaja preduzeća u konkurentskom okruženju.

#### 5. LITERATURA

- [1] Baker, W. E.; Sinkula, J. M., *Market orientation and the new product paradox*, The Journal of Product Innovation Management, 22(6), 483-502, 2005.
- [2] Bracanović, Z., *The research of the possibilities of the application of the enterprise principles in the research and development organizations*, Proceedings - IAT, 477-485, Rogla, Slovenia, May, 2007.
- [3] Hooley, G.; Greenley, G.; Fahy, J.; Cadogan, J., *Market-focused resources, competitive positioning and firm performance*, Journal of Marketing Management, 17(5/6), 503-520, 2001.
- [4] Hooley, G., Fahy, J., Greenley, G., Beracs, J., Fonfara, K., *Market orientation in the service sector of the transition economies of central Europe*. *European Journal of Marketing*, 37(2), 86-116, 2003.
- [5] Whelan, E.; Carcary, M., *Integrating talent and knowledge management: where are the benefits*, Journal of Knowledge Management, 15(4), 675-687, 2011.
- [6] Radović D., Radović B., Bracanović, Z., (2010), *Uticaj strategije preduzeća na konkurentsku prednost*, 3. Internacionalna Konferencija Menadžmenta - FIM, 232-237, Kruševac, mart 2010.
- [7] Hair, J. F., Jr.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C., *Multivariate Data Analysis*. 5. Ed. New Jersey: Prentice Hall. ,1998.

**Bracanović, Z., Petrović, V., Grozdanić, B., Borak, Đ.**

#### ***INFLUENCES INCOMING AND OUTGOING PROCESSES ON THE DEVELOPMENT OF COMPETITIVE ADVANTAGES OF COMPANIES***

**Abstract:** To direct competitive advantage for growth and sustainable development is necessary to determine important parameters for the current situation. *By defining the position of the company in the market can be directed to form the observed processes. At the same time allows for the creation of a specific share of the impact of the process on the other process. How processes associated resources, innovation, market, clients and define company competitive advantage. This paper will attempt to give improved competitive advantage with the change percentage share of outgoing and incoming process. Interconnections between processes to stable competitive advantage can be adjusted.*

**Key words:** *incoming and outgoing processes, participation, correction.*



**40. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

40<sup>th</sup> JUPITER CONFERENCE  
with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**



**20. simpozijum**

**MENADŽMENT KVALITETOM**

Beograd, maj 2016.

**MENADŽMENT KVALITETOM**  
**QUALITY**

**Stojadinović, S., Majstorović, V., Durakbasa M., .**  
МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ ЗА ИНСПЕКЦИЈУ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА  
МЕРНОЈ МАШИНИ ..... 5.1





Стојадиновић, М. С.<sup>1)</sup>, Мајсторовић, Д. В.<sup>1)</sup>, Durakbasa, М. Numan<sup>2)</sup>

## МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ ЗА ИНСПЕКЦИЈУ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ

### Резиме

У раду је представљен један нов модел планирања путање мерног сензора нумерички управљане мерне машине (НУММ). Модел се састоји из математичког модела, моделирања примитива за инспекцију, дистрибуције мерних тачака, анализа приступачности мерног сензора и принципа избегавања колизије. Геометријске информације потребне за планирање путање преузете су из интерних датотека 3D CAD модела призматичног дела (IGES и STL), док се улазни подаци о толеранција уносе на основу већ креиране онтолошке базе знања. Представљени модел је нов приступ орјентисан дефинисању интелигентног концепта инспекције. Његова предност се огледа у смањењу укупног времена мерења кроз смањење времена потребног за припрему (планирање) мерења услед аутоматског генерисања путање мерног сензора и њене оптимизације.

**Кључне речи:** мерна стратегија, призматични делови, НУММ, планирање путање

### 1. УВОД

Инспекција на мерној машини је базирана на комплексној софтверској подршци за различите класе метролошких задатака (толеранција). Спровођење униформног плана инспекције на њима представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију.

У последње три деценије планирање инспекције на *NUMM* се развијало кроз следеће прилазе: мануелни план, потом план генерисан *CAI* софтвером који се задржао до данас, затим план заснован на експертним системима и интелигентни концепт планирања инспекције. Заједнички елемент који је остао исти кроз све ове етапе развоја је објекат додир или објекат мерења. Према третирању објекта мерења разликују се три приступа: толеранцијски, геометријски и комбиновани.

Као што је познато, процес инспекције се састоји из неколико кључних елемената као што су планирање путање, избегавање колизије, анализа постављања дела, анализа приступачности, као и конфигурисање мерних пипака. Ниво развоја и имплементације до сада развијених метода генерисања плана инспекције дефинише заступљеност ових елемената у њему. Комплетан систем за планирање инспекције садржи све наведене елементе. У раду [1] заступљени су елементи као што су постављање дела и конфигурисање мерних пипака. У [2-6] дати су приступи за планирање путање. У [7] се разматрају решења за избегавање колизије, а у [8] анализа приступачности мерног сензора. Планирање инспекције се може разматрати и кроз поделу на локални и глобални план инспекције [9]. Пример екстракције геометријских информација из *CAD* модела и формирање улазних података дат је у [10].

У овом раду путања мерног сензора се упрошћава и посматра као скуп тачака који се састоји из три подскупа. Први подскуп су мерне тачке и оне се могу добити на основу геометријских информација о примитивима односно параметрима примитива. Други скуп су чворне тачке кроз које сензор прође при инспекцији једног геометријског примитива без колизије, а добијају се на основу координата

<sup>1)</sup> Др Славенко М. Стојадиновић, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-438 ([sstojadinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:sstojadinovic@mas.bg.ac.rs))

Проф. др Видосав Д. Мајсторовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-407 ([vmajstorovic@mas.bg.ac.rs](mailto:vmajstorovic@mas.bg.ac.rs))

<sup>2)</sup> Prof. Dr. Numan M. Durakbasa, Full professor, Vienna University of Technology, Institute for Production Engineering and Laser Technology ([durakbasa@ift.tuwien.ac.at](mailto:durakbasa@ift.tuwien.ac.at))

мерних тачака и анализе приступачности мерног сензора. Трећи скуп тачака омогућава путању без колизије при преласку сензора са једног на други примитив.

У овом раду је представљен нов модел планирања путање за инспекцију призматичних делова на мерној машини. Главна идеја представљеног модела је генерисање путање мерног пипка на основу CAD модела призматичног дела и његових (задатих) толеранција. Експериментални пример је обухватио расподелу десет мерних тачака, међутим метод дистрибуције дозвољава унос било ког броја мерних тачака, што зависи од типа и квалитета прописане (захтеване) толеранције. На основу дефинисане повезаности толеранција и геометрије као предходно објашњених процедура развијених метода и принципа, планирање путање мерног сензора као излаз даје *point-to-point* мерну путању за дати призматични део.

## 2. МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ПУТАЊЕ

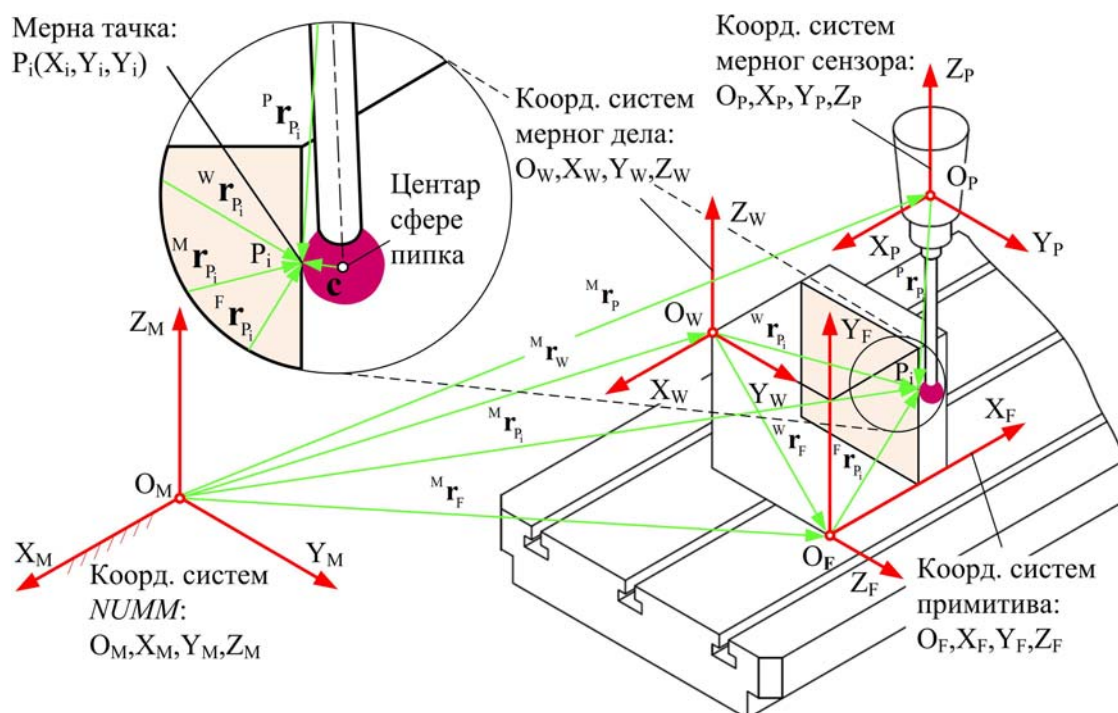
Модел планирања путање за инспекцију PD на NUMM се састоји из математичког модела, моделирања примитива за инспекцију, дистрибуцију мерних тачака, анализа приступачности мерног сензора и принципа избегавања колизије.

### 2.1. Математички модел

Математички модел планирања путање за инспекцију PD на NUMM је показан на слици 1. Његова основна улога је у дефинисању веза између координатних система мерне машине, мерног дела и примитива дела. Модел је базиран на једначини (1) којом се израчунава вектор положаја мерне тачке у координатном систему мерне машине:

$${}^M r_P = {}^M r_W + {}^W r_P + {}^F r_P = {}^M r_F + {}^F r_P \quad (1)$$

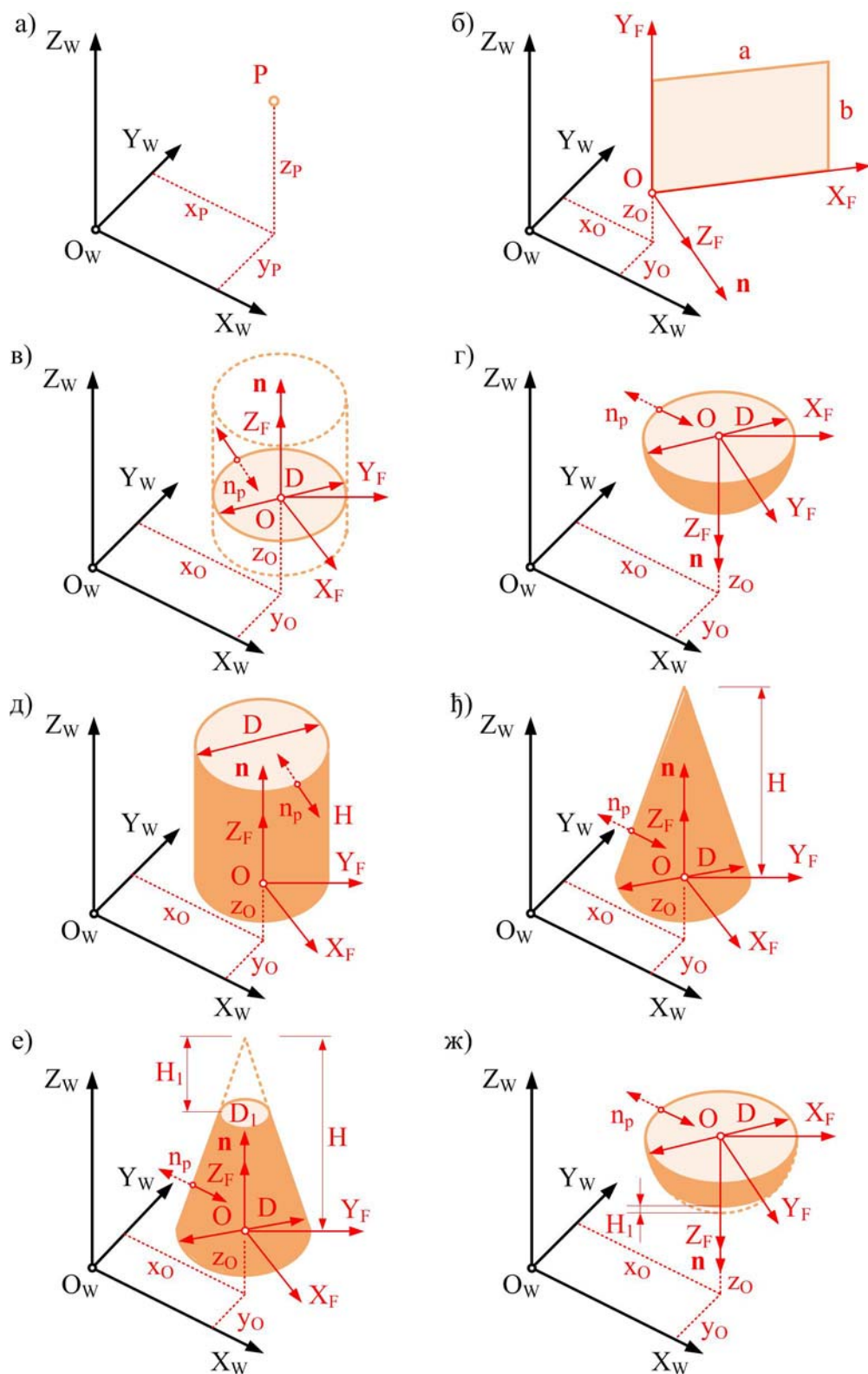
где је:  ${}^M r_F$  - вектор положаја примитива у KS мерне машине,  ${}^F r_P$  - вектор положаја мерне тачке у KS примитива.



Слика 1. Математички модел планирања инспекције PD на NUMM [12]

### 2.2. Моделирања примитива за инспекцију

Моделирање примитива за инспекцију је базирано на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима који их једнозначно одређују. Геометријски примитиви обухваћени овим моделирањем су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера (слика 2).



Слика 2. Базни геометријски примитиви и њихови параметри [12]: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; њ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера

### 2.3. Дистрибуција мерних тачака

Модел дистрибуције мерних тачака је базиран на *Hammersly* - овој секвенци [11], за израчунавање координата дуж две осе примитива. Модификовањем *Hammersly* – ове секвенце изведена је дистрибуција мерних тачака за основне геометријске примитиве као што су раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера. Том приликом се користи Декартов *KS*

$O_F, X_F, Y_F, Z_F$  и поларно-цилиндарски  $KS O'_F, X'_F, Y'_F, Z'_F$ . Координате у Декартовом  $KS$  су обележене са  $P_i(s_i, t_i, w_i)$ .

Обрасци за израчунавање координата мерних тачака за примитив полусфера су:

$$s_i = \sqrt{R^2 - \left( \left( \sum_{j=0}^{k-1} \left( \left[ \frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \cos \left( \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (2)$$

$$t_i = \sqrt{R^2 - \left( \left( \sum_{j=0}^{k-1} \left( \left[ \frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \sin \left( \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (3)$$

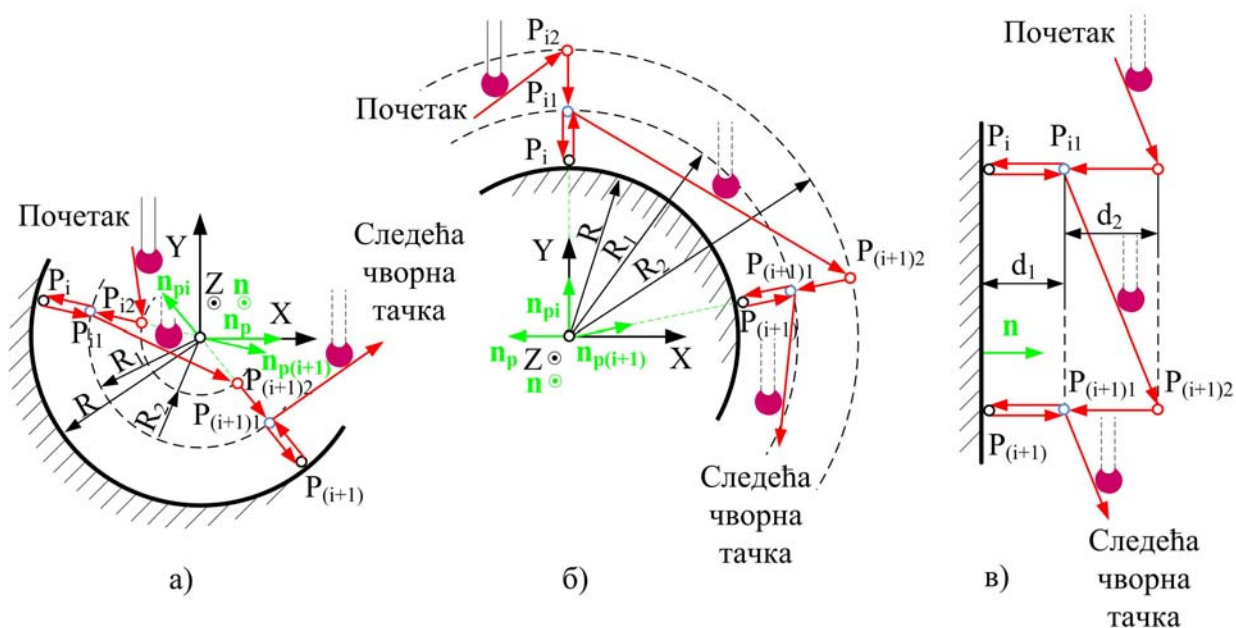
$$w_i = \left( \sum_{j=0}^{k-1} \left( \left[ \frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \quad (4)$$

где је:  $R$  [mm] - полупречник полусфере,  $N$  - број мерних тачака,  $k = \log_2 N$  - константа,  $\text{Mod} 2$  - математички оператор који представља остатак дељења са два.

#### 2.4. Анализа приступачности мерног сензора

Да би се извршила инспекција једног примитива неопходно је спровести анализу приступачности мерног сензора односно одредити два нова скупа тачака. Први скуп тачака  $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$  представља тачке у којима се прелази из брзог у спори ход  $NUMM$ . Растојање које пипак пређе између  $i$ -те тачке,  $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$  и  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  је представљено са  $d_1$  - пут спорог хода, а растојање између  $i$ -те тачке  $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$  и  $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$  је  $d_2$  - пут брзог хода. Овим приступом дефинисања скупова тачака и ходова избегава се колизија између примитива и мерног пипка.

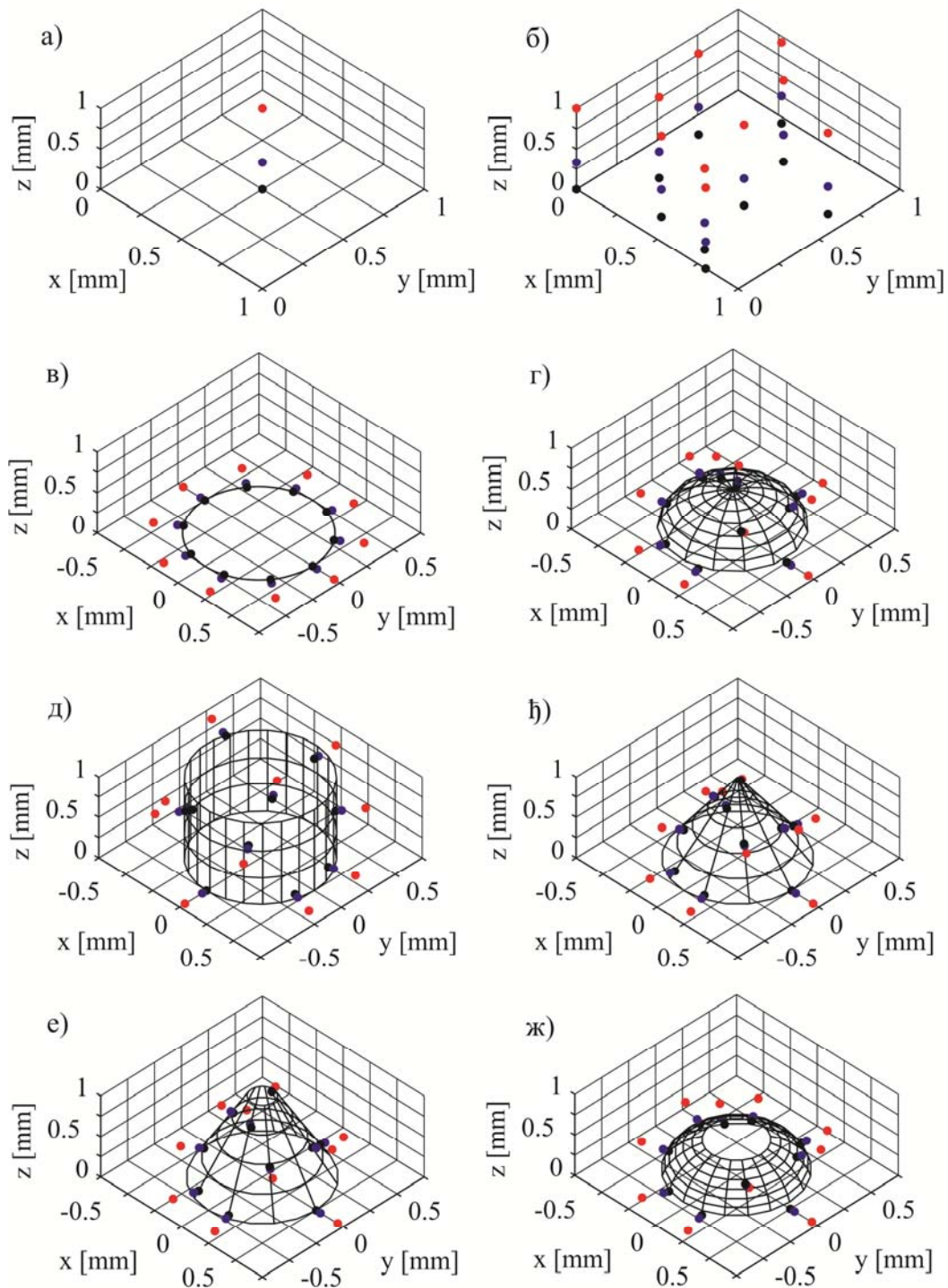
Код инспекције  $PD$  уочавају се три карактеристична случаја за дефинисање скупова тачака  $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$  и  $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ . Они су показани на слици 3.



Слика 3. Принцип генерисања тачака  $P_{i1}$  и  $P_{i2}$  на основу тачака  $P_i$  [12]: а) конкавна цилиндрична површина; б) конвексна цилиндрична површина; в) равна површина

Координате мерних тачака  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  обележене су црном бојом док су тачке  $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ ,  $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ , добијене на основу анализе приступачности сензора, обележене су плавом и црвеном бојом респективно и показане су на слици 4. Дистрибуција је изведена за број мерних тачака  $N=10$  за основне геометријске примитиве као што су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа, зарубљена полусфера.



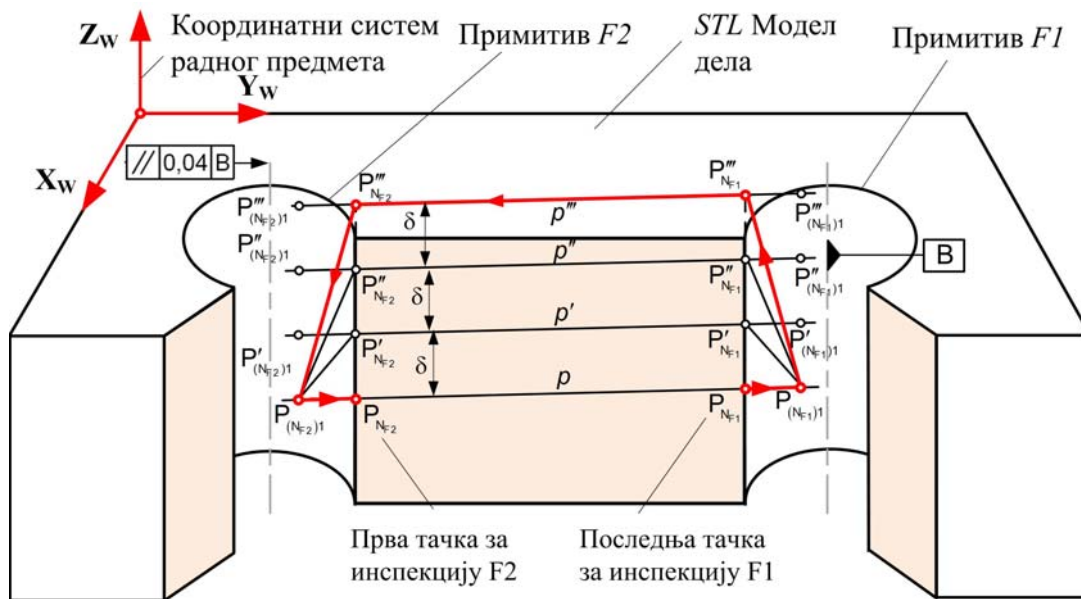


Слика 4. Дистрибуција тачака  $P_{i1}$  и  $P_{i2}$  на основу мерних тачака  $P_i$  за основне геометријске примитиве [12]

## 2.5. Избегавање колизије

На основу *STL* модела представљања геометрије *PD*, толеранција *PD*, координата последње тачке  $P_{(N_{F1})}$  за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке  $P_{(N_{F2})}$  за инспекцију наредног примитива, на слици 5 представљен је принцип избегавања колизије. Учитавањем координата темена првог троугла  $T_1, T_2, T_3$  формира се једначина равни кроз те три тачке. Истовремено се формира

једначина праве  $p$  кроз учитане тачке  $P_{(NF_1)l}$  и  $P_{(NF_2)l}$ . Потом се проверава да ли постоји пресечна тачка  $P_j$  између формиране равни и праве и да ли она припада дужи  $\overline{P_{(NF_1)l}P_{(NF_2)l}}$ .



Слика 5. Принцип избегавања колизије

Уколико не постоји  $P_j$  или постоји али не припада дужи  $\overline{P_{(NF_1)l}P_{(NF_2)l}}$  учитавају се темена следећег троугла. Ако постоји  $P_j$  и припада дужи проверава се да ли је пресечна тачка у делу површине равни која је ограничена троуглом. Даље се проверавају услови:  $\alpha \leq \alpha_1$  и  $\beta \leq \beta_1$  и  $\gamma \leq \gamma_1$ . Ако нису испуњена сва три наведена услова тачка не припада делу равни ограниченом троуглом. Тада се учитава нови троугао. Ако је испуњен услов то значи да се тачка налази у површини ограниченој троуглом ( $P_j \in \Delta T_1 T_2 T_3$ ) и да је потребно извршити корекцију  $z$  – координата учитаних тачака по обрасцима:  $z'_{P_{(NF_1)l}} = z_{P_{(NF_1)l}} + \delta$ ,  $z'_{P_{(NF_2)l}} = z_{P_{(NF_2)l}} + \delta$ , како не би дошло до колизије између  $PD$  и мерног сензора. После описане корекције формирати тачке  $P'_{(NF_1)l}(x_{P_{(NF_1)l}}, y_{P_{(NF_1)l}}, z'_{P_{(NF_1)l}})$  и  $P'_{(NF_2)l}(x_{P_{(NF_2)l}}, y_{P_{(NF_2)l}}, z'_{P_{(NF_2)l}})$  као и праву  $p'$  која их садржи. Проверити да ли постоји нова пресечна тачка  $P_j$  између  $p'$  и учитане равни. Ако постоји поновити предходно описани поступак провере да ли се налази на дужи и површини ограниченој троуглом. Ако не постоји кориговане тачке  $P'_{(NF_1)l}$  и  $P'_{(NF_2)l}$  усвојити као тачке у којима неће доћи до колизије при преласку са једног на други примитив при инспекцији једног облика толеранције.

За пример показан на слици 5, алгоритам три пута коригује  $z$  – координату и усваја тачке  $P''_{(NF_1)l}$  и  $P''_{(NF_2)l}$ .

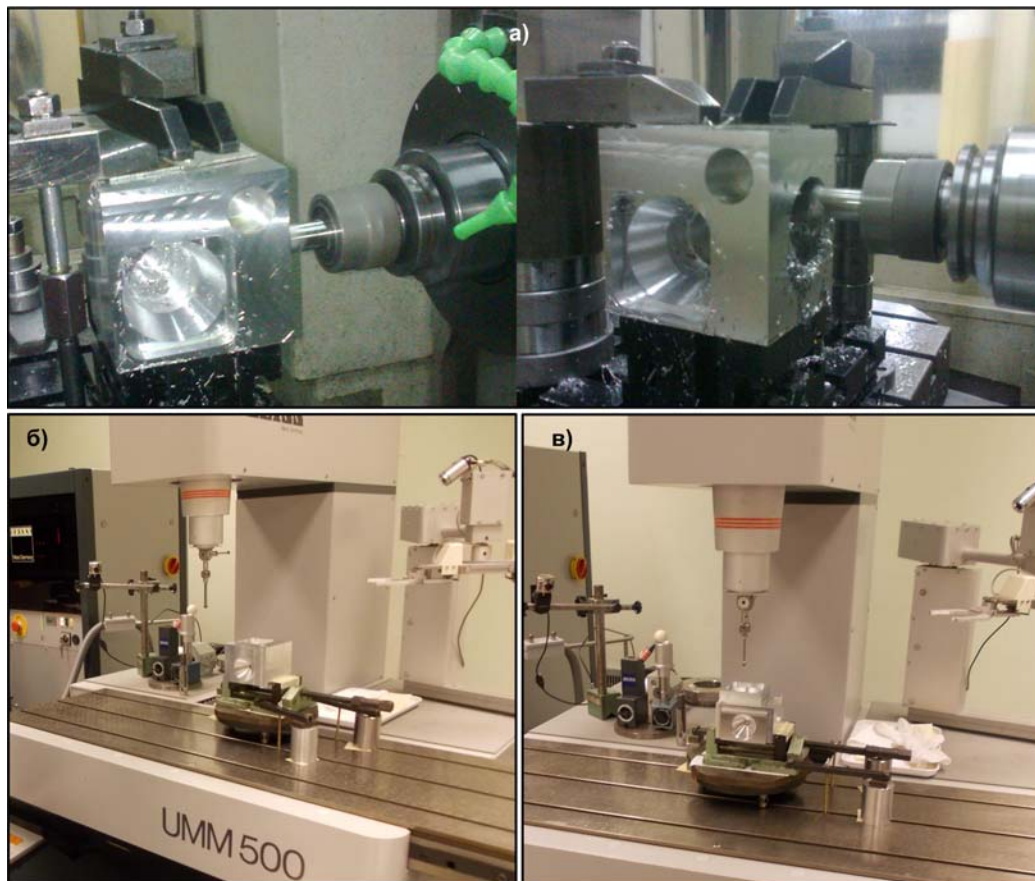
### 3. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експеримент обухвата мерење два  $PD$  наменски произведена за ове потребе. Тестирање напред наведеног модела је најпре извршено на првом, геометријски и метролошки простијем делу датом на слици 6 (под а)). Овај део се састоји из свих геометријских примитива обухваћених моделом.

Након успешно спроведеног експеримента над првим  $PD$  извршено је тестирање модела над другим  $PD$ . У односу на први, други део проширен је новим облицима толеранција, који су тестирани. Експеримент је извршен на мерној машини ZEISS UMM 500 (слика 6 под б) и в)).

Резултати аутоматске инспекције два тест  $PD$  показују да су све толеранције дела у цртежом прописаним границама. Ово потврђује да је изложени модел један успешан приступ дефинисању интелигентног концепта планирања инспекције  $PD$ . Комплексна геометрија  $PD$  се мења скупом тачака чији редослед дефише путању сензора машине без колизије. Представљање путање мерног

сензора скупом тачака са дефинисаним редоследом оставља могућност њене оптимизације тј. смањења времена процеса мерења.



Слика 6. Експериментална инсталација за мерење два призматична мерна предмета а) обрада првог PD, б) инспекција првог PD, в) инспекција другог PD

У табели 1 дати су резултати мерења за оба PD. Као што се то може видети у табели мерење је поновљено пет пута и израчуната је стандардна девијација (одступање).

Табела 1 Тестирани облици толеранција и резултати мерења радних предмета

Део	РБ	Толеранција			Резултати мерења					
		Назив	Ознака	Вред. у mm	1.	2.	3.	4.	5.	Одступање у $\mu\text{m}$
#1	1	Равност	$\square 0,02$	0,02	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0004	0,1
	2	Пречник	50	$\pm 0,1$	50,0851	50,0855	50,0852	50,0856	50,0855	0,2
	3	Управност	$\perp 0,03A$	0,03	0,0014	0,0024	0,0023	0,0022	0,0023	0,4
	4	Угао	Cone: 39°	$\pm 0,5$	39,2991	39,2991	39,2995	39,2982	39,2991	0,5
	5	Паралелност	$\parallel 0,04B$	0,04	0,035	0,0346	0,035	0,0348	0,035	0,2
#2	6	Растојање	70	$\pm 0,02$	70,0111	70,0111	70,0112	70,0111	70,0106	0,2
	7	Цилиндричност	$\text{cyl} 0,02$	0,02	0,0042	0,0043	0,0041	0,004	0,0041	0,1
	8	Коаксијалност	$\text{coax} 0,02D$	0,02	0,0068	0,008	0,008	0,0091	0,0092	1
	9	Кружност	$\text{circ} 0,03$	0,03	0,0094	0,0092	0,0092	0,0101	0,0096	0,4
	10	Позиција	$\text{pos} 0,75CB$	0,75	0,6471	0,6483	0,6416	0,6481	0,6424	3,2

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Спроведена истраживања у овом раду дају основ за даљи развој аутоматског планирања инспекције PD. То се посебно огледа у смањењу времена припреме мерења на основу аутоматског генерисања протокола мерења и остављеној могућности за оптимизацију путање мерног пипка тј. смањења времена мерења, као и аутоматском конфигурисању мерних пипака на основу анализе приступачности геометријским примитивима.

Резултати експеримента показују да је развијени модел један успешан приступ аутоматској инспекцији и добар основ за примену алата *AI* и развој интелигентног концепта планирања инспекције *PD* на *NUMM*.

Спроведена истраживања представљају један одговор на индустријске захтеве као што су висока геометријска варијантност, нешто бржи пласман производа на тржиште у циљу смањења укупног времена производње кроз смањења времена потребног за инспекцију, одржавање сталног-захтеваног нивоа квалитета инспекције кроз аутоматизацију активности које обавља планер инспекције.

Ограничење развијеног приступа је примена само за призматичне делове, не и на делове са слободним површинама за инспекцију, јер је модел планирања инспекције и модел оптимизације развијен само за основне геометријске примитиве.

Примена и корист од модела је јако изражена у случају инспекције геометријски комплексних *PD* делова са великим бројем толеранција у појединачној производњи.

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hwang Y. C., Tsai Y. C., Chang A. C.: *Efficient inspection planning for coordinate measuring machines*, Int J Adv Manuf Technol, 23:732-742, 2004.
- [2] Gu P., Chan K.: *Generative Inspection Process and Probe Path Planning for Coordinate Measuring Machines*, Journal of Manufacturing Systems, 15/4:240-255, 1996.
- [3] Prieto, F., Redarce, T., Lepage, R., Boulanger, P.: *An Automated Inspection System*, Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London, 19:917-925, 2002.
- [4] Lin Y. J., Murugappan P.: *A new algorithm for determining a collision-free path for a CMM probe*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Elsevier Science Ltd., 39:1397-1408, 1999.
- [5] Stojadinovic, S., Majstorovic, V., Durakbasa, N.: *A feature – based path planning for inspection prismatic parts on CMM*, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Proceedings, ISBN 978-80-01-05793-3, pp. 1551-1556, Prague, Czech Republic, August 30th - September 4th, 2015, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement.
- [6] Flack, D.: *CMM measurement strategies*, ISSN 1368-6550, National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, TW11 0LW, 2001.
- [7] Lin, C.-Z., Chen, C.-C.: *Collision-free path planning for coordinate measurement machine probe*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 39/9:1969-1992, 2001.
- [8] Lim, P.C., Menq, H. C.: *CMM feature accessibility path generation*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 32/3:597-618, 1994.
- [9] Zhao F., Xu X., Xie Q. S.: *Computer – Aided Inspection Planning – The state of the art*, Computer in Industry, 60/7:453-466, 2009.
- [10] Majstorovic, D. V., Stojadinovic, M. S.: *Research and Development of Knowledge Base for Inspection Planning Prismatic Parts on CMM*, 11<sup>th</sup> International Symposium on Measurement and Quality Control, Cracow-Kielce, Poland, September 11-13, 2013.
- [11] Lee G., Mou J., Shen Y.: *Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine*, Int. J. Mach. Tools Manufact., Great Britain, 37/7:917-934, 1997.
- [12] Стојадиновић, М. С., *Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини*, Докторска дисертација, Машински факултет у Београду, 2016.

Stojadinovic, M. S., Majstorovic, D. V., Durakbasa, M. Numan

### A MODEL OF PATH PLANNING FOR INSPECTION PRISMATIC PARTS ON CMM

**Abstract:** This paper presents a new model for probe path planning for CMM. The model consists from mathematical model, modeling primitives for inspection, distribution of measuring points, analysis of the probe accessibility and collision-free generation between probe and prismatic part. Needed geometrical information for path planning are taken from internal file of 3D CAD model of the prismatic part (IGES and STL), while input data about tolerance entries on the base already created knowledge base. The presented model is a new approach oriented towards definition of the intelligent concept inspection. Advantage of the model is in reduction the total measurement time by reducing the time needed for the preparation (planning) of the measurements due automated generation of probe path and its optimization.

**Key words:** measurement strategy, prismatic parts, CMM, path planning

CIP - Каталогизација у публикацији -  
Народна библиотека Србије, Београд

658.5:004.384(082)(0.034.2)  
004.896(082)(0.034.2)  
621.7/.9-52(082)(0.034.2)  
007.52:658.5(082)(0.034.2)  
005.6(082)(0.034.2)

ZBORNIK radova [Elektronski izvor] = Proceedings / [33. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala [i] 27. simpozijum CAD/CAM [i] 36. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 42. simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala [i] 20. simpozijum Menadžment kvalitetom [sve ovo u okviru]] 40. Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem = 40th Jupiter Conference with Foreign Participants, Beograd, maj 2016. ; [organizator] Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet = University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2016 (Beograd : Planeta print). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

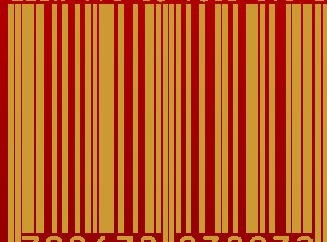
Sistemski zahtevi: PDF čitač. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tekst ćir. i lat. - Tiraž 150. - Bibliografija uz većinu radova. - Abstracts.

ISBN 978-86-7083-893-2

1. Јупитер конференција (40 ; 2016 ; Београд) 2. Симпозијум CIM у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала (33 ; 2016 ; Београд) 3. Симпозијум CAD/CAM (27 ; 2016 ; Београд) 4. Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (36 ; 2016 ; Београд) 5. Симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала (42 ; 2016 ; Београд) 6. Симпозијум Менаџмент квалитетом (20 ; 2016 ; Београд) 7. Машински факултет (Београд)  
а) CIM системи - Зборници б) CAD/CAM системи - Зборници с) Машине алатке - Нумеричко управљање - Зборници д) Роботи - Зборници е) Флексибилни технолошки системи - Зборници ф) Металоперађивачка индустрија - Управљање - Зборници г) Управљање квалитетом - Зборници

COBISS.SR-ID 223381516

ISBN 978-86-7083-893-2



9 788670 838932 >