

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA

PROCEEDINGS



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, oktobar 2014.

39. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



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

26. simpozijum
CAD/CAM

35. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

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

19. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Beograd, oktobar 2014. godine

39. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK 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

Odobreno za štampu odlukom Dekana

br. 281/14 od 02.10.2014

Tehnički urednici:

Prof. dr Bojan Babić

Doc. dr Saša Živanović

Beograd, oktobar 2014.

Tiraž: 150 primeraka

Štampa: **Planeta print**,

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

ISBN 978-86-7083-838-3

39. 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 • mr Goran Vujačić, VŽŠ Beograd • Prof. dr Ratko Gatalo, FTN Novi Sad • Prof. dr Miloš Glavonjić, MF Beograd • Prof. dr Milan Zeljković, FTN Novi Sad • Prof. dr Milisav Kalajdžić, MF Beograd • dr Vladimir Kvirgić, LOLA Institut Beograd • Prof. dr Pavel Kovač, FTN Novi Sad • Prof. dr Miodrag Lazić, MF Kragujevac • Prof. dr Ljubomir Lukić, MF Kraljevo • 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 Zoran Radojević, FON Beograd • Prof. dr Saša Randelović, MF Niš • Prof. dr Žarko Spasić, MF Beograd • Prof. dr Ljubodrag Tanović, MF Beograd • Prof. dr Slobodan Tabaković, FTN Novi Sad • Prof. dr Velimir Todić, FTN Novi Sad • Prof. dr Miroslav Trajanović, 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 Alexander Janac (Slovačka) • Prof. dr Vid Jovišević (BiH) • Prof. dr Michael I Kheifetz (Belorusija) • Prof. dr Sergey A. Klimentko (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:

Doc. dr Saša Živanović, Mašinski fakultet Beograd

Članovi:

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

ZAHVALNICA

Organizacioni odbor **39. JUPITER KONFERENCIJE** se najsrdahnije 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 XXXIX 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 izložen 41 rad 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 XXXIX JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 28. oktobar 2014.

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

Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A. TOPLOTNO-ELASTIČNO PONAŠANJE SKLOPA GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG CILINDRIČNO VALJKASTIM LEŽAJEM PRIMENOM MKE	3.15
Bojanić, M., Jovičić, G., Tabaković, S., Mladenović, C., Zeljković, M. UPOREDNI PRIKAZ STANDARDA ZA ISPITIVANJE TAČNOSTI POZICIONIRANJA NUMA.....	3.21
Bulatović, M., Đurović, D. MODEL MJERENJA IZVRSNOSTI PROCESA ODRŽAVANJA PROCJENOM PERFORMANSI	5.8
Danilov, I., Petrović, P., Lukić, N. TRIANGULACIJA STRUKTURIRANE SVETLOSTI U ROBOTSKOM ZAVARIVANJU	3.36
Drndarević, D., Đuričić, M., Milivojević, M. MODELOVANJE PROCESA SINTEROVANJA.....	2.1
Đurđević, A., Sedmak, A., Živković, A., Radisavljević, I. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM ZA DOBIJANJE T-SPOJEVA OD LEURE ALUMINIJUMA.....	3.44
Ivanov, T., Spasić, D., Komarov, D., Simonović, A. NUMERIČKA ANALIZA UDARA PROJEKTILA U RAVNU ALUMINIJUMSKU PLOČU	2.7
Janjić, M., Đurašković, D. MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA KALJENIH STAKLENIH PLOČA METODOM KONAČNIH ELEMENATA.....	2.13
Janjić, G., Mrkić Bosančić, M., Tanasić, Z., Kosec, B. PRIMJENA AHP METODE U IZGRADNJI SISTEMA ZA PRAĆENJE EFEKTIVNOSTI ORGANIZACIJE	4.1
Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N., Belović, D. INOVACIJE KAO KLJUČNI FAKTOR PRIVREDNOG RASTA I RAZVOJA SRBIJE	4.7
Jovanović, D., Nedić, B. SCRATCH TEST PREVLAKA HROMA	3.50
Jovišević, V., Borojević, S., Marković, B. IZBOR PUTANJE KRETANJA ALATA U PROCESU MAŠINSKE OBRADE TANKOSTJENIH ALUMINIJUMSKIH STRUKTURA	3.7
Karabegović, I., Doleček, V., Mićević, D. ULOGA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESIMA ZAVARIVANJA.....	3.56
Kokotović, B., Slavković, N. VERIFIKACIJE PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA PRI OBRADI CILINDRIČNIM VRETENASTIM GLODALIMA.....	3.67
Kvrgić, V., Dimić, Z., Cvijanović, V., Mitrović, S. ALGORITAM ZA POVEĆANJE TAČNOSTI PETOOSNIH MAŠINA ALATKI	3.60
Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., Đurđev, M. STANJE I TREND RAZVOJA U OBLASTI PROJEKTOVANJA ZA IZRADU-DFM	3.75
Lukić, N., Petrović, P., Danilov, I. AKTUATOR PROMENLJIVE KRUTOSTI	3.83
Majstorović, V., Mačuzić, J., Šibalija, T., Stojadinović, S. Cyber-Physical Manufacturing –Advances toward New Industrial Paradigm	5.1
Marković, V., Jakovljević, Ž. SEGMENTACIJA JEDNE KLASSE POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA.....	4.13
Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Trifković, B. PRIMENA INTEGRISANOG SISTEMA ZA PRECIZNO I BRZO PRECIZNO LIVENJE U STOMATOLOGIJI	3.91

Milutinović, D., Dimić, Z., Živanović, S., Slavković, N. UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE 6-OSNOG ROBOTA ZA OBRADU KAO HORIZONTALNE I/ILI VERTIKALNE 5-OSNE MAŠINE ALATKE.....	3.96
Mitrović, S., Dimić, Z., Kvirgić, V. SISTEM ZA SIMULACIJU I NADZOR RADA ROBOTSKIH ČELIJA.....	3.104
Mladenović, G., Tanović, L., Pjević, M. OBRADA SLOŽENIH POVRŠINA GLODANJEM – POREĐENJE STRATEGIJA OBRADE	2.19
Mosorinski, P., Mulić, V., Rančić, M. PARAMETRI GLAVNOG OTPORA REZANJA PRI OBRADI PLASTIČNIH MASA NA STRUGU.....	3.110
Nikolić, S., Randelović, S. FEM MODEL BRIZGANJA TERMOPLASTA U NESIMETRIČNOM ALATU	2.25
Petronijević, J., Petrović, M., Babić, B., Miljković, Z. PRIMENA MULTIAGENTNIH SISTEMA I TEORIJE ROJEVA U OPTIMIZACIJI FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA	3.114
Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z. OPTIMIZACIJA FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PRIMENOM ALGORITMA BAZIRANOG NA INTELIGENCIJI ROJA I TEORIJI HAOSA	3.122
Pjević, M., Mladenović, G., Puzović, R., Tanović, L. PRIMENA CAD/CAM SISTEMA U PROJEKTOVANJU I IZRADI PROFILNIH KRUŽNIH STRUGARSKIH NOŽEVA.....	2.31
Popović, M. PARAMETARSKO MODELIRANJE UREZNIKA SA PRAVIM ŽLEBOVIMA	2.37
Posteljnik, Z., Stupar, S., Svorcan, J., Petrašinović, N. POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH ANALIZA DEFORMACIJA KOMPOZITNE LOPATICE VETROTURBINE	2.41
Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D., Radojević, I. CIM SISTEM U SKLADIŠNOM PROSTORU.....	1.1
Sovilj Nikić, I., Legutko, S., Sovilj-Nikić, S., Chwalczuk, T. KONTROLA KVALITETA PREVLAKA MODELSKIH ALATA ZA OBRADU OZUBLJENJA	3.144
Spasić, D., Ivanov, T., Komarov, D., Stupar, S. ANALIZA OTKAZA ZVEZDASTOG SEPARATORA AVIONSKOG TOPA.....	2.53
Sredanović, B., Globočki Lakić, G., Kramar, D., Kopač, J. MODELIRANJE OTPORA REZANJA PRI STRUGANJU ČELIKA C45E PRIMJENOM HPJAM TEHNIKE HLAĐENJA I PODMAZIVANJA	3.130
Stanojević, N., Vasić, M., Stanojević, D. SISTEM ZA UPRAVLJANJE ENERGIJOM, KAO MERA ENERGETSKE EFIKASNOSTI.....	5.14
Stojadinović, S., Majstorović, V., Durakbasa M., . АУТОМАТСКО ПЛАНИРАЊЕ ПУТАЊЕ МЕРНОГ СЕНЗОРА ПРИ ИНСПЕКЦИЈИ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ.....	5.19
Svorcan, J., Stupar, S., Posteljnik, Z., Baltić, M. ODREĐIVANJE OSOBINA MATERIJALA KOMPOZITNIH DELOVA POMOĆU EKSPERIMENTALNIH PODATAKA I NEURONSKIH MREŽA	2.47
Tanasić, Z., Janjić, G., Borbek, M., Soković, M. NOVI MODELI ORGANIZACIJE I ISO/CD 9001:2015	4.23
Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Glavonjić, M. OPTIMIZACIJA DUŽINA SPOJKI DVOOSNOG REKONFIGURABILNOG PARALELNOG MEHANIZMA - MOMA.....	3.28
Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B. VERIFIKACIJA POSTPROCESORSKOG RAČUNA JEDNE KONCEPCIJE STONE REKONFIGURABILNE PETOOSNE MAŠINE ALATKE	3.136
Živković, A., Zeljković, M., Tabaković, S. ANALITIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJA SA KOSIM DODIROM.....	3.1

SPISAK AUTORA
LIST OF AUTHORS

BABIĆ, BOJAN
BALTIĆ, MARIJA
BELOVIĆ, DUŠKO
BLANUŠA, VLADIMIR
BOJANIĆ, MIRJANA
BORBEK, MIROSLAV
BOROJEVIĆ, STEVO
BULATOVIĆ, MIODRAG
CHWALCZUK, TADEUSZ
CVIJANOVIĆ, VOJKAN
DANILOV, IVAN
DIMIĆ, ZORAN
DOLEČEK, VLATKO
DONĐUR, NIKOLA
DRNDAREVIĆ,
DRAGOLJUB
DURAKBASA M., NUMAN
ĐURAŠKOVIĆ, DRAGANA
ĐURĐEV, MIĆA
ĐURĐEVIĆ, ANDRIJANA
ĐURIČIĆ, MILUTIN
ĐUROVIĆ, DUŠAN
GLAVONJIĆ, MILOŠ
GLOBOČKI LAKIĆ,
GORDANA
HADŽISTEVIĆ, MIODRAG
HODOLIĆ, JANKO
IVANOV, TONI
JAKOVLJEVIĆ, ŽIVANA
JANJIĆ, GORAN
JANJIĆ, MILETA
JOSIPOVIĆ, SONJA
JOVANOVIĆ, DESIMIR
JOVIČIĆ, GORAN
JOVIŠEVIĆ, VID
KARABEGOVIĆ, ISAK
KOKOTOVIĆ, BRANKO

KOMAROV, DRAGAN
KOPAČ, JANEZ
KOSEC, BORUT
KRAMAR, DAVORIN
KVRGIĆ, VLADIMIR
LEGUTKO, STANISLAW
LUKIĆ, DEJAN
LUKIĆ, NIKOLA
MAČUŽIĆ, JELENA
MAJSTOROVIĆ, VIDOSAV
MARKOVIĆ, BOJAN
MARKOVIĆ, VELJKO
MATIN, IVAN
MIĆEVIĆ, DUŠAN
MILIVOJEVIĆ, MILOVAN
MILJKOVIĆ, ZORAN
MILOŠEVIĆ, MIJODRAG
MILUTINOVIĆ, DRAGAN
MITIĆ, MARKO
MITROVIĆ, STEFAN
MLADENOVIĆ, GORAN
MLAĐENOVIĆ, CVIJETIN
MOSORINSKI, PREDRAG
MRKIĆ BOSANČIĆ, MAJA
MULIĆ, VESELIN
NEDIĆ, BOGDAN
NIKOLIĆ, SAŠA
PETRAŠINOVIĆ, NIKOLA
PETRONIJEVIĆ, JELENA
PETROVIĆ, MILICA
PETROVIĆ, PETAR
PJEVIĆ, MILOŠ
POKRAJAC, SLOBODAN
POPOVIĆ, MIHAJLO
POSTELJNIK, ZORANA
POTRAN, MICHAL
PUZOVIĆ, RADOVAN

RADISAVLJEVIĆ, IGOR
RADOJEVIĆ, DARKO
RADOJEVIĆ, IVAN
RADOJEVIĆ, MIROSLAV
RADOJEVIĆ, ZORAN
RANČIĆ, MILORAD
RANĐELOVIĆ, SAŠA
SEDMAK, ALEKSANDAR
SIMONOVIĆ,
ALEKSANDAR
SLAVKOVIĆ, NIKOLA
SOKOVIĆ, MIRKO
SOVILJ NIKIĆ, IVAN
SOVILJ-NIKIĆ, SANDRA
SPASIĆ, DRAGOLJUB
SREDANOVIĆ,
BRANISLAV
STANOJEVIĆ, DARKO
STANOJEVIĆ, NADA
STOJADINOVIĆ,
SLAVENKO
STUPAR, SLOBODAN
SVORCAN, JELENA
ŠIBALIJA, TATJANA
TABAKOVIĆ, SLOBODAN
TANASIĆ, ZORANA
TANOVIĆ, LJUBODRAG
TRIFKOVIĆ, BRANKA
VASIĆ, MILOŠ
VASILIĆ, GORAN
VUKELIĆ, ĐORĐE
VUKOVIĆ, NAJDAN
ZELJKOVIĆ, MILAN
ŽIVANOVIĆ, SAŠA
ŽIVKOVIĆ, ALEKSANDAR

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



32. simpozijum

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2014.

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

Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D., Radojević, I.
CIM SISTEM U SKLADIŠNOM PROSTORU 1.1





Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D., Radojević, M.¹

CIM SISTEM U SKLADIŠNOM PROSTORU

Rezime

CIM sistem je informacioni sistem svakog proizvodnog sistema iz bilo koje grane industrije. Zbog sve većeg značaja CIM sistema, detaljno se izučavaju pojedini delovi podsistema, a težnja je usmerena ka skraćanju trajanja tehnološkog procesa proizvodnje. Sem inovacija i tehničkih unapređenja, takođe je i informacioni sistem koji može da pomogne za brže pripremanje proizvodnje, a time i ubrza tok proizvodnog procesa. Kao jedan od elemenata je deo CIM sistema, koji se koristi pri skladištenju reproduktionog i pomoćnog materijala i gotovog proizvoda, koji se najčešće transportuje do kupca. Sledeći rad prikazuje najvažnije dokumente koji se koriste. Sigurno, isti dokumenti se unapređuju u smislu ubrzavanja procesa rada i kao takvi bitišu i promažu brzou pripremi proizvodnje.

Ključne reči: CIM sistem, informacioni sistem, skladište, tok materijala, skladištenje

1. UVOD

Današnji proizvodni sistemi žele da što više skrate vreme trajanja tehnološkog procesa. To se, pre svega, postiže kroz inovacije i tehnička unapređenja koja su neophodna da bi se proizvodni sistem održao u današnjem društvu. Kupac uvek želi da kupi jeftin, kvalitetan, funkcionalan i estetski lep proizvod. To nam govori da je neophodno raditi na unapređenju i razvoju postojećeg i novopredloženog proizvoda. Da bi se zadovoljili zahtevi tržišta, neophodno je izraditi jeftin i kvalitetan proizvod, što iziskuje posebne napore. Znači, treba svakodnevno pratiti svoj i konkurentski položaj na tržištu. Svaki dan je sve više konkurenata koji se bave proizvodnjom istog ili sličnog proizvoda, jer se broj kupaca sve više smanjuje, a to znači visoka konkurentnost svih proizvoda. Na osnovu današnjeg tržišta, možemo reći da proizvođačima nedostaje na hiljade novih proizvoda. Sadašnja proizvodnja bori se da ima što manja skladišta, jer na taj način smanjuje troškove proizvodnje.

Skladište repromaterijala i pomoćnih materijala za određeni proizvod teži da poseduje samo one materijale koji se ne mogu svakodnevno nabaviti. Svi ostali materijali se nabavljaju kada se lansira nalog za proizvodnju, koji zavisi od količine proizvoda.

Skladište gotovih proizvoda se takođe svodi na najmanju meru, jer težnja svakog proizvodnog sistema je da radi za poznatog kupca i da se naručiocu isporučuje roba odmah po završenom tehnološkom procesu proizvodnje.

Danas se izučavaju svi troškovi koji smanjuju cenu koštanja proizvoda da bi se opstalo na tržištu, pa ako treba i smanjila cena proizvoda.

Kroz ovaj rad pokušaćemo da prikazemo skladišta kroz njihovu ulogu i značaj, kao i njihov informacioni sistem, koji će omogućiti da se brže i efikasnije radi u skladištu, a time smanji cena skladištenja. Savremeni CIM sistem sigurno utiče na smanjenje troškova proizvodnje, a posebno deo koji se odnosi na skladišno kretanje materijala.

¹ prof. dr Zoran Radojević, Univerzitet u Beogradu, F.O.N., (zovime1@gmail.com), prof. dr Miroslav Radojević, Tehnikum Taurunum, (zovime1@gmail.com), M.Sc. Darko Radojević, Kompanija "Dunav osiguranje", (zovime1@gmail.com), M.Sc. Ivan Radojević, "Invest doo", (zovime1@gmail.com)

2. SKLADIŠTA

Skladište je prostor gde se odlaže dospela roba – materijal za transformisanje u elemente, podsklopove, sklopove i proizvode. Materijal koji se upotrebljava u proizvodnom procesu naziva se reprodukcioni. Skladište služi i za sortiranje proizvoda, a to znači: skupljanje, raspodela i formiranje zaliha. Iz ovog proizilazi da je skladište neminovno u procesu proizvodnje, kako sa stanovišta nabavke, tako i sa stanovišta otpreme proizvoda. Pre nego što se isprojektuje skladišni prostor, neophodno je izvršiti analizu troškova. Uvek se teži da skladišni prostor bude racionalan i što manji, kako bi i troškovi bili manji. Skladišta u proizvodnom sistemu mogu se podeliti na:

- skladišta repro materijala i pomoćnih materijala;
- skladišta gotovih proizvoda.

Skladište repromaterijala i pomoćnih materijala sadrži sve materijale neophodne za proizvodnju koji se ne mogu uvek kupiti na tržištu, pa se vrši plansko uskladištenje. Sem repromaterijala, tu se nalaze i pomoćni materijali za realizaciju proizvodnog procesa (ulje, krpe, četke, i dr.).

Skladište gotovih proizvoda služi za sortiranje i otpremanje istih po zahtevu kupca.

Skladišta u neproizvodnom sistemu imaju funkciju dopreme, istovara, identifikacije, sortiranja i paletizacije. Otprema do kupca ostvaruje se kroz prikupljanje narudžbenica, pakovanje i formiranje otpremne dokumentacije koja sadrži kompletnu specifikaciju sa nazivom proizvoda i količinom. U ovom slučaju skladišni sistem podrazumeva se kao distributivni sistem. Tok kretanja proizvoda kroz skladište može se definisati sledećim aktivnostima:

- prijem - istovar, identifikacija, sortiranje, paletizacija i dokumenti dopreme u skladište;
- kretanje robe u glavno skladište;
- prikupljanje porudžbina koje iziskuju sortiranje raznih proizvoda;
- pakovanje zahtevanih proizvoda po nazivu i količini, i utovaru transportno sredstvo.

Skladišni sistem se sastoji iz više podsistema, i to: prijema robe, skladištenja robe, sortiranja robe sa stanovišta porudžbina, pakovanje i otprema. Pod pojmom roba podrazumevaju se reprodukcioni, pomoćni materijal i gotovi proizvodi. Prijem robe počinje od istovara sredstva spoljnog transporta. Istovar se obavlja sredstvima unutrašnjeg transporta ili ručno, u zavisnosti od mase i gabarita tereta. Sem naznačenog, prijem robe znači da se počinje sa pripremom za uskladištenje, a to znači sortiranje, vreme zadržavanja i formiranje skladišne jedinice. Skladištenje robe predstavlja vremensko odlaganje, a svaka roba ima svoj vek trajanja u skladištu. Način uskladištenja može biti ručno, čija je ambalaža u obliku kutija i može se formirati na paleti. Ovo skladištenje je skupo i zahteva dosta fizičkog rada. Skladištenje viljuškarima paletizovanih proizvoda vrši se na različite visine i nosivosti. Skladištenje sa skladišnim dizalicama paletizovanih proizvoda vrši se na prethodno opisan način za proizvode u kutiji. Visoko regalna skladišta opslužuju se štapel-dizalicama koje se kreću po podu i ostvaruju prenos u specijalnim visokim regalima.

Sortiranje robe vrši se prema zahtevu naručioca, da bi se ista isporučila. Kada se otprema, prikuplja i kompletira, vrši se zahtev narudžbenice. Kada se kompletira narudžbenica, roba se pakuje u transportne jedinice, gde se kasnije utovara u prevozno sredstvo spoljnog transporta, ili se pakuje za potrebe proizvodnje u sredstvo unutrašnjeg transporta. Po pakovanju robe, ista se isporučuje naručiocu i to predstavlja vezu skladišta i naručioca. To se obavlja sledećim aktivnostima: odnošenje robe iz skladišta gde je izvršeno pakovanje, odnošenje robe do mesta za utovar u spoljni transport, kontrola pakovanja, formiranje dokumentacije otpreme, adresiranje i utovar.

2.1 Informacioni podsistem skladišta

Ovaj informacioni podsistem je deo CIM sistema kompletnog proizvodnog sistema i odnosi se na skladišta. Skladište se susreće sa sledećim dokumentima:

Trebovanje materijala je dokument koji pokazuje koliko materijala je potrebno uzeti iz skladišta za potrebe proizvodnje određenog proizvoda. Sadrži: šifru materijala, naziv materijala, potrebnu količinu materijala. Trebovanje je šifrom povezano sa radnim nalogom, a izgled je dat na slici 1:

RADNI NALOG BR.		KOLIČINA KOM.		DATUM IZDAV. ____		ROK ZAVRŠETKA ____		
PROIZVOD: ____		NAZIV DELA: ____		BROJ NACRTA ____		BROJ ZAHTEVNICE ____		
MATERIJAL–KVALITETA, DIMENZIJA			KOL.ZA 1 KOMAD			BROJ IZDAT. ____		
DUGUJE OBRAČ.JED. ____		KONTO: ____		POTRAŽUJE OBRAČ.JED ____		KONTO: ____		
NOMENKLATURA	JED. MERE	TRAŽENA KOLIČINA		IZDATA KOLIČINA		PLANSKA CENA	IZNOS	
TREBOVANJE MATERIJALA	ISPOSTAVIO		IZDAO		PRIMIO		KNJIŽIO	
	DANA	POTPIS	DANA	POTPIS	DANA	POTPIS	DANA	POTPIS

Slika 1. Izgled trebovanja materijala

Zahtevnica je dokument koji se formira u tehnološkom birou da skladište izda potrebni materijal za proizvodnju određenog proizvoda.

Trebovanje elemenata i delova iz kooperacije je dokument koji se koristi za podizanje elemenata za potrebe proizvodnje ili montaže iz skladišta. Dokument je sličan trebovanju materijala, a izgled je dat na slici 2:

RADNI NALOG BR. ____		KOLIČINA KOM. ____		DATUM IZDAV. ____			ROK ZAVRŠETKA ____			
PROIZVOD ____		SKLOP (ELEMENT) ____		MONTAŽNA OPERACIJA BR. ____			BROJ ZAHTEVNICE:			
DUGUJE OBRAČ.JEDINICA		KONTO	POTRAŽUJE OBRAČ.JEDINICA			KONTO	BROJ IZDATNICE			
REDNI BROJ	OZNAKA	JED.MERE	KOM.PO PROIZV.	TEŽINA KOLIČ.	DELIMIČNO IZDATO			UKUPNO IZDATO	PLANSKA CENA (DIN.)	IZNOS (DIN.)
					1	2	3			
TREBOVANJE ELEMENTA I DELOVA IZ KOOPERACIJE		ISPOSTAVIO		IZDAO		PRIMIO		KNJIŽIO		
		DATUM	POTPIS	DATUM	POTPIS	DATUM	POTPIS	DATUM	POTPIS	

Slika 2. Izgled trebovanja elemenata iz kooperacije

Izdatnica je dokument koji daje zbir svih izdatih elemenata i delova (sklopova i podsklopova) za traženi proizvod. Isti izdaje skladištar.

Normativ materijala, elemenata i delova formira se na bazi sastavnice proizvoda. Svaki tehnički crtež sadrži količinu, kvalitet i dimenzije materijala od kog je sastavljen proizvod. Na bazi toga formira se jedinstveni normativ materijala, gde se svaki materijal po količini, kvalitetu i dimenzijama pojavljuje samo jedanput, mada se nalazi u više tehničkih crteža. Znači, vrši se sabiranje količina istorodnih materijala po kvalitetu i dimenzijama. Kada se sačini tehnološka lista za jedan proizvod, onda se ta količina uveća za veličinu serije koja će se proizvoditi, ili ostane ista ukoliko izrađujemo samo jedan proizvod. Isto važi za pomoćni materijal, gotovu robu i za elemente i delove iz kooperacije. Na slici 3. dat je izgled obrasca normativa materijala, elemenata i delova.

NAZIV PROIZVODA ____				NORMATIV MATERIJALA BR. ____			
BROJ CRTEŽA							
REDNI BROJ	NAZIV MATERIJALA, ELEMENTA DEL.	KVALITET OZNAKA PO S.S.	JEDINICA MERE	KOLIČINA PO PROIZV.	VELIČINA SERIJE	UKUPNA KOLIČINA	PRIMEDBA
DATUM OBRADBE		OBRADIO		DATUM PREGLEDA		PREGLEDAO	ODOBRIO

Slika 3. Izgled obrasca normativa materijala, elemenata i delova

Normativi alata i pomoćnog pribora sačinjavaju se na osnovu tehnološke razrade – postupka izrade elemenata, podsklopova, sklopova, delova i kompletnog proizvoda. Na osnovu specifikacije iz tehnološke dokumentacije i potrošnje po vrstama i kvalitetu, izračunava se normativ potrebnog standardnog i nestandardnog alata i pomoćnog pribora. Na slici 4. dat je izgled obrasca normativa alata i pomoćnog pribora. Pomoćni pribor se po završetku posla vraća u skladište.

NORMATIV ALATA I POMOĆNOG PRIBORA BR. _____		NAZIV PROIZVODA _____ BROJ CRTEŽA _____		VELIČINA SERIJE _____	
REDNI BROJ	NAZIV ALATA (POM.PRIB.)	OZNAKA PO S.S.	JEDINICA MERE	KOLIČINA ZA SERIJU PROIZVODA	PRIMEDBA

DATUM OBRADJE _____	OBRADIO _____	DATUM PREGLEDA _____	PREGLEDAO _____	ODOBRIO _____
------------------------	------------------	-------------------------	--------------------	------------------

Slika 3. Izgled obrasca normativa alata i pomoćnog pribora

Povratnica materijala i alata je dokument koji se koristi po završenom poslu ukoliko je ostala određena (predviđena i nepredviđena) količina materijala ili alata. Povraćaj u skladište materijala ili alata vrši se povratnicom, koja nosi oznaku trebovanja i radnog naloga po kome je materijal i alat trebovan. Svrnjivanjem trebovanja materijala i alata i povratnice dolazi se do stvaranja utrošene količine materijala i alata određenog radnog naloga.

U zavisnosti od proizvoda i tipa proizvodnje, svaki proizvodni sistem poseduje svoja specifična dokumenta. Ovde su obuhvaćena najvažnija dokumenta, koja se najčešće koriste.

3. ZAKLJUČAK

Na kraju možemo reći da je veoma važan kompletan CIM sistem, koji se primenjuje na kompletan proizvodni sistem. Deo koji se odnosi na skladištenje kao podsistem neophodno je unapređivati, jer utiče na tok proizvodnog procesa i čini deo kompletne celine. Sve se vrši da bi se ubrzao proizvodni proces i time skratilo vreme trajanja kompletnog procesa, a kroz sve nabrojano omogućuje se smanjenje cene koštanja proizvoda.

4. LITERATURA

- [1] Zrnić, Đ.: *Projektovanje fabrika*, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [2] Jovanović P., redaktor i ostali: *Leksikon menadžmenta*, F.O.N, Beograd, 2003.
- [3] Lončarević R.: *Menadžment*, Univerzitet Singidunum, Beograd, 2006.
- [4] Radojević Z., Radojević M., Stojanović D.: *Lokacija i projektovanje objekata*, F.O.N, Beograd, 2007.
- [5] Vorbech J., Finke J.: *Motivation and competence*, Springer, Berlin, 2001..

Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D., Radojević, M.

CIM SYSTEM IN WAREHOUSE STORAGE SPACE

Abstract: *CIM system is an information system of each production system from any branch of industry. Because of the growing importance of CIM systems, certain parts of the subsystem are studied in detail, and tendency is directed towards shortening the duration of the technological process. Except innovations and technical improvements, the information system can also help in faster preparation of production and therefore speed up the flow of the production process. One of the elements of CIM system is a part that is used for propagating materials, auxiliary materials and finished products storage, which are usually transported to the customer. The following study presents the most important documents to be used. Surely the same documents are improving in order to speed up the work process, as such, exist and help rapid preparation of production.*

Key words: *CIM system, information system, warehouse, material flow, storage*

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



26. simpozijum

CAD/CAM

Beograd, oktobar 2014.

CAD/CAM

Drndarević, D., Đuričić, M., Milivojević, M. MODELOVANJE PROCESA SINTEROVANJA	2.1
Ivanov, T., Spasić, D., Komarov, D., Simonović, A. NUMERIČKA ANALIZA UDARA PROJEKTILA U RAVNU ALUMINIJUMSKU PLOČU	2.7
Janjić, M., Đurašković, D. MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA KALJENIH STAKLENIH PLOČA METODOM KONAČNIH ELEMENATA	2.13
Mladenović, G., Tanović, L., Pjević, M. OBRADA SLOŽENIH POVRŠINA GLODANJEM – POREĐENJE STRATEGIJA OBRADE	2.19
Nikolić, S., Randelović, S. FEM MODEL BRIZGANJA TERMOPLASTA U NESIMETRIČNOM ALATU	2.25
Pjević, M., Mladenović, G., Puzović, R., Tanović, L. PRIMENA CAD/CAM SISTEMA U PROJEKTOVANJU I IZRADI PROFILNIH KRUŽNIH STRUGARSKIH NOŽEVA	2.31
Popović, M. PARAMETARSKO MODELIRANJE UREZNIKA SA PRAVIM ŽLEBOVIMA	2.37
Posteljnik, Z., Stupar, S., Svorcan, J., Petrašinović, N. POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH ANALIZA DEFORMACIJA KOMPOZITNE LOPATICE VETROTURBINE	2.41
Svorcan, J., Stupar, S., Posteljnik, Z., Baltić, M. ODREĐIVANJE OSOBINA MATERIJALA KOMPOZITNIH DELOVA POMOĆU EKSPERIMENTALNIH PODATAKA I NEURONSKIH MREŽA	2.47
Spasić, D., Ivanov, T., Komarov, D., Stupar, S. ANALIZA OTKAZA ZVEZDASTOG SEPARATORA AVIONSKOG TOPA	2.53

← NAZAD



Drndarević D., Đuričić M., Milivojević M.¹

MODELOVANJE PROCESA SINTEROVANJA

Rezime

Dat je jedan pristup modelovanju ponašanja dimenzija delova dobijenih metalurgijom praha u procesu sinterovanja u cilju predikcije dimenzionalnih promena. Model je razvijen na bazi signifikantnih faktora procesa sa primenom arhitekture višeslojne neuronske mreže i Backpropagation algoritma učenja. Rezultati simulacije su prikazani u obliku dijagrama i tabela. Dobijeni model daje bolje rezultate od modela baziranog na statističkoj obradi eksperimentalnih podataka, odnosno manju ukupnu srednju grešku aproksimacije dimenzija dela za 11,4%. Praktični efekti modelovanja su u određivanju dimenzija otpreska s obzirom na dimenzionalne promene pri sinterovanju.

Ključne reči: Modelovanje, Sinterovanje, Dimenzionalne promene, Neuronska mreža, Backpropagation algoritam učenja

1. UVOD

U radu je dato modelovanje dimenzionalnih promena pri sinterovanju u procesu proizvodnje delova sa hladnim presovanjem praha u zatvorenom alatu. Pri sinterovanju se javlja relativno veliki broj faktora procesa koji utiču na promenu dimenzija, a time i na konačnu tačnost dela (temperatura, vreme sinterovanja, vrsta zaštitne atmosfere, režimi predgrevanja i hlađenja, vrsta transporta). U radu je cilj bio da se ispita uticaj geometrije i dimenzija dela na promenu tih dimenzija pri sinterovanju.

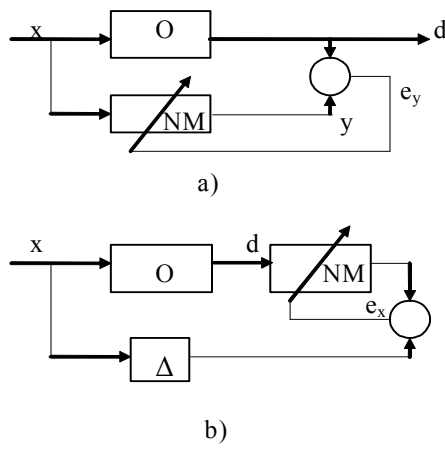
Modelovanje je izvedeno pomoću veštačkih neuronskih mreža (NM). Korišćena je višeslojna neuronska mreža sa *Backpropagation* algoritmom učenja, koja je dala najbolje rezultate u modelovanju procesa.

Neuronske mreže za modelovanje korišćene su u različitim vrstama procesa, kao što su proizvodnja (pregled dat u [1]), hemijska industrija [2] i u procesima metalurgije praha [3].

2. PRINCIPI MODELOVANJA

Osnovni principi modelovanja procesa nepoznatog ponašanja dati su na slici 1 [4]. Pri modelovanju poznati su parovi ulaza i izlaza objekta x i d , respektivno. Modelovanje se može izvesti kao direktno i indirektno, odn. inverzno. Direktno modelovanje (slika 1a) izvodi se prema grešci izlaza procesa e_y , koja predstavlja razliku izlaza procesa (željena vrednost) i izlaza NM. Modelovanje se sastoji u adaptiranju težina NM pomoću algoritma učenja dok greška izlaza e_y ne udje u propisane granice. Promenom konfiguracije dobija se inverzno modelovanje (slika 1b), koje se izvodi prema grešci ulaza procesa e_x . Kod on-line modelovanja uvodi se kašnjenje, pri čemu ulaz procesa kasni za Δ .

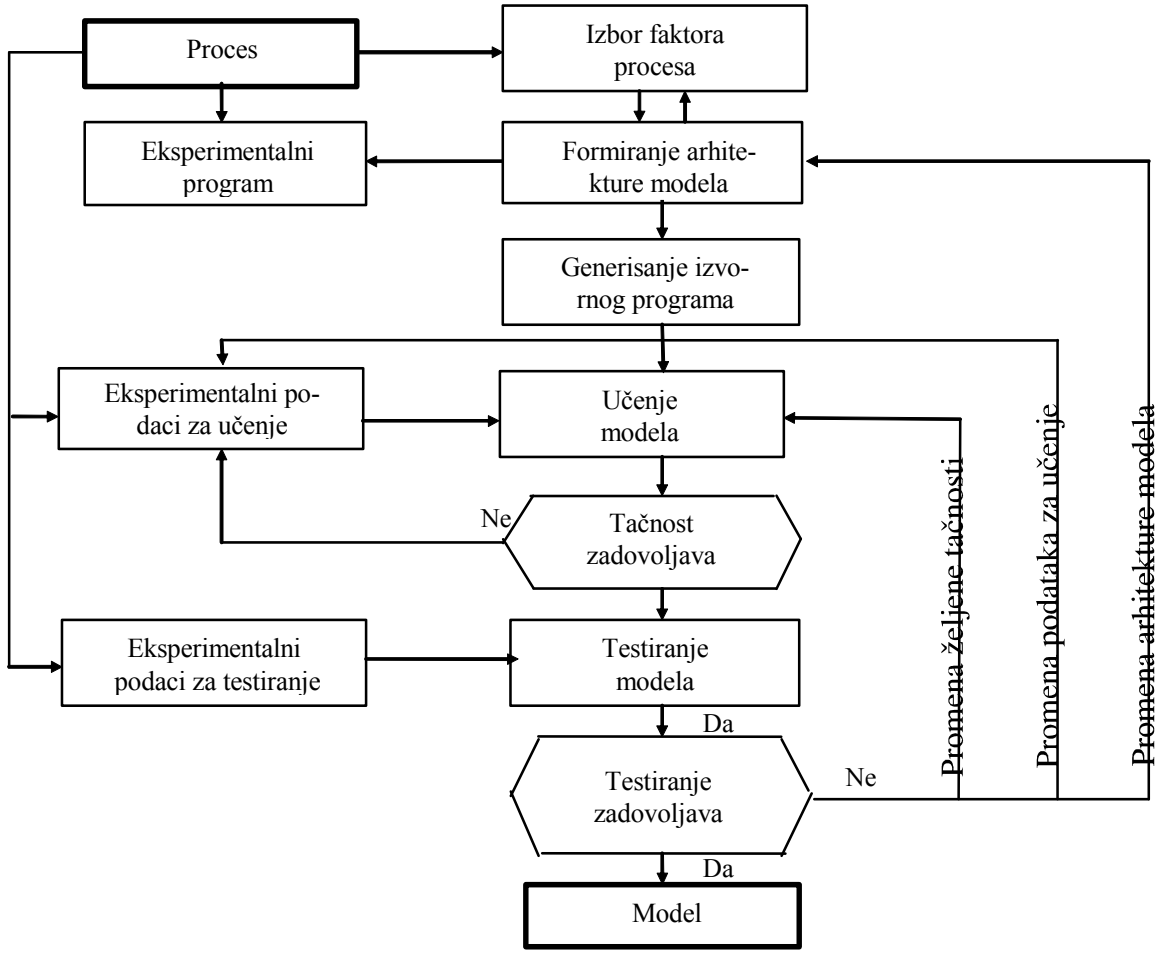
¹ dr Dragoljub Drndarević, prof. strukovnih studija, Visoka poslovno tehnička škola Užice, (dragoljub.drndarevic@vpts.edu.rs), prof. dr Milutin Đuričić, Visoka poslovno tehnička škola Užice, (milutin.djuricic@vpts.edu.rs), mr Milovan Milivojević, predavač strukovnih studija, Visoka poslovno tehnička škola Užice, (milovan.milivojevic@vpts.edu.rs)



Slika 1. Modelovanje procesa upravljanja sa neuronskom mrežom

- Model procesa na bazi NM čine:
 a) ulazni podaci
 b) arhitektura NM
 c) algoritam učenja

Osnovne etape, odnosno aktivnosti u modelovanju procesa prikazane su na slici 2 [3].



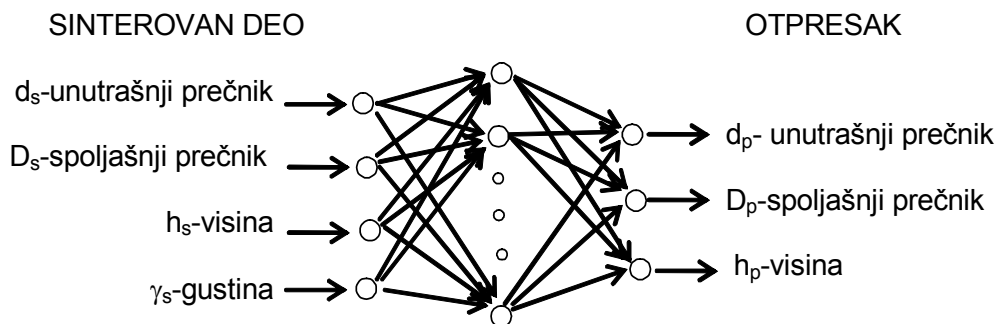
Slika 2. Razvoj modela procesa na bazi neuronske mreže

Dijagram toka aktivnosti pri modelovanju procesa pomoću NM može se podeliti na dva dela. U prvoj fazi, na osnovu prethodno urađene analize procesa, vrši se izbor uticajnih faktora i definiše arhitektura modela sa algoritmom učenja, dok se u drugoj fazi formira eksperimentalni program i generiše računarski program, sa kojim se izvodi učenje i testiranje modela.

2. MODEL

Model je formiran za određenu vrstu delova dobijenih metalurgijom praha - samopodmazujuće ležaje, čiji je materijal bronza P4013Z. Režimi procesa sinterovanja za dati materijal pri dobijanju eksperimentalnih podataka bili su konstantni. Proces je posmatran inverzno. Kao ulazni faktori uzete su dimenzije i gustina sinterovanog dela, a izlazne karakteristike su dimenzije otpreska, na osnovu kojih se mogu odrediti dimenzije alata za presovanje, odnosno dobiti elementi potrebni za projektovanje procesa.

Na bazi eksperimentalnih podataka formiran je model promene dimenzija dela pri sinterovanju. Kao model korišćena je višeslojna neuronska mreža [5], čija je arhitektura data na slici 3. Arhitektura modela sastoji se od ulaznog sloja, jednog (ili više) "skrivenih" slojeva i izlaznog sloja. Svaki sloj sastoji se od procesirajućih elemenata, pri čemu broj procesirajućih elemenata ulaznog i izlaznog sloja odgovara broju izabranih ulaznih faktora i izlaznih karakteristika dela, respektivno, dok je broj procesirajućih elemenata u skrivenom sloju proizvoljan.



Slika 3. Arhitektura modela promene dimenzija pri sinterovanju

Modelovanje se sastoji od faze učenja i faze testiranja. Učenje je iterativan proces u kom se određuju koeficijenti (težine) modela. Pri testiranju sa dobijenim težinama, za odgovarajuće ulazne podatke na izlazu se dobijaju tražene karakteristike. U cilju određivanja tačnosti, odnosno greške modela, vrednosti dobijenih karakteristika mogu se porediti sa odgovarajućim zadatim (eksperimentalnim) vrednostima.

Primenjen je standardni *Backpropagation* algoritam sa korekcijom težina posle svake iteracije i sa "momenat" članom, na bazi kog je formiran program za simulaciju. U programu za simulaciju izvršena je priprema ulaza, odnosno eksperimentalnih podataka (randomizacija redosleda, podela celog skupa ulaznih podataka na podatke za učenje i podatke za testiranje, parametrizacija i normalizacija podataka), generisanje početnih vrednosti težina i definisanje kriterijuma tačnosti.

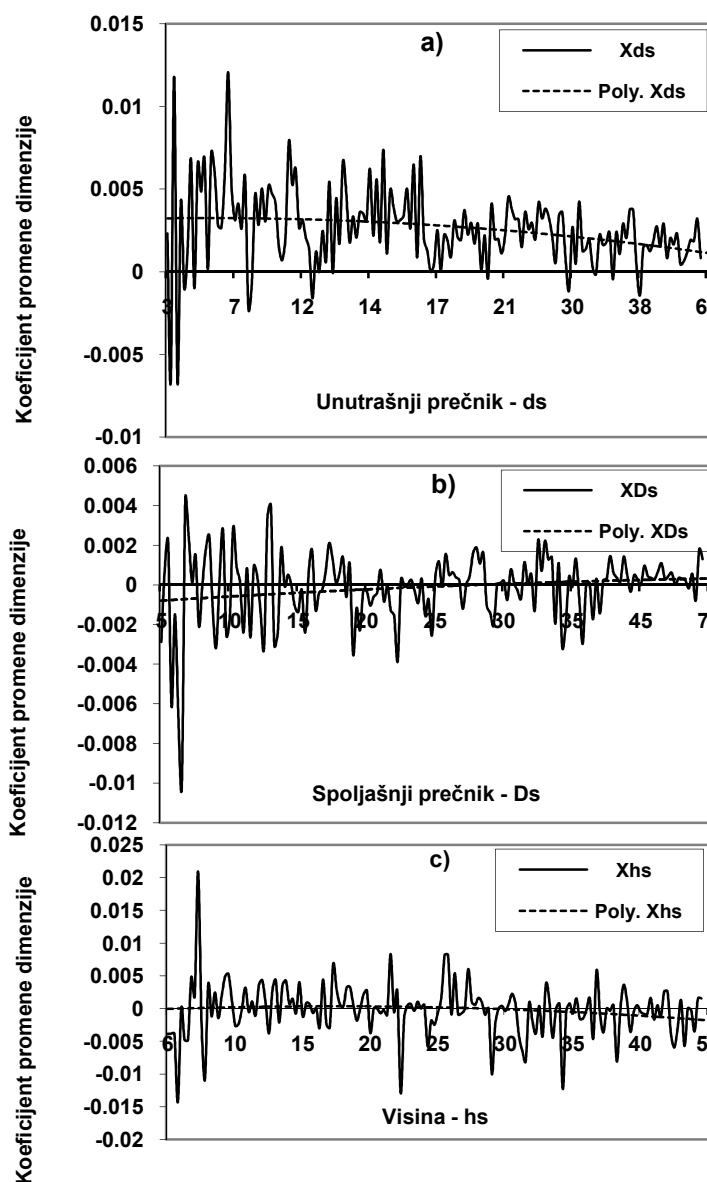
Skup ulaznih, odnosno eksperimentalnih podataka je podeljen tako da je približno 3/4 slučajno izabranih podataka namenjeno za učenje i 1/4 za testiranje. Optimizacijom pomoću kriterijuma minimalne greške testiranja i minimalnog broja ciklusa učenja dobijene su vrednosti parametara modela: koeficijent učenja 0.9, koeficijent momenta 0.4, interval početnih težina ± 0.3 i broj procesirajućih elemenata u skrivenom sloju 4.

3. REZULTATI

Simulacijom modela sa optimalnim parametrima na skupu eksperimentalnih podataka za testiranje dobijeni su izlazi, odnosno dimenzije dela posle presovanja, za zadate dimenzije sinterovanog dela. Na bazi ulaznih eksperimentalnih podataka i dobijenih izlaza određeni su koeficijenti, koji predstavljaju relativnu promenu odgovarajućih dimenzija pri sinterovanju:

$$X_{ds} = \frac{dp - ds}{ds}; X_{Ds} = \frac{Dp - Ds}{Ds}; X_{hs} = \frac{hp - hs}{hs} \quad (1)$$

Na slici 4 prikazani su koeficijenti promene dimenzija. Na slici 4a prikazana je relativna promena unutrašnjeg prečnika X_{ds} za ležajeve sa $ds=3-60$ mm. Pored stvarne krive data je njena polinomijalna aproksimacija. Zapaža se da koeficijent X_{ds} opada sa porastom prečnika. Koeficijent spoljašnjeg prečnika X_{Ds} blago raste sa povećanjem Ds (slika 4b), a koeficijent visine X_{hs} se ponaša slično kao X_{ds} (slika 4c). Srednje vrednosti promene dimenzija pri sinterovanju date su u tabeli 1, gde znak daje smer promene u odnosu na pretpostavljeni smer u jedn. (1).

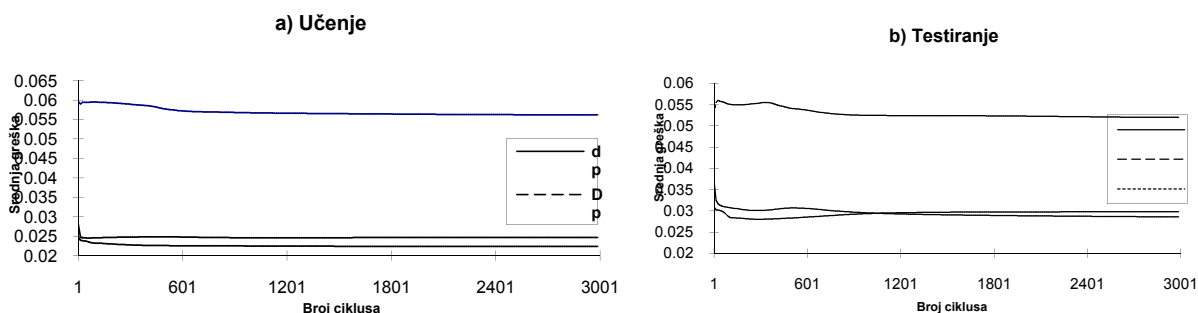


Slika 4. Relativna promena dimenzija pri sinterovanju

Tabela 1. Srednje vrednosti koeficijenata promene dimenzija

X_{ds}	X_{Ds}	X_{hs}
$2.616 \cdot 10^{-3}$	$-1.453 \cdot 10^{-4}$	$-1.796 \cdot 10^{-4}$

Rezultati simulacije modela u obliku dijagrama grešaka izlaza dati su na slici 5. Greške predstavljaju srednje vrednosti apsolutnih odstupanja izlaza modela od željenih, odnosno eksperimentalnih vrednosti izlaza. Dijagrami prikazuju promenu grešaka učenja i testiranja po dimenzijama za 3000 ciklusa učenja, jer je pri povećanju broja ciklusa konvergencija vrlo spora. Promena grešaka učenja sa povećanjem broja ciklusa učenja data je na dijagramu na slici 5a. Greške učenja, posle relativno brzog opadanja u početku učenja i variranja u narednoj fazi, posle približno 600 ciklusa ulaze u područje konvergencije. Greške testiranja ponašaju se slično (slika 5b). Zapaža se da je greška modelovanja visine otpreska znatno veća od grešaka unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika. Pored toga, greška učenja kod visine otpreska je veća od greške testiranja, što ukazuje na veći šum procesa kod ove dimenzije.



Slika 5. Greške modela sinterovanja

Detaljnija informacija o mogućnosti aproksimacije sa modelom baziranim na NM prikazana je u tabeli 2. Date su vrednosti izlaza mreže, dobijene za odgovarajući skup podataka za testiranje, u cilju poređenja sa eksperimentalnih vrednostima izlaza za isti skup.

Tabela 2. Izlazi modela za testiranje i eksperimentalni izlazi

k	Izlazi modela			Željeni (eksp.) izlazi		
	d_p	D_p	h_p	d_p	D_p	h_p
1	7.033	9.061	7.643	7.033	9.055	7.640
2	30.162	35.166	25.879	30.088	35.164	25.920
3	11.590	14.108	13.648	11.624	14.121	13.640
.....						
38	20.053	30.139	20.658	20.008	30.092	20.670
39	60.135	70.081	51.692	60.128	70.158	51.840

Rezultati simulacije modela, dati u radu, poređeni su sa standardnim postupkom, baziranim na statističkoj obradi eksperimentalnih podataka. Ovaj postupak je izveden kretanjem unazad, od dimenzija sinterovanog dela do otpreska, uzimajući u obzir dimenzionalne promene pri sinterovanju. Određeni su koeficijenti promena dimenzija, bazirani na skupu podataka za učenje pomoću NM. Dimenzije otpreska su određene za skup podataka za testiranje, koristeći dobijene koeficijente. Za poređenje je korišćen isti oblik srednje greške kao kod NM.

Rezultati poređenja dati su u tabeli 3. Rezultati pokazuju da model baziran na NM daje manju srednju grešku za svaki izlaz i manju ukupnu srednju grešku za 11.4% od statističkog postupka. Ovo je postignuto uključivanjem većeg broja uticajnih faktora i njihovih međuzavisnosti, kao i pomoću opštijih funkcionalnih oblika i iterativnim prilazom rešenju.

Tabela 3. Srednje greške predikcije za statistički postupak i model NM

Model	d_p	D_p	h_p	Σ
Sa statističkim postupkom	0.03315	0.03271	0.05867	0.12453
Sa NM	0.02858	0.02977	0.05198	0.11033

4. ZAKLJUČAK

Izložen je postupak i rezultati modelovanja promene dimenzija dela pri sinterovanju sa korišćenjem višeslojne neuronske mreže i *Backpropagation* algoritma učenja.

U razvoju modela korišćene su prednosti neuronske mreže u identifikaciji nepoznatog ponašanja procesa sa velikim brojem uticajnih faktora (tolerancija grešaka, robusnost na šum i nekompletne podatke i sposobnost aproksimacije sistema visoke nelinearnosti). Sa paralelnom strukturom procesiranja postignuta je zahtevana međuzavisnost ulaza i istovremeno formiranje većeg broja izlaza.

Praktični značaj modelovanja promene dimenzija pri sinterovanju je u određivanju dimenzija otpreska za zadate dimenzije sinterovanog dela i vrstu materijala, za unapred zadate režime procesa. Pomoću dimenzija otpreska mogu se odrediti dimenzije alata za presovanje, da bi se kao rezultat dobio konačan deo potrebnih dimenzija.

LITERATURA

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, 1995 (705-728)
2. Novič M., Zupan J., *Investigation of infrared Spectra-Structure Correlation Using Kohonen and Counterpropagation Neural Network*, J. Chem. Inf. Comput. Sci., Vol. 35, No 3, 1995 (454-466)
3. Drndarević D., Reljin B., *Accuracy modelling of powder metallurgy process using backpropagation neural networks*, Powder Metallurgy, Vol. 43, No.1, 2000 (25-29)
4. Widrow B., Winter R., *Neural Nets for Adaptive Filtering and Adaptive Pattern Recognition*, Computer, Vol. 21, No. 3, 1988. (25-40)
5. Rumelhart D. E., Hinton G.E., Williams R.J., *Learning representation by back-propagating errors*, Nature, Vol. 323, 1986 (533-536)

Drndarević D., Đuričić M., Milivojević M.

MODELLING OF THE SINTERING PROCESS

Abstract: *A approach to modelling behaviour of powder metallurgy parts dimensions at sintering process for the prediction of the dimensional changes is given. The model is developed on the base of significant process factors applying multilayer neural network architecture with Backpropagation learning algorithm. Results of the simulation in the form of the diagrams and tables are presented. Obtained model gives better results than the one of statistical procedure of the experimental data, i.e. less total mean approximation errors of the part dimensions for 11.4%. Practical effects of the modelling are in determination of compact dimensions in accordance with dimensional changes during sintering.*

Key words: *Modelling, Sintering, Dimensional changes, Neural network, Backpropagation learning algorithm*



Ivanov, T., Spasić, D., Komarov, D., Simonović, A. ¹⁾

NUMERIČKA ANALIZA UDARA PROJEKTILA U RAVNU ALUMINIJUMSKU PLOČU ²⁾

Rezime

U ovom radu prikazan je numerički proračun udara projektila u aluminijumsku ploču. Razmatrane su ploče različitih debljina izrađene od AA5083H116 aluminijum-magnezijumske legure. Karakteristike materijala korišćene u numeričkim analizama modelovane su pomoću Johnson-Cook-ovih konstitutivnih modela za čvrstoću i lom materijala. Razmatran je udar projektila sa konusnim vrhom izrađen od Arne alatnog čelika. Urađene su analize metodom konačnih elemenata (FEM) i kombinovanim metodom gde je zona velikih deformacija modelovana metodom hidrodinamike glatkih čestica, a ostatak metodom konačnih elemenata. Dobijeni rezultati poređeni su sa eksperimentalnim rezultatima iz dostupne literature i izveden je zaključak.

Ključne reči: Analiza udara, metod konačnih elemenata, metod hidrodinamike glatkih čestica, Johnson Cook konstitutivni modeli.

1. UVOD

Ispitivanja vezana za udar i perforaciju materijala predmet su istraživanja mnogih inženjerskih grana. Ova vrsta ispitivanja je naročito popularna u vojnoj i vazduhoplovnoj industriji, gde se posebna pažnja obraća na zaštitu od udara. U situacijama kada je potrebna mobilnost uređaja, težina zaštite t.j. oklopa igra bitnu ulogu. Iz tog razloga izdržljivost na udar lakih materijala je u ovim granama, a naročito u vazduhoplovstvu od posebnog interesa. Mala gustina, velika specifična čvrstoća, dobra absorpcija energije, dobra otpornost na koroziju, dobra termalna provodljivost kao i slabija osetljivost na adijabatsko smicanje i termoplastičnu nestabilnost karakteristike su aluminijumskih legura koje ih čine pogodnim za primenu u ove svrhe. U prilog primeni ide i činjenica da se mnoge aluminijumske legure lako mogu oblikovati u kompleksne strukture [1].

U ovom radu razmatrana je perforacija aluminijumske ploče čeličnim projektilom. Najbitnija karakteristika koja ukazuje na zaštitnu sposobnost i otpornost ploče na udar je balistički limit tj. balistička granična brzina koja predstavlja najveću brzinu udara projektila pri kojoj neće doći do perforacije ploče [2].

Sa ciljem određivanja balističkog limita i preostale brzine u prošlosti su stvarani analitički i empirijski modeli koji su u određenoj meri mogli da predvide ponašanje materijala izloženog udaru. Razvojem računarske tehnologije stvorile su se mogućnosti za numeričko rešavanje ovog problema. Najčešće korišćeni metodi za numerički proračun udara jesu metod konačnih elemenata (FEM – *Finite Element Method*) i metod hidrodinamike glatkih čestica (SPH – *Smoothed Particle Method*). U zadnje vreme je sve popularnija kombinacija ove dve metode tj. SFM metoda. U ovom radu biće prikazana analiza udara projektila sa konusnim vrhom u ravnu aluminijumsku ploču i biće poređeni rezultati dobijeni FEM i SFM metodama sa eksperimentalnim rezultatima.

¹⁾ Toni Ivanov, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (tivanov@mas.bg.ac.rs),
Dragoljub Spasić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dragoljub.spasic@gmail.com),
prof. dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (asimonovic@mas.bg.ac.rs),
dr Dragan Komarov, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dkomarov@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_broj projekta: Istraživanje i razvoj savremenih pristupa projektovanju kompozitnih lopatica rotora visokih performansi, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

2. KONSTITUTIVNI MODEL I KARAKTERISTIKE MATERIJALA

2.1 Konstitutivni model

Udar često prouzrokuje plastično tečenje materijala sa velikim brzinama deformacije, lokalni rast temperature kao i pucanja materijala. Standardni pristup rešavanju problematike udara uključuje dva različita konstitutivna modela. Jedan koji definiše plastičnost i drugi koji definiše kriterijum loma materijala. U literaturi za ovakvu vrstu analiza najčešće se koriste Johnson-Cook-ovi (JC) konstitutivni modeli koji su korišćeni i u ovom radu. Ova dva modela nisu povezana i mogu se koristiti zasebno.

Johnson i Cook formulisali su konstitutivni model za metale izložene velikim deformacijama, velikim brzinama deformisanja i visokim temperaturama koji je primarno namenjen za proračune udara [3]. Kako bi se definisale karakteristike materijala, ovaj model koristi pet različitih koeficijenata koje je potrebno odrediti eksperimentalnim ispitivanjem. Johnson i Cook su predstavili fon Mizesov napon tečenja preko relacije:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

gde, ε - ekvivalentna plastična deformacija, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ - bezdimenziona brzina deformisanja za $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$ a T^* - odgovarajuća temperatura. Koeficijenti A, B, n, C i m su konstante materijala. Konstanta A je napon tečenja, B i n su posledica očvršćavanja, a C je konstanta brzine deformisanja. Borvik je izvršio modifikaciju JC modela i njegova relacija je oblika [4]:

$$\sigma_{eq} = [A + B\varepsilon^n][1 + \dot{\varepsilon}^*]^C[1 - T^{*m}] \quad (2)$$

Liu et al. [5] su uzeli u obzir i uticaj priraštaja temperature koji je posledica adijabatskog zagrevanja materijala tj. rad koji se pri plastičnom tečenju pretvara u toplotu.

Autori ovog rada smatraju da se zadovoljavajući rezultati mogu dobiti i originalnim JC modelom te će iz tog razloga u ovom radu biti korišćen samo standardni nemodifikovani JC konstitutivni model čvrstoće materijala.

Kao kriterijum za lom materijala Johnson i Cook su predložili konstitutivni model prilagođen računarskim simulacijama i on je predstavljen relacijama [6]:

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (3)$$

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*] \quad (4)$$

U ovim relacijama D predstavlja oštećenje elementa i lom je moguć kada je D=1.0. $\Delta\varepsilon$ je priraštaj plastične deformacije koja nastaje prilikom integracionog ciklusa, dok ε^f je ekvivalentna deformacija do loma pri trenutnim uslovima temperature, pritiska i ekvivalentnih napona.

2.2 Karakteristike materijala

Za numeričku analizu u ovom radu biće korišćeni Johnson-Cook-ovi konstitutivni modeli čvrstoće i loma materijala. Materijal koji je korišćen u analizama je aluminijumska legura AA5083-H116. Ova legura pripada klasi AA5xxx tj. aluminijum-magnezijumskih legura. Ima dobre osobine za valjanje te je stoga praktična za upotrebu. Takođe ima dobru otpornost na koroziju. Legura AA5083-H116 je druga najjača komercijalna aluminijum-magnezijumska legura.

Detaljnju analizu karakteristika ovog materijala i definisanje koeficijenata namenjenim za JC konstitutivne modele uradili su Clausen et. al. [7]. U tabeli 1 prikazane su karakteristike materijala i vrednosti koeficijenata korišćene u analizama.

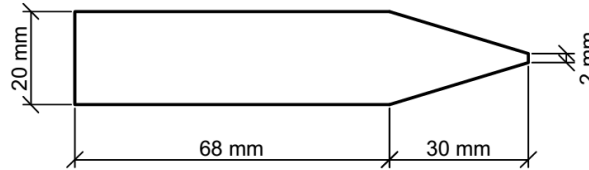
Tabela 1. Karakteristike i konstante za AA5083-H116 [7]									
E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	A [MPa]	B [MPa]	$\dot{\varepsilon}$ [s ⁻¹]	n	C	m	D _c
70	0.3	2700	167	596	1	0.551	0.001	0.859	1
C _p [J/kgK]	α	$\bar{\alpha}$ [K ⁻¹]	T _m [K]	T ₀ [K]	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
910	0.9	2.3 x 10 ⁻⁵	893	293	0.0261	0.263	-0.349	0.147	16.8

Projekttil je modeliran sa karakteristikama Arne alatnog čelika. Njegove karakteristike prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike Arne alatnog čelika					
σ_y [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	E_t [MPa]	ε_t [%]
1.9	0.33	7850	204	15	2.15

3. NUMERIČKA ANALIZA

Urađeni su numerički proračuni za AA5083H116 aluminijumske ploče različitih debljina i različite početne brzine projektila. Geometrija projektila prikazana je na slici 1.



Slika 1. Geometrija i dimenzije projektila sa konusnim vrhom

Za numeričke proračune korišćen je softver za eksplicitno rešavanje jednačina stanja u Lagranžovim koordinatama. Lagranžova formulacija je lakša za primenu kod ove vrste proračuna jer kod Ojlerove postoje poteškoće pri preciznom definisanju deformabilnih granica materijala i kontakta između projektila i ploče. Kod Lagranžove formulacije mreža se pomera i deformiše sa materijalom koji je modelovan tako da je održanje mase automatski zadovoljeno. Parcijalne diferencijalne jednačine o održanju količine kretanja koje povezuju ubrzanje sa naponskim tenzorom izgledaju:

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (6)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (7)$$

Jednačina o održanju energije predstavljena je preko relacije:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\varepsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\varepsilon}_{zx}) \quad (7)$$

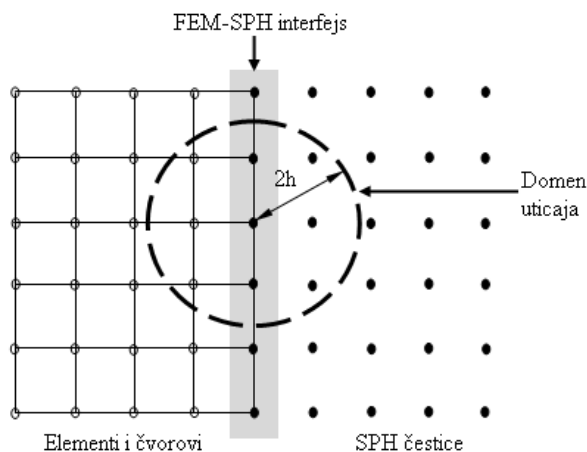
Treba napomenuti da softver nameće samo održanje mase i količine kretanja dok se održanje energije posmatra zbog procene kvaliteta rešenja. Nedostatak rešavanja Lagranžove formulacije metodom konačnih elemenata je problem velikih izobličenja elemenata, prekida elemenata i pojave negativnih zapremina. Postoje metode rešavanja ovog problema, na primer uvođenjem erozije elemenata, međutim u poslednje vreme sve aktuelnije je uvođenje SPH domena u domen velikih deformacija.

SPH je nehomogen Lagranžev metod razvijen za opisivanje astrofizičkih pojava međutim pogodan je za rešavanje problema udara u kojima su aktuelne velike deformacije i oštećenje materijala [8]. Kod SPH metoda sistem je predstavljen skupom čestica i njihove promenljive računaju se pomoću „kernel“ interpolacione funkcije. Integralna reprezentacija t.j. kernel aproksimacija za funkciju $f(x)$ za poddomen Ω prikazana je u obliku:

$$\langle f(x) \rangle \cong \int f(x') W(x-x', h) dx' \quad (8)$$

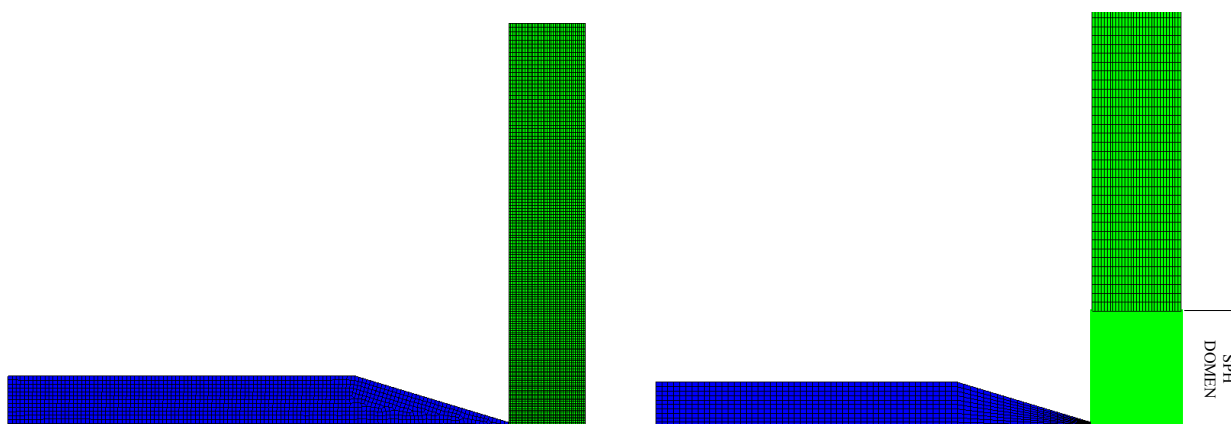
gde je W kernel funkcija, a h definiše veličinu domena uticaja funkcije W (slika 2). Kubna B-splajn funkcija se najčešće koristi za poravnanje kernel funkcije.

Kombinovana (uparena) metoda (SFM) koristi se za optimizaciju i najbolje iskorišćenje računarskih resursa. Ovim metodom modeluje se SPH domen samo u zoni velikih deformacija i očekivanih velikih oštećenja čime se smanjuje broj SPH čestica, odakle sledi znatno kraće vreme proračuna. Štaviše, upotrebom FEM za ostatak proračunskog domena poboljšava se tačnost rešenja. SPH čestice sa domenom uticaja i interfejs SPH-FEM kod SFM metode prikazani su grafički na slici 2.



Slika 2. SPH domen sa dužinom domena uticaja h i SPH-FEM interfejs

Za sve analize, kako za metod konačnih elemenata tako i za kombinovani metod korišćen je osnosimetričan model. Deo FEM i SFM mreža korišćenih za analizu prikazane su na slici 3.



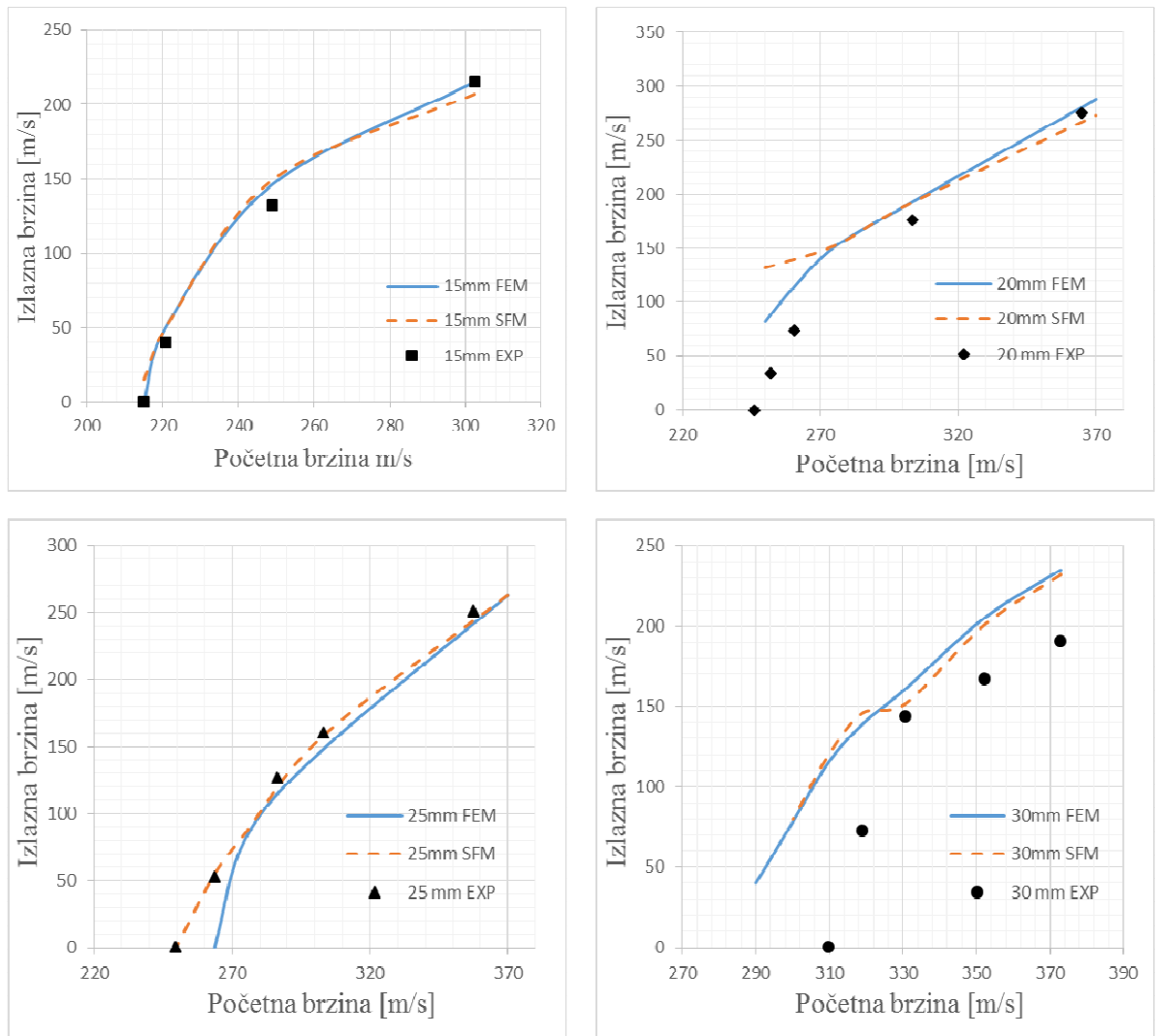
Slika 3. Proračunske mreže za FEM (levo) i SFM (desno)

Kod eksplicitnih solvera vremenski korak određen je veličinom dijagonale najmanjeg elementa u proračunskoj mreži. Stoga, sitnija mreža smanjuje potrebni vremenski korak što negativno utiče na vreme trajanje proračuna. Analize sa nekoliko različitih mreža su urađene kako bi se našla optimalna proračunska mreža po pitanju tačnosti i vremena trajanja proračuna. U slučaju SFM analiza variran je razmak između SPH čestica i veličina SPH domena kako bi se utvrdila optimalna kombinacija.

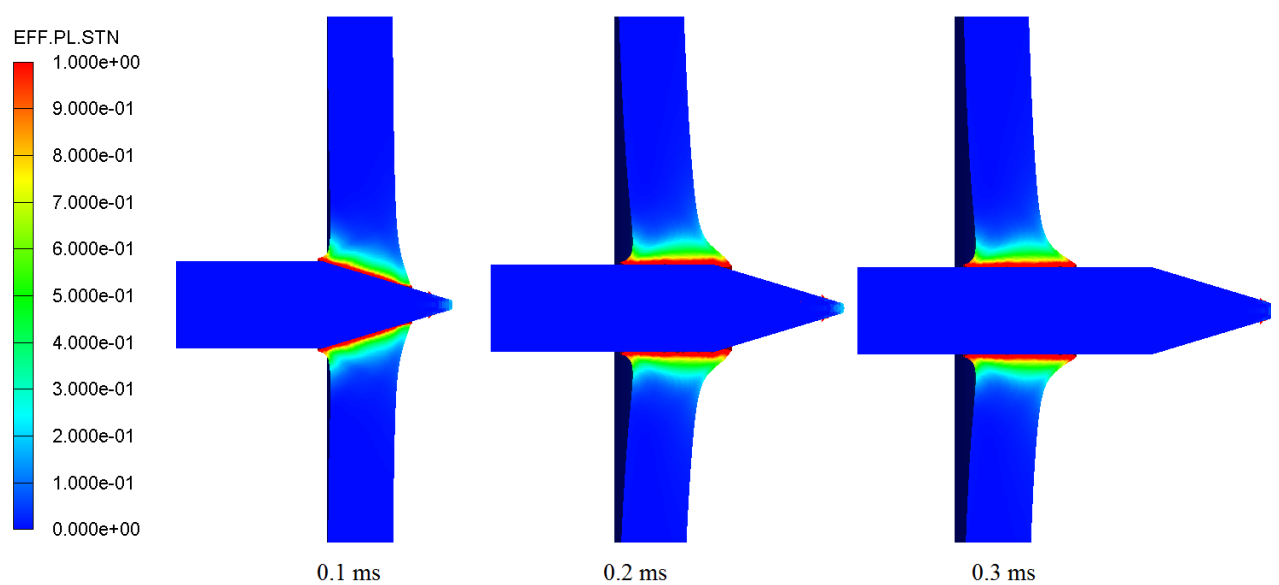
4. REZULTATI

Analize su urađene za raspon početnih brzina od 200 m/s do 400 m/s. Debljina aluminijumskih ploča je varirana od 15 mm do 30 mm. Izlazna brzina projektila merena je kada se brzina projektila pri perforaciji nakon izlaza iz ploče stabilizovala. Dobijeni rezultati poređeni su eksperimentalnim rezultatima koji su dobili Borvik et. al. [1]. Na slici 4 prikazano je poređenje rezultata za FEM i SFM analiza sa eksperimentalnim rezultatima. Na slici 5 prikazana je efektivna plastična deformacija za nekoliko različitih vremenskih trenutaka prilikom perforacije aluminijumske ploče debljine 15mm početnom inicijalnom brzinom projektila

302,4 [m/s]. Može se uočiti da lom ploče nastaje usled duktilnog širenja rupe. Slično ponašanje primećuje se i kod ostalih slučajeva za koje je vršen proračun.



Slika 4. Poređenje rezultata dobijenih FE i SF metodom sa eksperimentalnim rezultatima



Slika 5. Efektivna plastična deformacija za različita vremena tokom perforacije ploče.

5. ZAKLJUČAK

Johnson-Cook-ov konstitutivni model i metod konačnih elemenata kako i upareni metod (SFM) iskorišćeni su kako bi se napravila numerička analiza udara čeličnog projektila u aluminijumsku ploču velikim brzinama. Analize su pokazale da za ploče manjih debljina postoje prilično dobra poklapanja sa eksperimentalnim podacima dok za ploče veće debljine javljaju se značajnija odstupanja. Takođe numerički rezultati više odstupaju od eksperimentalnih u oblasti nižih brzina udara.

Kako bi se poboljšao numerički model i dobijeni rezultati približili eksperimentalnim, kod ploče većih debljina moguće je uvesti uticaj promene temperature u JC konstitutivni model čvrstoće materijala i uvesti uticaj trenja koje se javlja prilikom interakcije projektila i ploče.

6. LITERATURA

- [1] Borvik, T., Clausen, A.,H., Hopperstad, O.,D., Langseth, M.: *Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles – experimental study*, International Journal of Impact Engineering, Vol.30, 367-384, 2004.
- [2] Grytten, F.: *Low-Velocity Penetration of Aluminium Plates*, Phd Thesis, Trondheim, 2008.
- [3] 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 Sevenths International Symposium on Ballistics, The Hague, 1983.
- [4] Borvik, T., Forrestal, M.,J.,Hopperstad, O.,S., Warren, T.,L., Langseth, M.: *Perforation fo AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles – Calculations*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 36, 426-437, 2009.
- [5] Liu, Z., S., Swaddiwhipong, S., Islam, M., J.: *Perforation of steel and aliminum targets using a modified Johnson-Cook material model*, Nuclear Engineering and Design, Vol.250, 108-115, 2012.
- [6] Johnson, G.,R., Cook, W.,H.: *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates,temperatures and pressures.* Engineering Fracture Mechanics, Vol.21(1), 31-48, 1985.
- [7] Clausen, A., H., Borvik, T., Hopperstad, O., S., Benallal, A.: *Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality*, Materials Science and Engineering, A364, 260-272, 2004.
- [8] Johnson, G., R., Stryk, R., A., Beissel, S., R.: *SPH for high velocity impact computations*, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 139, 347-373, 1996.

Ivanov, T., Spasić, D., Komarov, D., Simonović, A.

NUMERICAL ANALYSIS OF PROJECTILE IMPACT ON FLAT ALUMINIUM PLATE

Abstract: In this paper numerical analysis of a projectile impact on an aluminuim plate is shown. Flat plates made of AA5083H116 aluminium-magnesium alloy with different thicknesses are considered. Material properties used in the numerical analysis are modeled using the Johnson-Cook constitutive models for material strength and fracture criterion. Conical-nosed projectile made of Arne-tool steel is considered. Analysis using the finite element method (FEM) and the coupled SPH-FE method where the large deformations zones are modeled using SPH and the rest of the domain is modeled using FEM are made. Obtained results are compared to experimental result found in literature.

Key words: Impact analysis, FEM, SPH, Johnson-Cook constitutive models



M. Janjić¹, D. Đurašković²

MODELIRANJE I SIMULACIJA NAPREZANJA KALJENIH STAKLENIH PLOČA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Rezime

Razvoj informacionih tehnologija, odnosno digitalnih računara, učinio je da je računar, u posljednje vrijeme, postao nezamjenljivo sredstvo u svim fazama istraživanja, razvoja, projektovanja, konstruisanja, proizvodnje, korišćenja i održavanja proizvoda i sistema različite fizičke prirode [7]. U ovom radu, prikazano je numeričko modeliranje naponsko deformacionog stanja opterećene kaljene staklene ploče bazirane na teoriji MKE. Korišten je programski paket ANSYS. Takođe, izvršena je upoređana analiza numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

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

1. UVOD

Pojava 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 [8]. Ubrzan razvoj računara uslovio je razvoj 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 [2]. 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. Odgovor na te izazove su vrste stakla koje u sebi ujedinjavaju mnoge karakteristike: aktivne, pasivne i konstrukcijske zaštite. Tu posebno značajno mjesto zauzima termički ojačano staklo tzv. kaljeno staklo. Ovo staklo je i do pet puta čvršće i otpornije na temperaturne razlike od običnog, što ga preporučuje prilikom izrade staklenih vrata, ograda, nadsrešnica tj. gdje god postoji opasnost od eventualnih povreda izazvanih lomom. Kaljeno staklo spada u grupu sigurnosnih stakala, jer se prilikom loma rasprši u veliki broj sitnih zatupljenih komadića koji ne mogu izazvati ozbiljne povrede. Cilj istraživanja ovog rada je posvećen istraživanju naponsko deformacionih parametara, kaljenih staklenih ploča pomoću ANSYS softverskog paketa, primjenom metode konačnih elemenata. Izvršit će se upoređna analiza numeričkih rezultata i rezultata dobijenih eksperimentalnim istraživanjima [1].

¹ Prof. dr Mileta Janjić, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet Podgorica, ul. Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, e-mail: mileta@ac.me

² Mr Dragana Đurašković, Fab live d.o.o, Mahala bb, 81000 Podgorica, e-mail: draganadjuraskovic94@gmail.com

2. NUMERIČKA MKE SIMULACIJA

2.1. Osnovni koraci u MKE

Metoda konačnih elemenata spada u metode diskretne analize. Za razliku od ostalih numeričkih metoda, koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina graničnih problema, MKE se zasniva na fizičkoj diskretizaciji razmatranog područja. Umjesto elementa diferencijalno malih dimenzija, osnovu za sva proučavanja predstavlja dio područja konačnih dimenzija, manje područje ili konačni elemenat [8]. Sa stanovišta fizičke interpretacije, to znači da se razmatrano područje, kao kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode, zamenjuje 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. Procedura proračuna po MKE nekog problema odvija se u šest koraka:

1. Diskretizacija domena i izbor vrste elementa,
2. Izbor interpolacionih funkcija,
3. Sračunavanje karakteristika elemenata (definisanje relacije deformacija-pomjeranje, napon deformacija, matrica krutosti),
4. Formiranje jednačina mreže konačnih elemenata,
5. Rješavanje sistema jednačina i
6. Proračun potrebnih uticaja.

Prva tri koraka su naročito važna, dok su posljednja tri danas toliko razvijena da spadaju u okvire rutinskog posla koji je prilagođen automatskom radu na računaru [4].

2.2. Numeričko modeliranje 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 [5]. U praktičnom smislu, faze analize određenog problema metodom konačnih elemenata u ANSYS-u su sljedeće [6]:

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 NAPREZANJA KALJENE STAKLENE PLOČE

3.1. Objekat istraživanja

Predmet modeliranja metodom konačnih elemenata u ANSYS softverskom paketu je kaljena 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 nikakavog upozorenja koje može ukazati na lom. Lom zavisi primarno od broja površinskih pukotina (površinska opterećenja), nivoa naprezanja, veličine napregnute površine i trajanja opterećenja. Pukotine u staklu mogu biti inherentne, ali se mogu uzrokovati i rezanjem, brušenjem i bušenjem. Isto tako, broj oštećenja zavisi od okoline kojom je staklo okruženo tokom eksploatacije. Kod kaljenog stakla pukotine se ne propagiraju zbog napona na pritisak na površini pa takvo staklo može podnijeti veća opterećenja od običnog stakla. U kaljenom staklu nastaje karakteristična distribucija naprezanja: molekuli na površini trajno su izloženi pritisku, a molekuli u

unutrašnjosti zateznim naprezanjima. Ta naprezanja moraju biti uravnotežena, jer je to uslov za stabilno stanje koje osigurava odgovarajuće sigurnosne osobine kaljenog stakla [2,3]. Kaljeno staklo se ne može naknadno obrađivati. Karakteristike stakla: gustina, Jungov modul elastičnosti i Poasonov broj su uzete iz literature.

Tabela 1. Ulazni parametri za ANSYS simulaciju kaljenog stakla 4[mm]

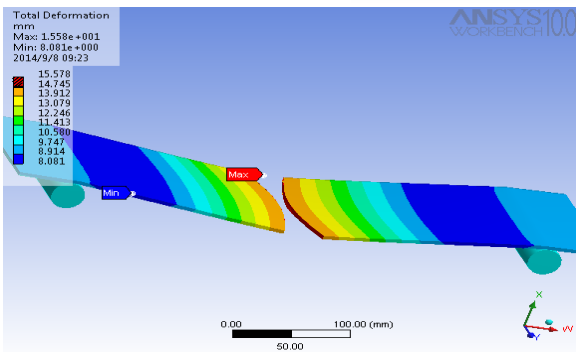
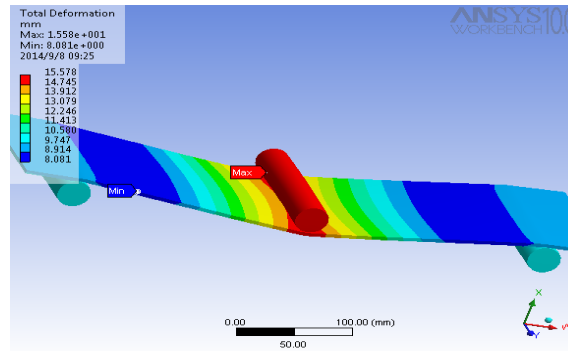
G E O M E T R Y	Graphics Properties	Visible	Yes	E N V I R O N M E N T	Definition	Ref.tempe.	22°C
		Transparency	1			inertia	off
	Definition	Suppressed	No		W e a k S p r i n g s R e a c t i o n F o r c e	Total	4.2692e-002 [N]
		Material	Glass			X componente	-3.2612e-005 [N]
	Bounding box	Length x	500 [mm]			Y componente	4.2692e-002 [N]
		Length y	4 [mm]			Z componente	-2.5739e-007 [N]
		Length z	150 [mm]			X comp.	0 [N]
	Properties	volume	3.e+005[mm ³]			Y comp.	-550 [N]
		mass	0.75 [kg]			Z comp.	0 [N]
	M E S H	Statistics	Nodes			21653	G L A S S
elements			3000	Jungov modul elas.[MPa]		82000	
	Defaults	Global control	basic	Poasonov broj		0.23	
		relevance	0	S T E E L	Gustina[kg/m ³]	7850	
C O N T A C T	Generate contact on update	Yes	M A T E R I A L		Jungov modul elas.[MPa]	200 000	
		slider			Poasonov broj	0.3	
	Tolerance slider	0			Gustina[kg/m ³]	7850	
	Tolerance value	1.315 [mm]			Jungov modul elas.[MPa]	200 000	
	Face / face	Yes			Poasonov broj	0.3	
	Face /edge	No					

4. REZULTATI SIMULACIJE MKE U ANSYS SOFTVERSKOM PAKETU

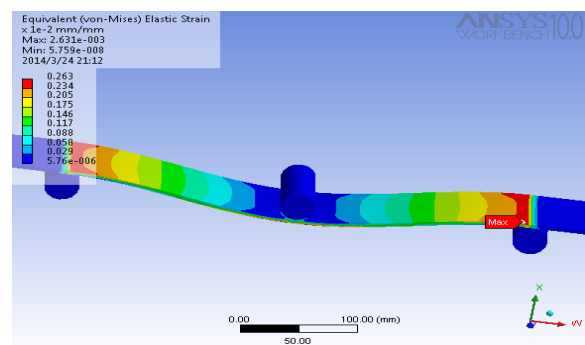
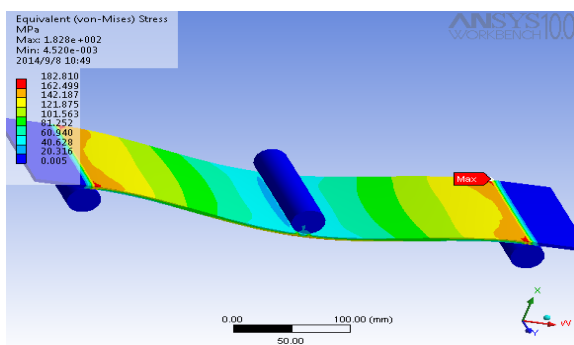
Na osnovu prethodno navedenih ulaznih podataka modeliranjem i simulacijom metodom konačnih elemenata u ANSYS-u došlo se do rezultata napona, deformacija i ugiba kod kaljenog stakla. Dio ANSYS-ovog modula mechanical *solution* nam nudi rezultate simulacije za ugibe, von-Mises-ove napone kao i maksimalne 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 [2].

Tabela 2. Izlazni rezultati simulacije u ANSYSU

SOLUTION	Jed.mjere	Kaljeno staklo 4 [mm]
Total deformation	[mm]	15.88
Von-Mises stress	[MPa]	182.81
Max. principal elastic stress	[MPa]	179.15
Min. principal elastic stress	[MPa]	14.57
Von-Mises strain		0.26
Max. principal elastic strain		0.22



Slika 1. Ugib kaljene staklene ploče debljine 4 [mm] **Slika 2. Mjesto loma kaljene staklene ploče debljine 4 [mm]**



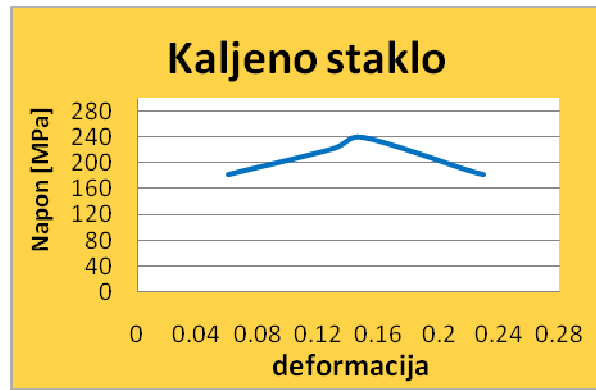
Slika 3. Distribucija von-Misesovih napona kod kaljene staklene ploče debljine 4 [mm]

Slika 4. Distribucija von-Misesovih deformacija kod kaljene staklene ploče debljine 4 [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 kaljenog stakla, koje je predmet istraživanja ovog rada.



Slika 5. Sila u funkciji debljine kod kaljenog stakla

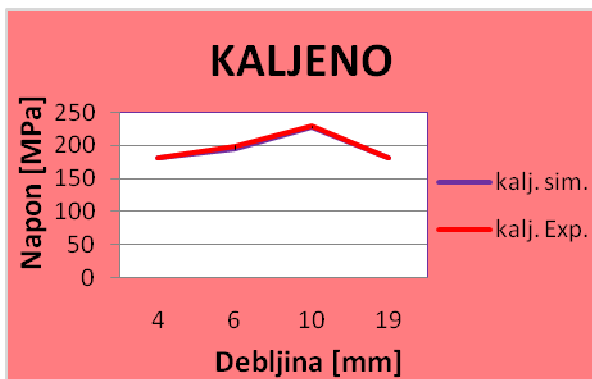


Slika 6. Dijagram zavisnosti napona i deformacija za kaljeno staklo

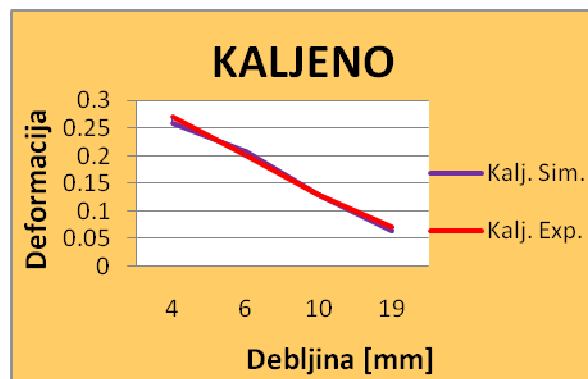
Na Slici 5. prikazano je opterećenje silom u funkciji debljine kod kaljenog stakla. Sa dijagrama se može uočiti, da je za lom staklene ploče do 10 [mm] debljine, rast sile neznan, dok se za deblja stakla ta vrijednost naglo uvećava, što pokazuje nagli skok krive. Sa dijagrama (Slika 6.) uočava se rast napona kod manjih deformacija, a zatim pad povećanjem deformacija.

5.UPOREDNA ANALIZA NUMERIČKIH I REZULTATA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIM ISTRAŽIVANJIMA

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 kaljene staklene ploče, dobijenih modeliranjem i simulacijom u ANSYS softverskom paketu sa eksperimentalnim [1]. U cilju dobijanja adekvatnih zaključaka sprovodi se analiza rezultata i vrši njihovo poređenje. Sa Slike 7. može se uočiti gotovo potpuno poklapanje napona za debljine 4, 6, i 8 [mm] dobijenih eksperimentalno i ANSYS simulacijom, dok je za debljinu 10 [mm] primjeren veći napon dobijen ANSYS simulacijom.



Slika 7. Naponi dobijeni ANSYS simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjima za kaljeno staklo



Slika 8. Deformacije dobijene ANSYS simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjima za kaljeno staklo

Na Slici 8. upoređeni su rezultati deformacija kod kaljenog stakla 4, 6, 10 i 19 [mm]. Najveća odstupanja su se pojavila kod kaljenog stakla 4 [mm], dok za ostale debljine odstupanje gotovo da ne postoji. Greška iznosi 0.015% što je svakako zadovoljavajuće. 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 kaljene staklene ploče.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih modeliranjem i simulacijom metodom konačnih elemenata (MKE) opterećene kaljene 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 kaljene 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 5. Za tanja stakla do 10 [mm], potrebno je djelovati daleko manjom silom, dok se proporcionalno sa povećanjem debljine povećava sila koja izaziva lom stakla. 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 kaljene 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 7. i 8. 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 kaljene 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] 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.
- [2] Đurašković D.: *Simulacija naprezanja i istraživanje profitabilnosti i održavanja pri obradi staklenih ploča* - Magistarski rad, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014.
- [3] Hajdinak R.: *Gradimo staklom*, Reflex d.o.o, Podgora, 2009.
- [4] Janjić M.: *Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja* - Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Podgorica, 2005.
- [5] Jovanović J.: *"Konstruisanje podržano računom"*, Mašinski fakultet, Podgorica, 2013.
- [6] Mandić V.: *Fizičko i numeričko modeliranje procesa obrade deformisanjem*, Kragujevac, 2012.
- [7] Nedić N., Pršić D.: *Računarsko modeliranje i simulacija u savremenoj tehnologiji upravljačkih komponenti i siste*, Mašinski fakultet Kraljevo i Mašinski fakultet Srpsko Sarajevo, Infoteh, Jahorina, 2001.
- [8] Vrekić S., Živković M., Milovanović M.: *Primjena metode konačnih elemenata u proračunima tankozidnih nosač*, Mašinski fakultet, Kragujevac, Juinfo, Kopaonik, 2006.

M. Janjić, D. Đurašković

MODELING AND SIMULATION OF STRESS TEMPERED GLASS PLATE BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: *The development of information technology and the digital computer, the computer did that, lately, has become an irreplaceable tool in all phases of research, development, design, construction, manufacture, use and maintenance of products and systems of different physical priode. This paper shows the numerical modeling of stress and strain state loaded tempered glass plates based on the theory of finite element method, which use the ANSYS software package. Also, there was a compareing analysis of numerical and experimental results.*

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



OBRADA SLOŽENIH POVRŠINA GLODANJEM – POREĐENJE STRATEGIJA OBRADNE

Rezime

U današnje vreme je sve češća upotreba delova sa složenim površinama u svim granama mašinstva više iz estetskih nego iz funkcionalnih razloga. Dok su geometrijski aspekti veoma dobro pokriveni i dalje ostaju problemi kada je u pitanju stvarna proizvodnja jer u zavisnosti od generisane putanje alata zavisi cena izrađenog dela. Kada se govori o izboru optimalne putanje alata mora se voditi računa o kvalitetu obrađene površine, minimizaciji ukupnog vremena obrade, kontroli intenziteta sile rezanja itd. U radu je prikazano poređenje različitih strategija obrade komercijalnih CAD/CAM softvera za obradu glodanjem loptastim glodalom na primeru jednog dela sa složenom površinom.

Ključne reči: Složena površina, putanja alata, loptasto glodalo

1. UVOD

Danas su mnogi proizvodi projektovani primenom slobodnih (složenih, skulptorskih) površina kako u brodogradnji, automobilskoj i avio industriji, tako i u procesu projektovanja livačkih i kovačkih kalupa za različite mašinske delove. Upotreba složenih površina je prevashodno iz estetskih razloga, međutim postoje i slučajevi kada je njihova upotreba iz funkcionalnih razloga. Kada se govori o složenim površinama neizostavna je upotreba CAD/CAM sistema kako bi se površina analitički opisala, a samim tim i odredila odgovarajuća putanja alata. Najčešći postupci obrade su 3 i 5 – osnim glodanjem loptastim glodalom. Kako je na loptastom delu glodala promenljiva brzina rezanja to je jako teško održavati važeće parametre procesa obrade, a sve u cilju postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta obrađene površine. Kvalitet i tolerancija obrađene površine direktno zavise od prethodno generisane putanje alata gde sa smanjenjem tolerancije eksponencijalno raste količina podataka koju treba smestiti u upravljačku jedinicu mašine alatke pa je u nekim slučajevima potrebno dati NC program deliti u segmentima što predstavlja dodatni problem za projektanta tehnologije [1]. Sila rezanja koja deluje na obradak je jedna od promenljivih koja značajno utiče na kvalitet obrađene površine pa je zbog toga potrebna dodatna pažnja pri izboru parametara procesa obrade da ne bi došlo do loma alata ili pak do preopterećenja pogonskih motora servo osa mašine alatke.

Određivanje putanje alata je veoma važan korak u procesu projektovanja tehnologije izrade delova sa složenim površinama. Kada se govori o određivanju optimalne putanje alata za obradu slobodnih površina potrebno je istovremeno zadovoljiti više parametara, kao što su: količina podataka koju treba smestiti u upravljačku jedinicu mašine alatke, kvalitet i tačnost obrađene površine, sile rezanja, ukupno vreme obrade i slično. Da bi se dobila optimalna putanja alata, a sve u cilju postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta obrađene površine i optimalnog vremena obrade prisutna su različita specifična ograničenja, na primer, za slučaj grube obrade potrebno je minimizirati vreme obrade dok kvalitet obrađene površine nije toliko značajan, dok kod završne obrade treba voditi računa da visina neravnina ne prelazi dozvoljeno odstupanje propisano tehničkom dokumentacijom, a pri tome vreme obrade nema značajnu ulogu u projektovanju tehnologije obrade. Idealna putanja alata bi trebala da obezbedi uniformnu raspodelu visine neravnina po obrađenoj površini [2]. Manja visina neravnina od propisane tehničkom dokumentacijom ne znači nužno i bolju putanju alata jer se povećanje broja prolaza odražava na povećanje vremena obrade, a time i cene datog dela.

Pri obradi slobodnih površina prisutne su sledeće faze: gruba, predzavršna i završna obrada. Pri gruboj obradi veliki deo materijala je skinut da bi se dobio približni oblik površine. Neravnine koje su ostale nakon

¹⁾ Goran Mladenović, dipl.inž.maš., (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Miloš Pjević, MSc.inž.maš., (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

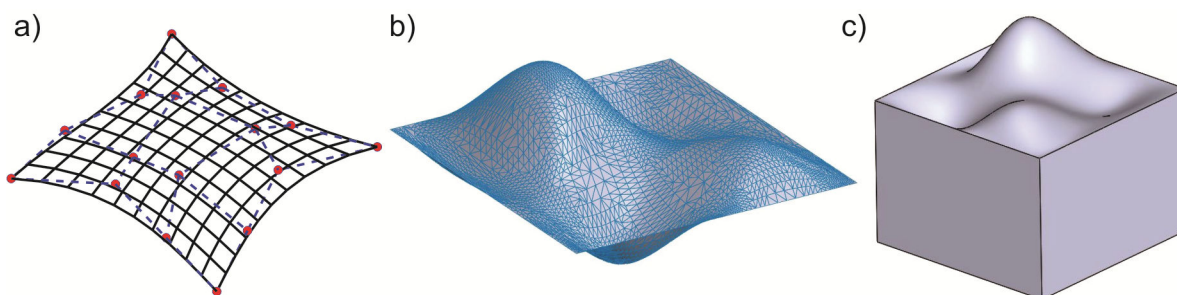
grube obrade, a koje su uslovljene upotrebom alata velikog prečnika se uklanjaju u predzavršnoj obradi da bi se dobila ofsetovana površina (na rastojanju jednakom dodatku za finu obradu) koja će se obraditi u završnoj obradi što dovodi do smanjenja ukupnog vremena obrade [3, 4]. Pri gruboj obradi je potrebno ukloniti što je moguće više materijala za što kraće vreme pa se u današnje vreme istraživanja usmeruju na tu stranu. Prilikom projektovanja tehnologije, izbor parametara obrade kao što je broj obrta glavnog vretana, brzina pomoćnog kretanja i dubina rezanja se vrši na osnovu iskustva projektanta ili na osnovu baze podataka izabranog CAM softvera [5].

Skulptorka površina je najčešće predstavljena kao bikubna Bezier-ova, B splajn ili NURBS površina, a definiše se preko kontrolnih tačaka koje su zadate u dekartovim koordinatama. Svaka tačka na površini se izračunava prema odgovarajućim obrascima u funkciji dva parametra, u i v. Osobina navedenih površina je da zadržavaju kontinuitet drugog reda koji je različit od nule čime se obezbeđuju kontinualni prelazi između površina. Zadavajući vrednost jednog parametra možemo odrediti krivu u funkciju drugog parametra čime se može generisati mreža površine, slika 1a.

Do sada su razvijena tri metoda obrade složenih površina i to:

- Izoparametarski metod – putanja alata se poklapa sa izoparametarskim linijama slobodne površine,
- Izoravanski metod – putanja alata se poklapa sa nekom od koordinatnih osa mašine alatke,
- Izohrapavi metod – određena putanja alata respektuje uslov iniformne raspodele visina neravnina obrađene površine.

Rad predstavlja uporednu analizu više komercijalnih CAD/CAM softvera za proces predobrade i grube završne obrade na primeru dela prikazanog na slici 1c koji je modeliran upotrebom CAD softverskog paketa SolidWorks2014.



Slika 1. Mreža površine (a), CAD model generisanje površine (b), solid model dela za obradu (c)

2. POREĐENJE STRATEGIJA OBRADNE

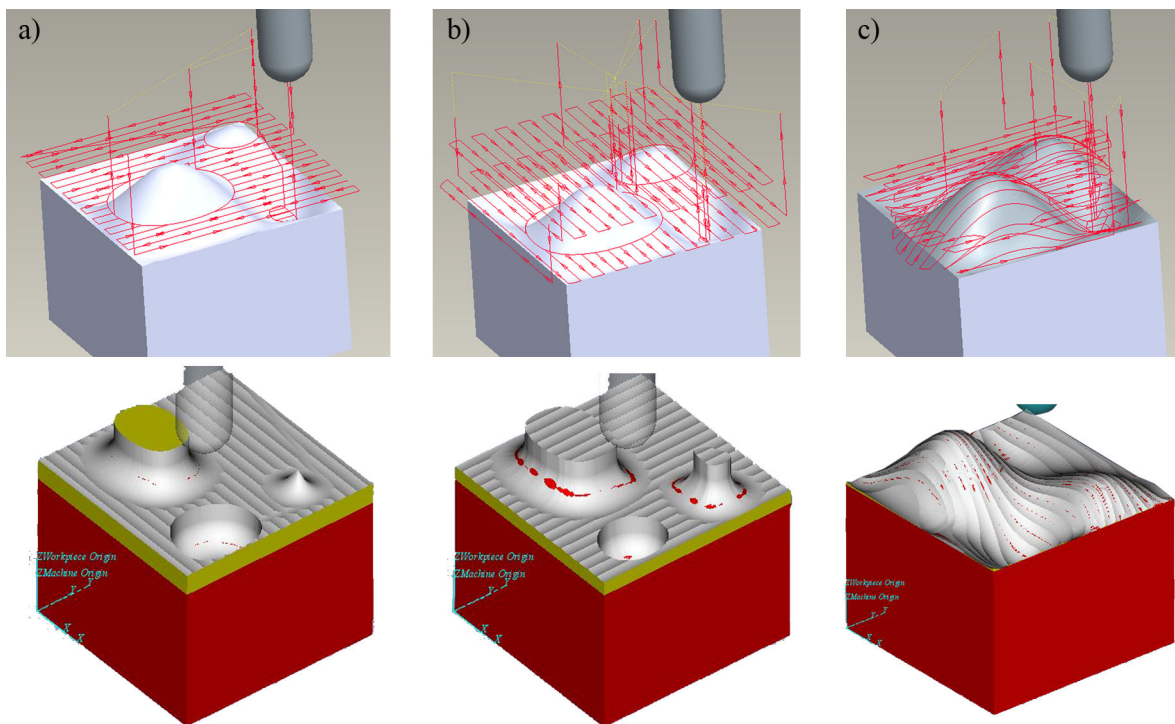
U cilju pregleda trenutnog stanja komercijalnih CAD/CAM softvera u nastavku se daje pojedinačni opis postupka generisanja putanje alata za obradu 3-osnim glodanjem gore navedenog dela sa opisom prednosti i nedostataka korišćenih softvera. Korišćeni parametri obrade su: alat – loptasto glodalo sa dva zuba prečnika 12mm i ugla nagiba zavojnog žljeba 30° materijala HSSE (8% Co), brzina rezanja 40m/min čemu odgovara broj obrta glavnog vretana od 1060o/min, material obratka AlMg4.5Mn dimenzije 50x50x50mm. Brzina pomoćnog kretanja i dubina rezanja variraju od strategije do strategije, a sve u cilju minimizacije ukupnog vremena obrade. Veličina poprečnog koraka je usvojena da bude 3mm, a određena je na osnovu maksimalno dozvoljene visine neravnina koja je u ovom slučaju usvojena da bude 0.19mm. Analizom geometrije priprema i gotovog dela je utvrđeno da dubina rezanja varira u opsegu 1.8 – 22.3mm, pa je na osnovu maksimalne dubine rezanja i usvojene vrednosti poprečnog koraka upotrebom razvijenog softvera [1] dobijena vrednost brzine pomoćnog kretanja tako da maksimalna sila u ravni upravnoj na osu alata ne pređe vrednost od 600N čime se izbegava mogućnost da dođe do loma alata.

2.1 Pro/ENGINEER Wildfire 4.0®

Prethodno modeliran deo je uvežen u CAM modul softvera Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 gde je izvršeno modeliranje priprema i definisanje parametara operacije. Izabrani softver ima mogućnost izbora više različitih strategije obrade, kao što su: zapreminsko glodanje, glodanje po trajektoriji, predobrada, površinsko glodanje, izarada rupa i otvora itd. Radi preglednosti, poredjenje različitih stragegija obrade je prikazano u tabeli 1 sa navedenim parametrima koji mogu da budu iskorišćeni radi izbora optimalne strategije obrade izabranog softvera.

Tabela 1. Usporedna analiza više strategija obrade softvera Pro/ENGINEER Wildfire 4.0					
Naziv strategije obrade	Maksimalna dubina rezanja [mm]	Brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	Glavno vreme obrade [min]	Broj rečenica NC koda	Oznaka slike putanje alata
Zapreminsko glodanje (Volume milling)	10	80	20:54	288	sl. 2a
Gruba obrada (Roughing)	10	80	39:63	250	sl. 2b
Površinsko glodanje (Surface mill)	10	80	28:05	1057	sl. 2c

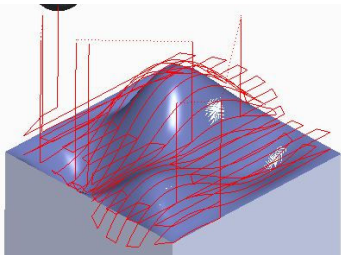
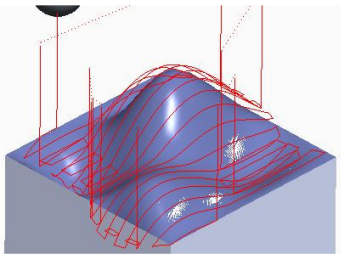
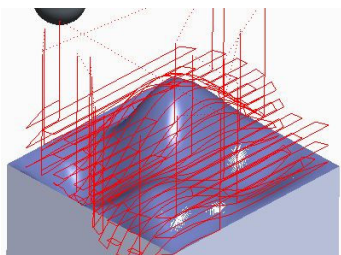
Radi preglednosti na slici 2 su prikazane tri generisane putanje alata gde se uočavaju nedostaci pojedinih strategija obrade. Za prikaz simulacije procesa obrade korišćen je modul Vericut izabranog softvera. Na osnovu tabele 1 može se uočiti da postoji razlika u vremenima obrade do 35%. Kada se govori o izboru optimalne putanje alata mora se uzeti u obzir više kriterijuma. Ukoliko je kriterijum za izbor putanje alata minimizacija vremena obrade svakako će se izabrati strategija sa slike 2a, međutim data strategija za sobom povlači da se nakon nje mora koristiti stragetija pod nazivom “Re-rough” koja uklanja nedostatke prethodne obrade da bi se dobio približni oblik željene površine što će se svakako odraziti na povećanje ukupnog vremena obrade date površine. Izborom strategije sa slike 2b dobija se ušteda u memoriji upravljačke jedinice mašine alatke, ali se vreme obrade znatno povećava. Ukoliko se zahteva da je gruba obrada ujedno i završna obrada opravdano je korišćenje stragetije sa slike 2c koja ima veće vreme obrade u odnosu na minimalno moguće za grubu obradu (sl. 2a), ali se to povećanje vremena obrade opravdava činjenicom da nakon izabrane obrade (sl. 2c) nije potrebna naknadna obrada.



Slika 2. Putanja alata i izgled obrađenog dela za izabrane strategije obrade

2.2 Creo Parametric 2.0®

Po istoj proceduri kao i za prethodno opisani softver izvršeno je projektovanje tehnologije za grubu obradu dela prikazanog na slici 1c. Pošto je izabrani softver razvijen na osnovi prethodnog to je i logika projektovanja tehnologije slična za oba CAD/CAM paketa. Creo parametric 2.0 je nastao 4 godine nakon Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 i doneo je par novih strategija obrade, međutim ni jedna od njih se ne odnosi na obradu složenih površina. Iz ovog razloga se u nastavku daje detaljnija analiza strategije površinskog glodanja (Surface mill) jer se pretpostavlja da je, u ovom slučaju data grubu obradu ujedno i završna. Parametri koji su varirani, a koji utiču na kvalitet i ukupno vreme obrade su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Usporedna analiza više strategija površinske obrade softvera Creo Parametric 2.0					
RB	Maksimalna dubina rezanja [mm]	Brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	Glavno vreme obrade [min]	Broj rečenica NC koda	Putanja alata
1	10	80	27:06	1065	
2	15	40	41:52	925	
3	5	160	23:88	1279	

Analizirajući podatke date u tabeli 2 može se doći do sledećih zaključaka:

- U pogledu izbora parametara procesa obrade kojima odgovara minimalno ukupno vreme obrade, a uz zanemarivanje broja rečenica NC koda i kvaliteta obrađene površine opravdano je korišćenje obrade sa manjim dubinama rezanja i većim brzinama pomoćnog kretanja,
- Kako se kod izabrane strategije putanja alata poklapa sa nekom od koordinatnih osa mašine alatke to se na mestima gde je nagib površine veći dobija veća hrapavost od propisane jer poprečnom koraku od 3mm i radijusu loptastog dela glodala od 6mm odgovara visina neravnina od 0.19mm samo na ravnom delu površine

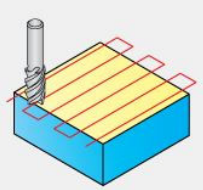
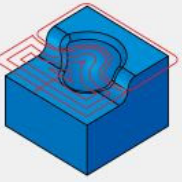
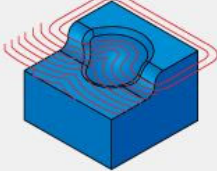
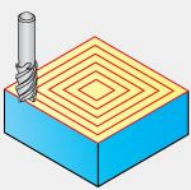
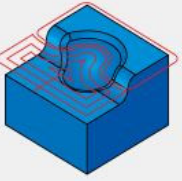
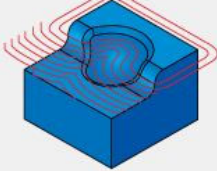
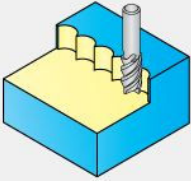
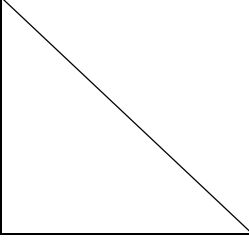
Ukoliko se u parametrima za definisanje izabrane strategije obrade pod rednim brojem 1 iz tabele 2 doda zahtevana visina neravnina dobija se putanja alata koja ima u svom NC kodu 1593 rečenica i ukupno vreme obrade od 45:54 min.

2.3 SolidCAM 2010®

Po preceduri kao u odeljku 2.1 izvršeno je projektovanje tehnologije izrade dela prikazanog na slici 1. Izabrani softverski paket SolidCAM 2010, pored ostalih ima strategiju obrade pod nazivom „3D MILLING OPERATION“ u okviru koje se dalje mogu definisati dodatna podešavanja. Prvo se odnosi na strategiju obrade koja može biti:

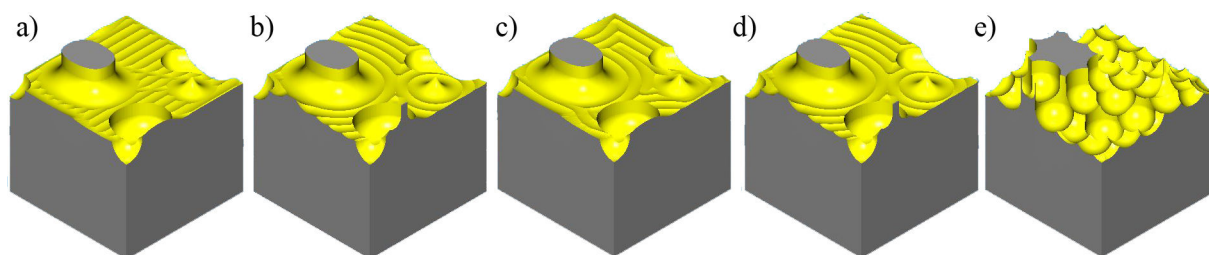
- Hatch – putanja alata se poklapa sa jednom od koordinatnih osa mašine alatke,
- Contour – putanja alata predstavlja ofsetovanu konturu dela za veličinu poprečnog koraka,
- Plunging pattern – proces obrade je sličan procesu bušenja tako da se putanja alata u zahvatu poklapa sa Z osom mašine, a na delu ostaju udubljenja koja su jednaka prečniku alata.

Prve dve strategije obrade imaju dodatni izbor podstrategija koje se odnose na dodatno definisanje kretanja alata prilikom izrade džepova. Zbog specifičnosti strategije “Plunging pattern” ne postoji izbor dodatne podstrategije obrade kao kod prethodne dve. Usporedna analiza više strategija izabranog softvera za iste parametre procesa obrade kao i prethodno analiziranog (Pro/ENGINEER) je prikazana u tabeli 3.

Tabela 3. Usporedna analiza više strategija grube obrade softvera SolidCAM 2010						
Skica strategije obrade	Skica podstrategije obrade	Maksimalna dubina rezanja [mm]	Brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	Glavno vreme obrade [min]	Broj rečenica NC koda	Slika dela
 Hatch		10	80	17:38	884	sl.3a
		10	80	12:35	430	sl.3b
 Contour		10	80	15:06	1043	sl.3c
		10	80	12:20	425	sl.3d
 Plunging pattern		10	80	12:39	119	sl.3e

Analizom rezultata datih u tabeli 3 može se doći do zaključka da prva strategija ne daje velike razlike u pogledu ukupnog vremena obrade u odnosu na strategiju zapreminskog glodanja softvera Pro/ENGINEER, dok je međutim, broj rečenica NC koda znatno veći kod ovog softvera. Ostale četiri strategije daju kraće vreme obrade, a posebno peta strategija uz to i najmanji broj rečenica NC koda, međutim postavlja se pitanje koliko je data strategija upotrebljiva za slučaj obrade loptastim glodalom malog prečnika kao što je u ovom slučaju 12mm.

Na slici 3 su prikazane simulacije procesa obrade glodanjem za date strategije odakle se može primetiti da se pri svakoj izabranoj strategiji dobija približni oblik površine koji zahteva dodatnu dalju obradu.



Slika 3. Prikaz simulacije procesa obrade izborom datih strategija softvera SolidCAM

Radi poređenja sa softverom Creo Parametric gde je za 45:54 minuta dobijena kompletno obrađena površina sa visinom neravnina od 0.19mm, u slučaju softvera SolidCAM upotrebom strategije sa slike 3d uz dodatnu završnu obradu isti oblik površine se dobija za ukupno vreme obrade od 38:59 min.

3. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena uporedna analiza 3 vodeća CAM softvera na primeru jednog dela sa istim parametrima procesa obrade i zahtevanim kvalitetom obrađene površine. Utvrđeno je da izbor strategije obrade u velikoj meri utiče na ukupno vreme obrade, broj rečenica NC koda i kvalitet obrađene površine. Izbor adekvatne strategije obrade zavisi prvenstveno od zahteva korisnika gde je na primer, sa zahtevom da gruba obrada bude ujedno i završna obrada opravdano korišćenje strategije površinske obrade softvera Pro/ENGINEER ili Creo Parametric. U slučaju da je nakon grube obrade potrebna dodatna obrada neznatna je razlika u vremenima sva tri izabrana softvera jer će u svakom slučaju biti potrebna predzavršna i završna obrada.

Razlika u vremenima obrade delova sa slike 1 i slike 3 se može objasniti i činjenicom da nije ista količina zapremine koja se skida grubom obradom za sva data dva softvera, pa bi i ovo trebalo uvrstiti kao kriterijum za dalju analizu jer je povoljnija strategija obrade koja skida što je moguće više zapremine u procesu grube obrade kako bi u procesu fine obrade mogli da se koriste alati manjeg prečnika.

Za slučaj kada je gruba obrada ujedno i završna obrada potrebna je dodatna analiza strategija optimizacije putanje alata po više kriterijuma. Jedan od kriterijuma je da se cela površina obrađuje iz jednog prolaza uz variranje brzine pomoćnog kretanja u cilju održanja konstantne sile rezanja, a danas su istraživanja usmerena na tu stranu.

4. LITERATURA

- [1] G. Mladenović, Lj. Tanović, M. Popović: *Tool Path Optimization For Machining Of Free Form Surfaces*, Proceedings of the XII International Conference Maintenance And Production Engineering, pp. 239-247, Budva, Engineering Academy Of Montenegro, Montenegro, June, 2014
- [2] C. Manav, H.S. Bank, L. Lazoglu: *Intelligent toolpath selection via multi-criteria optimization in complex sculptured milling*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 24, Issue 2, pp. 349–355, 2011.
- [3] Y.S. Lee, B.K. Choi, T.C. Chang, *Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining*, International Journal of Production Research, 30 (6) (1992), pp. 1447–1470
- [4] Y. Ren, H.T. Yau, Y.S. Lee, *Clean-up tool path generation by contraction tool method for machining complex polyhedral models*, Computers in Industry, 54 (1) (2004), pp. 17–33
- [5] Cus F., Zuperl U., Kiker E., Milfelner M., *Adaptive controller design for feedrate maximization of machining process*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 17, pp. 237–239, 2006.
- [6] *Solidcam 2010 Getting Started*, SolidCAM Inc., Newtown, PA 18940, United States, 2010
- [7] *Solidcam 2010 3d Milling User Guide*, SolidCAM Inc., Newtown, PA 18940, United States, 2010
- [8] PTC® PRODUCT & SERVICE ADVANTAGE, <http://www.ptc.com>, 2014
- [9] 3D CAD Design Software SOLIDWORKS, <http://www.solidworks.com>, 2014

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

FREE FORM MACHINING – COMPARISON OF MACHINING STRATEGIES

Abstract

Today, many products are designed by using freeform (sculptured) surfaces, in all fields of mechanical engineering industries more for aesthetic than functional reasons. While the geometric aspects of the design are relatively well-covered, issues still remain when it comes to the actual manufacture of freeform surfaces because of depending of generated toolpath depends price of machined part. When it talking about choosing the optimal tool path it must be taken into account the required surface quality, the minimization of the total machining time, the control of the magnitude of the cutting forces, etc. The paper presents a comparison of different machining strategies of commercial CAD/CAM software for ball-end milling on the example of a part with complex surface.

Key words: Freeform surface, toolpath, ball-end mill



Nikolić S., Randelović S.¹⁾

FEM MODEL BRIZGANJA TERMOPLASTA U NESIMETRIČNOM ALATU

Rezime:

Razvoj novih proizvoda tehnologijom injekcionog brizganja plastike je nezamisliv bez generisanja virtuelnog prototipa, odnosno 3D modela u nekom CAD programu. Takav model je osnova i ulazna informacija za virtualnu analizu fizičkih pojava unutar i oko kalupne šupljine koji projektantu doskora nisu bili dostupni. Pored toga analiza 3D modela omogućuje: prostornu i estetsku vizuelizaciju budućeg proizvoda, analizu geometrijskog odnosa podsklopova složenog proizvoda; 3D štampanje prototipova i kalupa za injekciono brizganje prototip delova, automatsko generisanje NC koda isl. Analizom i simulacijom injekcionog brizganja zasnovanoj na metodi konačnih elemenata (FEM), u specijalizovanim softverskim programima dobijaju se pravi i suštinski rezultati koji ukazuju na eventualne greške i kritična mesta u ranoj fazi projektovanja.

Ključne reči: brizganje plastike, FEM model, pritisak, temperatura

1. UVOD

Brizganje je jedna od najnaprednijih i najčešćih metoda prerade plastike. Ovo je najbolji metod masovne proizvodnje složenih proizvoda trodimenzionalnog oblika i promenljive debljine zida.

Tehnološki opis ove tehnologije bi bio u najkraćem polimerni materijal se zagreva do tečnog stanja, zatim se injekciono ubrizgava u kalupnu šupljinu alata, a potom se hlađenjem stabilizuje u željeni oblik predviđenih dimenzija.

Sam proces injekcionog brizganja nije ni približno jednostavan kako je to prethodno opisano. Radi se o izuzetno složenim termodinamičkim i mehaničkim procesima kojima je izložen sistem sačinjen od termoplasta, kalupa i mašine, čija optimizacija treba da dovede do izrade proizvoda sa čitavim nizom željenih performansi [1]. Optimizacija i poboljšanje procesa injekcionog brizganja zahteva detaljno poznavanje i praćenje parametara tokom samog procesa unutar i oko kalupne šupljine. Pored toga i posedovanja iskustva potrebnog za uspešnu izradu proizvoda ovom tehnologijom, novi zahtevi tržišta i svakodnevna pojava različitih vrsta polimera na tržištu, kao mašina i alata za industriju plastike, postavljaju tehnološke probleme koji se teško mogu uspešno realizovati bez primene savremenih softvera za simulaciju injekcionog brizganja. U ovom radu je prikazano rešavanje realnih problema injekcionog brizganja plastike u alatu sa dve različite kalupne šupljine specifičnog oblika, uz podršku specijalizovanog programa Moldex3D za virtuelnu proizvodnju, odnosno simulaciju.

2. MODELIRANJE MATERIJALA, ALATA I MAŠINE

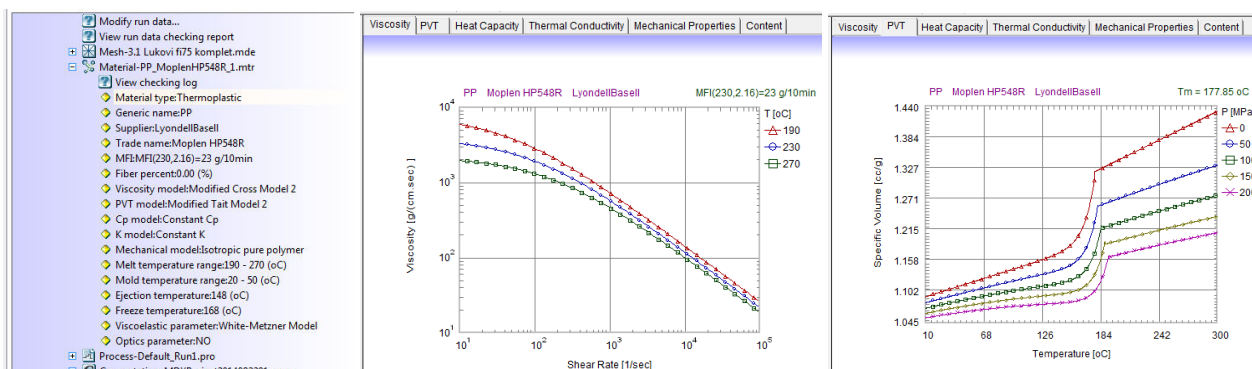
Na praktičnom primeru iz ovog rada je prikazan proces projektovanja alata za injekciono brizganje cevni lukova $\varnothing 75/45^\circ$ i $\varnothing 75/90^\circ$ iz asortimana građevinske industrije (sl.3). Danas su termoplastične mase nezamenljive u proizvodnji elemenata kućne kanalizacione instalacije. S obzirom da se radi o elementima koji su standardizovani, nema mnogo nedoumica oko dimenzija ovih plastičnih delova, osim radijusa i tehnoloških konusa koji treba da olakšaju izbacivanje delova iz alata.

U cilju ekonomičnosti izrađen je alat sa dva različita gnezda, za cevne lukove $\varnothing 75/45^\circ$ i $\varnothing 75/90^\circ$. S obzirom da je sada u pitanju alat sa dve različite kalupne šupljine, neophodno je dizajnirati ulivnu granu koja treba da razvede rastoplenu plastiku od kupastog ulivka do kalupnih šupljina i ulivnih ušća na različitim

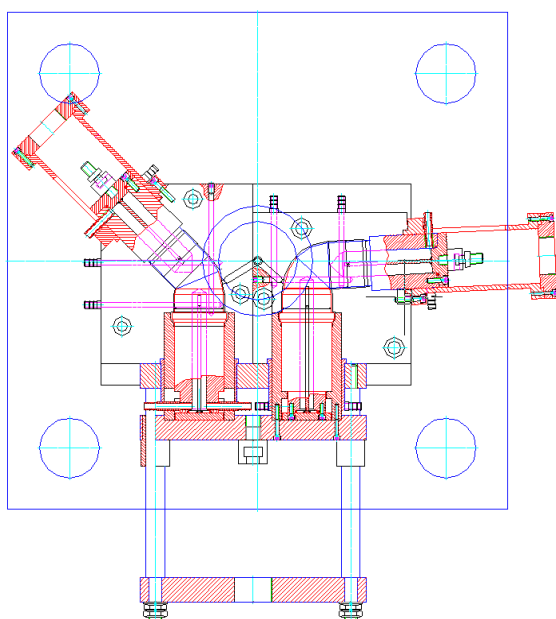
¹ Dr Randelović Saša, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, ul. Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš
sassa@masfak.ni.ac.rs

mestima, što dovodi do drugih uslova strujanja rastopljene plastike, i termodinamičkih uslova, koji mogu da dovedu do problema i neostvarivanja željenih rezultata [2,3].

Za izradu lukova $\varnothing 75/45^\circ$ i $\varnothing 75/90^\circ$ koristi se polipropilen PP zbog njegovih opšte poznatih osobina koji ga čine jednim od najupotrebljavanijih termoplasta. Specifičnost ovih plastičnih delova je unutrašnji žleb za zaptivanje koji formira bočni trn sa jedne strane. Elastičnost PP na povišenoj temperaturi na kojoj se deo vadi iz alata, kao i tehnološki konusi i izbalansirana debljina zida na tom delu proizvoda, dozvoljavaju nasilno izvlačenje bočnog trna iz dela, pri čemu nesme doći do plastične deformacije, ili pucanja dela.



Slika 1. Izabrani parametri i karakteristike modela materijala



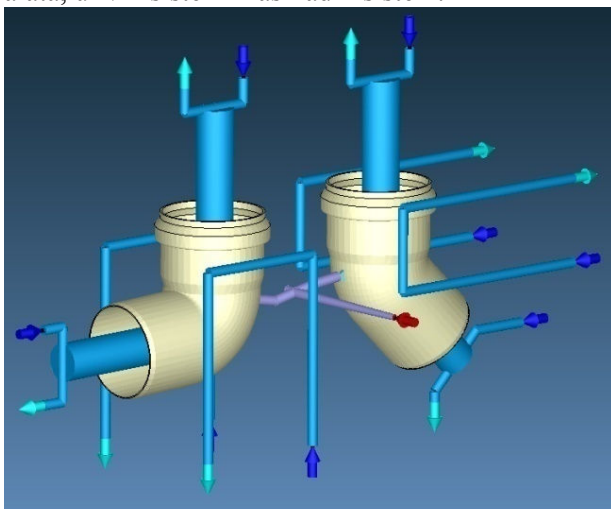
Slika 2. Položaj alata na brizgalici

Za FEM analizu injekcionog brizganja korišćen je program Moldex3D[®] koji se sastoji iz tri programska modula: Moldex3D Designer[™], Moldex3D Project i Moldex3D Viewer[®].

Moldex3D analiza se zasniva na nelinearnoj metodi konačnih elemenata (nonlinear FEM) i omogućava analizu parametara procesa, simulaciju i optimizaciju procesa injekcionog brizganja. Ovaj program za simulaciju treba da nas kroz nekoliko iterativnih koraka dovede do optimalnog rešenja procesa brizganja koji je osnova za projektovanje i optimizaciju gotovog dela i šupljine alata. Naravno, preduslov za što manji broj iteracija je posedovanje teorijskog znanja iz tehnologije injekcionog brizganja i iskustvo stečeno pri izradi alata za obradu plastike ovom tehnologijom. Iterativna analiza rezultata simulacije, treba da nam ukaže na eventualne nedostatke projektovanog dela i alata kako bi ih korigovali sa ciljem optimizacije procesa. Rezultati bitnih parametara dobijeni analizom su prikazani u vidu slajdova, grafikona i dijagrama i mogu nam pomoći u otklanjanju grešaka na delu (debljina zidova, pogrešan izbor konstrukcionih, ili tehnoloških dodataka na delu,...), ili elementima alata (dizajn i dimenzije ulivne grane, mesto i tip ulivnog ušća, dizajn i dimenzije sistema za hlađenje), u izboru materijala i mašine za brizganje [5].

U delu softverskog paketa Moldex3D Designer vrši se projektovanje alata sa svim elementima bitnim

za analizu složenih termodinamičkih procese koji se javljaju pri brizganju: kalupna šupljina, ploče forme alata, ulivni sistem i rashladni sistem.



Slika 3. Projektovanje ulivnog i rashladnog sistema

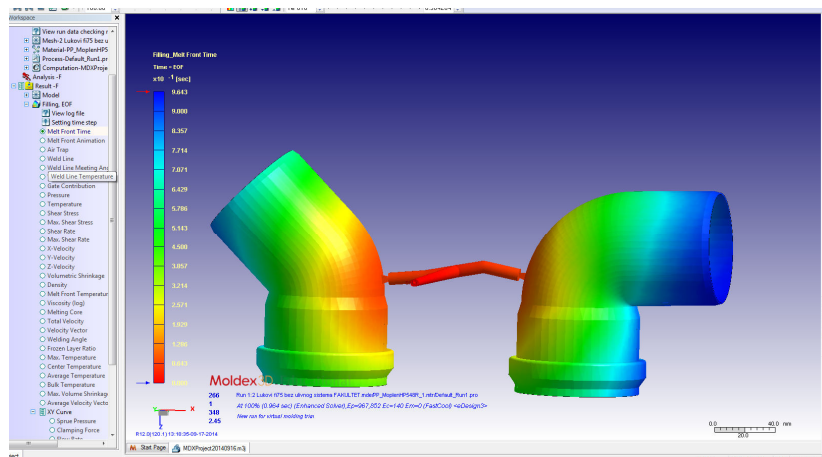
Upravo ovim redosledom treba u programu Moldex3D Designer definisati ove osnovne elementa alata za injeksiono brizganje. Projektovani 3D model iz bilo kog CAD programa može se iskoristiti za formiranje mreže konačnih elemenata kalupne šupljine, kao i za ostale elemente alata, a mogu se svi oni i direktno dizajnirati u ovom programu. Nakon uspešnog dizajniranja alata, izrađuju se mreže konačnih elemenata za sva četiri gore pomenuta elementa alata koje su neophodne za numeričku analizu termodinamičkih procesa, strujanja rastopa, skupljanja, deformacije itd. U slučaju nekih nepravilnosti na bilo kom od delova alata (kalupna šupljina, rashladni sistem, ulivni sistem, ploče forme alata), program će upozoriti na njih i predložiti mere za ispravku.

Nakon uspešno formiranih mreža konačnih elemenata, podaci se snimaju u datoteku koja će se koristiti za analizu brizganja. U delu softverskog paketa Moldex3D Project, uvoze se mreže konačnih elemenata projektovanog alata i nadalje se biraju preostali parametri delova tehnološkog sistema (materijal i mašina).

Iz baze podataka programa bira se materijal sa potrebnim tehničko-tehnološkim parametrima koje je propisao proizvođač. Takođe iz baze podataka programa bira se i tip i vrsta mašine, pa čak se u tom delu može izabrati i tip puža za plastifikaciju. Nadalje se definišu parametri koji se inače zadaju mašini za injeksiono brizganje preko upravljačke jedinice (vreme hlađenja, brzina brizganja, pritisak brizganja, naknadni pritisak, ...).

Kada su podešeni svi relevantni parametri, može se započeti FEM analiza procesa, odnosno simulacija brizganja. U zavisnosti od složenosti alata i izabrane finoće elemenata mreže konačnih elemenata i izabranog tipa analize, vreme proračuna može biti od nekoliko sati pa do nekoliko desetina sati [6].

4. REZULTATI ANALIZE INJEKCIONOG BRIZGANJA



Slika 4. Vreme ispune rastopljenog fronta

ravnomeran do 0.868 s. Uoprednom analizom protoka za svako ulivno ušće ponaosob, vidi se da se protok kroz ulivno ušće manjeg dela ubrzava, dok se protok kroz ulivno ušće većeg dela usporava istom progresijom pa je zbog toga ukupni protok do 0,868 sekunde konstantan. Konstantan protok je pokazatelj ravnomerne ispune (nema naglih prelaza debljine zidova i drugih otpora protoku)

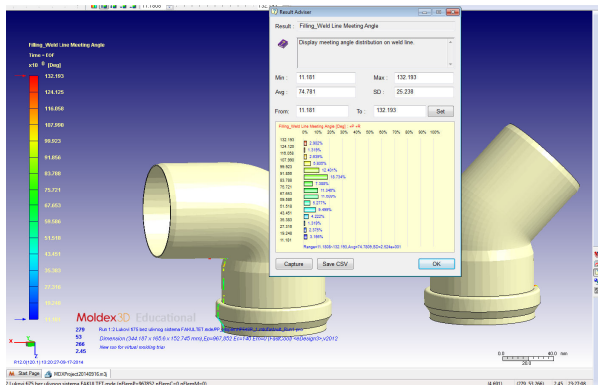
Linija zavarivanja koju formiraju dva različita fronta rastopa koji ulaze u šupljinu sa međusobno oštrim uglom u toku punjenja, oslabljuje gotov proizvod i izaziva estetske defekte, a nalazi se na najnepovoljnijem mestu, gde unutrašnje žlebove formiraju bočni trnovi koji se na silu izvlače uz pomoć hidrauličnih cilindara.

Ugao spajanja zavarenih frontova je ugao od 0° do 135° između dva rastopljena konvergentna fronta (za ugao 180° -rastopljeni frontovi su kao jedan, za ugao 0°- frontovi su se spojili, manji ugao zavarivanja -očiglednija

Program nudi rezultate analize u vidu grafičkih prikaza, dijagrama i slajdova (sl.4).

Analiza pokazuje da nije došlo do “kratkog ubrizgaja” - za vreme od 0,9643 sekunde na kraju ispune obe kalupne šupljine. Ravnomerno punjenje kalupnih šupljina preko ulivnog sistema postignuto je manjom površinom ulivnog ušća na manjem delu (luk Ø75/45°). Rezultat je da se ta kalupna šupljina neznatno sporije puni. Iz dijagrama ukupnog protoka rastopa u obe kalupne šupljine vidi se da je protok

linija zavarivanja i oslabljenija oblast na delu). Rezultati pokazuje da je najmanji ugao baš na mestu koje bi trebalo da elastičnom deformacijom omogući nasilno izvlačenje bočnih trnova koji formiraju unutrašnji žleb (ugao 11,181° ima 3,1%; 19,248° ima 2,375%; ugao 27,316° ima 1,319% materijala- najslabija mesta na delu).



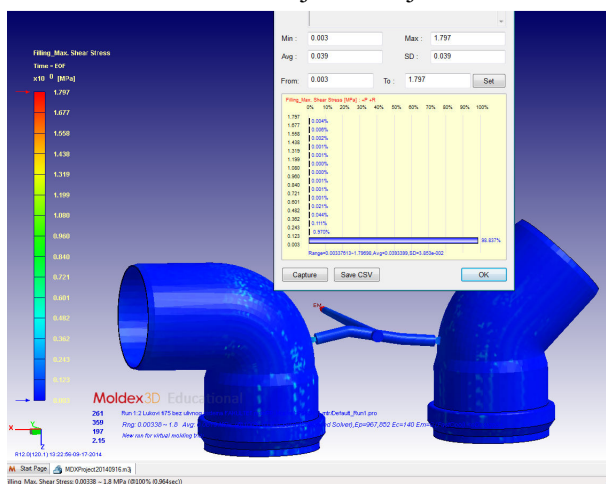
Slika 5. Ugao spajanja zavarenih frontova

Suviše visok napon smicanja i stepen smicanja materijala pri ispuni šupljine mogu izazvati degradaciju materijala i pucanje dela (smicanje je u korelaciji sa protokom i padom pritiska). Proizvođači plastike određuju dozvoljeni maksimalni napon smicanja za svoje materijale (za PP 0,25 MPa). Iz grafičkog i tabelarnog prikaza rezultata vidi se da čak 98,837 zapremine dela na kraju ispune ima maksimalni napon smicanja ne veći od 0,123 MPa, manji deo od oko 1,081% ima napon smicanja u dozvoljenim granicama koji ne prelazi 0,24 MPa, a zanemarljivo mali deo od 0,082% prelazi dozvoljene vrednosti koje se kreću do čak 1,797 MPa. S obzirom na mali procenat dela na kome može doći do oštećenja materijala usled velikih napona smicanja, može se reći da su rezultati u granicama dozvoljenih vrednosti.

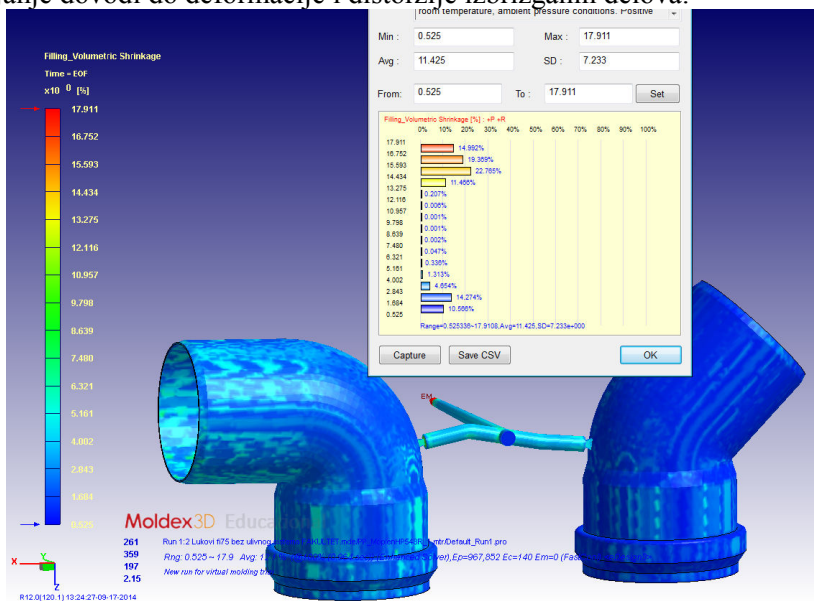
“Maksimalna dozvoljena stopa smicanja” za PP je 100 s⁻¹. Čak 99,508% otpreska ima maksimalnu stopu smicanja koja ne prelazi vrednost 0,012 s⁻¹ (daleko ispod dozvoljenih vrednosti). To ukazuje na prilično ravnomerno strujanje termoplasta kroz kalupnu šupljinu, bez većih otpora i opterećenja.

Rezultat X-komponente brzine rastopa, takođe i u Y i Z pravcu, prikazuju ujednačene vrednosti, što je preduslov za ravnomerno ne turbulento strujanje rastopa.

Analiza zapreminskog skupljanja prikazuje procenat promene zapremine kao posledicu brze promene sve tri veličine jednačine stanja PVT (hlađenje rastopa sa visoke temperature do sobne temperature, pad visokog pritiska do vrednosti atmosferskog pritiska i smanjenje zapremine usled skupljanja). Neujednačeno zapreminsko skupljanje dovodi do deformacije i distorzije izbrizganih delova.



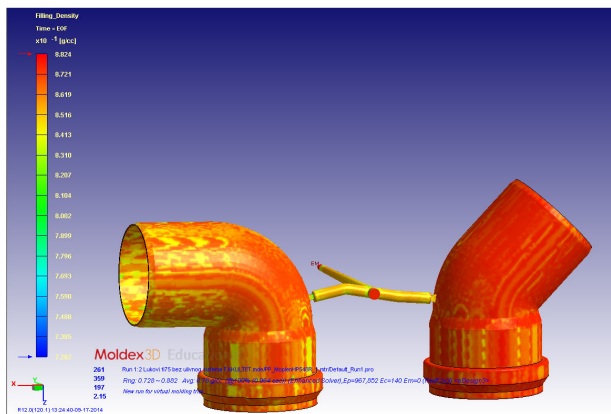
Slika 6. Maksimalna stopa smicanja



Slika 7. Zapreminsko skupljanje

Cela zapremina ima pozitivne vrednosti zapreminskog skupljanja, što predstavlja skupljanje dela, a nema negativne vrednosti koje predstavljaju širenje zapremine –nema prepunijavanja. Veliki opseg ove vrednosti od 0,525% do čak 17,911%, ukazuje na neujednačenu raspodelu temperature i raspodelu pritiska.

Čak 66% zapremine ima vrednost zapermnskog skupljanja od 14-17,911%, što može izazvati deformacije nakon izbacivanja dela iz kalupa i pojavu zaostalih napona, ako se oni ne pretvore u deformacije. Očvrsnute oblasti imaju veću, a rastopljene manju vrednost gustine. Rezultat raspodele gustine pokazuje neujednačenost koja može uzrokovati deformacije na gotovom delu. Iz grafičke analize rezultata se vidi da ravnomerniju gustinu ima luk $\text{\O}75/45^\circ$ i vrednosti se kreću od oko 8,619 do 8,824 g/cc, dok veliki deo luka $\text{\O}75/90^\circ$ ima gustinu oko 8,516 do 8,619 g/cc. Ovo ukazuje na bolje pakovanje manje kalupne šupljine što se može dovesti u vezu sa većim pritiskom pod kojim se ta kalupna šupljina ispunjava, što nije slučaj sa lukom

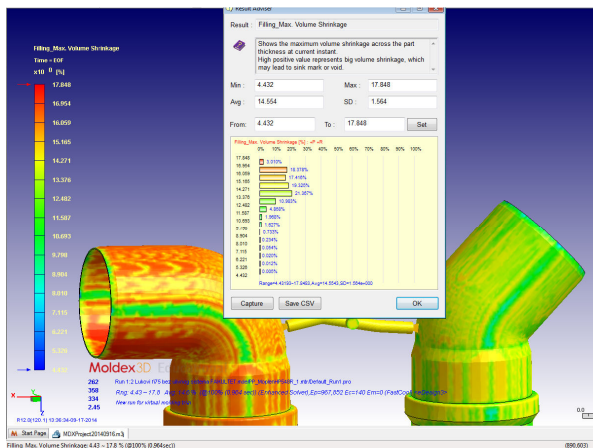


Slika 8. Polje gustina

dela prikazuje lokalno relativno velike pozitivne vrednosti, što predstavlja potencijalna mesta ulegnuća, ili praznine na gotovom delu u zavisnosti od debljine očvrnutog sloja. Veliki deo otpreska (preko 60%), a naročito luk $75/90^\circ$ ima velike vrednosti zapremenskog skupljanja od 13,376 do 17,848%. S obzirom na tanak zid delova, ulegnuća je teže očekivati, ali mikro neravnine, kao i različita gustina i unutrašnji naponi koji mogu da dovedu do deformacije su mogući.

U narednom iterativnom postupku je urađeno dodatno balansiranje ulivne grane tako što je smanjen prečnik sa 8 na 7 mm za deo ulivne grane prema većoj kalupnoj šupljini, a pomerena su i ulivna ušća prema oblasti koja je udaljenija od žleba za zaptivanje sa ciljem premeštanja linija zavarivanja u oblast koja ne trpi elastične deformacije pri izvlačenju bočnih trnova.

Rezultat novog dizajna ulivnog sistema je doveo do ujednačenije ispune, ali još uvek nedovoljno, zatim do toga da se linija zavarivanja kod luka $75/90^\circ$ potpuno izgubila iz oblasti žleba za zaptivanje i premestila u oblast gde nema žleba, a kod luka $75/45^\circ$ se vrlo malo pojavljuje na mestu žleba. Nepovoljnost kod druge iteracije je pojava zarobljenog vazduha i u unutrašnjosti dela oko oblasti žleba za zaptivanje gde je teško izvesti od vazdušavanje. U prvoj iteraciji je raspored potencijalnih mesta zarobljenog vazduha bio povoljniji za eliminaciju.

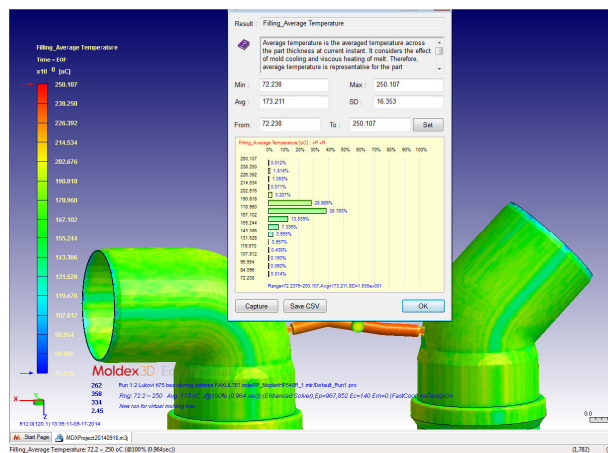


Slika 10. Maksimalno zapremensko skupljanje

$\text{\O}75/90^\circ$, odnosno sa nedovoljno balansiranim protokom (ranije se napuni manja kalupna šupljina).

Sve analize vezane za temperaturu termoplasta: Temperatura fronta rastopa, Jezgro rastopa, Maksimalna temperatura, Temperatura jezgra (središnja), Prosečna temperatura, Veći deo temperature, kao i Stopa očvrnutih slojeva (nivoa), pokazuju da je oblast delova najudaljenija od linije otvarajna alata, odnosno, najbliža nivou na kome se nalaze rashladni kanali u pločama forme, oblast sa najnižim temperaturama, odnosno sa najvećim procentom očvrnutih slojeva.

Maksimalno zapremensko skupljanje preko debljine



Slika 9. Polje prosečnih temperatura

5. ZAKLJUČAK

Prve tri iteracije analize injekcionog brizganja na osnovu FEM modela, sa parametrima koji su najpribližniji realnim uslovima, ukazale su nam na nedostatke dizajna alata (dizajn delova se ne dovodi u pitanje, s obzirom da se radi o standardnim elementima građevinske industrije).

Promena ulivnog ušća je dala zadovoljavajuće rezultate po pitanju izmeštanja linije zavarivanja frontova plastike na povoljnije mesto. Balansiranje ulivnog

sistema nam je poboljšalo rezultate, što se tiče ravnomernosti ispune, ali još uvek nije na zadovoljavajućem nivou s obzirom na razliku pritiska i viskoznosti u kalupnim šupljinama. S obzirom na mali procenat oblasti na kojima može doći do oštećenja materijala usled velikih napona i stopa smicanja, može se reći da su dosadašnji rezultati analize napona i stopa smicanja dobri.

Rezultati analize temperatura, očvrnutih nivoa i zaperminske deformacije nam ukazuju da dizajn rashladnog sistema ne daje dobre rezultate. Po svemu sudeći treba dodati rashladne kanale u pločama forme (trnovi su dobro rešeni) tako da oni prate konturu cilindričnog oblika dela, da bi odvođenje toplote bilo ravnomernije. Takođe, parametri koji zavise od mašine (vreme hlađenja, pritisak brizganja, brzina brizganja i vreme trajanja naknadnog pritiska) mogu poboljšati rezultate nejednake gustine pakovanja i neravnomernog zapreminskog skupljanja. Nije isključeno da bi primena materijala sa većim indeksom tečenja dala bolje rezultate što će biti predmet dalje analize.

6. LITERATURA

- [1] Lei, X, Longjiang, S. and Bingyan, J, *Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process*, Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications, (2011), pp.317-332
- [2] Perosevic B. *Kalupi za injekciono presovanje plastomera (termoplasta)*, Naučna knjiga, 1988.
- [3] Pejak M. *Polipropilen - svojstva i prerada*, Hipol korporacija Odžaci, 1994.
- [4] Shen Y.K., Yeh S.L. & Chen S.H. *Three-dimensional non-Newtonian Computations of Micro-Injection Molding with the Finite Element Method*. Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol 29, No.5, (2002) pp. 643-652, ISSN 0735-1933
- [5] Kemmann O, Weber L, Jeggy C & Magotte O. *Simulation of the Micro Injection Molding Process*. Proceedings of the Annual Technical Conference, (ANTEC 2000), (2000), pp.576-580, ISBN 1566768551, Orlando, FL, USA.
- [6] Liou A. C. & Chen R. H., *Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high aspect ratios*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol 28, (2006) pp.1097–1103, ISSN 0268-3768

Nikolić Saša, Randelović Saša

FEM MODEL OF THERMPLASTIC INJECTION IN ASYMETRICALLY TOOL

Abstract: *New product development technology of injection molding plastic is unthinkable without the generation of virtual prototypes and 3D models in a CAD program. This model is the basis of the input information for the virtual analysis of physical phenomenon in and around the mold cavity of the designer until recently were not available. In addition the analysis are 3D model allows spatial and aesthetic visualization of future products, the analysis of the geometric relationship of subassemblies complex product; 3D printing prototypes and molds for injection molding prototype parts, automatic generation of NC code, etc.. Analysis and simulation of injection molding based on the finite element method (FEM), the specialized software programs to get a real and substantial results that indicate possible errors and critical areas in the early phase of design.*

Keywords: *plastic injection, FEM model, pressure, temperature*



Pjević, M., Mladenović, G., Puzović, R., Tanović, Lj. ¹⁾

PRIMENA CAD/CAM SISTEMA U PROJEKTOVANJU I IZRADI PROFILNIH KRUŽNIH STRUGARSKIH NOŽEVA ²⁾

Rezime

U radu je prikazana razvijena programska podrška kojom se unapređuje postupak automatskog projektovanja i izrade kružnih profilnih strugarskih noževa primenom razvijenih CAD/CAM sistema. Razvijene metodologije projektovanja kružnih profilnih strugarskih noževa se zasnivaju na odnosu alata i obratka. Realizacija programske podrške je ostvarena na osnovu razvijenog algoritma prema metodologiji proračuna kružnih profilnih noževa datoj u [1], a čija je verifikacija pokazana na primeru zadatog 3D modela dela (izratka) koji je učitani u CAD sistem. Za zadate vrednosti grudnog γ i leđnog ugla α (vrednost uglova zavisi od vrste materijala obratka) proračunat je i generisan 3D model kružnog profilnog strugarskog noža za spoljašnju i unutrašnju obradu. Na osnovu tako dobijenog 3D modela profilnog noža generisana je tehnička dokumentacija i projektovan tehnološki proces izrade.

Ključne reči: Automatsko projektovanje, CAD/CAM, kružni profilni strugarski nož

1. UVOD

Kako se zahtevi kupaca sve više pooštavaju u pogledu kvaliteta i vremena isporuke, kod velikoserijske i masovne proizvodnje rotacionih delova složene konfiguracije, važnu ulogu ima primena profilnih strugarskih noževa za njihovu obradu. Složena konfiguracija delova je rezultat funkcionalnih ili estetskih zahteva kupaca koja se preslikava i na geometriju profilnih noževa. Ovo po automatizmu zahteva da se da brz odgovor u pogledu projektovanja i izrade profilnih strugarskih noževa. U mnogim literaturnim izvorima između kojih izdajamo [1-4] profilni strugarski noževi se dele na: kružne (za spoljašnju i unutrašnju obradu) i prizmatične (radijalne i tangencijalne) samo za spoljašnju obradu. Takođe u nekim literaturnim izvorima [1-4] daju se procedure projektovanja sa razvijenom programskom podrškom u pogledu proračuna i izrade tehničke dokumentacije profilnih noževa na bazi unetih kordinata čvornih tačaka (tabelarno) skinutih sa crteža dela koji se obrađuje. Kako se u industrijskoj praksi sve više primenjuju CA (*Computer Aided*) alati to je neminovno nametnulo potrebu njihove primene i u projektovanju i izradi profilnih noževa. Tržište danas nudi više CAD/CAM sistema: Creo Elements/Pro (Pro/Engineer), Autodesk Inventor, NX (Unigraphics), SolidWorks i Catia [5,7]. U [6] je opisana metodologija projektovanja prizmatičnih profilnih strugarskih noževa uz delimičnu primenu CAD/CAM sistema Catia. Razvijeni komercijalni CAD/CAM sistemi, nemaju razvijene specijalizovane module za projektovanje profilnih strugarskih noževa i tehnologije za njihovu izradu. Kako su ovi CAD/CAM sistemi pogodni za 3D modeliranje delova i profilnih strugarskih noževa, postoji potreba za razvojem modula koji bi obezbedio da se na osnovu 3D modela dela (izratka) generiše 3D model profilnog strugarskog noža na bazi kog bi se u CAM sistemu projektovao tehnološki proces njegove izrade. U cilju davanja doprinosa u pravcu poboljšanja metodologije projektovanja profilnih strugarskih noževa u radu je dat opis programske podrške koja unapređuje metodologiju projektovanja kružnih profilnih strugarskih noževa (za spoljašnju i unutrašnju obradu). Programska podrška opisana u radu obuhvata:

- Razvijen program za automatsko učitavanje podataka sa profila dela (izratka) koji je modeliran (3D model) u SolidWorks ili uvezen iz drugog CAD sistema (STEP format);

¹⁾ Miloš Pjević, MSc.inž.maš., (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Goran Mladenović, dipl.inž.maš., (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Radovan Puzović, (rpuzovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs) Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije, Kraljice Marije br.16. 11120 Beograd 35

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-35022: „Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj R. Srbije.

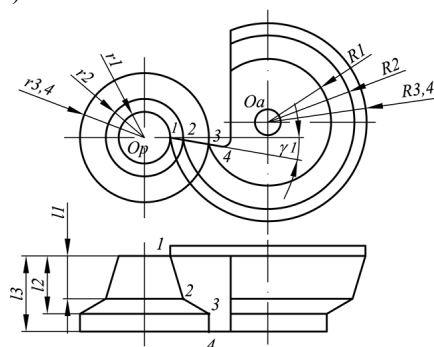
- Razvijen program za proračun parametara okruglih profilnih noževa na bazi učitanih tačaka sa profila dela (izratka) i ručno unetih vrednosti početnog grudnog i lednog ugla (čije vrednosti su u zavisnosti od materijala koji se obrađuje);
- Razvijen program koji omogućava kreiranje 3D modela okruglih profilnih noževa i uparivanje 3D modela dela i 3D modela profilnog noža radi upoređivanja profila.

Na jednom primeru je prikazana razvijena programska podrška za projektovanje i generisanje 3D modela kružnih profilnih noževa upotrebom softvera SolidWorks i deo NC sekvence za njegovu izradu primenom softvera Creo Elements/Pro (Pro/Engineer).

2. METODOLOGIJA PROJEKTOVANJA KRUŽNIH PROFILNIH STRUGARSKIH NOŽEVA

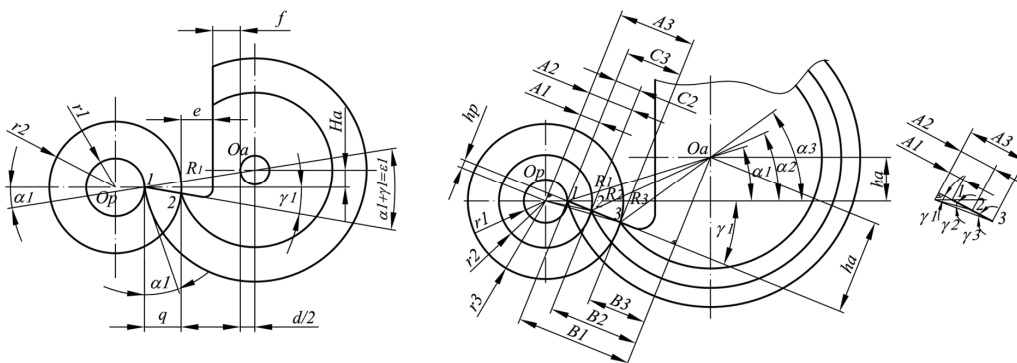
U opštem slučaju profilni strugarski noževi se mogu primenjivati za obradu delova složenog oblika (proizvoljne kinematske površine) u serijskoj i masovnoj proizvodnji. U praksi se sa profilnim strugarskim noževima najčešće obrađuju delovi ograničeni cilindričnim zavojnim i obrtnim površinama. Sečivo ovih noževa je složene konture (odgovara konturi površine obratka), a obrada se vrši prostim primicanjem noža obratku (slika 1) [1]. Profilni strugarski noževi se mogu podeliti prema [2]:

1. nameni na: noževe za spoljašnu i unutrašnju obradu;
2. obliku tela na: kružne (sa osom alata paralelnom osi obratka i sa osom alata pod uglom u odnosu na osu obratka) i prizmatične (prema položaju sečiva u odnosu na površinu obratka mogu biti: radijalni i tangencijalni);
3. položaju grudne površine (grudni ugao $\gamma=0^\circ$ i ugao nagiba grudne površine $\lambda=0^\circ$; grudni ugao $\gamma>0^\circ$ i ugao nagiba grudne površine $\lambda=0^\circ$; grudni ugao $\gamma>0^\circ$ i ugao nagiba grudne površine $\lambda>0^\circ$);
4. obliku ledne površine (sa rotacionom površinom profila; sa zavojnom površinom profila; sa prizmatičnom površinom profila).



Slika 1. Šema obrade sa kružnim profilnim strugarskim nožem za spoljašnju obradu

U literaturi [1-4] su prikazane razvijene metodologije za proračun strugarskih profilnih noževa, na slici 2 su prikazane karakteristične veličine koje se koriste u proračunima. Za razvijeni algoritam prikazan na slici 3, u tački 4. dat je opis razvijenog softverskog rešenja za proračun profilnih kružnih noževa za spoljašnju i unutrašnju obradu prema metodologiji prikazanoj u literaturi [1].



r_i - poluprečnici obratka

$R_1=R_{max}$ - maksimalni polupr. noža

R_i - poluprečnici alata

d - prečnik unutrašnjeg otvora

q - maksimalna dubina profila obratka; e i f - preporučene veličine

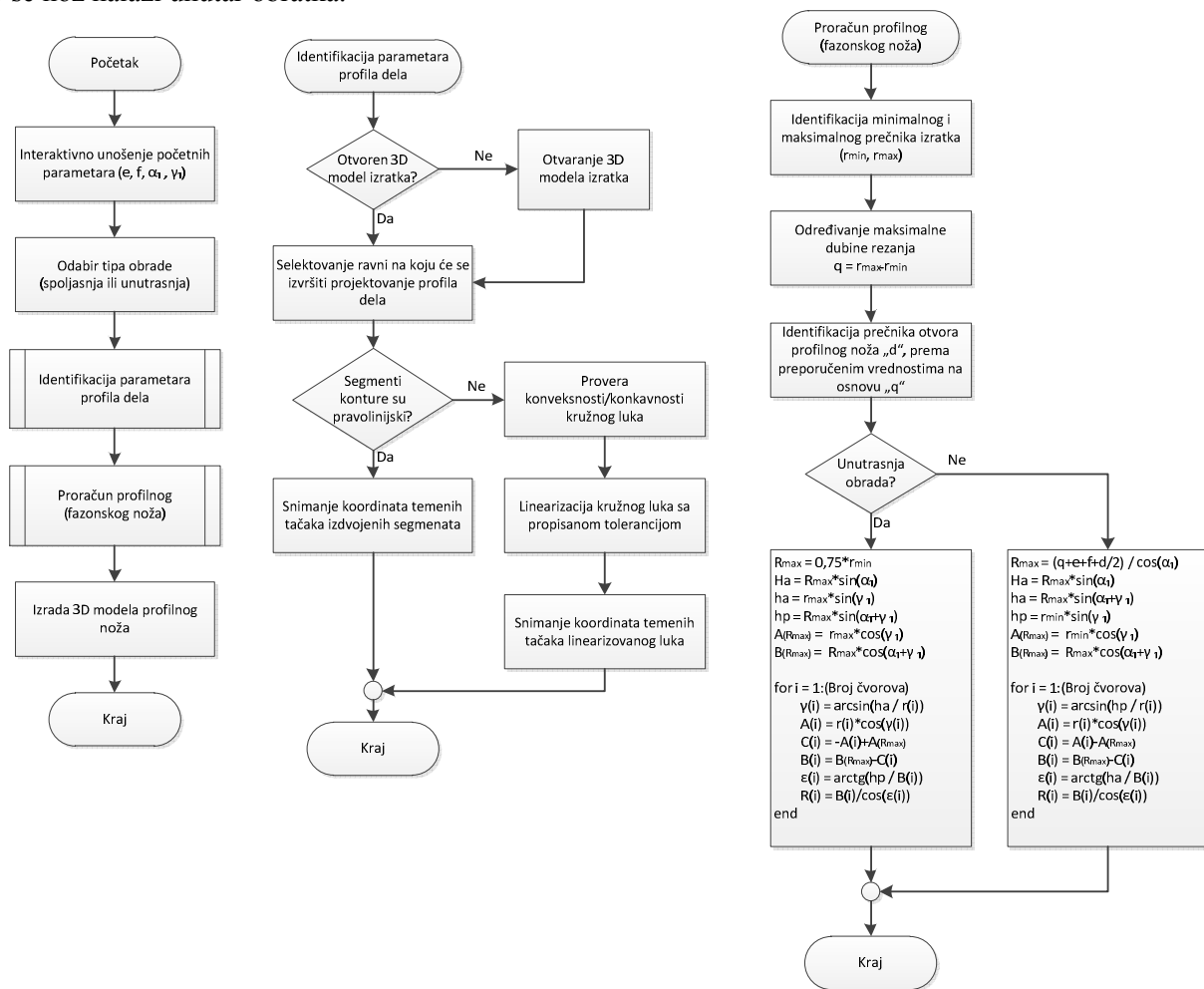
γ - grudni ugao; α - ledni uga; λ - ugao nagiba grudne površine

H_a , h_a i h_p - velič. koje određuju položaj ose alata prema osi obratka

A_i , B_i , C_i - pomoćne velič. koje služe za definisanje polupr. alata

Slika 2. Prikaz parametara koji se koriste u proračunu profilnih kružnih noževa za spoljašnju obradu

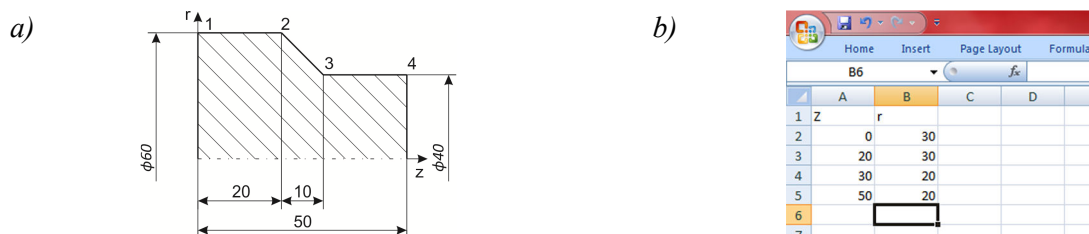
Kod kružnih profilnih noževa za unutrašnju obradu postupak određivanja karakterističnih prečnika je sličan, s tim što je maksimalni poluprečnik noža $R_{max} \leq 0.75 \cdot r_0$ (gde je r_0 poluprečnik polaznog otvora u obratku) i što se nož nalazi unutar obratka.



Slika 3. Prikaz algoritma za proračun profilnih kružnih noževa za spoljašnju i unutrašnju obradu

4. RAZVIJENO SOFTVERSKO REŠENJE ZA PROJEKTOVANJE PROFILNOG NOŽA

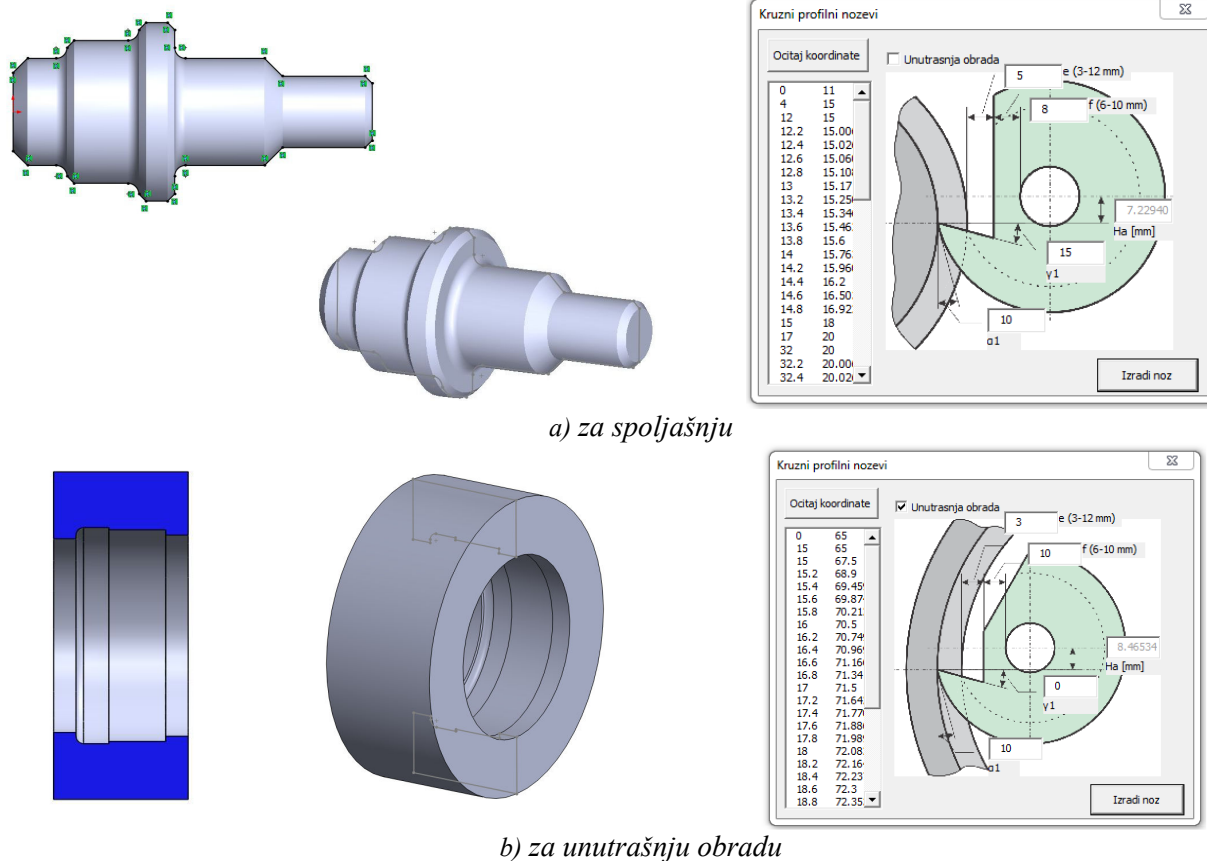
Prema dosadašnjoj praksi [6] proces automatskog generisanja profilnih noževa je podrazumevao ručno unošenje koordinata čvornih tačaka (slika 4a) u eksternu tabelu (slika 4b). Podaci iz te tabele bi se uvezli kao eksterni u CAD softver koji bi prema razvijenom algoritmu generisao 3D model profilnog noža. Ova procedura je sa sobom nosila izvesne nedostatke koji se najpre ogledaju u grešci prilikom unošenja koordinata tačaka u eksterni fajl, kao i nemogućnost definisanja kružnih segmenata.



Slika 4. Skica konture polovine dela (a), koordinate tačaka konture unešene u fajl (b)

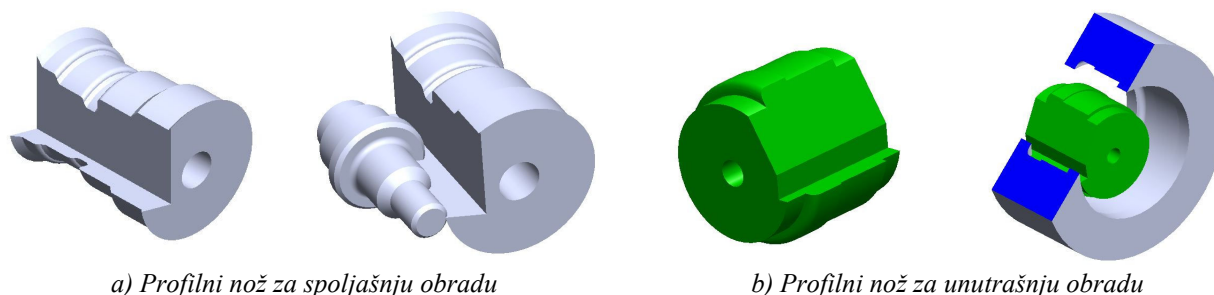
Razvoj softverske podrške za automatsko generisanje 3D modela profilnog noža u ovom slučaju podrazumeva da se na osnovu CAD modela gotovog dela automatski odrede čvorne tačke, izvrši proračun i generiše 3D model profilnog noža pri čemu bi se izbegla svaka mogućnost greške prouzrokovane od strane korisnika softvera.

Za razvoj softverskog rešenja je upotrebljen API (Application Programming Interface) softvera SolidWorks 2012. Programsko okruženje API-a sadrži stotine funkcija koje mogu da se pozovu iz Visual Basic for Applications (VBA), VB.NET, Visual C#, Visual C++ 6.0 ili Visual C++/CLI. Ove funkcije obezbeđuju direktan pristup SolidWorks funkcionalnosti, kao što je crtanje linije, ubacivanje gotovog dela u aktivni fajl ili provere parametara površine [9,10]. Proces izgradnje 3D modela profilnog noža započinje otvaranjem CAD modela gotovog dela za koji je potrebno generisati profilni nož. Nakon otvaranja željenog fajla potrebno je odabrati ravan na koju će se izvršiti projektovanje konture dela, a zatim aktivirati makro čime se otvara forma za unos parametara profilnog noža, slika 5.



Slika 5. Forma za unos parametara za proračun kružnih profilnih stugarskih noževa

Selektovanjem opcije "Očitaj koordinate" softver vrši generisanje tabele koja sadži koordinate čvornih tačaka uz mogućnost prepoznavanja tipa segmenta između čvornih tačaka, tj. ukoliko je neki segment kružni luk, vrši se aproksimacija datog luka pravolinijskim segmentima dovoljno male dužine uz zadovoljenje uslova da odstupanje od profila ne pređe maksimalno dozvoljenu vrednost. Prema osnovnim podešavanjima softver generiše profilni nož za spoljašnju obradu, a ukoliko je potrebno konstruisati profilni nož za unutrašnju obradu to se postiže čekiranjem označenog polja. Pored tipa noža potrebno je uneti još 4 parametara: ledni ugao (α_1), grudni ugao (γ_1), kao i vrednosti parametara e i f. Selektovanjem opcije "Izradi nož", nakon par sekundi se dobija kompletan 3D model profilnog noža, slika 6.



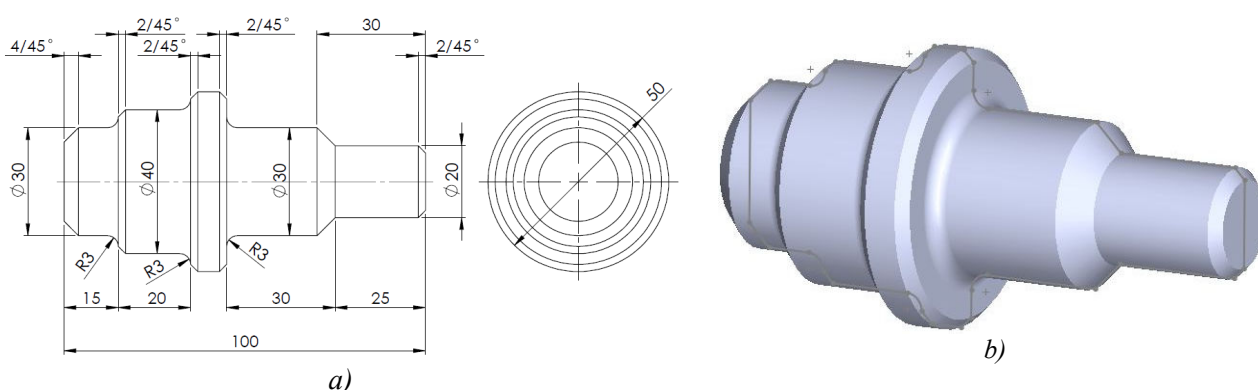
Slika 6. Prikaz 3D modela generisanih kružnih profilnih noževa pojedinačno i u kontaktu sa izratkom

5. PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADE KRUŽNOG PROFILNOG NOŽA

Imajući u vidu da se kružni profilni noževi najviše izrađuju od brzoreznog čelika (Č 6980, Č6981, Č6880, Č 6882 i dr.) mora se voditi računa o izboru metoda obrade i reznih alata sa kojima se oni obrađuju [2]. Prema [3] skraćeni postupak projektovanja tehnološkog procesa izrade kružnih profilnih noževa obuhvata operacije ka što su: sečenje pripremak, grubo struganje, fino struganje, glodanje čeonih zuba za pričvršćivanje na nosač alata, glodanje žleba koji formira sečivo, bušenje rupe, termička obrada, brušenje rupe za osovinu, oštrenje reznog dela, kontrola i konzervacija. Najveći deo obrade može da se izvede na NUMA-a, a prema NU programima generisanim od strane nekog od spomenutih CAD/CAM sistema. Pored korišćenja integrisanih CAD/CAM sistema za generisanje NU programa uspešno se mogu koristiti i posebni CAM sistemi: SurfCAM, Vericut, EdgeCAM, Mastercam i drugi [7].

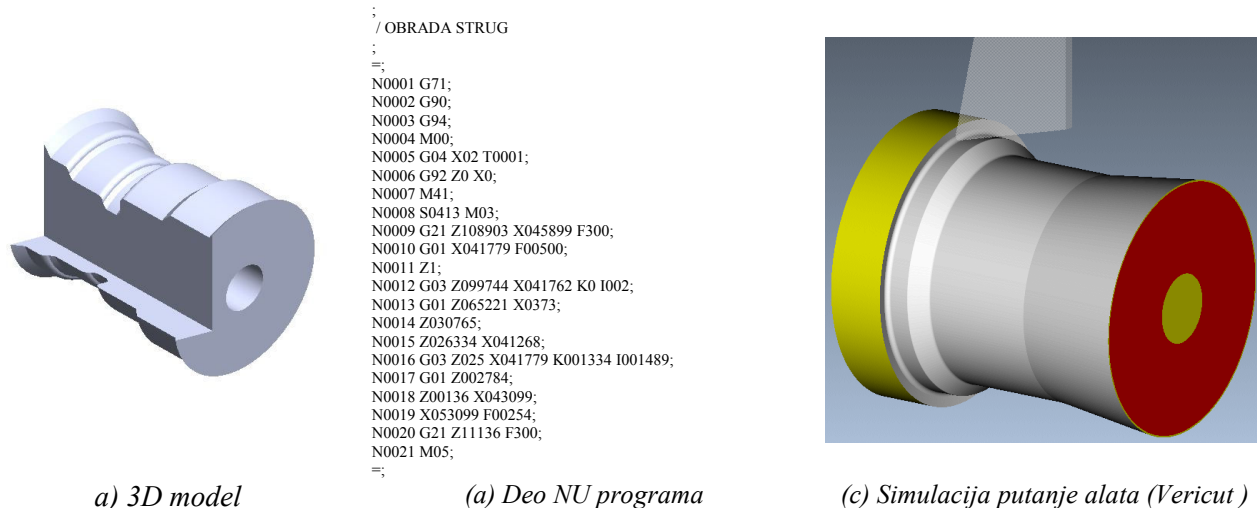
5.1 Primer projektovanja tehnologije izrade kružnog profilnog noža za spoljašnju obradu

Prema radioničkom crtežu dela sa slike 7a formiran je upotrebom softverkog paketa SolidWorks CAD model dela (izratka) prikazan na slici 7b, a prema njemu po proceduri opisanoj u poglavlju 4 kružni profilni nož za spoljašnju obradu (slika 8a). Kreirani CAD model noža uvezen je (inportovan) u modul *Pro/MFG* softverskog paketa Pro/ENGINEER Wildfire 4.0 [8] u kome je projektovan tehnološki proces obrade na NUMA (obrada struganjem i glodanjem/elektroerozionom obradom sa žicom).



Slika 7. a) Radionički crtež dela, b) 3D model dela (izratka)

Za pripremak je uzet šipkasti polufabrikat prečnika 90 mm, materijala HSSE. Obrada stuganjem podrazumeva izradu profila noža po obodu i unutrašnjeg otvora za postavljanje na nosač. Obrada na strugu se izvodi zahvatima grube i fine obrade (alati i režimi prema preporučenim vrednostima proizvođača alata). Nakon generisanja NU programa (NC koda) za obradu na strugu, izršeno je generisanje NU programa za izradu reznog klina profilnog noža. Na slici 8b dat je prikaz dela NU programa za grubo struganje profila kružnog profilnog noža za spoljašnju obradu koji je generisan u modulu *Pro/MFG (Creo Elements)*, a simulacija procesa obrade prikazana je na slici 8c primenom softverkog paketa *Vericut*.



a) 3D model

(a) Deo NU programa

(c) Simulacija putanje alata (Vericut)

Slika 8. Prikaz obrade grubo struganje profila kružnog profilnog noža za spoljašnju obradu

5. ZAKLJUČAK

Istraživanja koja se izvode na Katedri za proizvodno mašinstvo i Centru za nove tehnologije imaju jedan od pravaca projektovanje i izrada reznih alata primenom razvijenih CAD/CAM sistema. Ova istraživanja su motivisana činjenicom da su zahtevi kupaca sve više pooštavaju u pogledu kvaliteta i skraćenja isporuke delova složene konfiguracije a da važnu ulogu za njihovu izradu ili obradu imaju alati složene geometrije, čije projektovanje i izrada zahtevaju primenu CAD/CAM sistema. A pri tome razvijeni CAD/CAM sistemi, nemaju razvijene specijalizovane module za projektovanje takvih reznih alata i tehnologije za njihovu izradu. Jedan deo rezultata tih istraživanja koji su prikazani u ovom radu se odnose na razvijene programe koji u znatnoj meri daju doprinos u pravcu poboljšanja metodologije automatskog projektovanja (kreiranja 3D modela) kružnih profilnih stugarskih noževa za spoljašnju i unutrašnju obradu. Ovi programi preko makroa mogu biti uključeni u rad nekog od komercijalnih CAD/CAM sistema. Primena realizovanog programa koji je pomoću makroa povezan sa CAD/CAM sistemom, omogućila je brzo i tačno projektovanje 3D modela kružnih profilnih stugarskih noževa na bazi 3D modela dela (izratka), što predstavlja dobru osnovu za generisanje radioničkih crteža i kreiranje NC sekvenci za obradu na nekoj od CNC mašina. Dalja istraživanja biće usmerena na:

- Razvoju metodologije projektovanja profilnih noževa za obradu površina na delovima nastalim rotacijom segmenta splajnova;
- Razvoj modula za automatsko projektovanja tehnoloških procesa (NC sekvenci) za izradu profilnih stugarskih noževa.

7. LITERATURA

- [1] Kršljak, B., Čolović, M.: *Alati i pribori – Priručnik*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [2] Sovilj, B.: *Profilni noževi*, Forum – OJ "Izdavačka delatnost", Novi Sad, 1995.
- [3] Rebac, B.: *Rezni alati*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [4] Kalpakjian, S.: *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley Publishing Company, USA, 1995.
- [5] Koveljenić B., Ivanović R., Puzović R., Popović M.: *Stanje i perspektive primene CAD/CAM/CAE paketa u projekto. proizv. od plastike i odgovarajućih alata*, 29. JUPITER konfer., pp.2.47-2.50, Beograd, 2003.
- [6] Milutinović, M.: *Metodologija projektovanja prizmatičnih profilnih noževa*, 36. JUPITER konferencija, pp.2.51-2.57, Beograd, 2010.
- [7] Tanović, Lj., Bojanić, P., Puzović, R., Popović, M., Mladenović, G. : *Primena CAD/CAM/CAE programskog paketa pri projektovanju i izradu alata za livenje pod pritiskom delova od polimera*, 37. JUPITER konferencija, pp.2.22-2.29, Beograd 2011.
- [8] PTC® PRODUCT & SERVICE ADVANTAGE, <http://www.ptc.com>, 2014
- [9] 3D CAD Design Software SOLIDWORKS, <http://www.solidworks.com>, 2014
- [10] <http://help.solidworks.com/2014/English/api/sldworksapiproguide/Welcome.htm>, 2014

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

APPLICATION OF CAD/CAM SYSTEM IN PROCESS OF DESIGN AND MANUFACTURING OF PROFILED CIRCULAR TURNING TOOLS

Abstract: *The paper presents a developed software support which improves the procedure of automated design and manufacturing of profiled circular turning tools using existing CAD/CAM systems. Current methodologies for design and manufacturing of profiled circular turning tools are based on a relation between the tool and the workpiece position and orientation. The suggested software support is based on an algorithm, developed according to the methodology for calculations of profiled circular turning tools given in [1], and the verification of which is shown on an example of a given 3D part model, which is loaded in the CAD system. For given values of side rake γ and end relief angle α (angle values depend on the workpiece and the tool material) a 3D model of a profiled circular turning tool was calculated and generated for external and internal manufacturing. Based on such obtained 3D model of a profiled circular turning tool, technical documentation was generated and the manufacturing process was designed.*

Key words: *Automatic design, CAD/CAM, profiled circular turning tool*



Поповић, М.¹⁾

ПАРАМЕТАРСКО МОДЕЛИРАЊЕ УРЕЗНИКА СА ПРАВИМ ЖЛЕБОВИМА

Резиме

У раду је приказан поступак моделирања фамилије урезника са правим жлебовима у програмском окружењу CAD пакета Autodesk Inventor, користећи технику параметарског моделирања која омогућава да се физички облик дела дефинише вредностима које су придодате атрибутима (првенствено преко димензија). Скуп атрибута који описују урезник конкретних димензија, добија се из формиране базе података фамилије урезника, за задату називну меру урезника, његов корак и тип улазног дела. Урезник је један од најсложенијих резних алата који се користи у пракси и овако дефинисан модел користи се за идентификацију положаја и дужине главних и помоћних сечива његовог резног дела за потребе симулације сила и момента у процесу обраде урезивања навоја.

Кључне речи: урезник, параметарско моделирање, CAD

1. УВОД

За сваку од карактеристичних фаза при развоју једног производа, које у општем случају представљају идејни пројекат, концептуални дизајн, детаљни дизајн, анализу (структурну и функционалну), израду техничке документације и производњу, СА (Computer-Aided) софтверски пакети нуде посебне, међусобно повезана програмске модуле. Они омогућавају и олакшавају рад читавим развојним тимовима уз честу могућност паралелног рада. У раду су описана искуства у раду са CAD (Computer-Aided Design) софтверским пакетом Autodesk Inventor, који може да задовољи најразличитије захтеве, од машинског дизајна до производње. Као и остали слични програм, он је параметарски, “feature-based” систем за моделирање чврстим телима – “солидима”, који почива на јединственој структури података уз пуну асоцијативност у свим фазама пројектовања.

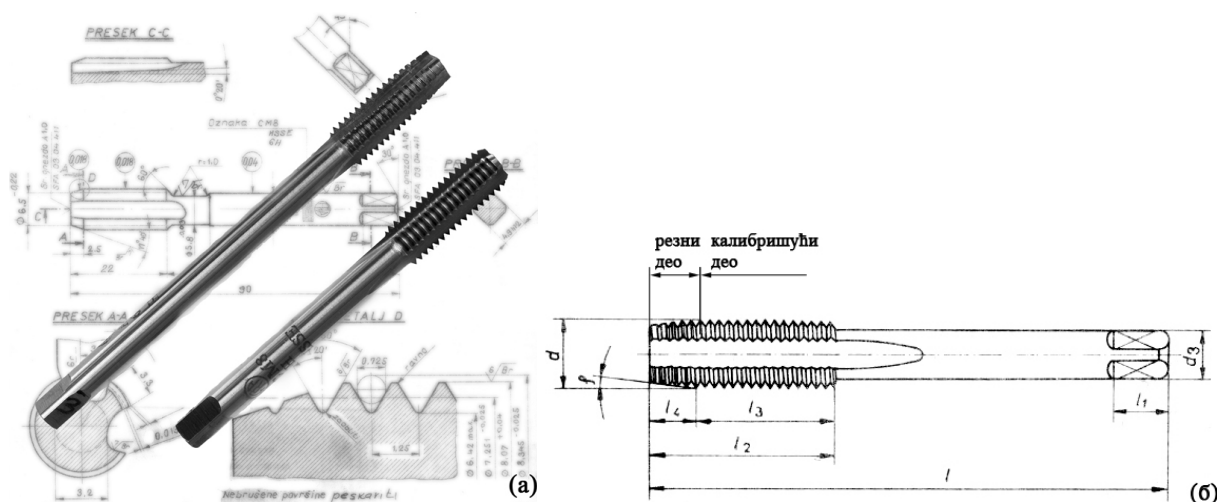
У раду су приказани резултати моделирања машинског урезника настали из потребе за успостављањем аналитичких модела за предикцију сила и момента урезивања навоја у свим фазама захвата алат-обрадк и дефинисања потребних алгоритама за развој софтверских модула, које се базира на геометрији и акцији сечива у процесу урезивања навоја.

Урезници и операције урезивања се сматрају за најсложеније и најмање схваћене резне алате и процесе обраде који се користе у пракси. У раду [1] се помиње да урезник који навој формира уклањањем материјала, датира из 1797 године. Израда унутрашњег навоја је један од најзахтевнијих машинских процеса и представља завршну обраду са сложенем 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

¹⁾ Mr Mihajlo Popović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije, Kraljice Marije br.16. 11120 Beograd 35, mpopovic@mas.bg.ac.rs

последиче, 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.

На слици 1а приказан је изглед два типа урезника, док су на слици 1б приказане основне димензије урезника са правим жлебовима [2,3]. Улазни, конусни део урезника врши резање навоја, а калибришући на цилиндричном делу резеника прочишћавање. Сваки зуб улазног дела скида одређени слој материјала који зависи од броја жлебова, корака навоја и синуса угла улазног, конусног дела урезника.



Слика 1. Машински урезник од брзорезног челика (а), основне димензије урезника (б)

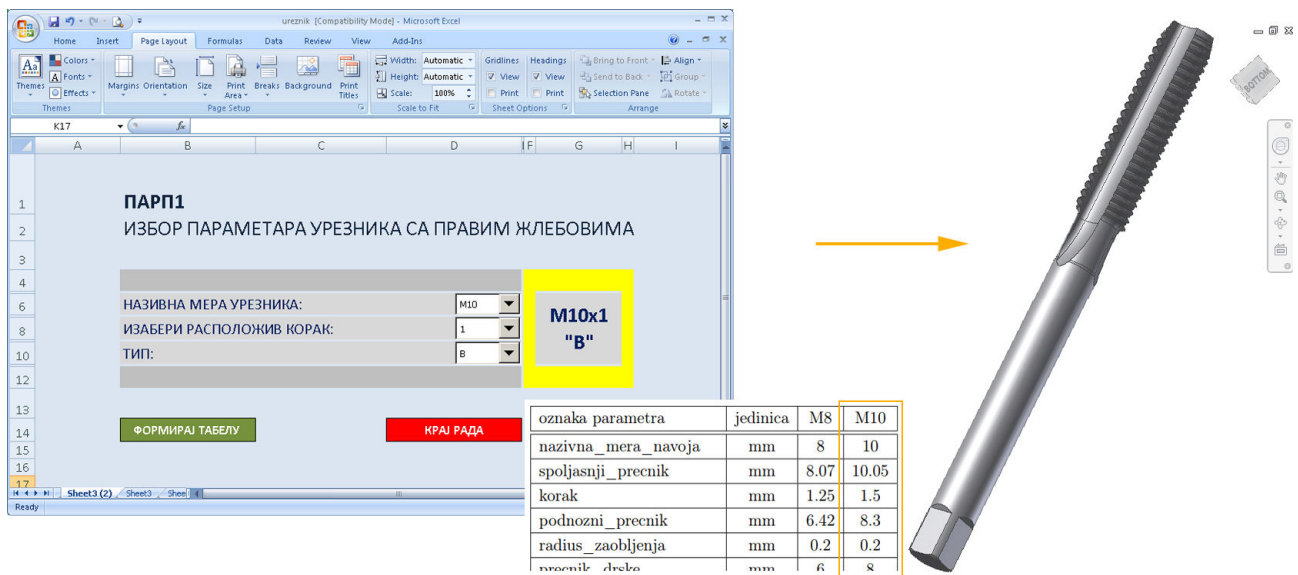
Класа (група) урезника је моделирана у програмском окружењу CAD апликације *Autodesk Inventor 11* користећи технику параметарског моделирања. На овај начин, улаз у програм је скуп параметара који описују урезник конкретних димензија и који се примењују на само једном дефинисан редослед формирања модела према операционим листама израде урезника.

2. МОДЕЛИРАЊЕ УРЕЗНИКА

Приликом израде стандардног машинског урезника од вученог цилиндричног полуфабриката, материјала Ч9780, изводе се следећи захвати: сечење шипкастог полуфабриката, чеона обрада и забушивање обе стране, уздужно стругање дршке урезника, уздужно стругање врата урезника, глодање четвртке на врху дршке урезника, маркирање четвртке, глодање жлебова (један жлеб у правцу маркера на четвртци), термичка обрада, пескарење, брушење калибрирајућег дела, брушење дршке урезника, брушење врата урезника, оштрење са поделом, брушење навоја, брушење по обиму навоја, подбрусивање, означавање и прање урезника [4].

На основу радионичких цртежа урезника и редоследа обраде, формиран је репрезентативни модел урезника у коме су димензије биле повезане преко параметара. Параметри се могу задавати у.xml (XML је скраћеница за Extensible Markup Language, односно прошириви - мета језик за означавање текстуалних докумената и представља стандардни скуп правила за дефинисање формата података у електронској форми) формату или формату програма за табеларне прорачуне. У раду је искоришћен формат .xls програма за табеларне прорачуне *Microsoft Office Excel*, који се може дефинисати и у сличним програмима отвореног кода (нпр. *Apache OpenOffice*). Процес добијања параметара за конкретан алат је потпуно аутоматизован за већи распон урезника одређеног типа у програму за табеларне прорачуне у коме је формирана база података фамилије урезника са правим жлебовима, па је довољно само из падајуће листе изабрати називну меру урезника, његов корак и тип улазног дела да би се добио скуп конкретних вредности параметара који се даље користе у програму за моделирање. На слици 2 са леве стране приказан је изглед основног екрана програма за дефинисање скупа параметара, заједно са приказом дела коришћених параметара.

Модел урезника препознаје преко 20 параметара од којих су најбитнији они за формирање резног дела урезника: спољашњи пречник, корак, дужина резног дела, угао конуса, почетни пречник, грудни угао и број жлебова.



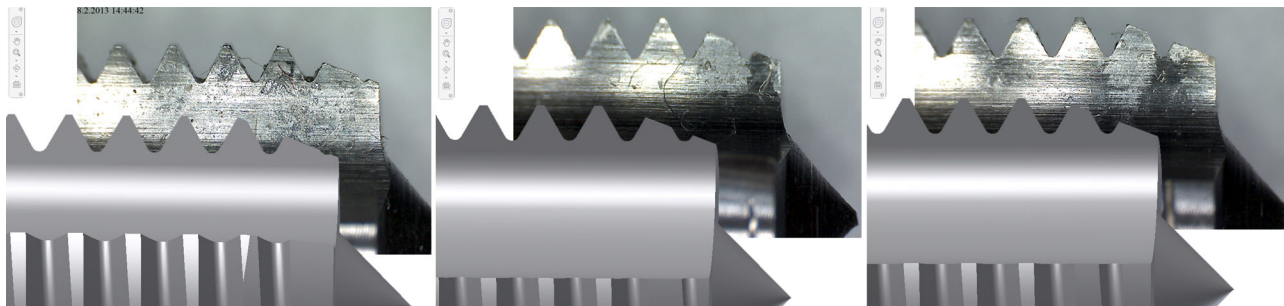
Слика 2. Улази у програм ПАРП1 за дефинисање скупа параметара и изглед урезника добијен коришћењем изабраног скупа параметара

У Autodesk Inventor-у се у зависности од изабраног урезника, кроз табелу параметара, тренутно добија виртуелни модел жељеног урезника, без потребе за поновним моделирањем од самог почетка сваког конкретног урезника, слика 2 десно. Опције за рад са параметрима се у програму налазе у =Manage= менију, опције =Parameters= за манипулацију са параметрима као и опције =Update= и =Rebuild All= за ажурирање модела са новим сетом параметара [5,6].

Оваквим начином моделирања, на једноставан и брз начин се може доћи до модела урезника било ког типа и називне димензије, чије су димензије унете у формирану базу података.

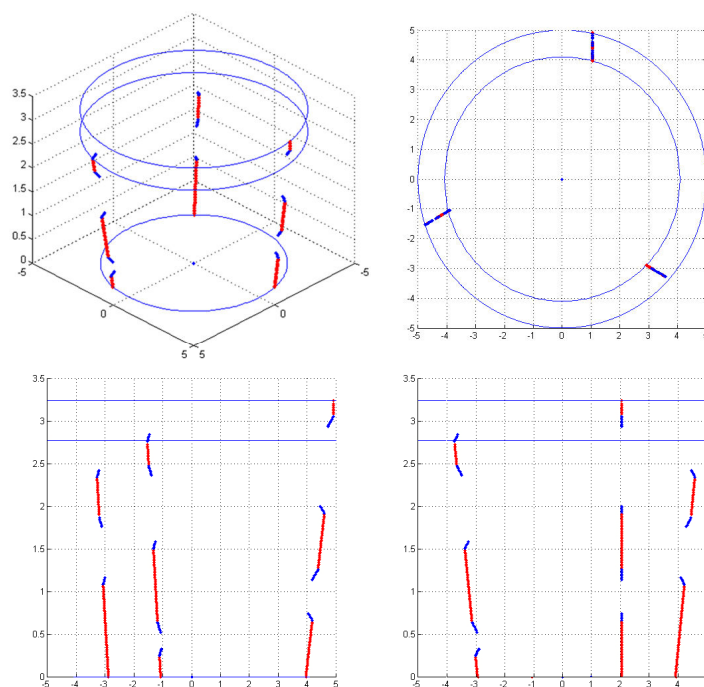
У конкретном случају, од интереса за даље истраживање је био резни део урезника са правим жлебовима различитих димензија, па су са модела коришћени подаци о положају и дужини појединачних сечива на резном делу урезника, који су ради прорачуна импортовани у програм *Matlab* у коме су вршене симулације процеса урезивања навоја.

Приликом дефинисања редоследа појединачних захвата обраде урезника, једна страна четвртке, тј. призме на крају дршке алата се механички означаи, и она је технолошка база за сва каснија базирања у захватима обраде урезника. На овај начин се добијају урезници који у границама толеранција имају приближно иста сечива. На слици 3 су приказани снимци резног дела урезника свих сечива урезника M10 са увећањем x35 и истовремено приказ модела урезника добијен у CAD софтверском пакету.



Слика 3. Резни део урезника на сваком жлебу на урезнику M10 (x35) и у CAD пакету

На слици 4 су приказана само сечива стандардног урезника M10, која учествују у захвату, и то црвеном бојом главна сечива и плавом бојом помоћна сечива, импортована из CAD програма.



Слика 4. Сечива на резном делу урезника M10 – главна (црвено) и помоћна (плаво)

3. ЗАКЉУЧАК

Урезник је вишесечни алат, чија су сечива по жлебовима прекидна. За даљи ток истраживања, од интереса је распоред и позиција сечива на резном делу урезника. Сечива, која се налазе у пресеку грудне површине која може бити равна, али и крива површ и леђне површине која је на улазном делу конус, могуће је идентификовати аналитички или преко модела у оквиру програма за моделирање, како је и приказано у овом раду. Приликом коришћења модела урезника, уместо формирања посебног модела за сваки будући потребни тип урезника искоришћен је принцип параметарског пројектовања, који вишеструко скраћује време потребно за дефинисање нових типова и димензија урезника.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Henderer, W.E., On the Mechanics of Tapping by Cutting, *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, pp.257-262, 1977
- [2] SRPS EN 22857, Брушени урезници за ISO метричке навоје толеранција од 4H до 8H и од 4G до 6G крупног и ситног навоја — Произвођачке толеранције навојног дела, 2011
- [3] SRPS EN 25967, Урезници и резачи навоја — Номенклатура главних типова и терминологија, 2011
- [4] Каталог ФРА - Чачак, 2012
- [5] Autodesk Inventor 2011® Professional - Help
- [6] <http://usa.autodesk.com/>

Popović, M.,

PARAMETRIC MODELING OF TAPS WITH STRAIGHT FLUTES

Abstract: This paper presents a procedure of modeling a family of taps with straight flutes in the CAD package Autodesk Inventor programming environment, using parametric modeling technique that allows to define the physical form of part with the values that are attached to attributes (primarily through dimensions). The set of attributes that describe the tap specific dimensions is obtained from a database, for a given nominal tap diameter, thread pitch and tap type. Tap is one of the most complex cutting tools used in practice and so defined model is used to identify the location and length of major and minor cutting edges, for the purposes of the force and the torque simulation in the tapping process.

Key words: tap, parametric modeling, CAD



Posteljnik Z., Stupar S., Svorcan J., Petrašinović N.¹⁾

POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH ANALIZA DEFORMACIJA KOMPOZITNE LOPATICE VETROTURBINE²⁾

Rezime

Lopaticе ветротурбине су последњих година предмет великог броја истраживања. Због своје одговорне улоге и бројних захтева које морају испунити пројектовање и производња лопатика јесу сложени процеси који подразумевају значајан утрошак времена. Применом одговарајућих програмских пакета у току пројектовања могуће је извршити preliminarnu procenu performansi лопатике које би накнадно биле верификоване експериментом. Такође, погодности нумеричких симулација могуће је искористити и за процену унутрашње структуре композитних лопатика, с обзиром да већином овакви подаци нису доступни од стране произвођача. Тако је у приказаном раду анализирана структура композитне лопатике ветротурбине, а за задата оптерећења упоређени су резултати деформација добијених статичким испитивањем и нумеричким прорачуном.

Кључне речи: лопатике ветротурбина, експеримент, МКЕ, композити

1. UVOD

Vetroturbine predstavljaju jedan od danas veoma zastupljenih vidova korišćenja obnovljivog izvora energije. Radi povećanja efikasnosti pretvaranja mehaničke energije u električnu i osiguranja dugog i pouzdanog radnog veka ovakvog sistema, posebnu pažnju je potrebno posvetiti razvoju i proizvodnji rotora vetroturbine. On se sastoji od glavčine rotora na koji su montirane, uglavnom kao optimalno rešenje, tri lopatice. Maksimalno iskorišćenje energije vetra najviše zavisi od konstrukcije lopatica, s toga one i jesu najkritičnije komponente vetroturbine. [1] U toku poslednje decenije dimenzije rotora znatno su povećane, pa je samim tim i cela konstrukcija opterećenija. Ovo svakako predstavlja izazov sa aspekta strukture lopatice, počevši od izbora materijala koji značajno utiče na performanse lopatice, kao i njene karakteristike – masu, mehanizam oštećenja, radni vek do pojave zamora, itd. Zbog svojih višestrukih prednosti u odnosu na metale (poboljšanog odnosa mase i nosivosti, mogućnosti da se lakše oblikuju prema kompleksnoj geometriji) primena kompozitnih materijala u izradi lopatica vetroturbina je veoma rasprostranjena. [2] Osobina kompozita je da su anizotropni materijali i to se koristi za poboljšanje performansi komponenata. Najčešće su u upotrebi u formi preimpregniranog platna - staklena, ugljenična ili aramidna vlakna u kombinaciji sa epoksi ili poliestarskom smolom. Postupkom lamiranja (slaganja) ovih platana dobija se laminat – laminarni kompozit koji se i koristi kod strukturalno najodgovornijih elemenata, kao što su lopatice vetroturbina. Veliki broj faktora mora biti uzet u obzir prilikom projektovanja kompozita; karakteristike novonastalog kompozita ne zavise samo od materijala ispune (vlakana) i matrice (smola, metal, keramika), već i od toga u kom su odnosu međusobno zastupljeni, kakav je geometrijski oblik i raspored vlakana u matrici. Takođe, važno je uzeti u obzir pretpostavljena spoljna opterećenja, uslove u kojima će materijal biti korišćen, itd. Pouzdanost projektovane kompozitne lopatice mora biti ispitana na određen način i garantovana, kako bi ona uspešno ispunila svoj radni vek. Dakle, propisnim testiranjem prototipa kompozitne lopatice treba utvrditi da li je izabrani materijal u stanju da izdrži sva opterećenja kojima je lopatica izložena u operativnim uslovima. Izvođenje eksperimentalnih ispitivanja lopatica u punoj razmeri najčešće je izuzetno skupo, pa se nумеричке

¹⁾ Zorana Posteljnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zposteljnik@mas.bg.ac.rs), prof. dr Slobodan Stupar, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ssupar@mas.bg.ac.rs), ass. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs), Nikola Petrašinović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (npetrasinovic@mas.bg.ac.rs)

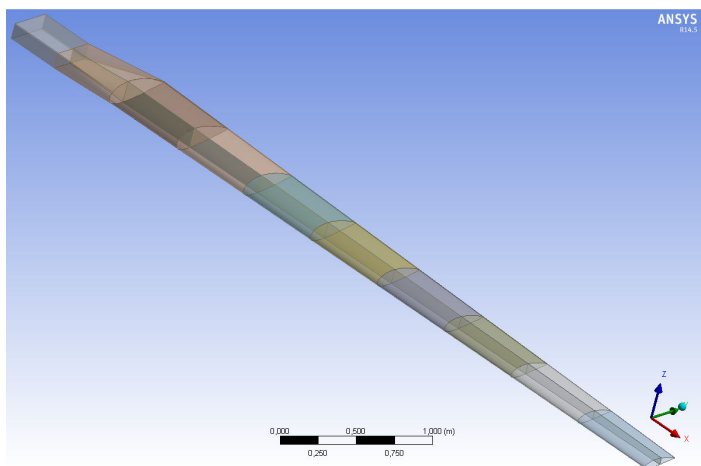
²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_35035: Istraživanje i razvoj savremenih pristupa projektovanju kompozitnih lopatica rotora visokih performansi, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

simulacije u odgovarajućim programskim paketima nameću kao odličan vid uštede vremena i novca, s obzirom na mogućnost višekriterijumske optimizacije strukture modela lopatice. [3]

Prikazani rad predstavlja istraživanje u oblasti strukture lopatice vetroturbine male snage. Analizirana lopatica je uzeta u obzir sa vrlo malo početnih informacija; aerodinamički oblik je poznat i nije dalje razmatran, nominalno opterećenje za koje je izvršeno statičko ispitivanje takođe je dato. Tehnologija proizvodnje lopatice nije bila dostupna od strane proizvođača, pa su materijal i unutrašnja struktura lopatice pretpostavljeni tako da zadovoljavaju uslov težine. Prilikom izbora nepoznatih parametara uzeta su u obzir brojna istraživanja i stečena iskustva u okviru vodećih instituta i kompanija u svetu koja su bila dostupna. [3-5] Za numeričku analizu primenom metode konačnih elemenata korišćen je komercijalni softver ANSYS, i na osnovu ovog modela upoređeni su rezultati deformacija sa onim dobijenim eksperimentalnim putem i izvedeni su određeni zaključci.

2. NUMERIČKI MODEL I ANALIZA MKE

Geometrijski model je dužine 5894 mm, umesto 6000 mm kolika je dužina prave lopatice, jer vrh lopatice nije uzet u razmatranje. Maksimalna dužina tetive iznosi 526 mm, dok je pri vrhu lopatice 290 mm. U korenom delu lopatice korišćen je aeroprofil NACA 4430 iz strukturalnih razloga, a pri vrhu NACA 4420 radi održanja aerodinamičke efikasnosti. Lopatica nije vitoperena, pa se sa slike 1 može zaključiti da je polazni model nije kompleksne geometrije. Radi jednostavnosti lopatica je prvobitno modelirana u programskom paketu CATIAv5, a zatim uvezena u ANSYS.



Slika 1. Geometrijski model lopatice

Tabela 1. Mehaničke karakteristike materijala		
Materijal	Unidirekcioni E-staklo/epoksi	Pena
ρ (kg/m ³)	2100	200
E_x (MPa)	60 000	80
E_y (MPa)	13 000	80
E_z (MPa)	13 000	20
ν_{xy}	0.3	0.35
ν_{yz}	0.4	0.35
ν_{xz}	0.3	0.35
G_{xy} (MPa)	4000	29
G_{yz} (MPa)	4600	29
G_{xz} (MPa)	4600	29

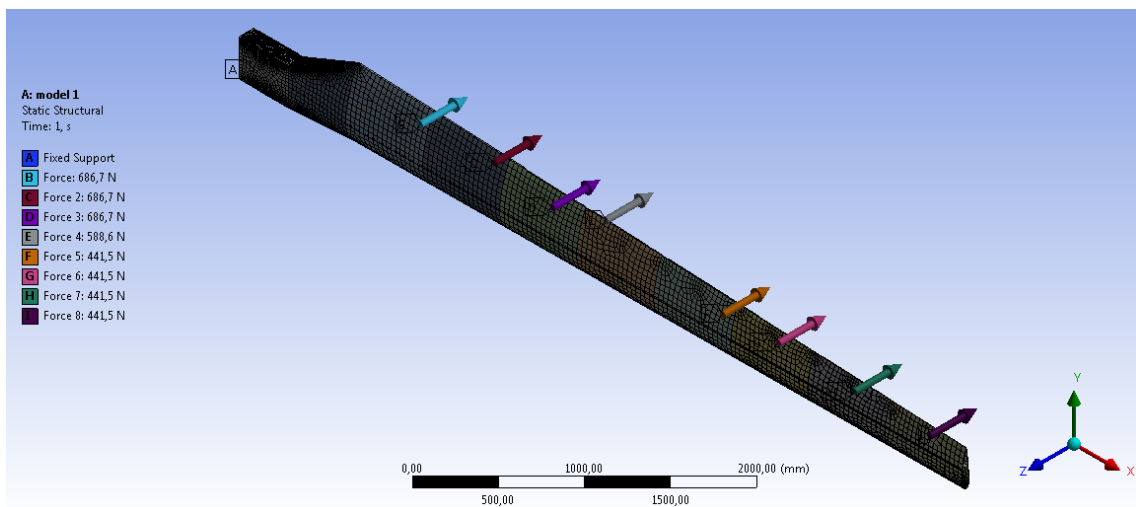
Usled nedostataka informacija o strukturi lopatice i materijalu od kojeg je napravljena (poznato je samo da je kompozit u pitanju), pretpostavljeno je da lopatica ima I-profilnu ramenjaču koja se prostire duž aeroprofilisanog dela i postavljena je na 30% tetive u korenu i 50% tetive pri vrhu lopatice. Iako je u definisanju strukture lopatice dominantan i kutijasti oblik ramenjače, I-profilna ramenjača zastupljenija je u kod lopatica manjih dimenzija i u slučajevima kada su korišćeni aeroprofil male relativne debljine, pa je iz tog razloga i izabrana za ovaj numerički model. Debljina zida ramenjače je veća u odnosu na debljinu oplata kako bi se obezbedila stabilnost lopatice. Radi uštede u masi ramenjača se uglavnom pravi od kompozita sendvič konstrukcije, za čije jezgro se biraju razni penasti materijali, balsa drvo, stiropor, itd, što je učinjeno i u ovom radu.

Kao najčešće korišćeni materijali u izradi lopatica javljaju se staklena i ugljenična vlakna u kombinaciji sa epoksi smolom. Za prikazani model izabrana su duga neprekidna E-staklena vlakna, prvenstveno zbog jednostavnosti procesa proizvodnje, niže cene, izrazito visoke čvrstoće, otpornosti na toplotu. Iako je ova vrsta vlakana slabijih fizičkih karakteristika od vlakana tipa S i R, vrlo često su u upotrebi jer se njihovom primenom mogu zadovoljiti određeni strukturni zahtevi koji se postavljaju pred ovakvu kompozitnu lopaticu. Vlakna su u aeroprofilisanom delu lopatice postavljena pod uglovima od 0°, koji se poklapa sa podužnom osom lopatice kao otpor savijanju; +45° i -45°, kao otpor uvijanju i izvijanju.

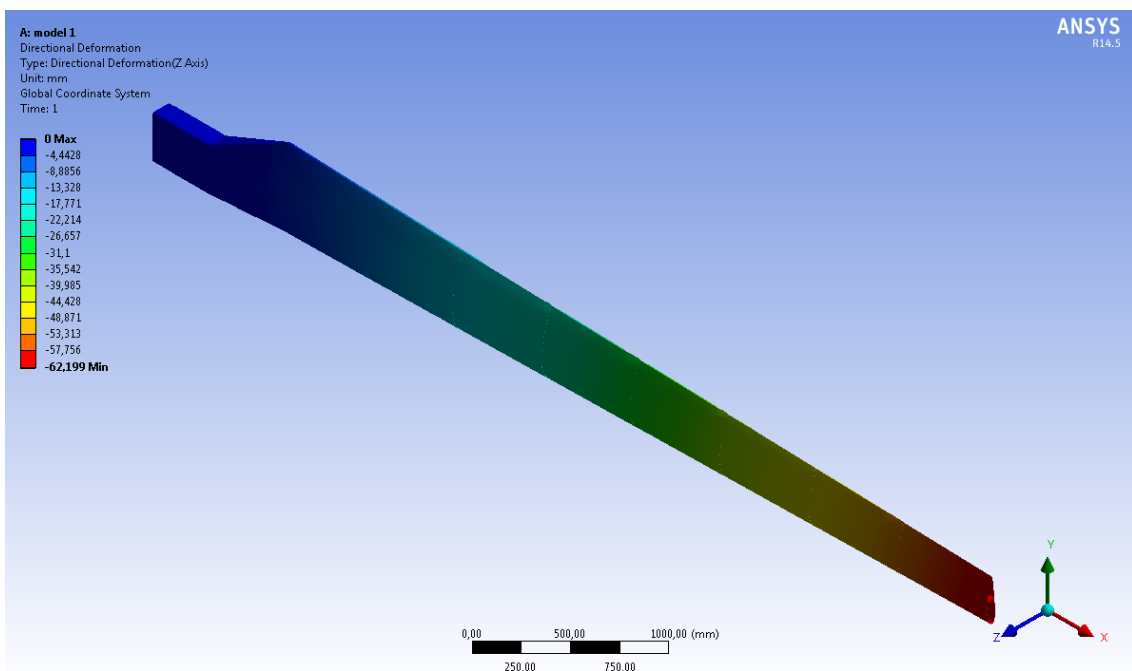
Raspodela debljine slojeva (oplata) formirana je tako da se zadovolji uslov težine lopatice koji iznosi 75 kg. Najveća debljina oplata je u korenom delu, i u prelazu na aeroprofilisani deo, jer se na tim mestima javlja najveća koncentracija napona. Jedan od načina određivanja raspodele debljine oplata u preliminarnom dizajnu strukture prikazan je u radu [6]. Geometrijski model podeljen je na pet delova i ramenjaču; formirana struktura lopatice prikazana je u tabeli 2. Svi formirani laminati su simetrični.

Tabela 2. Pretpostavljena struktura lopatice				
Segment	r (mm)	Šema ređanja lamina	Debljina laminata (mm)	Materijal
Koreni deo	0 – 901	[(0/90)6] _s	10.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 1	901 – 2149.25	[(0/45/0/-45/0)4] _s	8.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 2	2149.25 – 3397.5	[(0/45/0/-45/0)3] _s	6.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 3	3397.5 – 4645.75	[(0/45/0/-45/0)2] _s	4.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 4	4645.75 – 5894	[0/45/0/-45/0] _s	2.1	UD E-staklo/epoksi
Ramenjača	901 – 5894	[-30/0/30/0/-30/0/30/pena] _s	14	UD/Pena/UD

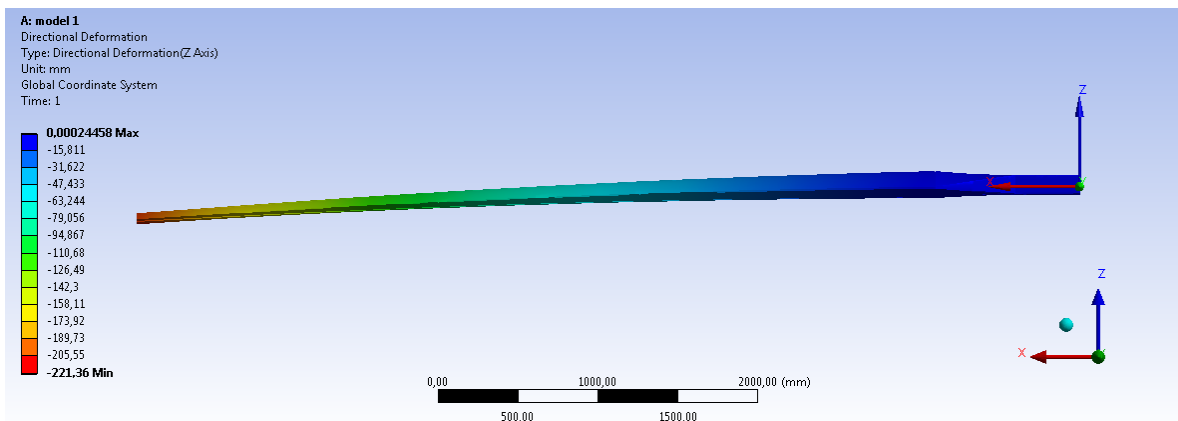
Numerički proračun izvršen je u programu ANSYS14.5, za 8 slučajeva opterećenja. Mreža se sastoji od 11554 elemenata i nije dodatno usložnjena iako bi to doprinelo tačnosti rezultata, ali i dužem proračunu; u ovom slučaju smatrano je da su dobijene vrednosti pomeranja zadovoljavajuće. Na slikama ispod prikazani su rezultati nekih od slučajeva opterećenja, a kompletne vrednosti i poređenje sa eksperimentalnim rezultatima dato je u poglavlju – Zaključak.



Slika 2. Formirana mreža i vrednosti opterećenja



Slika 3. Rezultati dobijeni unosom opterećenja 5



Slika 4. Rezultati dobijeni unosom opterećenja

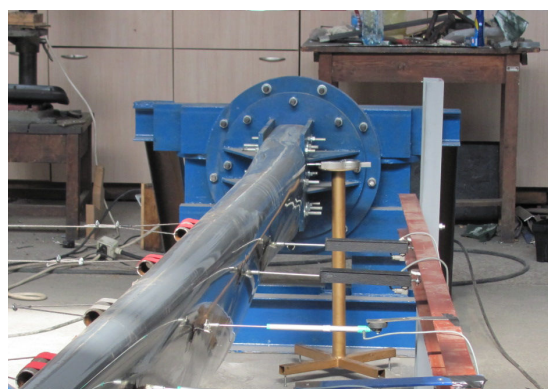
3. STATIČKO TESTIRANJE LOPATICE

Statičko ispitivanje ima važnu ulogu u proceni performansi jedne lopatice i dosta se pažnje posvećuje ovom načinu testiranja. [7,8] Vrši sa ciljem utvrđivanja da li je lopatica dovoljno čvrsta da izdrži ekstremna opterećenja. Takođe bi trebalo da bude dovoljno kruta kako ne bi došlo do kontakta njenog vrha sa stubom vetroturbine u toku rada, pojave rezonance, itd.

Na slikama 5-11 može se videti kompozitna lopatica koja je testirana u ovom istraživanju. Prvenstveno je izvršen prihvat lopatice, odnosno uklještenje u korenom delu, a zatim je obeleženo 8 mernih mesta. Na stani gornjake, na 1/4 dužine tetive, postavljena su ulazna mesta za opterećenja. Duž donjake lopatice, na mestima koja odgovaraju mestima unosa opterećenja, postavljeni su davači pomeranja – uređaji za merenje pomeranja lopatice u pravcu dejstva opterećenja.



Slika 5. Uklještenje lopatice



Slika 6. Postavka eksperimenta

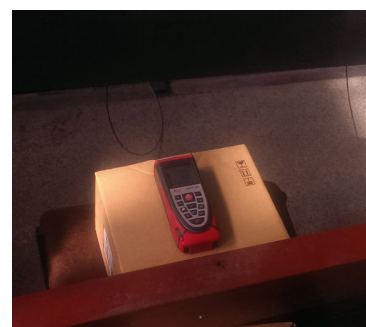
Merno mesto 1, u korenu lopatice, mereno je pomoću komparatera, slika 5, na sledećih 5 mernih mesta korišćeni su ekstenziometri dužina hoda od 150 do 270 mm, slike 7 i 8, dok su na poslednja dva merna mesta deformacije merene pomoću laserskih daljinomera, slika 9.



Slika 7. Ekstenziometar



Slika 8. Ekstenziometar



Slika 9. Laserski daljinomer



Slika 10. Lopatica u nultom položaju



Slika 11. Opterećenje lopatice tegovima

Lopatica je postepeno opterećivana tegovima potrebne težine kao što je prikazano u tabeli 3, (8 slučajeva opterećenja). Za svako zadato opterećenje merena su pomeranja u odnosu na nulti položaj kada je lopatica neopterećena pomoću merno-akvizicionog sistema na računaru. Rezultati su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3. Opterećenje i deformacije lopatice po mernim mestima

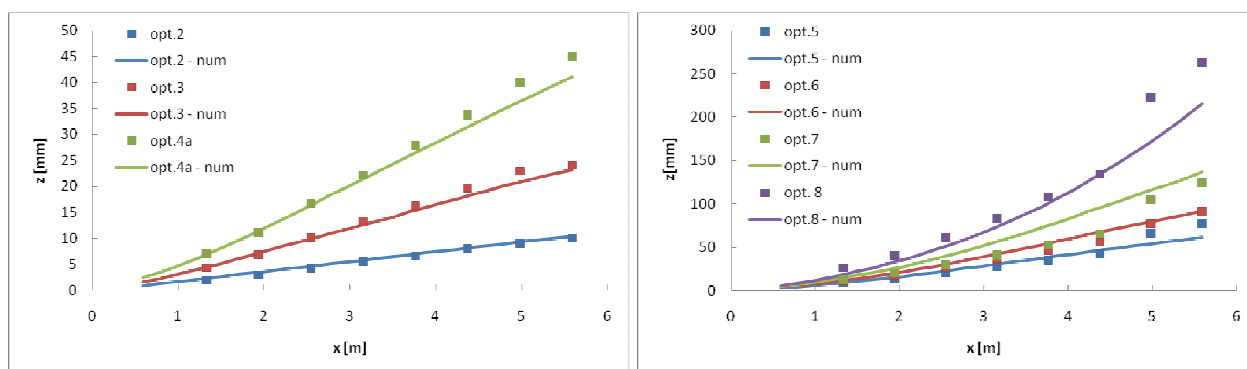
	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8
Koor. [m]	1,3302	1,9388	2,5473	3,1557	3,7642	4,3727	4,9812	5,5897
Opterećenje 1[kg]	70							
Pomeranje [mm]	0,682	0,978	1,733	1,379	2,037	2,433	2	2
Opterećenje 2[kg]	70	70						
Pomeranje [mm]	1,917	2,978	5,492	4,257	6,589	8,025	9	10
Opterećenje 3[kg]	70	70	70					
Pomeranje [mm]	4,359	6,82	13,197	10,115	16,232	19,7	23	24
Opterećenje 4[kg]	70	70	70	60				
Pomeranje [mm]	7,099	11,118	22,202	16,679	27,895	33,78	40	45
Opterećenje 5[kg]	70	70	70	60	45			
Pomeranje [mm]	8,94	13,919	27,865	20,885	35,018	42,389	66	77
Opterećenje 6[kg]	70	70	70	60	45	45		
Pomeranje [mm]	11,602	18,043	36,222	27,053	46,219	55,957	77	91
Opterećenje 7[kg]	70	70	70	60	45	45	45	
Pomeranje [mm]	13,077	20,298	41,377	30,592	53,446	65,6	105	124
Opterećenje 8[kg]	70	70	70	60	45	45	45	45
Pomeranje [mm]	26,419	40,819	60,977	83,021	108,204	133,691	222,5	263

4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani numerički model kompozitne lopatice i analiza metodom konačnih elemenata, kao i statičko testiranje iste u punoj razmeri za zadata opterećenja. Dobijene vrednosti deformacija date su u formi dijagrama – tačkama su predstavljene vrednosti rezultata eksperimenta (tabela 3.), dok linije prikazuju vrednosti pomeranja dobijene numeričkim proračunom koje se nalaze duž lopatice na 1/4 tetive – istoj lokaciji na kojoj su postavljeni i davači pomeranja prilikom izvođenja eksperimenta. Vidimo da se rezultati za manja opterećenja jako dobro poklapaju, dok za nešto veća opterećenja najveća greška iznosi 20%, što smatramo prihvatljivim u preliminarnim inženjerskim proračunima. S toga, nameće se zaključak da izabrana kompozitna struktura lopatice može da odgovara realnom modelu.

Naravno, treba naglasiti da je numerički model lopatice uprošćen, npr. spoj ramenače sa oplatom koji nazivamo zid ramenače takođe ima svoju ulogu u prenosu opterećenja, a smanjuje i koncentraciju napona koji se javlja na ovom spoju. Njegove dimenzije isto utiču na čvrstoću lopatice i, kao i mnogi drugi parametri

– položaj i debljina ramenjače, raspored debljine slojeva, najčešće i najbolje se određuju metodama optimizacije (genetski algoritam, optimizacija rojem čestica, itd.). U tom smislu, složeniji model lopatice bi sigurno doveo do još tačnijih rezultata.



Slika 12. Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Iako troškovi proizvodnje kompozitne lopatice iznose 15-20% od ukupne cene vetroturbine, inovacije u dizajnu strukture lopatice predstavljaju zanemarljiv iznos u odnosu na ukupan trošak zahvaljujući numeričkim proračunima i tehnikama optimizacije. Jedan od načina kojim bi se predložena struktura lopatice u ovom radu mogla tačnije odrediti jeste upotrebom neuronskih mreža.

5. LITERATURA

- [1] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, USA, 2004
- [2] Jones R., *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis, USA, 1999
- [3] Dal Monte A., Castelli M., Benini E., *Multi objective structural optimization of a HAWT composite blade*, Composite structures, 106 (2013), 362-373
- [4] Chen J, et al. *Structural optimization study of composite wind turbine blade*, Materials and Design 46 (2013) 247-255
- [5] Mandell, J. E., Samborsky, D. D., *DOEMSU composite material fatigue database: Test methods, materials, and analysis*. Contractor Report SAND97-3002, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA, 1997
- [6] Wu W.H, Young W.B, *Structural analysis and design of the composite wind turbine blade*, Applied Composite Materials (2012) 19:247-257
- [7] Malhotra P., Hyers R.W., Manwell J.F., McGowan J.G., *A review and design study of blade testing systems for utility-scale wind turbines*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012) 284-292
- [8] Jorgensen E. R., et al. *Full scale testing of wind turbine blade to failure - flapwise loading*, Risoe-R-1392, Risoe National Laboratory, Roskilde, 2004

Posteljnik Z., Stupar S., Svorcan J., Petrašinović N.

COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF COMPOSITE WIND TURBINE BLADE DEFORMATION

Abstract: In recent years wind turbine blades are subject of numerous research and studies. Because of their responsible function in wind turbine system, and requirements that must be satisfied, design of the blades is complex process that involves significant amount of time. By using modern software tools during the design phase it is possible to conduct preliminary assessment of blade's performance which would be subsequently verified by experiment. Also, numerical simulations can be used for composite blade internal structure prediction. This paper presents structural analysis of composite wind turbine blade. Comparison of numerical results and results obtained by static testing is given.

Key words: wind turbine blades, composites, FEA, testing



Svorcan, J., Stupar, S., Posteljnik, Z., Baltić, M. ¹⁾

ODREĐIVANJE OSOBINA MATERIJALA KOMPOZITNIH DELOVA POMOĆU EKSPERIMENTALNIH PODATAKA I NEURONSKIH MREŽA ²⁾

Rezime

Predstavljena je jednostavna, ekonomična i interesantna proračunska tehnika za određivanje mehaničkih osobina materijala kompozitnih ploča. Na osnovu vrednosti deformacija krajeva uklještene ploče pri različitim slučajevima opterećenja - zatezanju, kontinualnom opterećenju, savijanju i uvijanju, koje mogu biti dobijene kako eksperimentalno tako i u numeričkim analizama, moguće je proceniti koji materijal je upotrebljen kao i kako su lamine kompozita poslagane. Nekoliko različitih veštačkih neuronskih mreža je formirano, trenirano i testirano. Skupovi za treniranje, validaciju i testiranje dobijeni su metodom konačnih elemenata. U radu su navedene mogućnosti i ograničenja formiranih mreža kao i moguće dalje primene ili unapređenja.

Ključne reči: kompozitna ploča, deformacije, MKE, veštačke neuronske mreže

1. UVOD

Zbog svojih dobrih karakteristika, kao što su visoke vrednosti specifične čvrstoće i krutosti, otpornosti na zamor i koroziju, male mase, mogućnosti da se oblikuju kao zakrivljene površine, itd. kompozitni materijali su danas prilično zastupljeni u vazduhoplovstvu, brodogradnji, automobilske industriji, a naročito u proizvodnji lopatica vetroturbina [1]. Najčešće se sastoje iz slojeva/lamina koji se mogu razlikovati po mehaničkim i hemijskim osobinama, slika 1, pa je njihovim slaganjem moguće znatno uticati na čvrstoću i radni vek dela koji se izrađuje. Sa druge strane, upravo ova raznolikost predstavlja izvor problema pri projektovanju i proračunu kompozitnih delova [2]. Dalje, pošto se najčešće koriste u izradi nestandardnih delova, karakteristike korišćenih materijala (kako lamina tako i osnovnih materijala vlakana i smola) u najvećem broju slučajeva nisu dostupne, već ih veliki proizvođači čuvaju i dalje razvijaju samo u okviru svoje kompanije. Iz tih razloga, ovde je prikazana proračunska metoda koja omogućava procenu mehaničkih karakteristika upotrebljenih materijala kao i redosleda slaganja lamina. U praksi se koriste različite hibridne metode procene, dok se najpouzdanijim pristupom smatra onaj koji uključuje merenje sopstvenih frekvencija [3-5]. Razvijena tehnika zasniva se na primeni veštačkih neuronskih mreža na ulazne eksperimentalne ili numeričke podatke - rezultate statičkog ispitivanja. Jednostavna je i ekonomična, a može se koristiti i pri "obrnutom" pristupu projektovanju. Za dozvoljene/željene deformacije dela, ovim pristupom moguće je odrediti "preporučeni" materijal.

Veštačke neuronske mreže, u nastavku NM, formirane su po uzoru na nervni sistem živih organizama [6]. Sastoje se iz spleta veštačkih neurona što im omogućava masivnu paralelnu obradu podataka i čini ih robusnim alatom pogodnim za predviđanje budućih/nepoznatih događaja/podataka.

2. STRUKTURNI MODEL

Razmatrana je obična kompozitna ploča dimenzija 300 x 50 mm, uklještена na jednom kraju. Materijal

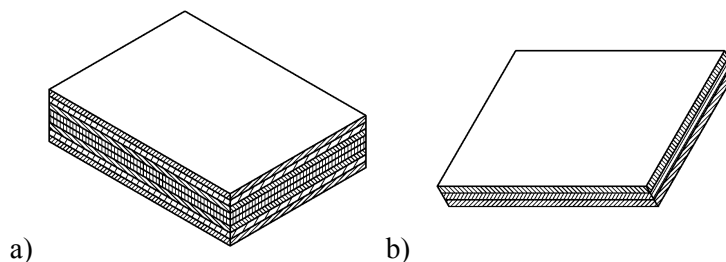
¹⁾ ass. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs), prof. dr Slobodan Stupar, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (sstupar@mas.bg.ac.rs), Zorana Posteljnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zposteljnik@mas.bg.ac.rs), Marija Baltić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mbaltic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR35035: Istraživanje i razvoj savremenih pristupa projektovanja kompozitnih lopatica rotora visokih performansi, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

lamina je transverzalno izotropna, odnosno poseduje jednu osu simetrije, i moguće ga je opisati sa 5 konstantnih vrednosti: E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} i ν_{23} koje predstavljaju module elastičnosti i klizanja kao i Poasonov koeficijent po glavnim pravcima [2]. Ovaj model je pogodan za opisivanje platana od unidirekcionih vlakana. Karakteristike korišćenih materijala date su u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike materijala lamina										
Br.	1	2	3	4*	5*	6	7*	8*	9	10*
Opis	Čelik	Aluminijum	Staklena vlakna				Karbonska vlakna			
E_1 [GPa]	200	69	31.7	37.9	41	42.3	60	133.9	136	145.9
E_2 [GPa]	200	69	7.6	9.4	10.4	9.7	13	7.7	9.8	13.3
G_{12} [GPa]	77	27	3.5	3.4	4.3	6.5	4	4.3	4.7	4.4
ν_{12}	0.3	0.3	0.32	0.30	0.28	0.30	0.30	0.30	0.28	0.26
ν_{23}	0.3	0.3	0.32	0.42	0.50	0.30	0.40	0.39	0.15	0.47

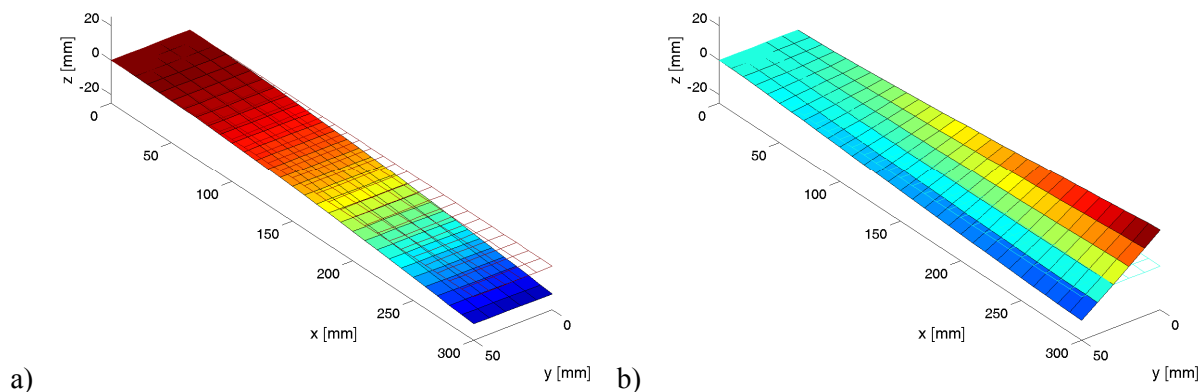
U prvom primeru, razmatrani laminat sastoji se iz 8 simetrično složenih lamina od istog materijala, $[\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3/\alpha_4]_S$, slika 1a. Uglovi α_i predstavljaju orijentaciju platna u odnosu na pravac vlakna. Debljine svih lamina su jednake i iznose 1.25mm. Na ovaj način svaki model predstavljen je preko 9 parametara, (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , ν_{23} , α_1 , α_2 , α_3 , α_4) koji ujedno predstavljaju i koordinate izlaznog vektora ispitivanih veštačkih neuronskih mreža. U drugom primeru razmatrani laminat je nehomogen. Sastoji se iz 3 lamine debljine 1.5mm, $[\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3]$, izradene od različitih materijala pa je svaki model bio definisan preko 18 parametara - ($E_{1,1}$, $E_{2,1}$, $G_{12,1}$, $\nu_{12,1}$, $\nu_{23,1}$, $E_{1,2}$, $E_{2,2}$, $G_{12,2}$, $\nu_{12,2}$, $\nu_{23,2}$, $E_{1,3}$, $E_{2,3}$, $G_{12,3}$, $\nu_{12,3}$, $\nu_{23,3}$, α_1 , α_2 , α_3), slika 1b.



Slika 1. Prikaz laminata korišćenog u a) primeru 1, b) primeru 2

Potreban ulazni vektor za neuronske mreže sadrži ukupna pomeranja slobodnih krajeva ploče pri različitim opterećenjima: zatezanju, kontinualnom opterećenju po ploči, savijanju i uvijanju, slika 2. Iako su, u prvom primeru, razmatrani samo simetrični slučajevi opterećenja, pošto lamine mogu biti nesimetrično složene u odnosu na podužnu osu, u daljoj analizi korišćena su pomeranja oba kraja ploče (što kod izotropnog materijala ne bi bilo potrebno). Prikazani rezultati dobijeni su metodom konačnih elemenata na mreži koja sadrži 150 elemenata (186 čvorova).

U drugoj analizi broj izlaznih parametara značajno je veći, pa je povećan broj različitih slučajeva opterećenja, a time i broj sakupljenih pomeranja da bi se povećala tačnost procene, što će biti detaljnije analizirano u odeljku Rezultati.

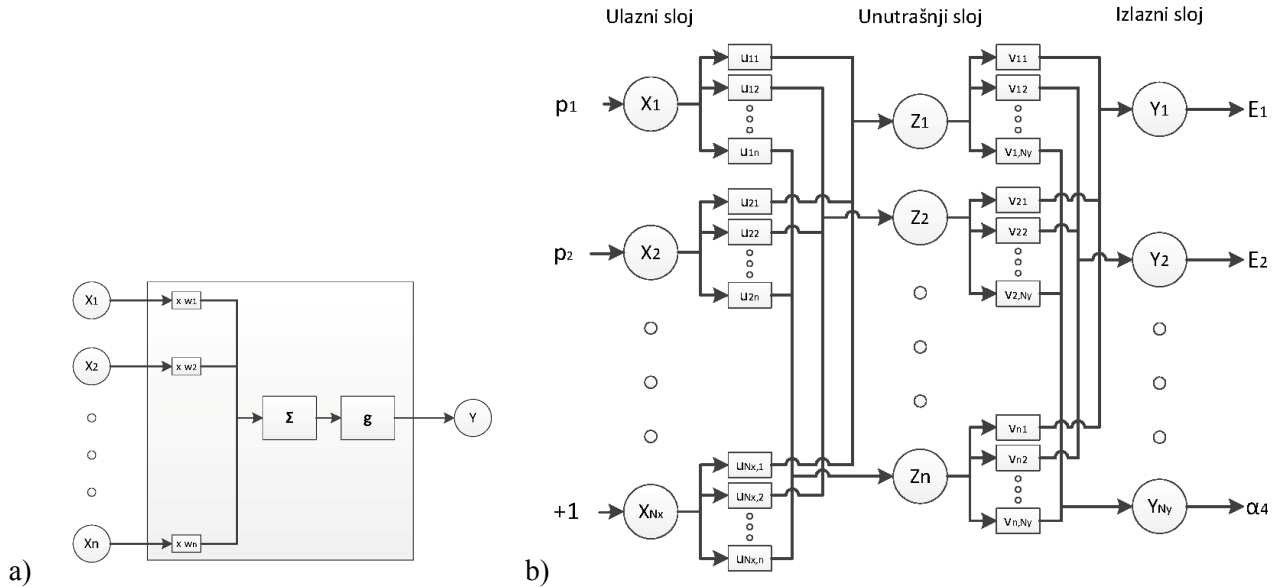


Slika 2. Primer proračunatih pomeranja kompozitne ploče pri a) savijanju i b) uvijanju

3. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

3.1 Osobine i tipovi neuronskih mreža

Uprošćeni prikaz veštačkog neurona ilustrovan je na slici 3a. Suština njegovog funkcionisanja sastoji se u postojanju velikog broja ulaznih veza kojima neuron prima spoljašnje nadražaje, skalira ih i sumira, a potom formira izlazni signal primenom aktivacione funkcije g na zbirni ulaz. Osnovne oblasti primene NM obuhvataju: prepoznavanje oblika, slika, govora, telekomunikacije, medicinsku dijagnostiku, meteorologiju, ali je i sve češća njihova primena u inženjerskim problemima [7].



Slika 3. a) Prikaz veštačkog neurona, b) Troslojna NM

Za uspešno razvijanje NM potrebno je pripremiti ulazne i izlazne parametre, odabrati odgovarajuću arhitekturu i gustinu mreže i napraviti odgovarajući izbor parametara mreže. Ovde su korišćene višeslojne, nepovratne mreže čiji je tip treniranja bio nadgledan. Ovakav izbor podrazumeva manje, jednostavnije mreže koje su dobre za globalne aproksimacije i manje su osetljive na nevalidne ulazne podatke [6,8]. Aktivaciona funkcija, data izrazom 1, izabrana je iz familije S-funkcija zbog svojih karakteristika: neprekidnosti, diferencijabilnosti i skupa vrednosti funkcije (0,1).

$$g(x) = 1 / (1 + e^{-x}), g'(x) = g(x)(1 - g(x)) \quad (1)$$

Vektor ulaznih podataka je normiran i dodat mu je još jedan čvor vrednosti 1 čija se vrednost koeficijenta određuje kao i kod ostalih čvorova. Njime se reguliše transliranje aktivacione funkcije duž x -ose i povećava fleksibilnost NM. Doprinos svakog neurona j računat je po izrazu 2, gde w_{ij} označava vrednost odgovarajućeg koeficijenta pridodeljenog vezi između čvorova i i j , a X_i vrednost čvora i .

$$Y_j = g \left(\sum_i w_{ij} X_i \right) \quad (2)$$

Razmatrane su različite arhitekture NM koje su sadržale ulazni, jedan ili dva unutrašnja i izlazni sloj. Primer klasične troslojne konfiguracije prikazan je na slici 3b. Izlazni sloj, dimenzije 9 ili 18, vraća procenjene vrednosti mehaničkih osobina materijala laminata i odgovarajuće orijentacije lamina.

3.2 Postupak treniranja NM

Proces treniranja je iterativan - u svakom koraku računa se vektor ukupne greške ε (iste dimenzije kao i izlazni sloj) kao polovina sume kvadrata razlike proračunate Y i željene vrednosti izlaza Y_d iz skupa za treniranje, izraz 3. Skupovi za treniranje, validaciju i testiranje formirani su slučajnim izborom vrednosti parametara. Svi materijali izlistani u tabeli 1 korišćeni su u prvom primeru, dok su samo materijali označeni * korišćeni u primeru 2. Kako je orijentacija lamina mogla biti u intervalu $(-90^\circ, 90^\circ]$ sa korakom 5° u

primeru 1 ili 15° u primeru 2, ukupan broj mogućih modela ploče iznosi nekoliko stotina hiljada. Dimenzije skupa za treniranje, validaciju i testiranje iznose redom 8000, 1000 i 1000.

$$\varepsilon^k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (Y_i^k - Y_{d,i}^k)^2 \quad (3)$$

Na osnovu komponenti vektora ukupne greške potom je vršena korekcija odgovarajućih koeficijenata mreže (algoritam povratnog prostiranja) po izrazu 4.

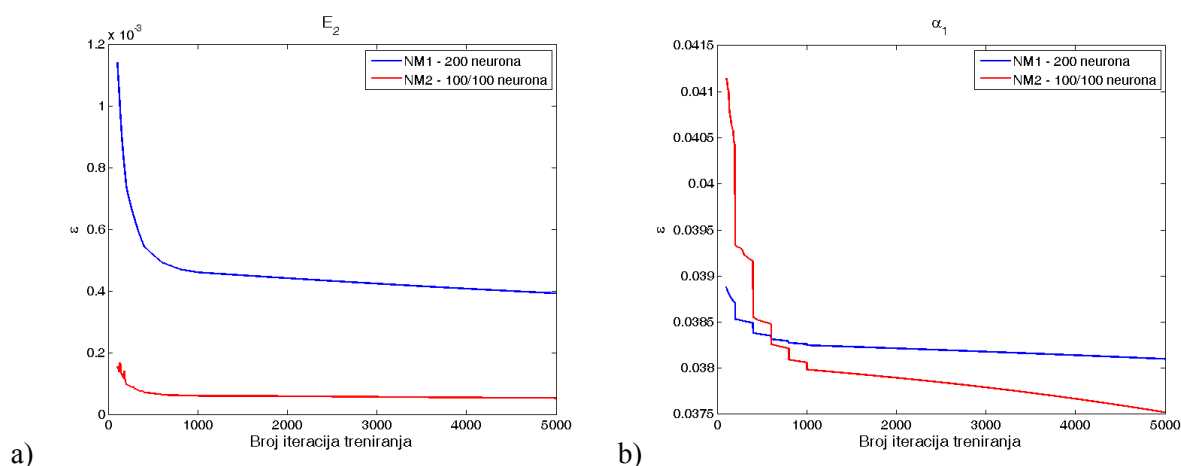
$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial \varepsilon^k}{\partial w_{ij}} \quad (4)$$

Vrednost koeficijenta η ("brzine učenja") menjana je sa brojem iteracija od početne koja je iznosila 0.1 do krajnje jednake 0.002. Početne vrednosti težinskih faktora w_{ij} takođe su slučajno zadate u intervalu (-2.5,2.5). Broj iteracija treniranja mreže ograničen je rezultatima skupa za validaciju. Naime, koeficijenti mreže se tokom treninga prilagođavaju vrednostima skupa za treniranje. Da ne bi izgubili na opštosti, NM proveravamo na skupu za validaciju različitom od skupa za treniranje. Onog trenutka kada greška skupa za validaciju počne da raste, treba prestati sa postupkom treniranja mreže.

4. REZULTATI

4.1 Primer 1

Ocena kvaliteta i pouzdanosti rezultata razmatranih NM vršena je nad skupom za testiranje. Ispitivane su mreže sa jednim ili dva skrivena sloja, NM1 i NM2, sa po 200 ili 100/100 neurona u skrivenom sloju/slojevima. Konvergencije određenih parametara tokom treniranja prikazane su na slici 4.



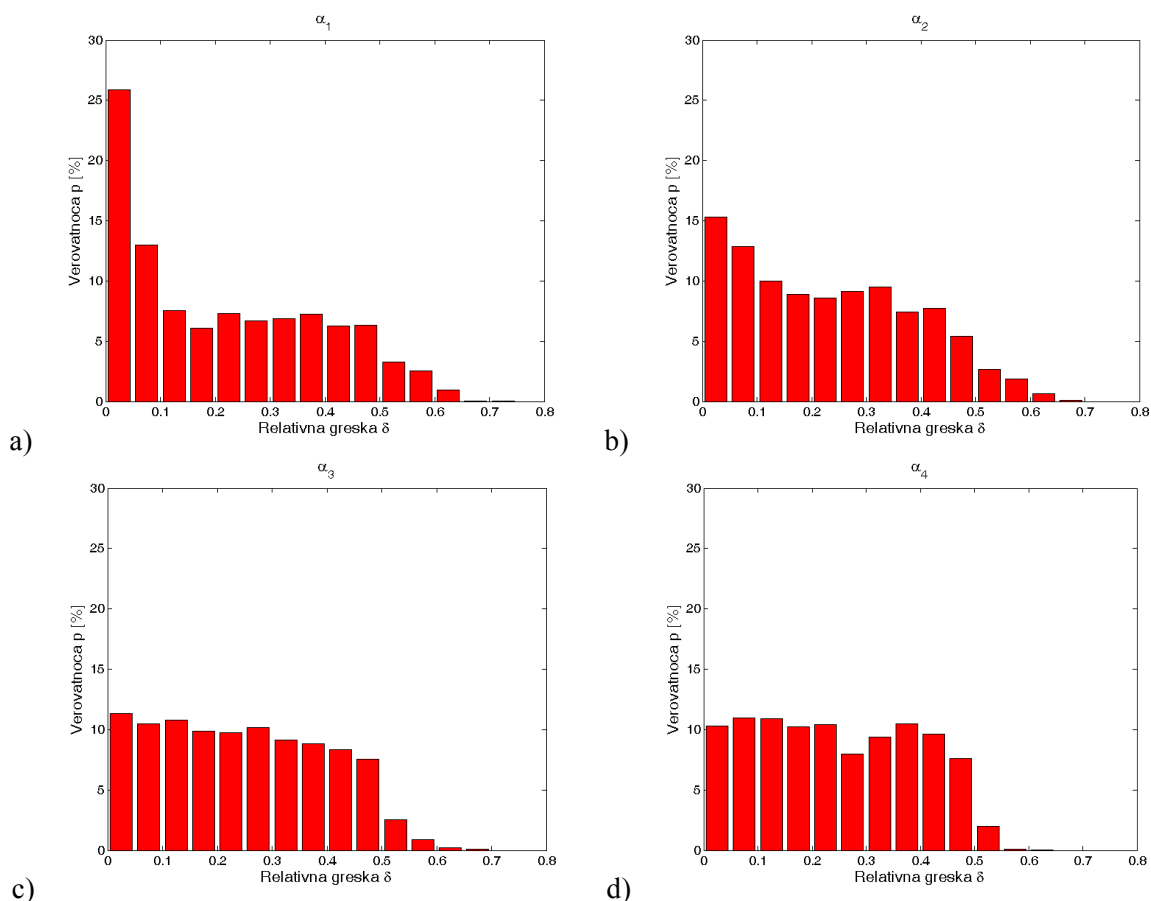
Slika 4. Konvergencija parametara a) E_2 i b) α_1

Br.	p [%]	E_1	E_2	G_{12}	v_{12}	v_{23}	α_1	α_2	α_3	α_4
200	0-10	71.2	99.5	99.2	100.0	45.0	38.8	28.2	21.8	21.3
	10-20	22.7	0.5	0.8	0.0	26.5	13.6	18.9	20.7	21.2
	20-30	3.8	0.0	0.0	0.0	17.3	14.0	17.7	19.9	18.4
	30-50	2.2	0.0	0.0	0.0	11.2	26.7	30.0	33.9	37.0
	>50	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	5.2	3.7	2.1
100 / 100	0-10	85.2	100.0	100.0	100.0	43.3	39.3	29.6	23.1	21.8
	10-20	10.0	0.0	0.0	0.0	28.3	14.4	18.5	21.4	21.6
	20-30	2.6	0.0	0.0	0.0	16.4	13.2	18.4	17.7	17.6
	30-50	2.1	0.0	0.0	0.0	12.1	26.5	28.0	33.2	36.4
	>50	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	5.6	4.6	2.6

Konvergencija svih izlaznih parametara postignuta je na obe mreže. Međutim, brzina konvergencije i tip mreže koji je najpodesniji za procenu određenog parametra se razlikuju. Takođe, neki od parametara, npr. E_1

i E_2 , mnogo bolje reaguju na povećanje skupa za treniranje, broja iteracija treniranja mreže ili neurona na unutrašnjim slojevima. Interesantno je što su mreže "sposobne da prepoznaju slične parametre", pa prikazani tok konvergencije na slici 4a važi i za parametre E_1 i G_{12} , dok se slika 4b može odnositi i na uglove α_2 , α_3 i α_4 .

Osetljivost parametara ocenjena je preko raspodele relativne greške procenjenog izlaza u odnosu na stvarni izlaz, tabela 2. Zadovoljavajuće je što verovatnoća predviđanja karakteristika materijala sa tačnošću od 20% iznosi preko 70% (ili znatno više) za obe mreže. Čini se da su rezultati na obe mreže vrlo slični, sem u slučaju parametra E_1 , koji je moguće tačnije proceniti na NM2. Mogućnost procene orijentacije lamina je nešto niža i opada od spoljašnje lamine ka unutrašnjim, slika 5. Drugačiji izbor izmerenih ili proračunatih deformacija bi možda doveo do povećanja tačnosti procene orijentacije lamina.



Slika 5. Raspodela verovatnoće predviđanja uglova a) α_1 , b) α_2 , c) α_3 i d) α_4 na NM1

4.2 Primer 2

Prethodno je napomenuto da je broj izlaznih parametara u primeru 2 značajno veći nego u primeru 1. Iz tog razloga, bilo je potrebno povećati broj ulaznih parametara (razmatranjem dodatnih slučajeva opterećenja) kao i broj čvorova mreža. Opet, zadovoljavajuće je što je konvergencija svih izlaznih parametara postignuta na svim razmatranim mrežama. Međutim, uočena je nemogućnost dovoljno precizne procene modula elastičnosti E_1 ijednog materijala. Najbolji rezultati postignuti su na NM sa dva unutrašnja sloja od po 300 i 200 neurona (verovatnoća da je greška procene manja od 20% iznosi približno 40%). Procene ostalih karakteristika materijala su zadovoljavajuće, detaljno u tabeli 3. Dalje, postignuta je veća tačnost procene karakteristika materijala spoljašnjih slojeva nego unutrašnjeg (lamine 1 i 3 u odnosu na laminu 2). Na kraju, procena orijentacije lamina je zadovoljavajuća, odnosno možemo tvrditi da je u više od 50% primera relativna greška orijentacije iznosila manje od 20%.

5. ZAKLJUČAK

Pokazano je da je upotrebom veštačkih neuronskih mreža moguće razviti moćan, brz i ekonomičan alat za procenu karakteristika kompozitnih materijala kao i redosleda slaganja lamina. Na jednostavnijim primerima, definisanim manjim brojem izlaznih parametara, moguće je ostvariti izuzetno zadovoljavajuće tačnosti

procene (greška iznosi manje od 10%). U slučaju većeg broja ulaznih i izlaznih parametara, odgovarajućim izborom tipa i veličine mreže, moguće je postići zadovoljavajuće rezultate. Sledeći korak ovog istraživanja je primena predstavljenih modela na eksperimentalne podatke čime bi bila omogućena procena karakteristika materijala i lamina realnih delova.

Delimično su izvršene ocene osetljivosti ulaznih i izlaznih parametara i ispitana je njihova kompatibilnost sa određenim tipom NM. Dok se, u proceni jednog dela parametara, čini da su se NM sa dva unutrašnja sloja bolje pokazale, u drugom delu deluje kao da arhitektura mreže ili broj neurona nemaju naročitog uticaja. U daljem razvoju pouzdanijih NM trebalo bi sprovesti detaljnija ispitivanja. Takođe, ostaje otvoreno pitanje mogućnosti primene razvijenih modela na nepoznate, "prethodno nenaučene" podatke.

Tabela 3. Verovatnoća predviđanja izlaza za različite NM u primeru 2

Br.	p [%]	Lamina 1					Lamina 2					Lamina 3					α_1	α_2	α_3
		E ₁	E ₂	G ₁₂	ν_{12}	ν_{23}	E ₁	E ₂	G ₁₂	ν_{12}	ν_{23}	E ₁	E ₂	G ₁₂	ν_{12}	ν_{23}			
500	0-10	10	34	80	100	81	8	40	79	100	78	10	37	82	100	79	36	18	33
	10-20	19	49	20	0	19	21	44	21	0	22	22	48	18	0	21	18	19	18
	20-30	32	17	0	0	0	30	16	0	0	0	29	15	0	0	0	14	23	14
	30-50	37	0	0	0	0	39	0	0	0	0	37	0	0	0	0	24	39	28
	>50	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	8	2	7
127 / 127	0-10	12	37	81	100	80	10	40	79	100	78	12	41	81	100	78	37	19	34
	10-20	21	47	19	0	20	21	44	21	0	22	24	44	19	0	22	19	19	18
	20-30	28	16	0	0	0	29	17	0	0	0	25	15	0	0	0	14	23	15
	30-50	36	0	0	0	0	37	0	0	0	0	36	1	0	0	0	23	36	26
	>50	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	8	3	7
300 / 200	0-10	16	38	82	100	79	18	39	79	100	79	23	41	82	100	78	35	18	33
	10-20	23	47	18	0	21	25	45	21	0	21	23	44	18	0	22	21	22	18
	20-30	23	15	0	0	0	23	16	0	0	0	19	15	0	0	0	14	22	15
	30-50	35	1	0	0	0	28	0	0	0	0	30	0	0	0	0	23	34	26
	>50	3	0	0	0	0	6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	7	4	8

6. LITERATURA

- [1] Campbell, F.C.: *Structural Composite Materials*, ASM International, Materials Park, OH, 2010.
- [2] Barbero, E.J.: *Finite element analysis of composite materials*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.
- [3] Wilde, W.P., Sol, H.: *Anisotropic material identification using measured resonant frequencies of rectangular composite plates*, Composite Structures, 4(2), 2317-24, 1987.
- [4] Rikards, R., Chate, A., Steinchen, W., Kessler, A., Bledzki, A.K.: *Method for identification of elastic properties of laminates based on experiment design*, Composites: Part B, 30, 279-89, 1999.
- [5] Araujo, A.L., Mota Soares, C.M., Moreira de Freitas, M.J., Pedersen, P., Herskovits, J.: *Combined numerical-experimental model for the identification of mechanical properties of laminated structures*, Composite Structures 50, 363-72, 2000.
- [6] Haykin, S.: *Neural networks: a comprehensive foundation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [7] Vassilopoulos, A.P., Georgopoulos, E.F., Dionysopoulos, V.: *Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials*, International Journal of Fatigue, 29, 20-29, 2007.
- [8] Rumelhart, D.E., McClelland, J.L., ed.: *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, MIT Press, Cambridge, MA, 1986.

Svorcan, J., Stupar, S., Posteljnik, Z., Baltić, M.

DETERMINATION OF MATERIAL PROPERTIES OF COMPOSITE PARTS USING EXPERIMENTAL DATA AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract: A simple, economic and interesting computational technique for determination of mechanical properties of composite plates is presented. From the values of deformations at two ends of the plate at several different loading cases - tension, continuous loading, flexion and torsion, that can be obtained either experimentally or computationally, it is possible to estimate which material was used as well as the stacking sequence of laminae. Several different artificial neural networks were formed, trained and tested. Training, validation and testing sets were defined using finite element method. Paper describes possibilities and limitations of the used networks as well as further applications and improvements.

Key words: composite plate, deformations, FEM, artificial neural networks

Spasić, D., Ivanov, T., Komarov, D., Stupar, S. ¹⁾

ANALIZA OTKAZA ZVEZDASTOG SEPARATORA AVIONSKOG TOPA ²⁾

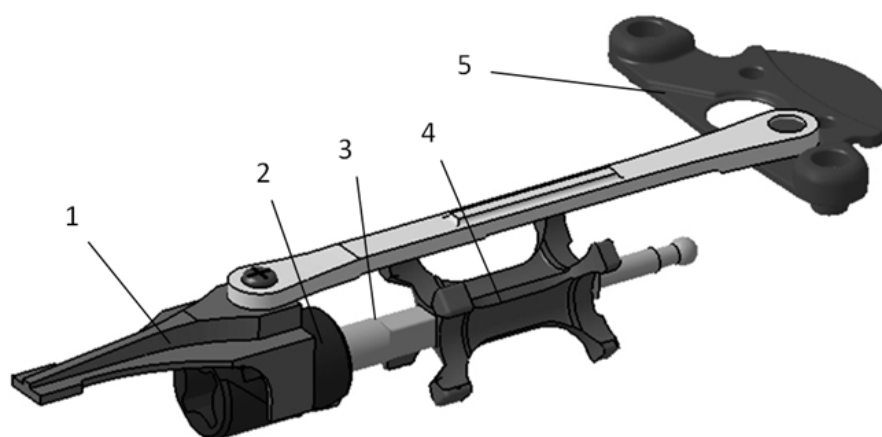
Rezime

U ovom radu prikazan je postupak numeričkog i eksperimentalnog određivanja razloga otkaza zvezdastog separatora dvocevnog avionskog topa koji se desio tokom njegovog dejstva. Zone najveće koncentracije napona određene su metodom konačnih elemenata dok je eksperimentalna analiza otkaza (loma) izvršena ispitivanjem tvrdoće materijala kao i mikrofraktografskim i makrofraktografskim ispitivanjem polomljenog separatora. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata izveden je zaključak i data je preporuka o tome šta je potrebno učiniti da bi se ovakvi i slični otkazi sprečili.

Ključne reči: Avionski topovi, analiza otkaza, metod konačnih elemenata, fraktografija.

1. UVOD

Dvocevni avionski top čiji se zvezdasti separator razmatra u ovom radu je složeni uređaj sa brzinom gađanja od 3000 do 3400 granata u minuti. Automatski rad topa zasniva se na korišćenju energije barutnih gasova koji se iz cevi odvođe u gasnu spojnicu. Predviđeni radni vek upotrebe ovog topa sa pravilnim održavanjem je 4000 paljenja pri čemu ne sme biti više od 200 pirorepetiranja od čega ne sme biti više od 80 repetiranja nakon utroška kompleta municije bez redenika i metaka u automatici topa [1]. Punjenje topa vrši se jednim redenikom dok se njegovo uvođenje u uvedno grlo topa vrši pomoću zvezdastog separatora koji je deo mehanizma za dovođenje redenika (slika 1). Separator je kinematski povezan sa osnovnim sklopom automatike topa i trpi velika opterećenja pri povlačenju redenika sa granatama kroz uvednike i usmerivače karika.



1. Vodilica, 2. Doboš, 3. Profilisano vratilo, 4. Zvezdasti separator, 5. Spojna poluga

Slika 1.1 Mehanizam za dovođenje redenika

¹⁾ Dragoljub Spasić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dragoljub.spasic@gmail.com),

Toni Ivanov, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (tivanov@mas.bg.ac.rs),

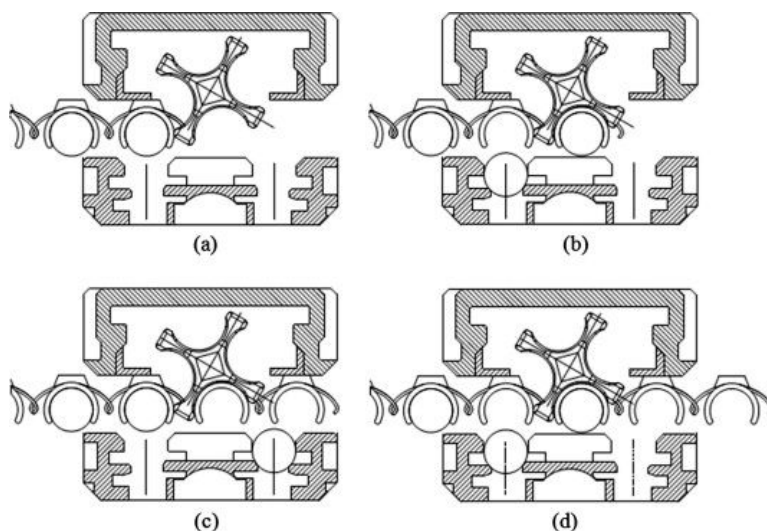
dr Dragan Komarov, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dkomarov@mas.bg.ac.rs),

prof. dr Slobodan Stupar, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (sstupar@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_35035: Istraživanje i razvoj savremenih pristupa projektovanju kompozitnih lopatica rotora visokih performansi, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Pouzdanost rada sklopova automatike topa u najvećoj mjeri zavise od kvaliteta materijala od kojeg su izrađeni i kvaliteta pregleda, čišćenja i montiranja u toku rukovanja i održavanja. Otkaz zvezdastog separatora može uzrokovati zastoj topa i nemogućnost nastavka gađanja. Zastoj topa može prouzrokovati da delovi topa ostanu u neutralnom položaju pri čemu može doći do nekontrolisanog opaljenja i oštećenja delova topa, aviona ili do povrede osoblja u blizini aviona.

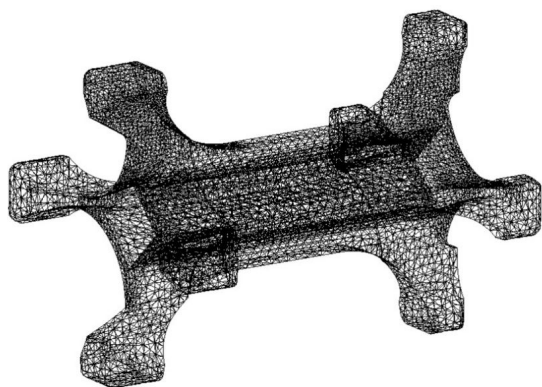
Punjenje agregata cevi granatama pri gađanju vrši se uvođenjem redenika u uvodno grlo topa i oslanjanjem na zvezdasti separator tokom druge polovine hoda pokretnih delova prilikom prvog ručnog repetiranja (slika 1.2.a). Na slici 1.2.b prikazan je položaj redenika nakon spuštanje prve granate u ležište cevi topa. Položaj redenika nakon spuštanja druge granate u ležište cevi topa prikazan je na slici 1.2.c. Na slici 1.2.d prikazan je položaj redenika posle prvog opaljenja i ponavljanje postupka hranjenja agregata cevi sa municijom. Parne granate u redeniku koriste se za hranjenja prvog agregata dok se neparni koriste za drugi agregat cevi.



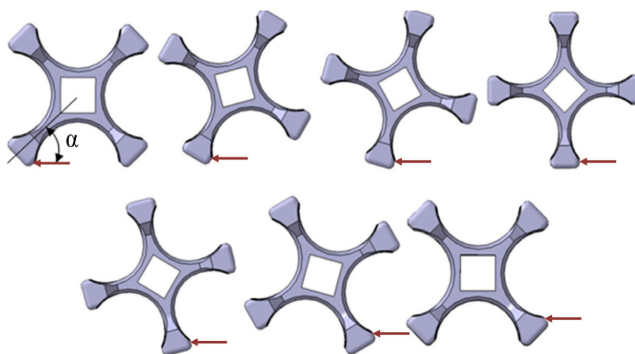
Slika 1.2 Radni ciklus zvezdastog separatora

2. NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza statičkog ponašanja zvezdastog separatora prilikom punjenja agregata izvršena je metodom konačnih elemenata [2]. U ovu svrhu trodimenzionalni konačno-elementni model je izrađen pomoću parabolčkih tetraedarskih elemenata različitih dimenzija (slika 2.1).



Slika 2.1 Konačno-elementni model zvezdastog separatora



Slika 2.2 Različite faze rada zvezdastog separatora

Matrica materijala kreirana je koristeći karakteristike 5432T proizvodnog čelika. Jangov modul elastičnosti za ovaj čelik je 216 GPa dok je njegova zatezna čvrstoća 785 MPa.

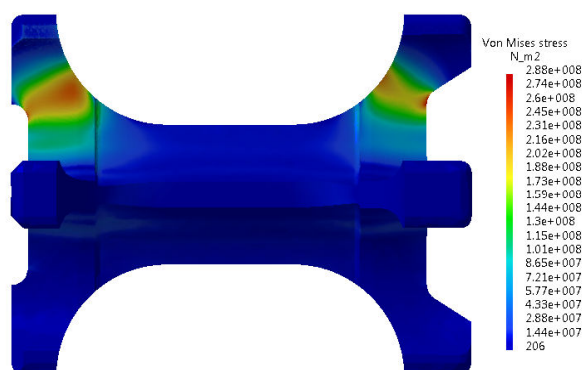
Na separatoru deluje više opterećenja: ubrzanje topa prilikom trzaja, temperaturne razlike, sila neophodna za vuču redenika itd. Tačne vrednosti ovih opterećenja nisu poznate pa je stoga kao i sa ciljem

pojednostavljena analize razmatrana samo reakcija vučenja redenika. Imajući u obzir da ovo opterećenje ima najveći uticaj na separator, zanemarivanje ostalih opterećenja ne bi trebalo da uzrokuje značajne razlike u dobijenim rezultatima. Iz dokumentacije topa preuzet je podatak da je potrebna sila neophodna za pokretanje redenika 90 ± 5 kg. Kako bi se uzelo u obzir i trenje za proračun korišćena je vrednost 100 kg t.j. 981 N.

Pri zadavanju opterećenja uzet je u obzir radni ciklus separatora u nekoliko njegovih radnih faza (slika 2.2). U tabeli 1 dati su maksimalni naponi dobijeni fon Mizesovim kriterijumom kao i maksimalne deformacije za različite faze rada zvezdastog separatora.

Tabela 1. Von Mizesovi maksimalni naponi i deformacije		
α [°]	σ [MPa]	ϵ [mm]
45	285	0.095166
60	288	0.101625
75	277	0.101227
90	250	0.094043
105	229	0.080598
120	208	0.062097
135	173	0.039485

Fon Mizesova koncentracija napona za jednu fazu ciklusa rada separatora prikazana je na slici 2.3.



Slika 2.3 Fon Mizes koncentracija napona

3. EKSPERIMENTALNA REZULTATI

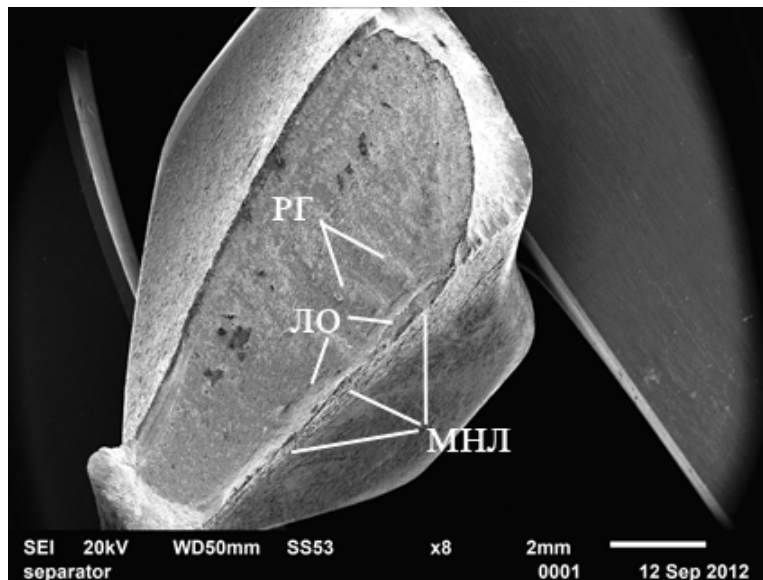
Oba dela polomljenog separatora dostavljena su u laboratoriju u stanju u kojem su nađeni nakon otkaza. Do loma separatora došlo je nakon ispaljenih 1695 granata što je 41% od predviđenog i nakon 63 piroretiranja što je 32% od predviđenog vekom upotrebe. Pregledom dokumentacije utvrđeno je da je zvezdasti separator izrađen od čelika Č. 5432T pri čemu nije definisan standard za izradu i isporuku materijala [1]. Prema licencnoj dokumentaciji separator je izrađen od 30HN2VFA čelika sa zahtevom za tvrdoću od 42 do 48 HRC.



Slika 3.1 Zvezdasti separator nakon otkaza

3.1. Makrofraktografski i mikrofraktografski pregled

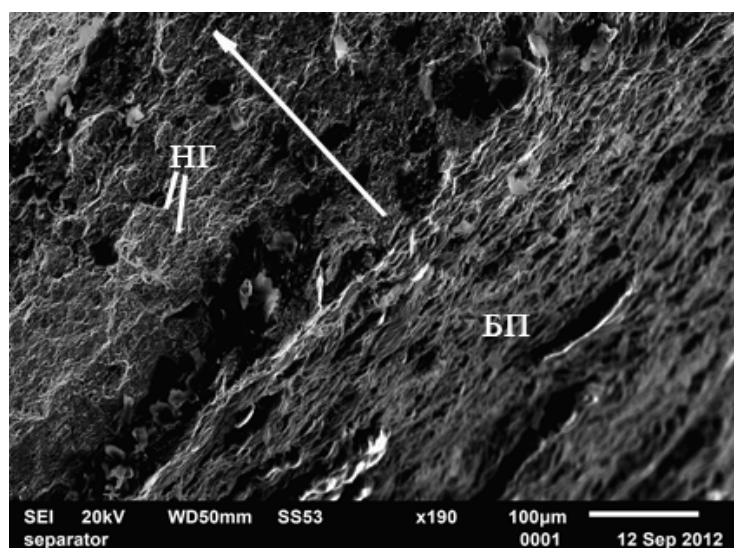
Prelomna površina separatora uvećana je skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) tipa "JOEL" (slika 3.1.1). Na površini loma vidljive su linije odmora (LO) karakteristične za zamorni lom. Zamorni lom nastao je na više mesta (MNL). U završnoj fazi loma vidljivi su radijalni grebeni karakteristični za nestabilan rast prsline.



RG - radijalni grebeni; LO - linije odmora; MNL - mesto nastanka loma.

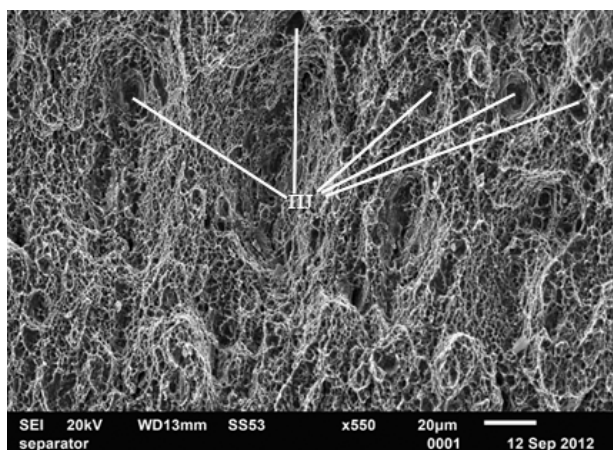
Slika 3.1.1 Makro izgled loma sa područjem nastanka prsline

Takođe skenirajućim elektronskim mikroskopom izvršen je mikrofraktografski pregled. Jedno od područja nastanka loma prikazano je na slici 3.1.2 gde je strelicom prikazan smer prostiranja prsline. U početnom delu prsline prisutni su grebeni normalni na smer prostiranja prsline (NG). Izgled normalnih grebena prikazan je na slici 3.1.3 gde su na prelomnoj površini vidljive veće primarne jamice (PJ), okružene mnoštvom sitnijih sekundarnih jamica. Primarne jamice (PJ) formirane su na nemetalnim uključcima dok su sekundarne formirane na karbidima (K) (slika 3.1.3). Prisustvo normalnih grebena i jamičastog loma ukazuje na niskociklični karakter loma.

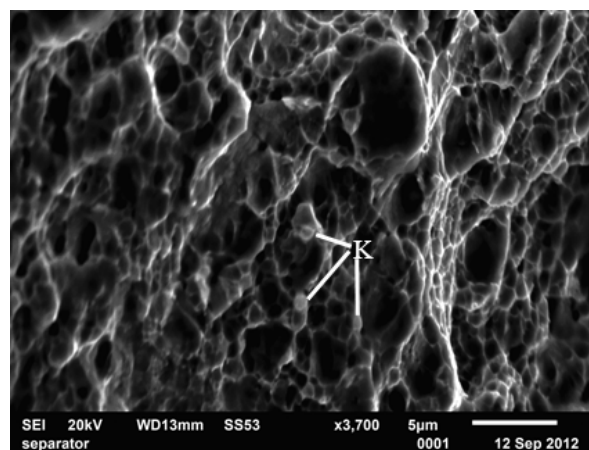


NG-normalni grebeni; BP-bruinirana površina

Slika 3.1.2 Područje nastanka loma



PJ-primarne jamice



K-karbidi

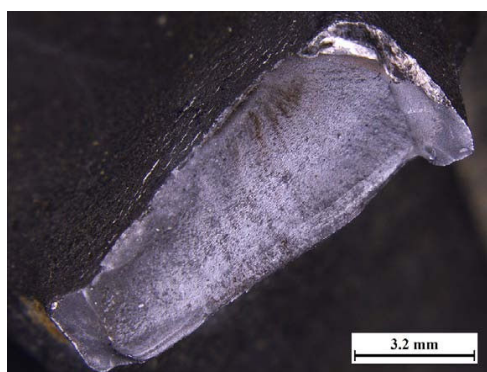
Slika 3.1.3 Područje nastanka loma i brzi smicajni lom sa jamicama nastalim na karbidima

3.2. Ispitivanje tvrdoće materijala

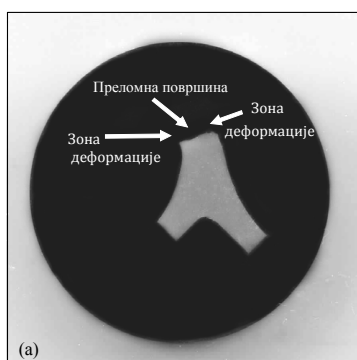
Ispitivanje tvrdoće urađeno je po metodi Vikersa sa opterećenjem od 294 N (HV30) po standardu SRPS C.A4.030 na uređaju za ispitivanje tvrdoće tipa “WOLPERT” [3]. Rezultati dobijeni ovim ispitivanjem nalaze se u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti tvrdoće osnovnog materijala		
Oznaka/merno mesto		Izmerene vrednosti HV30
Uzorak broj 1	niz 1	528, 530, 530, 529, 532, 528, 531
	niz 2	527, 529, 533, 534, 532, 531, 529

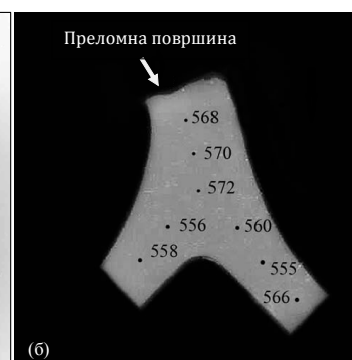
Tvrdoća je pod istim uslovima i na istom uređaju merena i na metalografskom uzorku sečenom u cilju analize mikrostrukture materijala u poprečnom pravcu u odnosu na prelomnu površinu. Izgled metalografskog uzorka, raspored mernih mesta i dobijene vrednosti tvrdoće prikazani su na slici 3.2.1. Prema licencnoj dokumentaciji za proizvodnju zvezdastog separatora, potrebno je da je materijal tvrdoće 425-497 HV [1].



Prelomna površina



presek uz površinu



raspored mernih mesta i dobijene vrednosti

Slika 3.2.1 Metalografski uzorak

4. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni numeričkom analizom ukazuju da su fon Mizesovi naponi koji se javljaju manji od zatezne čvrstoće čelika [2].

Rezultati dobijeni makro i mikrofraktografskim pregledom prelomnih površina, pregledom pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa kao i ispitivanjem tvrdoće materijala potvrdili su da čelik 5432T od kog je izrađen separator poseduje propisanu tvrdoću [1]. Takođe utvrđeno je da je pojava prsline prethodila plastična deformacija površinskog sloja koji je posledica delovanja kontaktnog zamora koji stvara složeno

višeosno naponsko stanje. Prslina je verovatno inicirana na samoj površini i njen rast se odvijao pod uticajem kontaktnog napona izazivajući pojavu ljuštenja površinskih slojeva [4,5,6]. Pojava ljuštenja površinskih slojeva materijala karakteristična je za kontaktni zamor što su rezultati i potvrdili. Pod određenim uslovima i pod uticajem smicajnih napona, prsline formirane u površinskom sloju mogu započeti rast u dubinu materijala. U sledećoj fazi pod uticajem glavnog zateznog napona u preseku dela. Fraktografski pregled je pokazao da se prostiranje prsline u ovoj fazi odvijalo pod uticajem visokog napona i odgovara prostiranju prsline pri niskocikličnom zamoru [7]. Prslina je nastavila da propagira sve do dostizanja kritične veličine kada je došlo do konačnog loma usled jednokratnog opterećenja.

Uzimajući u obzir poznatu činjenicu da na vek mašinskog dela pri kontaktnom zamoru utiču vrednost kontaktnog napona, materijal od kojeg je izrađen, prisustvo prevlaka, kvalitet površine zaostali naponi itd. [8] izveden je zaključak da je povećanje radnog veka separatora moguće primenom martenzitno starenog čelika [9].

5. LITERATURA

- [1] Rendulić, Z.: *Opis i održavanje avionskog topa*, Beograd, 1971.
- [2] Ognjanović, M., Simonović, A., Ristivojević, M., Lazović, T.: *Research of rail traction shafts and axles fractures towards impact of service conditions and fatigue damage accumulation*, Engineering Failure analysis, Vol. 17, 1560-1571, 2010.
- [3] SRPS EN ISO 6507-3:2012. *Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – Deo 3: Etaloniranje referentnih pločica*, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [4] Francis, J.A., Mazur, W., Bhadeshia, N.K.D.H.: *Type IV cracking in ferritic power plant steels*, Materials Science and Technology, Vol. 22, 1387-1395, 2006.
- [5] Albert, S.K., Matsui, M., Watanabe, T., Hongo, H., Kubo, K., Tabuchi, M., *Microstructural Investigation on Type IV Cracking in a High Cr Steel*, ISIJ International, Vol. 42, 1497-1504, 2002.
- [6] Francis, J.A., Mazur, W., Bhadeshia, N.K.D.H.: *Estimation of Type IV cracking tendency in power plant steels*, ISIJ International, Vol. 44, 1966 - 1968, 2004.
- [7] Gubelj, N., Sedmak, A., Kozak, D., *Fracture mechanics*, Fakultet za strojništvo, Maribor, 2009.
- [8] Wheeler, O.,E., *Spectrum loading and crack growth.*, J. Basic Eng, Trans, ASME, 94, 181-186, 1972.
- [9] Milović, Lj., Vuherer, T., Radaković, Z., Petrovski, B., Janković, M., Zrilić, M., *Determination of fatigue crack growth parameters in welded joint of HSLA steel.*, Struct Integr Life, Vol.11, 183-187, 2011.

Spasić, D., Ivanov, T., Komarov, D., Stupar, S.

FAILURE ANALYSIS OF AN AIRCRAFT GUN STAR-SEPARATOR

Abstract: *In this paper numerical and experimental analysis of the failure of an aircraft gun's star shaped separator that occurred during its action is shown. Stress concentration zones are defined using the finite element method (FEM) whilst the experimental analysis of the failure is made with material hardness examination as well as with macro and microfractographic examination of the broken separator. Also, based on the obtained results, a conclusion is derived and a recommendation is given in terms of what needs to be done so this and similar kind of failures are eliminated.*

Key words: *Aircraft guns, failure analysis, finite element method, fractography.*

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



35. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, oktobar 2014.

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS
SESIJA 1

Živković, A., Zeljković, M., Tabaković, S. ANALITIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJA SA KOSIM DODIROM	3.1
Jovišević, V., Borojević, S., Marković, B. IZBOR PUTANJE KRETANJA ALATA U PROCESU MAŠINSKE OBRAD TANKOSTJENIH ALUMINIJUMSKIH STRUKTURA	3.7
Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A. TOPLOTNO-ELASTIČNO PONAŠANJE SKLOPA GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG CILINDRIČNO VALJKASTIM LEŽAJEM PRIMENOM MKE.....	3.15
Bojanić, M., Jovičić, G., Tabaković, S., Mladenović, C., Zeljković, M. UPOREDNI PRIKAZ STANDARDA ZA ISPITIVANJE TAČNOSTI POZICIONIRANJA NUMA	3.21
Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Glavonjić, M. OPTIMIZACIJA DUŽINA SPOJKI DVOOSNOG REKONFIGURABILNOG PARALELNOG MEHANIZMA - MOMA	3.28
Danilov, I., Petrović, P., Lukić, N. TRIANGULACIJA STRUKTURIRANE SVETLOSTI U ROBOTSKOM ZAVARIVANJU.....	3.36
Đurđević, A., Sedmak, A., Živković, A., Radisavljević, I. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM ZA DOBIJANJE T-SPOJEVA OD LEURE ALUMINIJUMA	3.44
Jovanović, D., Nedić, B. SCRATCH TEST PREVLAKA HROMA	3.50
Karabegović, I., Doleček, V., Mićević, D. ULOGA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESIMA ZAVARIVANJA	3.56
Kvrgić, V., Dimić, Z., Cvijanović, V., Mitrović, S. ALGORITAM ZA POVEĆANJE TAČNOSTI PETOOSNIH MAŠINA ALATKI	3.60
Kokotović, B., Slavković, N. VERIFIKACIJE PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA PRI OBRADI CILINDRIČNIM VRETENASTIM GLODALIMA	3.67
Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., Đurđev, M. STANJE I TREND RAZVOJA U OBLASTI PROJEKTOVANJA ZA IZRADU-DFM.....	3.75

SESIJA 2 →

← NAZAD

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS
SESIJA 2

Lukić, N., Petrović, P., Danilov, I. AKTUATOR PROMENLJIVE KRUTOSTI	3.83
Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Trifković, B. PRIMENA INTEGRISANOG SISTEMA ZA PRECIZNO I BRZO PRECIZNO LIVENJE U STOMATOLOGIJI	3.91
Milutinović, D., Dimić, Z., Živanović, S., Slavković, N. UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE 6-OSNOG ROBOTA ZA OBRADU KAO HORIZONTALNE I/ILI VERTIKALNE 5-OSNE MAŠINE ALATKE.....	3.96
Mitrović, S., DIMIĆ, Z., KVRGIĆ, V. SISTEM ZA SIMULACIJU I NADZOR RADA ROBOTSКИH ĆELIJA	3.104
Mosorinski, P., MULIĆ, V., RANČIĆ, M. PARAMETRI GLAVNOG OTPORA REZANJA PRI OBRADI PLASTIČNIH MASA NA STRUGU	3.110
Petronijević, J., Petrović, M., Babić, B., Miljković, Z. PRIMENA MULTIAGENTNIH SISTEMA I TEORIJE ROJEVA U OPTIMIZACIJI FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA	3.114
Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z. OPTIMIZACIJA FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PRIMENOM ALGORITMA BAZIRANOG NA INTELIGENCIJI ROJA I TEORIJI HAOSA.....	3.122
Sredanović, B., Globočki Lakić, G., Kramar, D., Kopač, J. MODELIRANJE OTPORA REZANJA PRI STRUGANJU ĆELIKA C45E PRIMJENOM HPJAM TEHNIKE HLAĐENJA I PODMAZIVANJA	3.130
Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B. VERIFIKACIJA POSTPROCESORSKOG RAČUNA JEDNE KONCEPCIJE STONE REKONFIGURABILNE PETOOSNE MAŠINE ALATKE	3.136
Sovilj Nikić, I., Legutko, S., Sovilj-Nikić, S., Chwaleczuk, T. KONTROLA KVALITETA PREVLAKA MODELSКИH ALATA ZA OBRADU OZUBLJENJA	3.144





Živković, A., Zeljković, M., Tabaković, S. ¹⁾

ANALITIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJA SA KOSIM DODIROM²⁾

Rezime

Predviđanje statičkog ponašanja sklopa glavnog vretena je od suštinskog značaja za tačnost obrade na mašinama alatkama. Posebno karakteristike visokobrzinskih glavnih vretena zavise od karakteristika ležaja. Ovaj rad prikazuje mehanički model kugličnih ležaja sa kosim dodirom. Prikazani model se zasniva na analitičkom pristupu. Model ležaja je razvijen je na bazi John-Harris-ovih kvazistatičkih jednačina ravnoteže i Hertz-ove teorije kontakta. U ovom rešenju se razmatra nestacionarna promena, kontaktnih opterećenja, ugla kontakta i krutosti ležaja u zavisnosti od pozicije kotrljajnog tela. Na kraju je razvijeni model ležaja verifikovan na primeru sklopa glavnog vretena mašine alatke. Analiza rezultata pokazuje da aksijalna i radijalna krutost ležaja opadaju sa porastom sila inercije, dok se povećavaju, povećanjem sile prednapreznja.

Ključne reči: kuglični ležaj sa kosim dodirom, glavno vreteno, krutost ležaja

1. UVOD

Razvoj visokobrzinskih glavnih vretena je uslovio i razvoj visokobrzinskih ležaja koja i pri višim brojevima obrtaja imaju mali porast temperature, a pri tome obezbeđuju dovoljnu tačnost i krutost sklopa glavnog vretena. Deformacije ležaja učestvuju oko 30-50 % u ukupnim deformacijama glavnog vretena [2]. Kuglični ležaji sa kosim dodirom su najčešće korišćeni tipovi ležaja za uležištenje visokobrzinskih glavnih vretena, zbog malog koeficijenta trenja i ekonomičnog održavanja [7]. Kontaktne sile u ležaju sastoje se od četiri povezane komponente: početnog aksijalnog prednapreznja, toplotnog prednapreznja, spoljašnjeg opterećenja i inercijalnih sila (npr. centrifugalne sile). Uopšteno gledano, rapodela kontaktnog opterećenja na kotrljajna tela kod kugličnih ležaja je neravnomerna. Stepeneravnomernosti i broj kotrljajnih tela koja u datom trenutku prenose spoljašnja opterećenja, kod kugličnih ležaja zavisi od pravca, smera i intenziteta spoljašnjeg opterećenja, karakteristika materijala, elemenata strukutre i geometrije ležaja, odstupanja od oblika i položaja spregnutih delova ležaja, kao i od veličine zazora/preklopa.

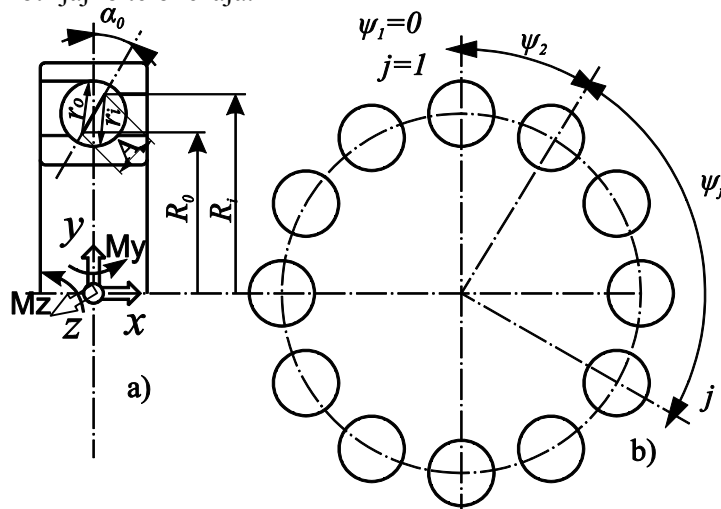
Kod ležaja sa kosim dodirom, pored prethodno navedenog, pri prenosu sile sa spoljašnjeg na unutrašnji prsten ili obrnuto, postoji i zakretanje napadne linije sile za veličinu ugla kontakta. Usled toga i pri prenosu čisto radijalne sile u ležaju se stvara i aksijalna sila koja dodatno opterećuje ležaj [6]. Povećanja sile prednapreznja obezbeđuje povećanje kontaktnih opterećenja između kuglica i prstenova, što dovodi do povećanja krutosti ležaja. Međutim, povećanjem brzohodnosti ležaja, dolazi do povećanja centrifugalnih sila u ležaju, što dovodi do smanjenja krutosti istog. Centrifugalna sila smanjuje krutost ležaja iz dva razloga. Prvo usled delovanja centrifugalne sile na kuglice smanjuje se kontaktno opterećenje između kuglica i spoljašnje staza kotrljanja, usled čega će Hertz-ova kontaktna krutost biti proporcionalna kontaktnom opterećenju. Drugi razlog leži u činjenici da pri delovanju centrifugalnih sila dolazi do promene ugla kontakta između kuglica i spoljašnje odnosno unutrašnje staze kotrljanja. Povećava se ugao kontakta sa unutrašnjom, a smanjuje sa spoljašnjom stazom kotrljanja [3].

¹⁾ doc. dr Aleksandar Živković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (aco@uns.ac.rs), prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milanz@uns.ac.rs), prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (tabak@uns.ac.rs)

²⁾ 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", koji finansijski podržava Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije

2. MATEMATIČKI MODEL LEŽAJA

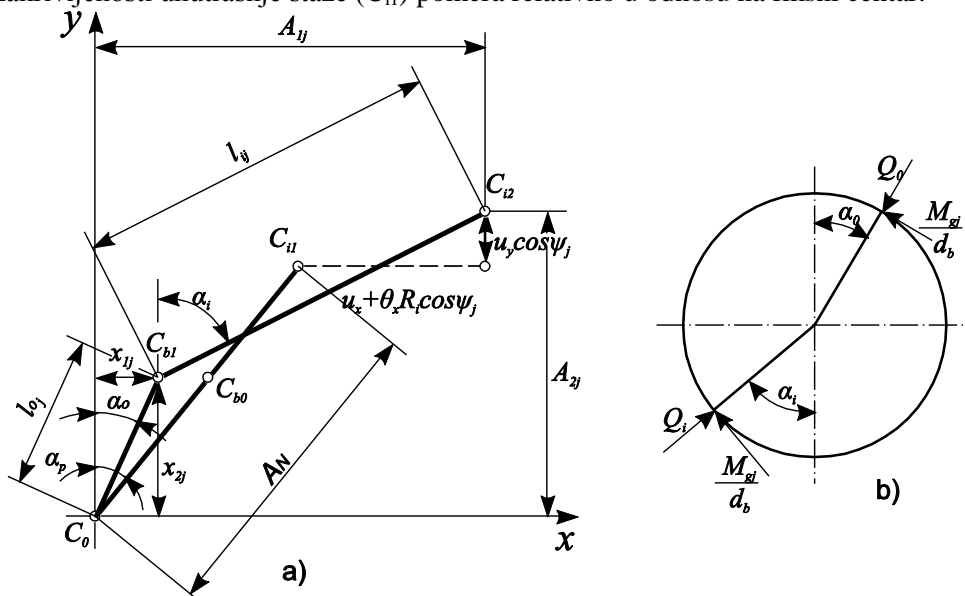
Kuglični ležaj se može ilustrovati u jednostavnom obliku kao što je prikazano na slici 1. Sposobnost kugličnog ležaja da prenosi opterećenja u velikoj meri zavisi od njegove unutrašnje geometrije. Takođe sa slike 1 se vidi da je početni ugao kontakta definisan linijom koja prolazi kroz tačke kontakta kotrljajnih tela i staza kotrljanja i ravni upravne na osu obrtanja ležaja. U slučaju kada nema opterećenja centri zakrivljenosti staza se nalaze na rastojanju $A = r_i + r_o - 2d_b$ kao što je prikazano na slici 1a. Na slici 1b je prikazano relativna ugaona pozicija za svako kotrljajno telo ležaja.



Slika 1. Šematski prikaz: a) parametara kugličnog ležaja; b) ugaone pozicije kotrljajnog tela

2.1 Raspodela unutrašnjeg opterećenja

Pri delovanju sila inercije na kotrljajna tela, usled različitih uglova kontakta između kotrljajnog tela i staza, linija delovanja opterećenja neće biti kolinearna sa rastojanjem između centara A kao što je prikazano na slici 1a. Na slici 1a je predpostavljeno da je centar zakrivljenosti spoljašnje staze (C_o) fiksiran u prostoru, i da se centar zakrivljenosti unutrašnje staze (C_{i1}) pomera relativno u odnosu na fiksni centar.



Slika 2 (a) Pozicija centara zakrivljenosti staza kotrljanja, (b) Delovanje kontaktnog opterećenja

Kada se ležaj deformiše pod dejstvom spoljašnjeg statičkog, rastojanje između centara zakrivljenosti unutrašnje staze i nove pozicije centra kotrljajnog tela i rastojanje između spoljašnje staze i nove pozicije centra kotrljajnog tela su:

$$l_{i/o(j)} = (f_{i/o} - 0.5)d_b + \delta_{i/o(j)} \quad (1)$$

U skladu sa slikom 4a, radijalno i aksijalno rastojanje između pozicije centra zakrivljenosti, uzimajući u obzir rastojanje A_N , ugao kontakta nakon primenjenog početnog prednaprezanja prema slici 2a je:

$$A_{1j} = A_N \sin \alpha_p + u_x + \theta_y R_i \sin(\psi_j) + \theta_z R_i \cos(\psi_j) \quad (2)$$

$$A_{2j} = A_N \cos \alpha_p + u_y \cos(\psi_j) + u_z \sin(\psi_j)$$

Uglovi kontakta sa spoljašnjim (α_o) i unutrašnjom (α_i) stazom kotrljanja se određuju sa slike 2a:

$$\tan \alpha_{oj} = X_{1j} / X_{2j} \quad (3)$$

$$\tan \alpha_{ij} = (A_{1j} - X_{1j}) / (A_{2j} - X_{2j})$$

Sa slike 4a se dobija jednačina kinematskih ograničenja između kotrljajnih tela i staza:

$$[A_{1j} - X_{1j}]^2 + [A_{2j} - X_{2j}]^2 + l_{ij}^2 = 0 \quad (4)$$

$$X_{1j}^2 + X_{2j}^2 + l_{oj}^2 = 0$$

Jednačina ravnoteže sila na kotrljajno telo sa slike 2b glasi:

$$Q_{oj} \cos \alpha_{oj} - Q_{ij} \cos \alpha_{ij} - \frac{M_{gj}}{d_b} (\sin \alpha_o - \sin \alpha_i) - F_{cj} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{oj} \sin \alpha_{oj} - Q_{ij} \sin \alpha_{ij} + \frac{M_{gj}}{d_b} (\sin \alpha_o - \sin \alpha_i) = 0$$

Odnos između lokalnih Hertz-ovih kontaktnih sila $Q_{(j)}$ i ugiba $\delta_{(j)}$ između kotrljajnog tela i unutrašnje/spoljašnje staze kotrljanja se može napisati kao [5]:

$$Q_{i,o(j)} = K_{i,o} (\delta_{i,o}^{3/2})_j \quad (6)$$

U prethodnim izrazima indeksi i, o označavaju unutrašnju i spoljašnju stazu kotrljanja respektivno, $j=1,2,3,\dots,Z$, gde je Z broj kotrljajnih tela; $K_{i/o}$ je Hertz-ova kontaktne krutost, a F_{cj} centrifugalna sila i M_{gj} giroskopski moment. Prethodna relacija važi za slučaj kada je $\delta_{i(j)} > 0$. U suprotnom $Q_{oj} = F_{cj}$ [9].

Četiri parametra $X_{1j}, X_{2j}, \delta_{i(j)}, \delta_{o(j)}$ su dobijena rešavanjem relacija (4), (5) primenom Newto-Raphson-ove metode za svaku poziciju kotrljajnog tela, za pretpostavljene vrednosti relativnog pomeranja prstenova ($\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_y, \theta_z$). Dozvoljena greška pri Newto-Raphson iteracijama je 10^{-12} . Da bi se odredile vrednosti relativnog pomeranja prstenova za poznato spoljašnje opterećenja, formirane su jednačine delovanja sila na prstenove ležaja kao:

$$\begin{aligned} F_{(i,o)x} &= \sum_{j=1}^Z \left(Q_{i,o(j)} \sin \alpha_{i,o(j)} + \frac{M_{gj}}{d_k} \cos \alpha_{i,o(j)} \right) & M_{(i,o)y} &= \pm \sum_{i=1}^Z \left\{ r_{i,o} \left(Q_{i,o(j)} \sin \alpha_{i,o(j)} + \frac{M_{gj}}{d_k} \cos \alpha_{i,o(j)} \right) \mp f_{i,o} M_{gj} \right\} \sin \psi_j \\ F_{(i,o)y} &= \sum_{j=1}^Z \left(\pm Q_{i,o(j)} \cos \alpha_{i,o(j)} \mp \frac{M_{gj}}{d_k} \sin \alpha_{i,o(j)} \right) \cos \psi_j & M_{(i,o)z} &= \mp \sum_{i=1}^Z \left\{ r_{i,o} \left(Q_{i,o(j)} \sin \alpha_{i,o(j)} + \frac{M_{gj}}{d_k} \cos \alpha_{i,o(j)} \right) \mp f_{i,o} M_{gj} \right\} \cos \psi_j \\ F_{(i,o)z} &= \sum_{j=1}^Z \left(\pm Q_{i,o(j)} \cos \alpha_{i,o(j)} \mp \frac{M_{gj}}{d_k} \sin \alpha_{i,o(j)} \right) \sin \psi_j \end{aligned} \quad (7)$$

Nakon što su izračunate vrednosti $X_{1j}, X_{2j}, \delta_{i(j)}, \delta_{o(j)}$ za svaku poziciju kotrljajnog tela i za poznate vrednosti F_x, F_y, F_z, M_y i M_z , vrednosti $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_y, \theta_z$, se određuju preko relacije (10). Nakon dobijanja primarnih nepoznatih $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_y, \theta_z$, potrebno je ponovo odrediti nove vrednosti $X_{1j}, X_{2j}, \delta_{i(j)}, \delta_{o(j)}$, koje će biti kompatibilne za primarnim vrednostima.

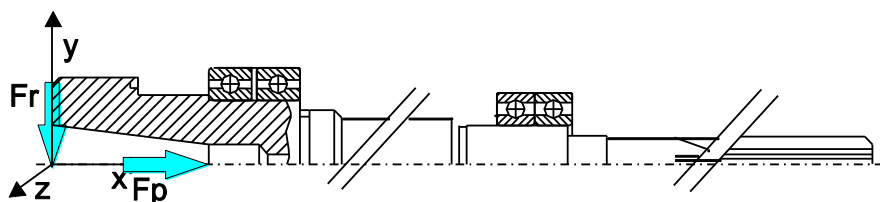
2.2 Matrica krutosti

Ako se relativna pomeranja ležaja označe sa δ_k^m , gde je $k=x, y, z, \theta_y, \theta_z$ i $m=i, o$, onda se krutst ležaja može izraziti preko:

$$K_{i,k}^L = \frac{\partial F_k^i}{\partial \delta_k^i} = \left(- \sum_{j=1}^Z [T]_j^T \frac{\partial Q_j}{\partial u_j} [T]_j \right)_i \quad \text{ili} \quad [K]^L = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} & k_{x\theta_y} & k_{x\theta_z} \\ & k_{yy} & k_{yz} & k_{y\theta_y} & k_{z\theta_z} \\ s & & k_{zz} & k_{z\theta_y} & k_{z\theta_z} \\ & i & & k_{\theta_y\theta_y} & k_{\theta_y\theta_z} \\ & & m & & k_{\theta_z\theta_z} \end{bmatrix}_{5 \times 5} \quad (8)$$

3. REZULTATI

Imajući u vidu da precizni kuglični ležaji sa kosim dodirom isključivo služi za uležištenje glavnih veretna mašina alatki, analiza je sprovedena na primeru glavnog vretena (sl.3) uležištenog u prednjem i zadnjem osloncu sa po dva kuglična ležaja sa kosim dodirom [8].



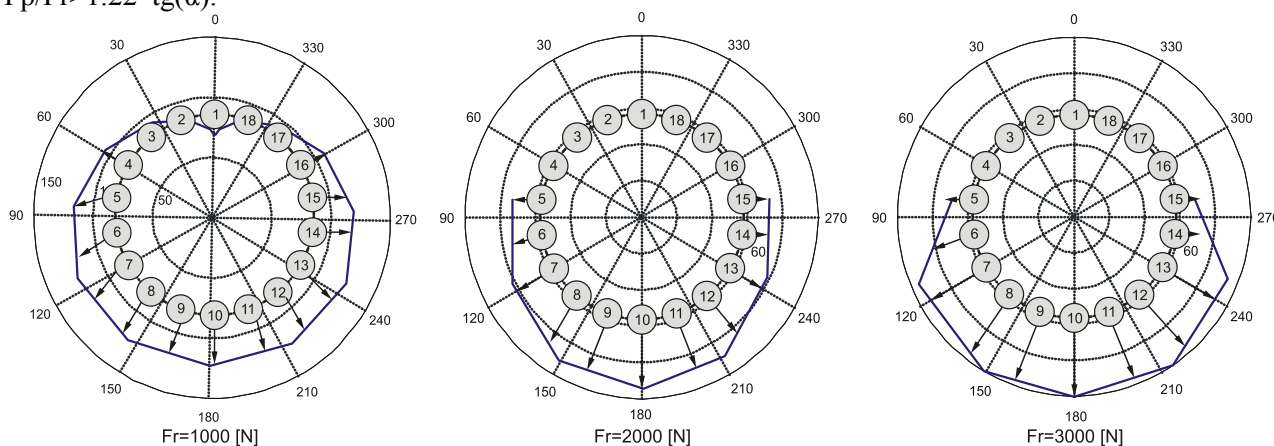
Slika 3 Šematski prikaz delovanja spoljašnjeg opterećenja na sklop glavnog vretena pri analizi ležaja

Analiza je sprovedena za hibridne ležaje SKF7011 CDGA/HC za malo, srednje i veliko prednaprezanje i "O", raspored ležaja u prednjem osloncu. Da bi se izvršilo ispitivanje samih ležaja, pretpostavljeno je da je vreteno apsolutno kruto, u tom slučaju opterećenja koje deluju na vrh vretena se direktno prenose na ležaje, na osnovu čega je: $F_p = F_x$, $F_r = F_y$. Analizom su obuhvaćeni uticaji ugla kontakta, kontaktnih deformacija, kontaktnih opterećenja, pomeranja centra ležaja, krutosti kako pojedinačnog tako i ležaja u rasporedu, pri delovanju datih opterećenja, u stacionarnom stanju i za sedam vrednosti brojeva obrtaja: 2800, 3550, 4500, 5600, 7100, 9000 i 11200. Radijalno opterećenje od 4000 N je određeno na osnovu maksimalnog obrtnog momenta ISO konusa i na osnovu prečnika ležaja. Brojevi obrtaja su definisani na osnovu preporuka proizvođača ležaja.

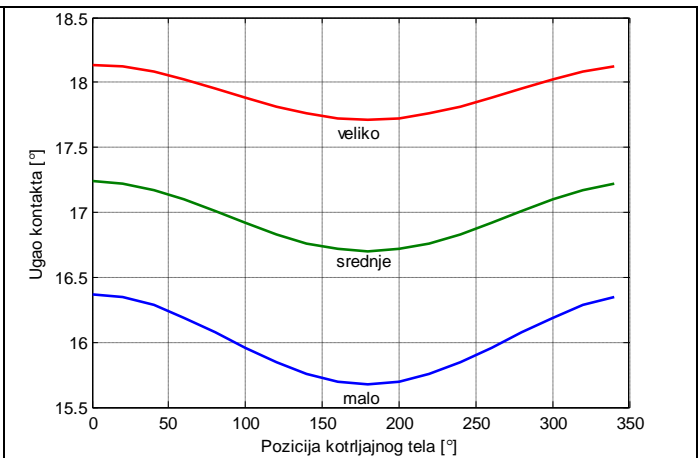
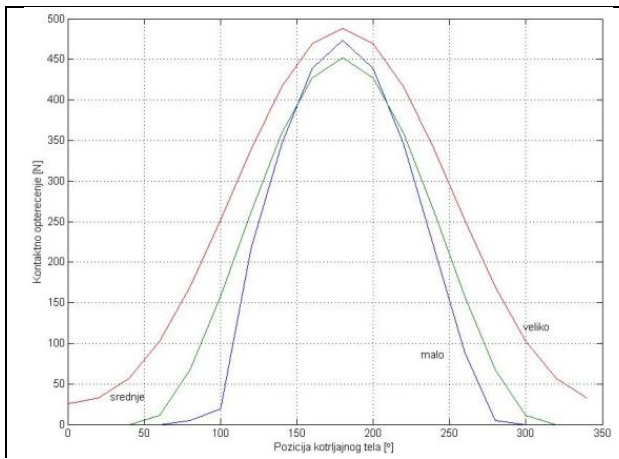
3.1 Analiza kontaktnih opterećenja i ugla kontakta

Pri delovanju radijalnog opterećenja na ležaj, dolazi do neravnomerne raspodele opterećenja na kotrljajna tela i pri stacionarnom stanju. U stacionarnom stanju kontaktno opterećenje sa spoljašnjom stazom kotrljanja jednako je kontaktnom opterećenju sa unutrašnjom stazom kotrljanja. Broj kotrljajnih tela koja ulaze u zahvat sa prstenovima ležaja, odnosno koja učestvuju u prenošenju opterećenja, zavisi od sile prednaprezanja, odnosno preklopa u ležaju. Sa povećanjem prednaprezanja, povećava se broj kotrljajnih tela koja prenose radijalno opterećenje, što značajno smanjuje stepen neravnomernosti raspodele u prenošenju spoljašnjeg opterećenja. Broj kotrljajnih tela koja učestvuju u prenošenju opterećenja za malo prednaprezanje je prikazano na slici 4. Pri malom prednaprezanju i radijalnom opterećenju od 1000 N, broj tela koji je opterećen iznosi 17, jedno kotrljajno telo ne učestvuje u prenošenju opterećenja, dok je pri istom prednaprezanju i radijalnom opterećenju od 2000 N, sedam kotrljajnih tela neopterećeno (1, 2, 3, 4, 16, 17, 18, (sl. 4)), isti slučaj je i kod opterećenja od 3000 i 4000 N, samo je intenzitet opterećenja različit. U slučaju velikog prednaprezanja za sve slučajeve radijalnog opterećenja sva kotrljajna tela se nalaze u zoni opterećenja, samo u zavisnosti od prednaprezanja i radijalnog opterećenja prenose opterećenja većeg ili manjeg intenziteta (sl.5). Promenom opterećenja na kotrljajnim telima, menja se ugao kontakta, koji je najveći na najrasterećenijem kotrljajnom telu i opada kako opterećenje na kotrljajnim telima raste. Na slici 6 je prikazana promena ugla kontakta u zavisnosti od prednaprezanja za $F_r=4000$ N.

Iz prethodne analize proizilazi da malo prednaprezanje treba povećavati pri razmatranom radijalnom opterećenju, dok srednje prednaprezanje treba povećavati pri većim radijalnim opterećenjima (3000 i 4000 N). Na osnovu sveobuhvatane analize, došlo se do zaključka da bi malo prednaprezanje trebalo povećati na 222 N pri $F_r=1000$ N ili srednje na 666 N pri $F_r=3000$ N, da bi sva kotrljajna tela bila u zoni opterećenja. Prema tome, a na osnovu većeg broja analiziranih podataka, određena je minimalna veličina prednaprezanja da bi sva kotrljajna tela bila u zoni opterećenja, a to je $F_p/F_r > 0.81 \cdot \tan(\alpha)$. Prema istraživanjima u radu [4] $F_p/F_r > 1.22 \cdot \tan(\alpha)$.



Slika 4. Raspodela opterećenja za malo prednaprezanje u zavisnosti od spoljašnjeg radijalnog opterećenja



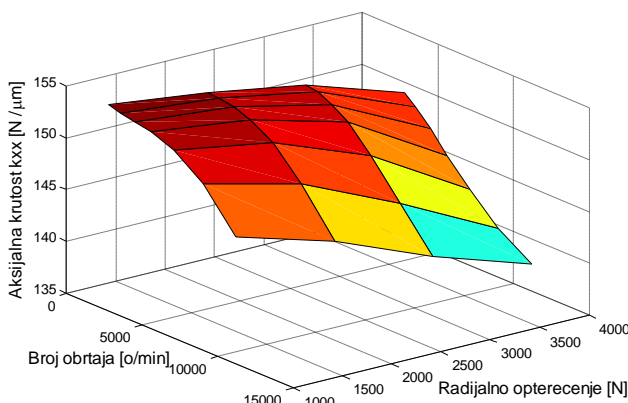
Slika 5. Promena kontaktnih opterećenja u zavisnosti od pozicije kotrljajnih tela i prednapreznja pri radijalnom opterećenju $Fr=4000$ [N]

Slika 6. Promena ugla kontakta u zavisnosti od pozicije kotrljajnih tela i prednapreznja pri radijalnom opterećenju $Fr=4000$ [N]

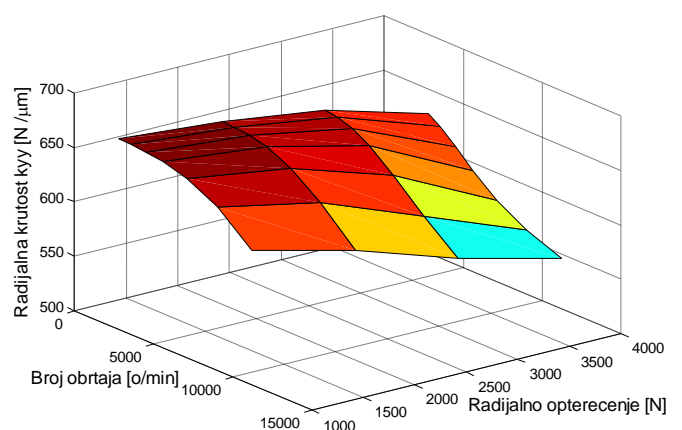
3.2 Analiza krutosti ležaja

Na slici 7a je prikazan promena aksijalne krutosti ležaja u zavisnosti od radijalnog opterećenja za razmatrane brojeve obrtaja. Povećavanjem radijalnog opterećenja sa 1000 na 4000 N aksijalna krutost opada za oko 3.7 %, dok povećanjem broja obrtaja aksijalna krutost opada za 4.9 % pri najmanjem radijalnom opterećenju, dok pri maksimalnom opterećenju povećanjem broja obrtaja aksijalna krutost opada za 7.66 %.

Ovako mali pad aksijalne krutosti se može objasniti time da sila prednapreznja (veliko prednapreznje) ima dominantan uticaj, pa radijalno opterećenje ne može mnogo promeniti aksijalnu krutost. Promena radijalne krutosti u zavisnosti od broja obrtaja i radijalnog opterećenja za veliko prednapreznje je prikazana na slici 7b. Povećanjem radijalnog opterećenja sa najmanje na najveću vrednost, radijalna krutost opada za oko 7%. Pri povećanju broja obrtaja sa minimalnog na maksimalni radijalna krutost opada za 7.5 % za slučaj najmanjeg radijalnog opterećenja ili za oko 13 % pri najvećem radijalnom opterećenju. Iz prethodnog se može zaključiti da radijalna krutost ima nešto veći pad u odnosu na aksijalnu, što se objašnjava činjenicom da radijalno opterećenje ima dominantni uticaj na radijalnu krutost. Do sličnih podataka su došli autori i u radovima [1, 2].



a)



b)

Slika 7. Promena: a) aksijalne; b) radijalne krutosti u zavisnosti od broja obrtaja i radijalnog opterećenja za veliko prednapreznje

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize ležaja, može se zaključiti, da pri delovanju radijalnog opterećenja aksijalna i radijalna krutost opadaju, dok se pri povećanju prednapreznja krutosti povećavaju. U nestacionarnom stanju, kao i pri delovanju radijalnog opterećenja dolazi do povećanja ugla kontakta sa unutrašnjom, odnosno smanjenju ugla kontakta sa spoljašnjom stazom, dok se kontaktna opterećenja povećavaju sa obe staze u odnosu na stacionarno stanje. Usled svega ovoga dolazi do razlike u krutosti u zavisnosti od pozicije kotrljajnog tela, s jedne strane, dok s druge strane, usled povećanja kontaktnih opterećenja sa obe staze kotrljanja i razlike u uglovima kontakta za svaku poziciju kotrljajnih tela dolazi do smanjena krutosti u svim pravcima, sa povećanjem broja obrtaja. Povećanjem broja obrtaja, povećava se intenzitet sila inercije, što će usloviti povećanje ugla kontakta sa unutrašnjom, odnosno smanjenje ugla kontakta sa spoljašnjom stazom kotrljanja, pri čemu dolazi do opadanja krutosti u svim pravcima.

5. LITERATURA

- [1] Bourdon, A., Rigal, J. Play, F. D.: *Static Rolling Bearing Models in a CAD. Environment for the Study of Complex Mechanisms: Part II—Complete Assembly Model*, Journal of Tribology, Transactions of the ASME, Vol. 121, 1999, Pages 215-223.
- [2] Cao, Y.: *Modeling of high-speed machine tools spindle system*, Ph.D thesis, The University of British Columbia, 2006.
- [3] Chen, J.,S., Hwang, Y.-W.: *Centrifugal force induced dynamics of a motorized high-speed spindle* Int J Adv Manuf Technol (2006) 30: 10–19
- [4] Chi, W. L., Jay, F. T., Kamman, J.: *An integrated thermo-mechanical-dynamic model to characterize motorized machine tool spindles during very high speed rotation*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Machine Engineering, ISSN 0890-6955, 2003, Vol. 43, Pages 1035–1050.
- [5] Harris, T.A., Michael N. K.: *Rolling bearing analysis: Advanced Concepts of Bearing Technology*, Fifth edition, Taylor & Francis Group, 2007.
- [6] Harris, T.A., Michael N. K.: *Rolling bearing analysis: Essential Concepts of Bearing Technology*, Fifth edition, Taylor & Francis Group, 2007.
- [7] Li H, Shin YC.: *Integrated dynamic thermo-mechanical modeling of high-speed spindles, part 1: Model development*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME 126 (1), 2004. Pages 148-158
- [8] Zeljković, M., Gatalo, R.: *Experimental and computer aided analysis of high-speed spindle assembly behavior*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1999, Vol. 48/1, Pages 325–328.
- [9] Živković, A.: *Računarska i eksperimentalna analiza ponašanja kugličnih ležaja za specijalne namene*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2013.

Živković, A., Zeljković, M., Tabaković, S.

ANALYTIC MODEL FOR ANALYSIS STATIC BEHAVIOUR OF THE BALL BEARING WITH ANGULAR CONTACT

¶ **Abstract:** Predicting the static behavior of spindle assembly is essential for the accurate processing on machine tools. Particular characteristics of high speed spindles depend on the characteristics of the bearing. This paper describes a mechanical model of ball bearings, angular contact. The present model is based on an analytical approach. Model of the bearing has been developed on the basis of John Harris's quasistatic equations of equilibrium and Hertz's contact theory. This solution is considered transient changes of contact load, the contact angle and the bearing stiffness depending on the position of the ball. At the end of the developed model is verified on the example of bearing assembly spindle machine tools. Analysis of the results shows that the axial and radial stiffness of the bearing decreases with increase inertia force, while the both stiffness increase, increasing the preload.

Key words: ball bearing with angular contact, spindle, the bearing stiffness

Vid Jovišević¹⁾, Stevo Borojević¹⁾, Bojan Marković²⁾

IZBOR PUTANJE KRETANJA ALATA U PROCESU MAŠINSKE OBRADJE TANKOSTJENIH ALUMINIJUMSKIH STRUKTURA

Rezime

U radu je prikazana metodologija, izbora optimalne putanje kretanja alata i izbor optimalne vrijednosti posmaka u procesu mašinske obrade aluminijumskih tankostjenih struktura. Pri izboru optimalne putanje kretanja alata kontrolisane su veličine površinske hrapavosti i tačnost dimenzija i oblika u graničnim vrijednostima tolerancijskih polja, u minimalnom vremenu obrade. U radu je na primjeru mašinske obrade dijela oblika tankostijene aluminijumske strukture linijskog tipa prikazan uticaj izbora putanje kretanja alata i uticaj veličine posmaka na vrijeme obrade, odstupanje debljine stijenke, upravnosti, ravnosti i vrijednosti površinske hrapavosti.

Ključne reči: CAD/CAM, mašinska obrada, putanja kretanja alata

1. UVOD

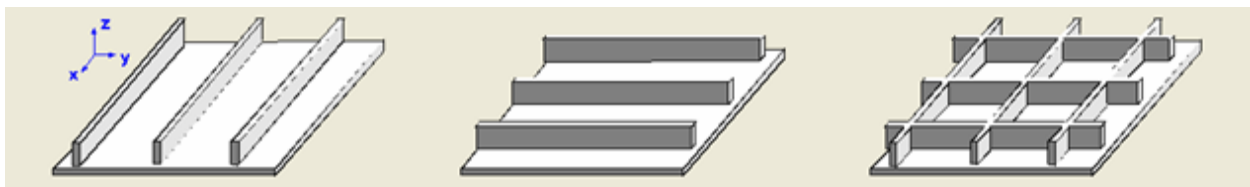
Tankostjene aluminijumske komponente (uzdužna rebra, poprečna rebra, nosači, pregrade) se najčešće koriste kao strukturalni dijelovi u vazduhoplovnoj industriji zbog svoje homogenosti i dobrog odnosa između nosive snage i težine. Izrađeni su od tankostjenih struktura, koje daju dovoljnu krutost cijelom proizvodu, iako se obično mogu pronaći kao sklopovi od više manjih komponenti, radi lakše montaže u cijelinu.

Proizvodnja tankostjenih struktura vrši se uklanjanjem materijala iz punih komada, čak i do 95 % njegove težine. Proces proizvodnje ovakvih složenih struktura je dugotrajan i veoma zahtjevan. Zbog velike količine materijala koji je potrebno ukloniti obradom, važno je da se u procesu mašinske obrade postigne što veća produktivnost, međutim zbog male krutosti tankih zidova predmeta javljaju se greške obrade.

Osnovna podijela tankostjenih struktura prema odnosu dimenzija:

- mala visina u odnosu na debljinu 15:1,
- umjerena visina u odnosu na debljinu <30:1,
- vrlo velike visine u odnosu na debljinu 30>:1.

Konstruktivna rješenja tankostjenih struktura vremenom su se mijenjala. Na samom početku izrade i primjene tankostjenih struktura to su bili jednostavni oblici (slika 1.), linijski i pravougaoni i kao takvi davali su značajne prednosti u odnosu na dotadašnja konstruktivna rješenja ovih proizvoda.



Slika 1. Konstrukcioni oblici tankostjenih struktura

Aluminijumske tankostijene strukture, primjenjuju se u mnogim granama industrije, gdje je prvenstveno važno da proizvodi budu što manje mase radi svoje funkcionalnosti, a da je njihova krutost i nosivost u dozvoljenim granicama. Dosadašnji identifikovani oblici aluminijumskih tankostjenih struktura izrađenih postupkom mašinske obrade mogu se uopšteno podijeliti na oblike: linijskog, trougaonog, pravougaonog i

¹⁾ prof. dr Vid Jovišević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (vid.jovisevic@blic.net), mr Stevo Borojević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (stevoborojevic@hotmail.com)

²⁾ mater Bojan Marković, SIM Tehnik d.o.o., Kotor Varoš, (markovicbojan35@gmail.com)

šestougaonog tipa.

Složeni oblik tankostijenih aluminijumskih struktura koje se koriste u proizvodnji elektro komponenti i kućista različitih oblika kao osnovni element za nadogradnju drugih elemenata i dobijanja funkcionalne cijeline (slika 2.).



Slika 2. Složeni oblik tankostijenih aluminijumskih struktura

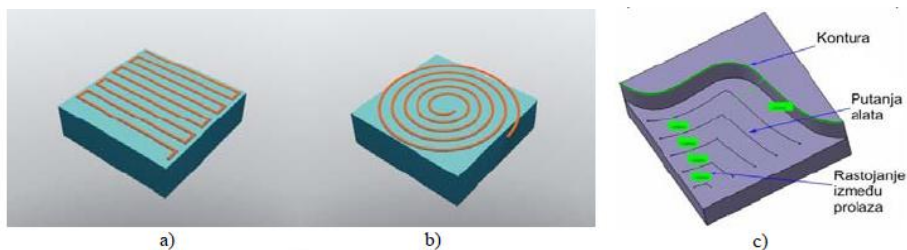
2. RAZVOJ METODOLOGIJE IZBORA PUTANJE KRETANJA ALATA

Razvoj proizvoda složene geometrije, kao novi tehnološki izazovi vezani su za automobilsku i vazduhoplovnu industriju. To je značajno ubrzalo razvoj programskih sistema za projektovanje primjenom računara koji omogućuju korisnicima modeliranje vrlo kompleksnih oblika, što dovodi do problema pri izradi ovakvih dijelova u pogledu kvaliteta, vremena i cijene obrade [1].

Složeni geometrijski oblici izazvali su najviše problema kod obrade glodanjem, i to posebno pri izradi složenih površina kalupa za brizganje i duvanje plastike, tankostijenih struktura, turbinskih lopatica i drugih. Veliki broj istraživanja realizovan je iz problematike glodanja složenih površina i optimizacije putanja kretanja alata za glodanje. Određeni broj rezultata ovih istraživanja, koja se odnose na nove i efikasne putanje kretanja alata u toku obrade, uspješno je implementiran u savremene programske sisteme za računarom podržanu proizvodnju (CAM) [2].

Proučavanje putanje kretanja alata mašinske obrade glodanjem je od posebnog značaja u slučajevima kada je potrebno izabrati adekvatnu putanju obrade, koja podrazumeva maksimalnu tačnost dimenzija, minimalnu hrapavost obrađene površine i minimalne troškove obrade [3]. Često se dešava da je nakon mašinske obrade potrebno ručno poliranje obrađene površine, kako bi bila postignuta zahtijevana hrapavost. Ove operacije dorade moguće je minimizirati ili čak potpuno eliminisati izborom adekvatne putanje kretanja alata pri mašinskoj obradi, čime je takođe moguće značajno smanjiti vrijeme i ukupne troškove obrade.

Putanja kretanja alata predstavlja način na koji se alat kreće pri obradi definisane površine. Postoji veliki broj programskih sistema koji pružaju podršku u raznim područjima proizvodnje, uključujući i oblast definisanja putanje kretanja alata u procesu mašinske obrade. Zajednički cilj ovih CAD/CAM sistema je da olakšaju projektantima i tehnolozima razvoj novih proizvoda i tehnologije njihove izrade.



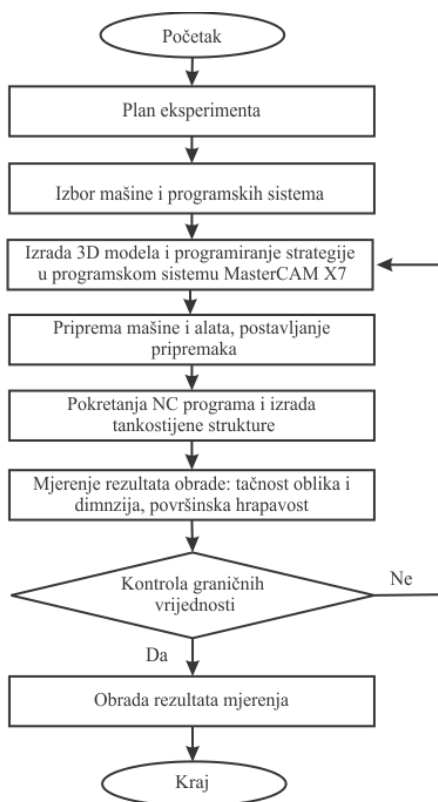
Slika 3. Primjeri putanje kretanja alata grube obrade; a) rastersko(cik cak) glodanje, b) spiralno glodanje, c) profilno glodanje

Osnovne putanje kretanja alata grube obrade glodanjem, koje sadrže skoro svi CAD/CAM sistemi, su:

- Rastersko (cik-cak) glodanje – putanje alata su na jednakom odstojanju i paralelne su sa jednom osom koordinatnog sistema mašine alatke, a obrada se izvodi i u jednom i u drugom smeru kretanja, prikazano na slici 3.a.);
- Spiralno glodanje – alat se kreće po spiralnoj putanji iz centra obrađivane površine sa prethodno definisanim preklapanjima putanje alata, prikazano na slici 3.b.);
- Profilno glodanje – putanja alata se generiše na osnovu profila izradka, a kretanje alata se izvodi po prethodno definisanim koracima, prikazano na slici 3.c.);

Model metodologije izbora putanje kretanja alata prikazan je na slici 4. i sadrži sedam faza aktivnosti, koje se provode izvođenjem eksperimenta, koji su bazirani na izboru putanje kretanja alata i vrijednosti posmaka mašinske obrade [4].

Primjena razvijenog modela bazirana je na programskim sistemima za kreiranje i analizu plana eksperimenta Desing-Expert 7.1.1 i za generisanje upravljačkog koda MasterCAM X7.

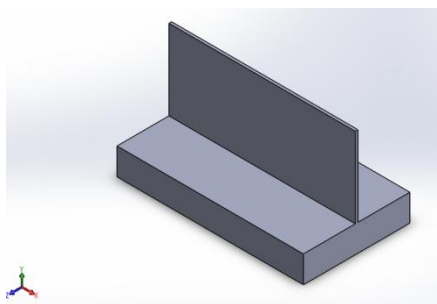


Slika 4. Model metodologije izbora putanje kretanja alata

3. PLAN EKSPERIMENATA

Razvijena metodologija za izbor odgovarajuće putanje kretanja alata uključuje u istraživanje podršku programskog sistema pod nazivom *Desing-Expert 7.1.1*. Pomenuti programski sistem podržava veliki broj metoda za eksperimentalna istraživanja. Eksperimentalna istraživanja u okviru ovog rada sastoje se iz tri promjenljive veličine (faktora) koji su predmet istraživanja. Od toga dva faktora predstavljaju numeričke vrijednosti a jedan faktor je nenumerička vrijednost. Na osnovu analize metoda utvrđeno je da metoda pod nazivom *Central Composite*, podržava preliminarni plan eksperimenta [5].

Predmet istraživanja u ovom radu je tankostijena aluminijumska struktura linijakog tipa, debljine stijenke 0,5-1,5 mm (slika 5.).



Slika 5. 3D model tankostijene aluminijumske strukture linijakog tipa

U okviru izabrane metode za analizu eksperimentalnih istraživanja izvršeno je definisanje graničnih vrijednosti numeričkih faktora. Za prvi numerički faktor debljinu stijenke tankostijene linijske stukture,

donja granična vrijednost iznosi 0.5 mm, a gornja granična vrijednost 1.5 mm. Za drugi numerički faktor vrijednost posmaka mašinske obrade, donja granična vrijednost iznosi 150 m/min, a gornja granična vrijednost 350 m/min.

Postupak definisanja ne numeričkog faktora izvršeno je u polju pod nazivom *Levels*, gdje se upisuje broj nenumeričkih faktora jednog tipa. U okviru posmatranog eksperimenta upisan je broj 3, što predstavlja tri različite putanje kretanja alata. Analizom putanja kretanja alata i početnim eksperimentalnim istraživanjima zaključeno je da su tri putanje kretanja alata dominantne i da prilikom izvođenja generišu najveće rezlike u procesu obrade. Unosom potrebnih podataka u programski sistem, generisana je tabela plana eksperimenata sa kombinovanim vrijednostima definisanih veličina. Tabela prikazana na slici 6. predstavlja plan izvođenja eksperimenata.

Select	Std	Run	ULAZ			IZLAZ				
			Factor 1 A: Debljina stijenke mm	Factor 2 B: Posmak mm/min	Factor 3 C: Putanja kretanja alata	Response 1 Vrijeme izrade min	Response 2 Odstupanje debljine delta a (mm)	Response 3 Odstupanje upravnosti delta b (mm)	Response 4 Odstupanje ravnosti delta c (mm)	Response 5 Hrapavost ob. površine Ra (um)
1	32		0.65	179.29	Putanja 1	42.66	0.050	0.040	0.038	0.49
2	3		1.35	179.29	Putanja 1	42.65	0.074	0.036	0.022	1.17
3	8		0.65	320.71	Putanja 1	24.85	0.006	0.041	0.036	0.55
4	24		1.35	320.71	Putanja 1	24.78	0.028	0.033	0.019	1.16
5	12		0.50	250.00	Putanja 1	30.91	0.016	0.060	0.035	0.49
6	2		1.50	250.00	Putanja 1	31.11	0.048	0.029	0.011	1.41
7	27		1.00	150.00	Putanja 1	50.35	0.032	0.018	0.017	0.97
8	6		1.00	350.00	Putanja 1	23	0.009	0.025	0.018	1.06
9	5		1.00	250.00	Putanja 1	31.21	0.031	0.017	0.030	1.12
10	7		1.00	250.00	Putanja 1	31.21	0.032	0.013	0.026	1.35
11	29		1.00	250.00	Putanja 1	31.21	0.025	0.015	0.029	1.37
12	20		0.65	179.29	Putanja 2	31.75	1.252	1.060	0.417	1.98

Slika 6. Plan eksperimenata

Eksperiment je izvršen u Laboratoriji za projektovanje tehnoloških procesa primjenom računara na Mašinskom fakultetu u Banjaluci, koja posjeduje troosni obradni centar *EMCO MILL 450*.

4. PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽIVANJA

4.1 Kontrola graničnih vrijednosti dimenzija i hrapavosti obrađene površine

Planom eksperimentalnog istraživanja u okviru ovog rada predviđeno je mjerenje i obrada sljedećih parametara karakterističnih za obradu tankostjenih linijskih struktura:

- odstupanje debljine stijenke - Δa ,
- odstupanje upravnosti - Δb ,
- odstupanje ravnosti - Δc i
- hrapavost obrađene površine - R_a

Mjerenje izrađenih uzoraka izvršeno je u Laboratoriji za Mjernu tehniku na Mašinskom fakultetu u Banjaluci, primjenom mjerne ruke pod nazivom *MCAx*. Ovaj mjerni uređaj ima mogućnost dvostrukog mjerenja dimenzija. Prvi način je da se pomoću dodirnog elementa dodiruju karakteristične tačke za dobijanje željene dimenzije i uspostavlja se položaj između njih, a drugi način je lasersko skeniranje predmeta, dobijanje oblaka tačaka i obrada pomoću računara. Mjerenje definisanih veličina u ovom radu izvršeno je pomoću dodirnog elementa (slika 7.).



Slika 7. Mjerenje sa mjernim uređajem *MCAx*



Slika 8. Uređaj za mjerenje hrapavosti *INNOVATEST*

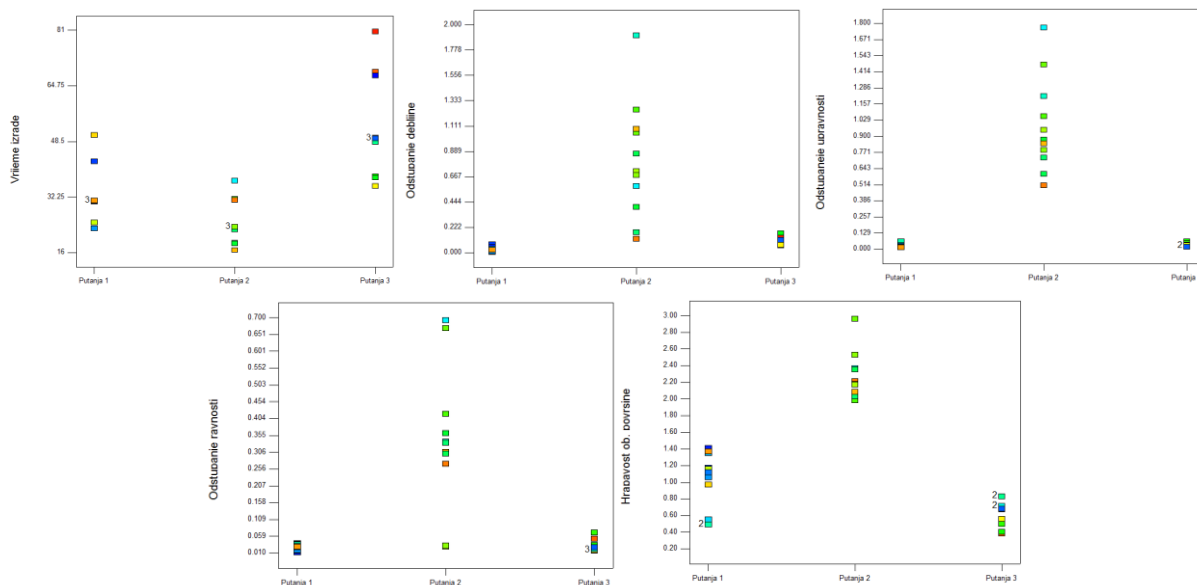
Mjerenje hrapavosti obrađenih površina izvršeno je mjernim uređajem *INNOVATEST* koji se koristi za unutrašnju i spoljašnju kontrolu kvaliteta obrađenih površina (slika 8.). Uređaj posjeduje mogućnost

mjerenja parametara Ra (0,03-6,35) μm i Rz (0.2-25.3) μm a izvodi se dijamantskim vrhom od 2 μm , sa rezolucijom 0,01 μm .

Izvršena eksperimentalna istraživanja definisanim *Centaral Composite* metodom obuhvatila su 33 priprema na kojima je izvršeno ispitivanje kombinovanjem različitih putanja kretanja alata, vrijednosti posmaka i debljina stijenki.

Analizirani su intervali koji obuhvataju vrijednosti dobijene mjerenjem i to (slika 9.):

- Poređenje putanja kretanja alata prema kriterijumu glavnog vremena izrade;
- Analiza prema kriterijumu odstupanja debljine tankostijene aluminijske strukture, gdje se vide uticaji različitih putanja kretanja alata;
- Analiza prema kriterijumu odstupanja upravnosti;
- Kriterijum odstupanja ravnosti;
- Vrijednost hrapavosti obrađene površine aluminijski tankostijenih struktura;



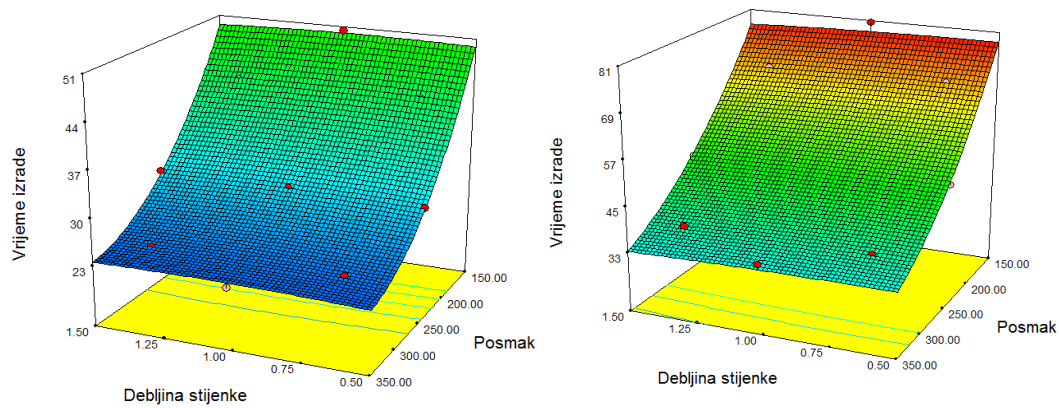
Slika 9. Intervali graničnih vrijednosti parametara u procesu izvođenja eksperimenata

Na osnovu analiziranih intervala graničnih vrijednosti za sve posmatrane veličine u procesu izvođenja eksperimenata, može se konstatovati da mjerene vrijednosti veličina vezane za putanju kretanja alata broj 2 kao što su: odstupanje debljine stijenke, odstupanje upravnosti, odstupanje ravnosti i vrijednost hrapavosti ne nalaze se unutar dozvoljenih vrijednosti. Iz tog razloga putanja kretanja alata broj 2 isključuje se iz daljeg istraživanja. Dok putanja kretanja alata broj 1 i putanja kretanja alata broj 3 zadovoljava granične vrijednosti i na njima se može vršiti optimizacija tehnološkog procesa.

4.2 Obrada rezultata mjerenja

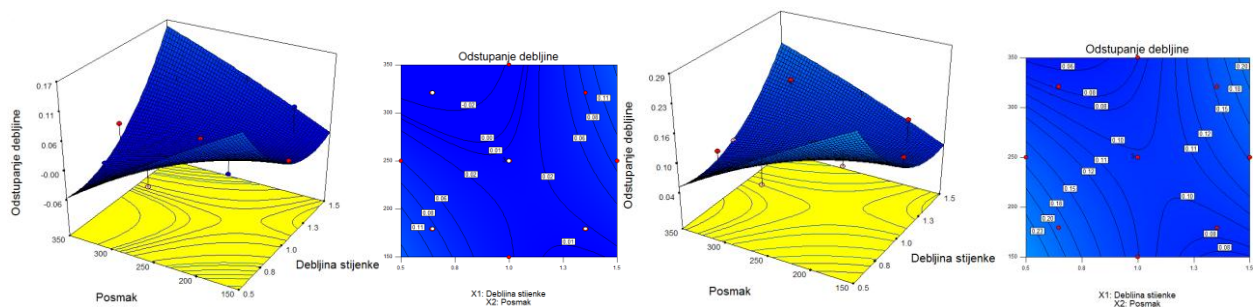
Obrada rezultata izvršena je pomoću programskog sistema Desing Expert 7.1.1. Na osnovu postavljenog plana eksperimenta i dobijenih rezultata mjerenjem izrađenih uzoraka dobijene su vrijednosti veličina, preko kojih se može vršiti upoređivanje putanja kretanja alata, za izradu tankostijenih aluminijskih struktura. Pomenuti programski sistem posjeduje mogućnost obrade i predstavljanja rezultata pomoću velikog broja grafičkih alata i dijagrama. U okviru ovog rada korišćeni su dvodimenzionalni i trodimenzionalni dijagrami radi efikasnijeg prikaza rezultata eksperimentalnih istraživanja.

Grafička reprezentacija zavisnosti glavnog vremena izrade, debljine stijenke tankostijene strukture i vrijednosti posmaka mašinske obrade, za proces izrade uzoraka putanjom kretanja alata 1 i 3 prikazan je na slici 10.



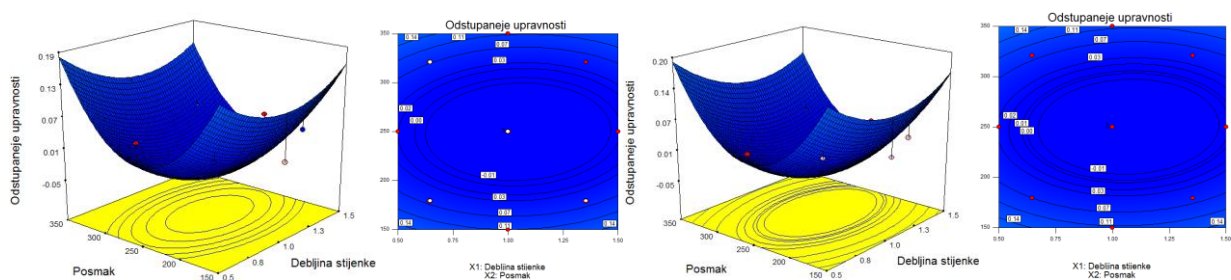
Slika 10. Grafička reprezentacija zavisnosti vremena i putanja kretanja alata 1 i 3

Na osnovu dobijenih rezultata odstupanja debljine stijenke formiran je dijagram koji opisuje ponašanje odstupanja pri izradi debljina stijenki u intervalu od 0.5 do 1.5 mm (slika 11.)



Slika 11. Grafička reprezentacija zavisnosti odstupanja debljine i putanje kretanja alata broj 1 – Δa

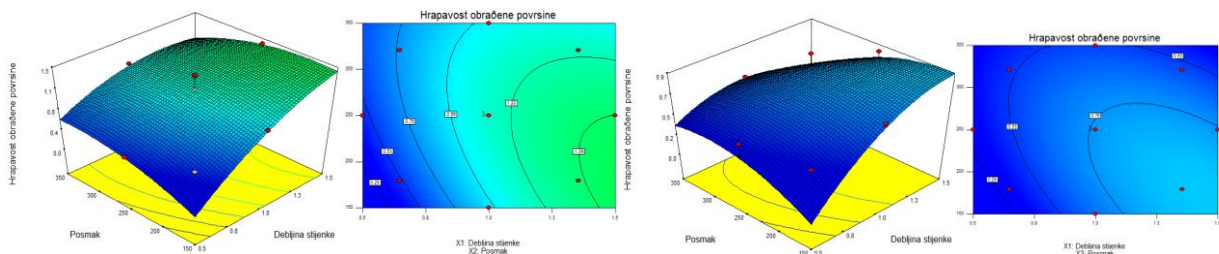
Analiza rezultata sa stanovišta upravnosti za putanju kretanja alata 1 i 3 predstavljena je na slici 12 u obliku dijagrama. Na slikama se može vidjeti da rezultati izmjerenih odstupanja daju približne vrijednosti za putanju kretanja alata broj 1 i putanju kretanja alata broj 3. Takođe, moguće je vidjeti zavisnost vrijednosti posmaka za debljinu stijenke u intervalu od 0.5 do 1.5 mm.



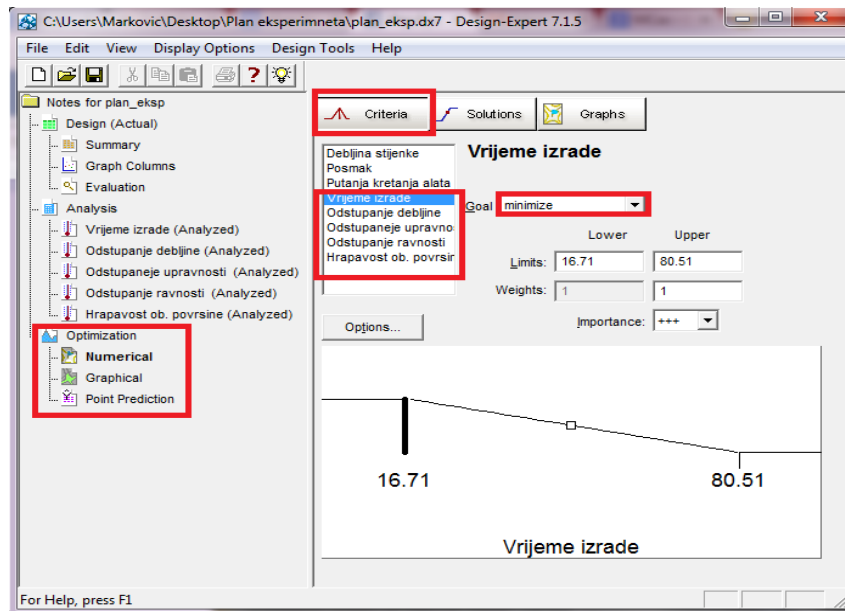
Slika 12. Grafička reprezentacija zavisnosti odstupanja upravnosti za putanju kretanja alata 1 i 3

Rezultati dobijeni za vrijednost hrapavosti obrađene površine za putanju kretanja alata 1 i 3 predstavljeni su na dijagramu prikazanom na slici 13. Putanja kretanja alata broj 1 ostvaruje veću hrapavost obrađene površine u odnosu na putanju kretanja alata broj 3.

Na osnovu gore definisanih modela izvršena je optimizacija izbora optimalne putanje kretanja alata i vrijednosti posmaka pri obradi tankostijene strukture određene debljine stijenke primjenom programskog sistema Desing Ekspet 7.1.1. Na slici 14 prikazan je interfejs programskog sistema za postavljanje kriterijuma optimizacije na osnovu minimalnih izlaznih veličina: glavno vrijeme izrade, odstupanje debljine, upravnosti, ravnost i vrijednost hrapavosti obrađene površine.

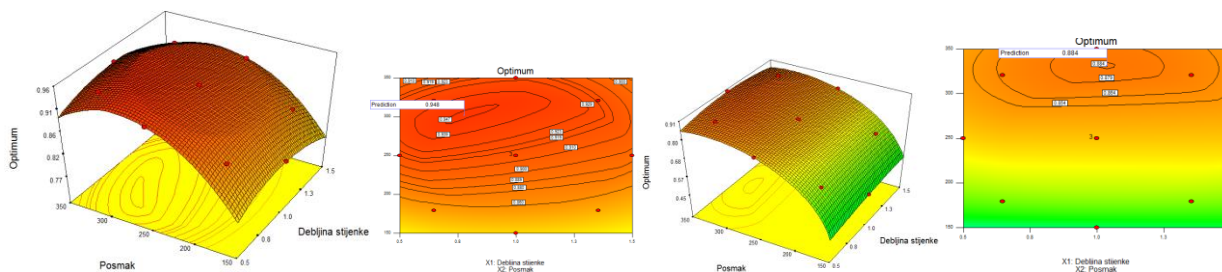


Slika 13. Hrapavost obrađene površine za putanju kretanja alata 1 i 3



Slika 14. Programski alat za optimizaciju u programskom sistemu Desing-Expert 7.1.5

Postavljeni kriterijumi optimizacije dali su rezultate predstavljene u obliku dijagrama na slici 15. Za slučaj putanje kretanja alata broj 1 pri izradi tankostijene aluminijumske strukture debljine 0.8 mm sa posmakom vrijednosti 300 m/min ostvareno je 95 % postavljenih kriterijuma, što rezultatima procesa optimizacije daje visok nivo povjerenja. Sa dijagrama prikazanog na slici 15. može se vidjeti da se optimalna vrijednost posmaka značajno ne mjenja pri odabiru debljine stijenke u intervalu (0.5 do 1.5) mm. Optimalna vrijednost posmaka za te debljine stijenki kreće se u intervalu od 280 m/min do 320 m/min.



Slika 15. Optimalna vrijednost posmaka za putanja kretanja alata 1 i 3

Za slučaj putanje kretanja alata broj 3 pri izradi tankostijene aluminijumske strukture debljine 1 mm sa posmakom vrijednosti 330 m/min dostignuto je 88 % postavljenih kriterijume, što predstavlja niži nivo povjerenja rezultata procesa optimizacije u odnosu na putanju kretanja alata broj 1. Na dijagramu prikazanom na slici 15 vidi se da je optimalna vrijednost posmaka 330m/min za sve vrijednosti debljine strukture na intervalu (0.5 do 1.5)mm

Primjenom programskog sistema *Desing-Expert 7.1.1* prikazane su optimalne vrijednosti parametara za obradu tankostijenih aluminijumskih struktura u posmatranom intervalu debljina od 0,5 do 1,5 mm. U tabeli 1 su predstavljene optimalne vrijednosti istraženih veličina za pomenute vrijednosti debljina tankostijenih aluminijumskih struktura.

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Analizom dobijenih rezultata za putanju kretanja alata broj 1 i putanju kretanja alata broj 3, može se vidjeti da putanja kretanja alata broj 1 sa posmakom optimalne vrijednosti 300 m/min ispunjava preko 90 % postavljenih kriterijuma za razliku od putanje kretanja alata broj 3 koja sa posmakom optimalne vrijednosti 330 m/min ispunjava od 85% do 88% postavljenih kriterijuma, zavisno od izabrane debljine stijenke. Na osnovu toga, putanja kretanja alata broj 1 predstavlja optimalnu putanju kretanja alata sa intervalom vrijednosti posmaka od 280 m/min do 320 m/min u zavisnosti od debljine stijenke.

Tabela 1. Optimalne vrijednosti istraživanih veličina za pomenute vrijednosti debljina tankostijenih aluminijumskih struktura.

Red. Br.	Debljina stijenke a (mm)	Putanja kretanja alata	Posmak f (m/min)	Glavno vrijeme izrade T (min)	Odstup. debljine stijenke Δa (mm)	Odstupanje upravnosti Δb (mm)	Odstupanje ravnosti Δc (mm)	Hrapavost obrađene površine Ra	Ostvareni kriterijumi optimizacije (%)
1.	0.5	1	292	26.12	0.009	0.050	0.075	0.6	94
2.	0.6	1	293	26.17	0.004	0.029	0.043	0.7	94
3.	0.7	1	294	26.21	0.011	0.013	0.018	0.8	94
4.	0.8	1	304	25.55	0.019	0.015	0.011	0.9	94
5.	0.9	1	314	25.02	0.017	0.024	0.011	1.0	94
6.	1	1	319	24.77	0.020	0.029	0.011	1.1	94
7.	1.1	1	320	24.71	0.022	0.031	0.011	1.1	94
8.	1.2	1	319	24.81	0.035	0.030	0.011	1.2	93
9.	1.3	1	311	25.14	0.041	0.024	0.011	1.2	93
10.	1.4	1	298	26.01	0.050	0.013	0.011	1.3	92
11.	1.5	1	293	26.20	0.058	0.025	0.032	1.3	91

6. LITERATURA

- [1] Jovišević V. : *Projektovanje tehnoloških procesa*, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2005.
- [2] Todić V.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
- [3] Babić R. B.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Mašinski fakultet Beograd, 2004.
- [4] Khairul A.S., Ab-Kadir A. R, Mohd Hairizal O.: *A Comparison of Milling Cutting Path Strategies for Thin-Walled Aluminium Alloys*, The International Journal Of Engineering And Science (IJES), 2013.
- [5] Todić V., Stanić J.: *Osnove optimizacije tehnoloških procesa izrade i konstrukcije proizvoda*, Novi Sad. 2002.

Vid Jovišević³⁾, Stevo Borojević¹⁾, Bojan Marković⁴⁾

OPTIMIZATION OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF ALUMINUM THIN-WALLED STRUCTURES BASED ON THE SELECTION OF TOOL PATH STRATEGIES

Abstract: This paper presents a methodology for selection of the optimal tool path and selection of the optimal feed value in the machining of thin-walled aluminum structures. In process of selection of the optimal tool path there are several controlled sizes: surface roughness and dimensional and shape accuracy of the limit values in tolerance zone, and minimum processing time. This paper, on the example of machining of part with shape in form of thin-walled aluminum structures with line type, shows the influence of selected tool path and the impact of the feed value size on the processing time, dimensional deviation of wall thickness, squareness, flatness and surface roughness values.

Keywords: CAD / CAM, machining, tool path strategies

³⁾ prof. dr Vid Jovišević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (vid.jovisevic@blic.net), mr Stevo Borojević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (stevoborojevic@hotmail.com)

⁴⁾ mater Bojan Marković, SIM Tehnik d.o.o., Kotor Varoš, (markovicbojan35@gmail.com)



Blanuša, V.¹⁾, Zeljković, M.²⁾, Živković, A.³⁾

TOPLOTNO-ELASTIČNO PONAŠANJE SKLOPA GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG CILINDRIČNO VALJKASTIM LEŽAJEM PRIMENOM MKE⁴⁾

Rezime

Rezime: Toplotne deformacije glavnih vretena su izvori grešaka na mašinama alatkama i iz tog razloga je značajno da se ove greške odrede i da se izvrši analiza njihovog uticaja. U radu se prezentuju rezultati računarskog 3D modelovanja toplotno-elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena uležištenog dvoredim cilindrično valjkastim i kugličnim ležajem sa kosim dodirnom u prednjem osloncu. Modelovanje toplotnog ponašanja i definisanje pomeranja pod dejstvom toplotnog opterećenja izvršeno je primenom metoda konačnih elemenata. Razmatran je raspored temperaturnih polja i toplotne deformacije u karakterističnim tačkama za četiri broja obrtaja.

Ključne reči: računarsko modelovanje, sklop glavnog vretena, toplotno-elastično ponašanje, dvoredi valjkasti ležaj

1. UVOD

Jedan od ciljeva procesa projektovanja sklopa glavnog vretena je predikcija njegovog ponašanja u eksploataciji, pod dejstvom opterećenja. Pored statičkog i dinamičkog, sklop glavnog vretena je izložen i toplotnom opterećenju. Predikcija ponašanja ovih sklopova se najčešće vrši metodom konačnih elemenata. Da bi se definisalo ponašanje određene mehaničke strukture metodom konačnih elemenata potrebno je definisati proračunski model iste koji uzima u obzir što veći broj parametara koji utiču na njeno ponašanje.

Cilj rada je da se odredi deformacija vrha vretena u stacionarnom temperaturnom stanju za različite brojeve obrtaja usled toplotnog opterećenja. Razmatra se sklop glavnog vretena uležišten cilindrično valjkastim dvoredim ležajem i kugličnim ležajem sa kosim dodirnom u prednjem osloncu, a za simulaciju ponašanja se koristi metodom konačnih elemenata.

Analizom toplotno-elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena za različite načine uležištenja bavio se i bavi se relativno veliki broj autora. U nastavku se navode određeni rezultati dosadašnjih istraživanja iz ove oblasti.

Bossmanns i Tu [3] predstavljaju model toka energije što je prvi korak za celokupan toplotno-mehanički model kotrljajnih ležaja. Oni u svom modelu uključuju izvore toplote u elektromotoru i izvore toplote nastale trenjem između kotrljajnih tela i prstenova kod kugličnih ležaja sa kosim dodirnom u zavisnosti od broja obrtaja. Takođe, definišu izraze za izračunavanje koeficijenta provođenja toplote između unutrašnjeg prstena i vretena odnosno spoljašnjeg prstena i kućišta, kao i koeficijente konvekcije na vrhu vretena. Prednaprezanje ležaja je u matematičkom modelu zanemareno.

Haitao, Jianguo i Jinhua istražuju toplotne uticaje na sklopu glavnog vretena obradnog centra uležištenog kugličnim ležajima sa kosim dodirnom [5]. Ispitali su uticaj toplotnih deformacija, kao posledicu toplotnog opterećenja, na tačnost glavnog vretena. Prvo su definisane relacije za određivanje koeficijenta prenosa toplote na sklopu glavnog vretena a nakon toga su određeni pomeraji na vhu vretena usled toplotnog opterećenja metodom konačnih elemenata. Razvijeni matematički model je verifikovan eksperimentalnim ispitivanjima i konstatovano je da su deformacije određene numerički približno iste kao i eksperimentalno izmerene. Rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata pokazuju da je porast

¹⁾ dipl. inž. Vladimir Blanuša, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (blanusa@uns.ac.rs)

²⁾ prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milanz@uns.ac.rs)

³⁾ doc. dr Aleksandar Živković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (acoz@uns.ac.rs)

⁴⁾ U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici" TR 35025, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

temperature u stacionarnom temperaturnom stanju 11,85 [°C], a deformacija vrha vretena 35 [μm] u aksijalnom pravcu i 16 [μm] radijalnom pravcu. Eksperimentalnim ispitivanjem ustanovljeno je da je pri porastu temperature na vrhu vretena od 12 [°C] pomeranje u aksijalnom pravcu 34 [μm] a pomeranje u radijalnom pravcu 16 [μm].

Chein, C. H. i Jang, J. Y. [4] su numerički i eksperimentalno ispitivali mogućnost hlađenja visoko brzinskog sklopa glavnog vretena spiralnim kanalom u kućištu pri različitim protocima vode. Zaključili su da se povećanjem protoka sa 0,4 [l/min] na 1,2 [l/min] smanjuje temperatura na vrhu vretena sa 24,5 [°C] na 22 [°C].

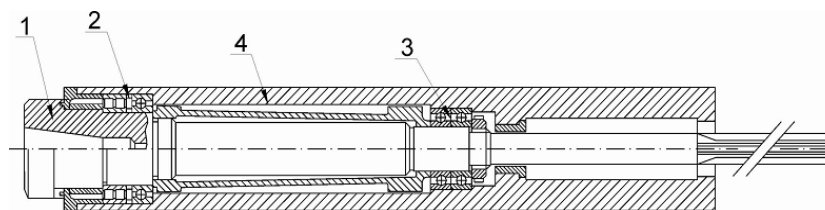
Iz prethodnog prikaza se može konstatovati da se, u poslednje vreme, manji broj autora bavio ponašanjem sklopa glavnog vretena uležištenog cilindrično valjkastim ležajem, što je iniciralo autore rada na ova istraživanja.

2. TOPLOTNO-ELASTIČNI MODEL SKLOPA GLAVNOG VRETENA

Zadatak analize toplotno-elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena je da se izvrši predikcija ponašanja i da se odrede pomeranja karakterističnih tačaka pod dejstvom toplotnog opterećenja. Prvi korak u ostvarenju ovog zahteva je izrada toplotnog modela na osnovu čijih rezultata se određuju pomeranja vrha vretena.

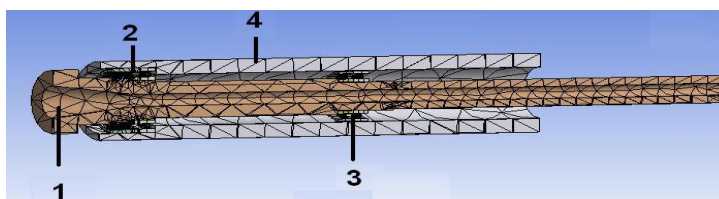
2.1 Toplotni model

Konstruktivno rešenje analiziranog sklopa glavnog vretena je prikazano na slici 1.



Slika 1. Sklop glavnog vretena uležišten cilindrično valjkastim ležajem

Za analizu je primenjen programski sistem opšte namene baziran na metodi konačnih elemenata, pri čemu je računarski model trodimenzioni (3D) (slika 2), i čine ga glavno vreteno 1, prednje uležištenje (valjkasti dvoredi ležaj i kuglični ležaj sa kosim dodirnom) 2, zadnje uležištenje 3 i pinola 4.



Slika 2. Diskretizovan model sklopa glavnog vretena 3D konačnim elementima

Na osnovu zapreminskog modela primenom metode konačnih elemenata definisana je mreža od 32610 konačnih elemenata, 100474 čvorova i 212 kontaktnih parova. Pri diskretizaciji je korišćen 3D konačni element SOLID 87 (linearni tetraedar), dok su za definisanje kontaktnih parova korišćeni konačni elementi TARGET 170 za definisanje površine kontakta i CONTA 174 za uspostavljanje kontakta između kotrljajnih tela i staza kotrljanja kao i kontakta između prstenova i vretena odnosno prstenova i pinole. Svi kontaktni parovi definisani su kao čvrste veze (BOND). Temperature na spoljašnjim prstenovima valjkastog i kugličnog ležaja su eksperimentalno određene za stacionarno temperaturno stanje za sledeće brojeve obrtaja: $n_1=2800$ [o/min], $n_2=3550$, $n_3=5600$, $n_4=6300$ [1, 2] i prikazane su u tabeli 1. Temperatura okoline je označena sa t_o , temperatura na spoljašnjem prstenu valjkastog ležaja sa t_v a temperatura na spoljašnjem prstenu kugličnog ležaja sa t_k .

Tabela 1. Eksperimentalno određene temperature elemenata sklopa glavnog vretena			
n [o/min]	t_o [°C]	t_v [°C]	t_k [°C]
2800	21,9	25,9	25,5
3550	20,8	26,2	25,6
5600	21,7	33,1	30,9
6300	22,3	37,1	34,0

Izvori toplote u razmatranom sklopu su samo ležaji, dok su unutrašnji mehanizmi prostiranja toplote: konvekcija usled rotacije ležaja, konvekcija usled rotacije vretena, provođenje između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno provođenje između unutrašnjeg prstena i glavnog vretena [9]. Da bi se izvršila računarska analiza potrebno je definisati vrednosti koeficijena konvekcije i provođenja toplote. Za konkretan slučaj, način definisanja ovih koeficijena je prikazan u radu [9], i u nastavku se navode brojčane vrednosti za usvojene mehanizme prostiranja toplote.

Konvekcija usled obrtanja ležaja ostvaruje se prostiranjem toplote između ležaja i okolnog vazduha [9]. U tabeli 2 su navedene vrednosti koeficijenta konvekcije kroz ležaje za razmatrane brojeve obrtaja.

Tabela 2. Vrednosti koeficijena konvekcije pri obrtanju ležaja za različite brojeve obrtaja [9]	
Broj obrtaja [o/min]	Koeficijent konvekcije α [W/m ² K]
2800	160,8
3550	252,2
5600	614,4
6300	775,0

Konvekcija usled obrtanja glavnog vretena je definisana u skladu sa teorijom izračunavanja koeficijenta konvekcije pri strujanju vazduha oko ravne ploče. Polazeći od konstrukcionog rešenja razmatranog sklopa glavnog vretena može se konstatovati da se prostiranje toplote konvekcijom dešava na spoljnoj cilindričnoj i unutrašnjoj konusnoj površini vrha vretena (konusna površina je razmatrana kao cilindrična srednjeg prečnika konusa) [2]. Vrednosti koeficijena konvekcije na spoljaljašnjoj cilindričnoj i unutrašnjoj konusnoj površini vrha vretena prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti koeficijena konvekcije pri obrtanju vretena za različite brojeve obrtaja [2]		
Broj obrtaja [o/min]	Koef. konvekcije za spoljašnju cilindričnu površinu h [W/m ² K]	Koef. konvekcije za unutrašnju konusnu površinu h [W/m ² K]
2800	29,18	21,44
3550	37,56	25,1
5600	46,1	34,2
6300	55,5	36,1

Provođenje toplote između spoljašnjeg prstena ležaja i kućišta, odnosno unutrašnjeg prstena i vretena zavisi od zazora između prstena i kućišta, odnosno prstena i vretena. Vrednosti koeficijena provođenja toplote između prstena ležaja i vretena odnosno prstena i kućišta (pinole) prikazane su u tabeli 4 za vrednost zazora od 10 [μm].

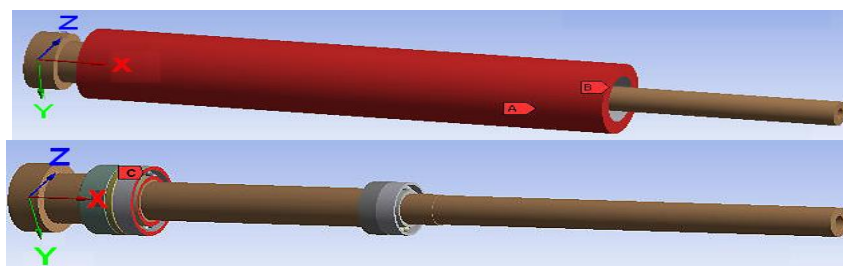
Tabela 4. Vrednosti koeficijena provođenja između prstena i kućišta, odnosno prstena i vretena [9]	
Mesto kontakta	Koeficijent provođenja λ [W/m ² K]
Unutrašnji prsten ležaja/glavno vreteno	30,41
Spoljašnji prsten ležaja/pinola (kućište)	49,95

2.2 Toplotno-elastični model

Pri modelovanju toplotno-elastičnog ponašanja razmatran je samo uticaj toplotnog opterećenja bez dejstva spoljašnjih sila. Toplotno opterećenje je definisano na osnovu rezultata iz toplotne analize, i predstavlja raspored temperaturnih polja na celom sklopu glavnog vretena.

Grafični uslovi, pri ovoj analizi, se odnose na ograničenje pomeranja na određenim mestima odnosno

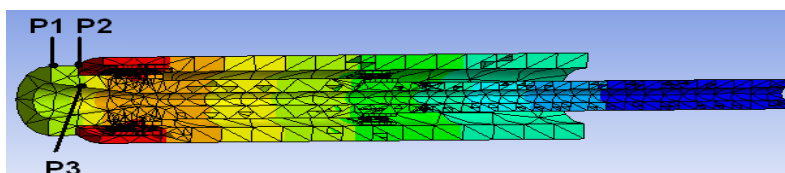
čvorovima konačnih elemenata. Sklop glavnog vretena se nalazi u kušištu, spoljašnja površina pinole se ne može širiti u radijalnim pravcima (površina "A"), dok se zadnja površina pinole (površina "B") oslanja na unutrašnju površinu kušišta, što joj ograničava kretanje u aksijalnom pravcu (x-osa). Pored toga prednje uležištenje je fiksirano čaurom pa je potrebno ograničiti njegovo kretanje u aksijalnom pravcu (površina "C"). Ograničenja sklopa glavnog vretena prikazana su na slici 3.



Slika 3. Ograničenja sklopa glavnog vretena na 3D modelu

3.0 REZULTATI ANALIZE

Na osnovu vrednosti koeficijenata konvekcije i provođenja metodom konačnih elemenata definisani su modeli toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena za različite brojeve obrtaja i to: $n_1=2800$ [o/min], $n_2=3550$, $n_3=5600$ i $n_4=6300$. Na slici 4 prikazan je 3D model toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena za $n_4=6300$, sa karakterističnim tačkama u kojima je određivana temperatura.

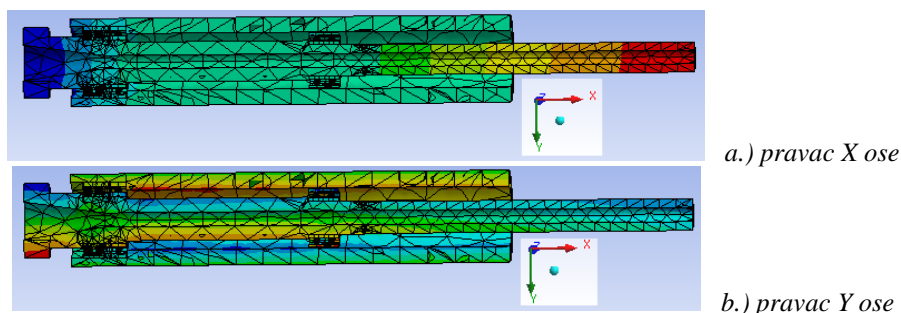


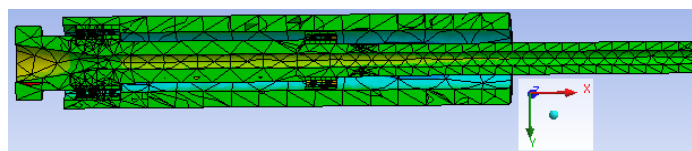
Slika 4. Izgled 3D modela toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena

Vrednost temperature u karakterističnim tačkama vrha vretena na 3D modelu (P1, P2, P3) prikazana je u tabeli 5.

Tabela 5. Vrednost temperature u karakterističnim tačkama vrha vretena			
Broj obrtaja [o/min]	P ₁ [°C]	P ₂ [°C]	P ₃ [°C]
2800	23,9	23,9	24,1
3550	23,8	23,8	24,1
5600	28,6	28,7	29,7
6300	31,3	31,4	33,1

Na slikama 5 a., 5 b. i 5 c. prikazani su, u grafičkom obliku, rezultati modelovanja elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena pod dejstvom toplotnog opterećenja, za broj obrtaja $n_4=6300$ [o/min] u X, Y i Z pravcu.

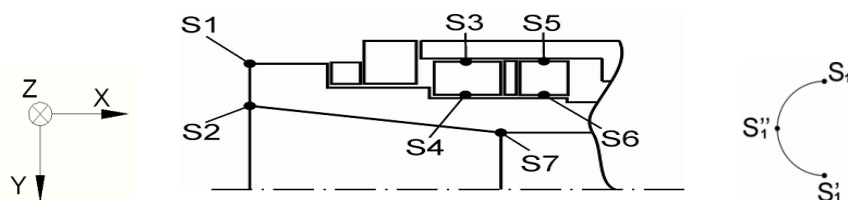




c.) pravac Z ose

Slika 5. 3D model sklopa glavnog vretena nakon toplotnog opterećenja za broj obrtaja $n_4=6300$

Pomeranja pri toplotno-elastičnom ponašanju su određena u karakterističnim tačkama vrha vretena, koje su prikazane na slici 6.



Slika 6. Karakteristične tačke vrha vretena na 3D modelu

Pomeranja tačaka S' i S'' u aksijalnom pravcu (X osa) imaju iste vrednosti kao u tabeli 6. Zbog činjenice da je sklop glavnog vretena osnosimetričan pomeranja karakterističnih tačaka u radijalnom pravcu (u yz ravni) su ista. Vrednosti pomeranja karakterističnih tačaka S u ravni YZ prikazani su u tabeli 7 a pomeranja karakterističnih tačaka S' u tabeli 8.

Tabela 6. Pomeranja karakterističnih tačaka S u pravcu X ose							
Broj obrtaja [o/min]	Pomeranja karakterističnih tačaka u pravcu X ose [μm]						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
2800	-3,1	-3,1	-0,9	-0,9	0	0	-0,4
3550	-3,3	-3,3	-1	-1	0	0	-0,5
5600	-12	-12	-3,1	-3,3	-0,1	0	-1,5
6300	-16	-16	-5,1	-4,5	-0,2	-0,1	-2,2

Tabela 7. Pomeranja karakterističnih tačaka S u ravni YZ							
Broj obrtaja [o/min]	Pomeranja karakterističnih tačaka u ravni (Y,Z) [μm]						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
2800	-1; 0	-0,5; 0	0,2; 0	-0,2; 0	0,3; 0	-0,5; 0	0, 0
3550	-1; 0	-0,5; 0	0,2; 0	-0,2; 0	0,3; 0	-0,5; 0	0; 0
5600	-3,5; 0	-1,9; 0	0,7; 0	-0,7; 0	1,1; 0	-1,8; 0	0,1; 0
6300	-4,8; 0	-2,6; 0	1; 0	-1; 0	1,5; 0	-2,5; 0	0,1; 0

Tabela 8. Pomeranja karakterističnih tačaka S' u ravni YZ							
Broj obrtaja [o/min]	Pomeranja karakterističnih tačaka u ravni (Y,Z) [μm]						
	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'	S_5'	S_6'	S_7'
2800	1; 0	0,5; 0	0,2; 0	0,2; 0	0,3; 0	0,5; 0	0, 0
3550	1; 0	0,5; 0	0,2; 0	0,2; 0	0,3; 0	0,5; 0	0; 0
5600	3,5; 0	1,9; 0	0,7; 0	0,7; 0	1,1; 0	1,8; 0	0,1; 0
6300	4,8; 0	2,6; 0	1; 0	1; 0	1,5; 0	2,5; 0	0,1; 0

4.0 ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u radu predstavljaju deo istraživanja vezanih za računarsko modelovanje toplotno-elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena. Primenom računarskog modelovanja sklopa glavnog vretena moguće je, još u fazi projektovanja, sa velikom pouzdanošću predvideti toplotno-elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena u eksploataciji.

Analizom rezultata toplotno elastičnog ponašanja sklopa glavnog vretena uležištenog kugličnim ležajima sa kosim dodirom "X na rastojanju" može se konstatovati da za broj obrtaja $n=5600$ [o/min] pomeranje u radijalnom pravcu iznosi 20 [μm], a za raspored ležaja "O na rastojanju" pomeranje u radijalnom pravcu iznosi 16 [μm] [9]. Pomeranje u radijalnom pravcu sklopa glavnog vretena uležištenog cilindrično valjkastim

dvoredim ležajem za broj obrtaja $n=6300$ [o/min] iznosi $4,8$ [μm]. Na bazi prikazanih rezultata konstatuje se da je toplotna krutost sklopa glavnog vretena uležištenog dvoredim cilindrično valjkastim ležajem veća nekoliko puta u odnosu na krutost vretena uležištenog kugličnim lažajima sa kosim dodirom.

LITERATURA

- [1] Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A., Štrbac, B., Hadžistević, M.: Primena savremenih metoda za merenje temperature, Zbornik radova, CD rom, Infoteh-Jahorina, Sesija PRS-Proizvodni sistemi, Str. 491-496, ISSN: 99938-624-2-8, 2012.
- [2] Blanuša, V., Živković, A., Zeljković, M.: Računarska analiza toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena uležištenog valjčastim dvoredim ležajima, Zbornik radova, CD rom, 38 JUPITER konferencija, 25 Simpozijum CAD/CAM, Str. 32-38, ISSN: 978-86-7083-757-7, 2012.
- [3] Bossmanns, B., Jay, F.: A thermal model for high speed motorized spindles, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 0890-6955, Vol. 39, Pages 1345-1366, 1999.
- [4] Chein, C. H., Jang, J. Y.: 3-D numerical and experimental analysis of a built-in motorized high-speed spindle with helical water cooling channel, Applied Thermal Engineering, ISSN: 1359-4311, Vol. 28, Pages 2327-2336, 2008.
- [5] Haitao, Z., Jianguo, Y., Jinhua, S.: Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 0890-6955, Pages 1003-1010, 2006.
- [6] Jedrzejewski, J.: Effect of the thermal contact resistance on thermal behavior of the spindle radial bearings, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 08909-6955, Vol.28, No.4, Pages 409-416, 1988.
- [7] Liu, D., Zhang, H., Tao, Z., Su, Y.: Finite element analysis of high-speed motorized spindle based on ANSYS, The Open Mechanical Engineering Journal, ISSN: 1874-155X, Vol. 5, Pages. 1-10, 2011.
- [8] Zeljković, M., Živković, A., Borojev, Lj.: Thermal-elastic behaviour numerical analysis of the high speed main spindle assembly, International Conference „Heavy Machinery“, ISSN:978-86-82631-45-3, Pages E57-E62, 2008.
- [9] Živković, A.: Eksperimentalna i računarska analiza toplotno-elastičnog ponašanja sklopa visokobrzinskog glavnog vretena mašina alatki, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [10] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Toplotno –elastični model sklopa visokobrzinskog glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, Infoteh-Jahorina, Sesija C-Informacioni sistemi u proizvodnim tehnologijama, ISSN: 99938-624-2-8, Vol.6, Ref. C10, Pages 170-174, 2007.
- [11] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Uticaj toplotnog opterećenja na prednaprezanje kugličnih ležišta sa kosim dodirom, Zbornik radova, CD rom, 33 JUPITER konferencija, 20 Simpozijum CAD/CAM, ISSN: 978-86-7083-628-0, Pages 2.1-2.6, 2007.
- [12] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Uticaj toplotnog prednaprezanja ležišta na krutost sklopa glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učesćem, ISSN: 978-86-7892-131-5, Pages 409-412, 2008.
- [13] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Eksperimentalno ispitivanje toplotno-elastičnog ponašanja sklopa visokobrzinskog glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, 34 JUPITER konferencija, 30 Simpozijum NU roboti i FTS, ISSN: 978-86-7083-628-0, Pages 3.13-3.18, 2008.

Blanuša, V.¹, Zeljković, M.², Živković, A.³

THERMAL -ELASTIC BEHAVIOR MAIN SPINDLE ASSEMBLY WITH CYLINDRICAL ROLLER BEARING USING FEM

Abstract: *Thermal deformation spindles are the sources of errors on machine tools and because of this reason it is important to identify these errors and to analyze their influence. In this paper presents the results of computer 3D modeling thermal-elastic behavior of main spindle assembly support double-row cylindrical roller and ball bearing with angular contact in front of support. Modeling thermal behavior and defining the displacement under the influence of thermal load was done using the finite element method. Analyzed the distribution of temperature field and thermal deformation of the characteristic points for the four spindle speed.*

Keywords: *Computer modeling, main spindle assembly, thermal-elastic behavior, double row cylindrical roller bearings*



Bojanić, M., Jovičić, G. Tabaković, S., Mladenović, C., Zeljković M. ¹⁾

UPOREDNI PRIKAZ STANDARDA ZA ISPITIVANJE TAČNOSTI POZICIONIRANJA NUMA ²⁾

Rezime

Pozicioniranje predstavlja zauzimanje položaja izvršnog organa mašine alatke. Pod tačnošću pozicioniranja podrazumeva se odstupanje stvarnog položaja izvršnog organa mašine od programiranog, pri njegovom višestrukum dvosmernom pozicioniranju u različitim tačkama po svakoj od koordinatnih osa (pri nezavisnom kretanju duž ose - nezavisne ose).

U radu je dat uporedni prikaz rezultata dobijenih primenom različitih standarda za ispitivanje tačnosti pozicioniranja: SRPS M.GO.101., VDI/DGQ 3441 i DIN ISO 230-2. Eksperimentalna ispitivanja su izvedena na tri NU mašine alatke: teški strug, horizontalni obradni centar i brusilica. Ispitivanja su vršena laserskim mernim sistemom (LMS) 5526A firme „Hewlett-Packard” tačnosti $0,5 \mu\text{m/m} \pm 0,2 \mu\text{m/m}$.

Ključne reči: Tačnost pozicioniranja, laserski merni sistem, NU mašina alatka

1. UVOD

Razvoj preciznih mašina alatki i koordinatnih numerički upravljanih mernih mašina doveo je do povećanja zahteva u pogledu tačnosti laserskog mernog sistema, odnosno smanjenje merne nesigurnosti. Upravo zbog toga, autor rada [2] je razmatrao uticaj pojedinačnih parametara na tačnost i ponovljivost laserskog mernog sistema.

Autori Castro i Burdekin [1] se bave analizom metoda ispitivanja tačnosti pozicioniranja numerički upravljanih mašina alatki i koordinatnih mernih mašina, duž ispitivane ose, u dinamičkim uslovima (uslovi u kome se klizač mašine kreće, a tačnost odstupanja od pozicije se meri bez zaustavljanja klizača u programiranoj poziciji) u cilju unošenja korekcija u upravljačku jedinicu.

Tačnost pozicioniranja i ponovljivost su osnovni pokazatelji karakteristika mašina alatki i ukazuju na njihov očekivani nivo. Postoji ne mali broj standarda i preporuka koji ukazuju kako ispitati tačnost pozicioniranja i ponovljivost, i oni se razlikuju u analizi i u definiciji parametara. Brojčani rezultat kao izveštaj o tačnosti pozicioniranja i ponovljivosti za bilo koju mašinu mogu varirati u zavisnosti od toga, koji je standard primenjen [6].

Cilj ovog rada je prikaz rezultata dobijenih po različitim standardima za tačnost pozicioniranja NU mašina alatki. Kako je važnost standarda ravnopravna, važno je znati razliku između njih i kako se različite proračunate vrednosti međusobno mogu porediti. Merenje tačnosti pozicioniranja je izvršeno na tri mašine alatke, rezultati su prikazani tabelarno za odabrane ose. Takođe su prikazani i grafici za odabranu osu, po sva tri standarda.

¹⁾ Mirjana Bojanić, asistent, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (bojanicm@uns.ac.rs), Goran Jovičić, istraživač saradnik, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (goran.jovicic@uns.ac.rs), Slobodan Tabaković, vanr. prof., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (tabak@uns.ac.rs), Cvijetin Mladenović, asistent, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (mladja@uns.ac.rs), Milan Zeljković, red. prof., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milanz@uns.ac.rs)

²⁾ 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, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

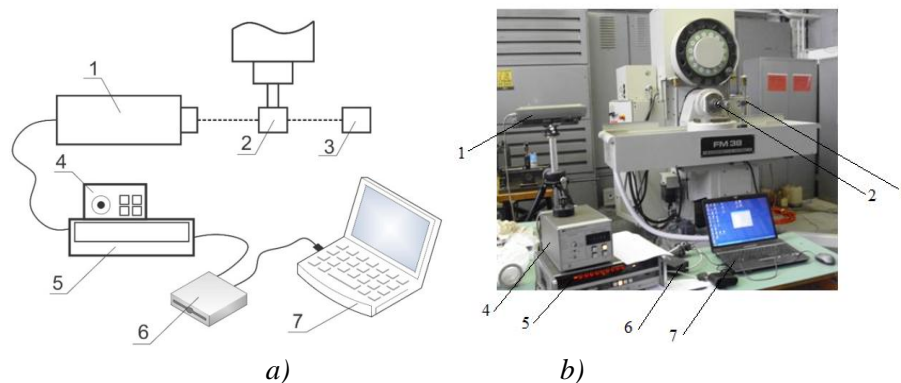
2. TAČNOST POZICIONIRANJA NUMA

2.1 Merna instrumentacija

Ispitivanje tačnosti pozicioniranja numerički upravljanih mašina alatki izvršeno je na: teškom strugu, horizontalnom obradnom centru i brusilici pomoću laserskog mernog sistema (LMS) 5526A firme „Hewlett-Packard”. Merenje je moguće izvesti u dva opsega (kratki opseg -100 mm do 3 m i dugi opseg - 1 m do 30 m), a pri ovom ispitivanju korišten je kratki opseg.

Šematski prikaz LMS sa uređajem za prikupljanje podataka dat je na slici 1 a, dok je na slici 1 b dat numerički upravljani obradni centar FM 38 sa postavljenim LMS.

Laserska glava 5500C je jedna od prvih HP-ovih lasera za metrologiju koji ima integrisani optički prijemnik za povratni laserski zrak [5]. Ovaj prijemnik se sastoji od 4 fotodiode povezane kao dva para sa sočivima koja okružuju laserski izlaz, tj. otvor blende. Zakretanjem otvora blende može se izabrati bilo horizontalni ili vertikalni par fotodiode. Dakle, dva nezavisna optička prijemna kanala su uvek dostupna, s tim da kanal „A” prima signal sa desne (gledano u pravcu zraka) i donje fotodiode, a „B” kanal sa leve i gornje fotodiode. Na osnovu ovoga može se zaključiti da je, ovakvom interferometarskom optikom, moguće sprovesti merenje u dve ose samo sa jednom 5500C laserskom glavom.



Slika 1. a) Šema laserskog mernog sistema; b) Numerički upravljani obradni centar FM sa LMS
1. Laserska glava (He- Ne gasni laser)- 5500 C; 2. Interferometar; 3. Reflektor;
4. Automatski kompenzator; 5. Laserski pokazivač- displej HP- 5505A; 6. AD kartica; 7. Računarski sistem sa odgovarajućim programskim sistemom

Automatski kompenzator 5510A se koristi da bi korigovao uticaj okoline, kao što su: temperatura, vlažnost i pritisak vazduha, za koje postoje odgovarajući senzori, priključeni na automatski kompenzator. Napajanje se vrši od laserskog pokazivača 5505A, preko priključnog kabla. Kompenzator pojednostavljuje proces kompenzacije i eliminišući potrebu da operator vrši bilo kakve proračune.

Od optičkih komponenata za merenje tačnosti pozicioniranja korištene su: daljinski interferometar (slika 2) i daljinski reflektor (slika 3).



Slika 2. Interferometar



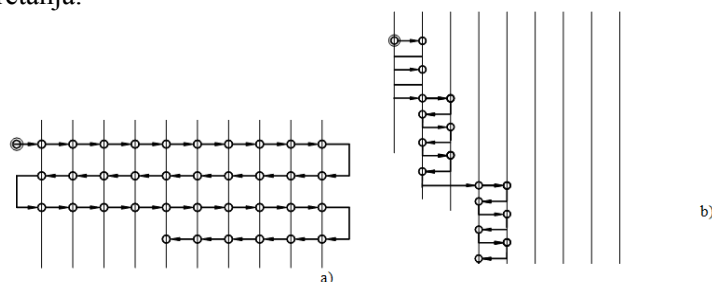
Slika 3. Reflektor

2.2 Metodologija ispitivanja

Metodologija ispitivanja tačnosti pozicioniranja numerički upravljanih mašina alatki je usvojena u skladu sa VDI/DGQ 3441. Standardi kao što je SRPS M.G0.101 i ISO 230-2 od 1988., kao i novije verzije su vrlo slični u pogledu metodologije ispitivanja.

Prema VDI/DGQ 3441 ispitivanje tačnosti pozicioniranja se vrši u neopterećenom i stacionarnom temperaturnom stanju mašine. Na upravljačkoj jedinici mašine programira se kretanje izvršnog organa tj. klizača duž ispitivane ose. Ovo kretanje se može vršiti po linearnom ciklusu ili ciklusu koraka (slika 4). U

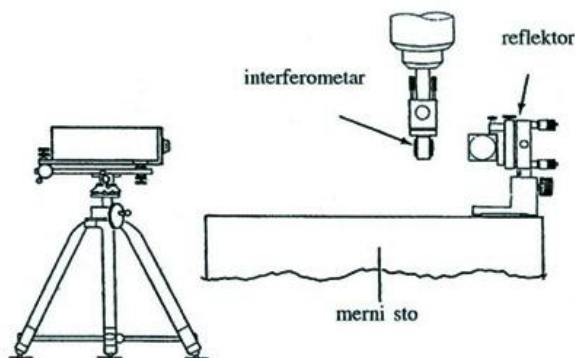
preporuci VDI/DGQ 3441 ovo nije definisano, dok standardi SRPS M.G0.101. preporučuje ova dva ciklusa kretanja pri ispitivanju tačnosti pozicioniranja. Pri ispitivanju sve tri numerički upravljane mašine alatke korišten je linearni ciklus kretanja.



Slika 4. Ciklusi kretanja pri ispitivanju tačnosti pozicioniranja:
(a) linearni, (b) ciklus koraka

Kao i kod većine drugih ispitivanja i pri ispitivanju tačnosti pozicioniranja potrebno je definisati uslove okoline i stanja same mašine radi eliminisanja grešaka merenja u što većoj meri. Automatski kompenzator daje korektne kompezacije za promenu talasne dužine zbog promene uslova okoline (temperatura, pritisak i relativna vlažnost vazduha) i kompenzacije za dilataciju delova mašina usled promene temperature materijala.

Pri postavljanju komponenata laserskog mernog sistema (laserske glave, interferometra i reflektora) treba imati u vidu da se u što većoj meri smanji broj naknadnih podešavanja. Laserska glava se postavlja na laserski tronožac (slika 5) koji omogućuje lako dovođenje u pravac sa mernom osom, pri tome izbor mesta postavljanja treba tako izvršiti da se postigne maksimalan broj merenja koja se mogu izvršiti bez premeštanja laserske glave.



Slika 5. Šematski prikaz merenja tačnost pozicioniranja pomoću laserskog mernog sistema [4]

Mašina za ispitivanje mora biti potpuno montirana (sa izuzetkom sigurnosne zaštite) [7]. Sve neophodne operacije nivelisanja, ispitivanja geometrijske tačnosti i funkcionalnosti moraju se izvršiti ranije, pre početka ispitivanja tačnosti pozicioniranja. Sva ispitivanja se vrše u uslovima bez opterećenja. Laserska glava se postavlja ispred mašine okrenuta ka mašini, a optičke komponente su postavljene na odgovarajući način na radni sto (klizač) i u glavno vreteno mašine, u zavisnosti koja osa se u datom momentu ispituje.

Ispitivanju mašine pod normalnim radnim uslovima prethodi postupak zagrevanja, prema uputstvu proizvođača mašine. Ako uslovi nisu određeni, prethodna kretanja se moraju izvršiti u meri neophodnoj za postavljanje merne instrumentacije.

2.3 Rezultati merenja

Merenje tačnosti pozicioniranja je izvedeno na tri mašine, teški strug i brusilica, slika 6, su ispitivani u fabrici korisniku odnosno fabrici proizvođaču, dok je obradni centar za glodanje ispitivan u laboratoriji na Fakultetu tehničkih nauka. U tabelama su prikazani obrađeni rezultati ispitivanja u pravcu odabranih osa, a grafička interpretacija rezultata data je za X osu obradnog centra za glodanje na slikama 7, 8 i 9. Direktno učitane vrednosti sa displeja na računar pomoću odgovarajućeg interfejsa nisu date u ovim tabelama, niti su data odstupanja od programiranih vrednosti, već su dati obrađeni podaci, zbog nedostatka prostora. Navedena ispitivanja su izvršena u različitom periodu od nekoliko godina.



a)



b)

Slika 6. a) Teški strug Rafamet UBC 150 i b) brusilica BP 1600

Tabela 1. Rezultati ispitivanja X ose- Obradni centar za glodanje						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS)}{VDI} \cdot 100$	$\frac{(VDI - DIN)}{VDI} \cdot 100$
P	25,682	A	25,5121	A	19,0315	0,66	34,94
P _a	6,26	\bar{B} (B _{sr})	1,022	A↑ (A _d)	18,6344	x	x
\bar{P}_s (P _{srs})	18,643	R↑ (R _d)	21,4117	A↓ (A _l)	19,0315	x	x
P _{smax}	19,4825	R↓ (R _l)	19,0286	E	6,96	x	x
\bar{U} (U _{sr})	1,066	R	21,396	E↑ (E _d)	5,78	x	x
U _{min}	0,18	x	x	E↓ (E _l)	6,92	x	x
U _{max}	2,2	x	x	M	6,26	x	x
x	x	x	x	R	14,9974	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	14,2745	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	12,6857	x	x
x	x	x	x	B	2,2	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	1,022	x	x

Tabela 2. Rezultati ispitivanja Y ose- Obradni centar za glodanje						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS)}{VDI} \cdot 100$	$\frac{(VDI - DIN)}{VDI} \cdot 100$
P	30,1049	A	30,4866	A	28,311	-1,27	6,34
P _a	22,61	\bar{B} (B _{sr})	4,7	A↑ (A _d)	25,1021	x	x
\bar{P}_s (P _{srs})	6,81848	R↑ (R _d)	8,13216	A↓ (A _l)	28,311	x	x
P _{smax}	7,53757	R↓ (R _l)	7,16743	E	23,96	x	x
\bar{U} (U _{sr})	5,144	R	14,5356	E↑ (E _d)	21,26	x	x
U _{min}	0,48	x	x	E↓ (E _l)	3,96	x	x
U _{max}	7,26	x	x	M	22,61	x	x
x	x	x	x	R	12,0771	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	5,42144	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	4,77828	x	x
x	x	x	x	B	7,26	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	4,7	x	x

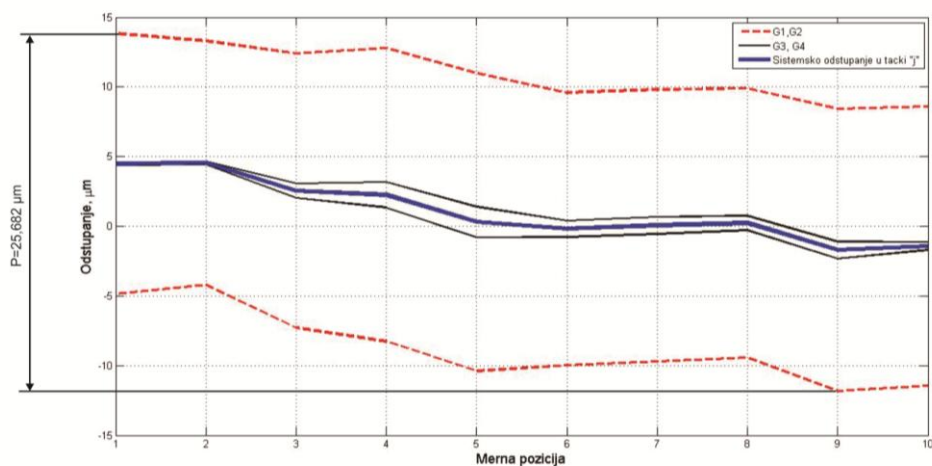
Tabela 3. Rezultati ispitivanja Z ose- Obradni centar za glodanje						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS)}{VDI} \cdot 100$	$\frac{(VDI - DIN)}{VDI} \cdot 100$
P	12,5399	A	13,5448	A	12,5232	-8,01	0,13
P _a	8,46	\bar{B} (B _{sr})	1,264	A↑ (A _d)	12,5232	x	x
\bar{P}_s (P _{srs})	2,29717	R↑ (R _d)	4,35982	A↓ (A _l)	7,09968	x	x
P _{smax}	4,98743	R↓ (R _l)	7,06626	E	10,48	x	x
\bar{U} (U _{sr})	2,08	R	7,60743	E↑ (E _d)	10,48	x	x
U _{min}	1,62	x	x	E↓ (E _l)	6,44	x	x
U _{max}	2,62	x	x	M	8,46	x	x
x	x	x	x	R	5,94496	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	2,90654	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	4,71084	x	x
x	x	x	x	B	2,62	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	1,264	x	x

Tabela 4. Rezultati ispitivanja X ose- Brusilica						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS) \cdot 100}{VDI}$	$\frac{(VDI - DIN) \cdot 100}{VDI}$
P	144,923	A	146,968	A	141,898	-1,41	2,09
P _a	128,93	\bar{B} (B _{sr})	4,848	A↑ (A _d)	132,286	x	x
\bar{P}_g (P _{srs})	17,3929	R↑ (R _d)	10,14146	A↓ (A _l)	141,898	x	x
P _{smax}	16,0065	R↓ (R _l)	22,4074	E	132,68	x	x
\bar{U} (U _{sr})	5,356	R	19,783	E↑ (E _d)	126,1	x	x
U _{min}	0,54	x	x	E↓ (E _l)	131,76	x	x
U _{max}	9,04	x	x	M	128,93	x	x
x	x	x	x	R	16,142	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	6,76107	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	14,9383	x	x
x	x	x	x	B	9,04	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	4,848	x	x

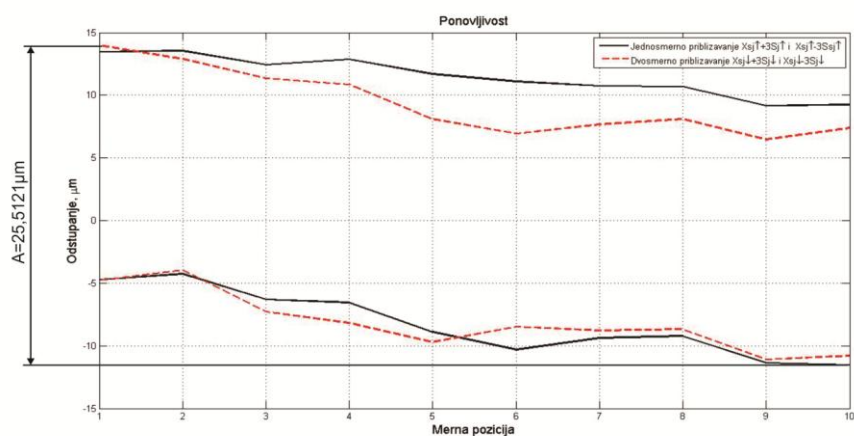
Tabela 5. Rezultati ispitivanja Z ose- Brusilica						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS) \cdot 100}{VDI}$	$\frac{(VDI - DIN) \cdot 100}{VDI}$
P	7,38233	A	7,30177	A	5,38785	1,09	27,09
P _a	1,09	\bar{B} (B _{sr})	-0,212	A↑ (A _d)	4,76344	x	x
\bar{P}_g (P _{srs})	3,70769	R↑ (R _d)	6,05079	A↓ (A _l)	5,24607	x	x
P _{smax}	5,977	R↓ (R _l)	5,90322	E	1,56	x	x
\bar{U} (U _{sr})	0,276	R	6,717	E↑ (E _d)	1,04	x	x
U _{min}	0,14	x	x	E↓ (E _l)	1,44	x	x
U _{max}	0,92	x	x	M	1,09	x	x
x	x	x	x	R	4,75108	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	4,03386	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	3,93548	x	x
x	x	x	x	B	0,92	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	-0,212	x	x

Tabela 6. Rezultati ispitivanja X ose- Strug						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS) \cdot 100}{VDI}$	$\frac{(VDI - DIN) \cdot 100}{VDI}$
P	108,998	A	109,435	A	90,0302	-0,4	17,4
P _a	25,07	\bar{B} (B _{sr})	-16,596	A↑ (A _d)	70,505	x	x
\bar{P}_g (P _{srs})	39,4843	R↑ (R _d)	64,6727	A↓ (A _l)	65,1081	x	x
P _{smax}	61,8044	R↓ (R _l)	58,9461	E	51,22	x	x
\bar{U} (U _{sr})	16,596	R	91,0054	E↑ (E _d)	30,34	x	x
U _{min}	17,06	x	x	E↓ (E _l)	27,74	x	x
U _{max}	31,34	x	x	M	25,07	x	x
x	x	x	x	R	71,1169	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	43,1151	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	39,2974	x	x
x	x	x	x	B	31,34	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	-16,596	x	x

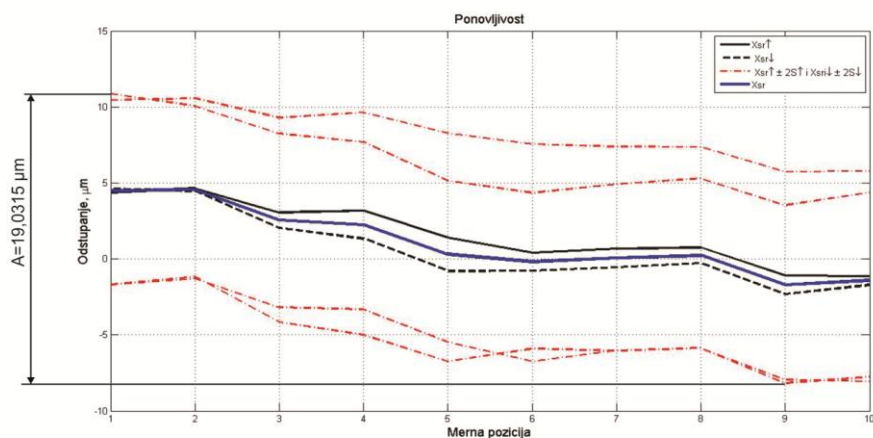
Tabela 7. Rezultati ispitivanja Z ose- Strug						Relativno odstupanje [%]	
VDI/DGQ 3441		SRPS M.GO.101		DIN ISO 230-2		$\frac{(VDI - SRPS) \cdot 100}{VDI}$	$\frac{(VDI - DIN) \cdot 100}{VDI}$
P	115,462	A	149,301	A	125,654	-29,31	-8,83
P _a	33,64	\bar{B} (B _{sr})	25,166	A↑ (A _d)	102,907	x	x
\bar{P}_g (P _{srs})	8,8666	R↑ (R _d)	137,131	A↓ (A _l)	39,253	x	x
P _{smax}	69,5694	R↓ (R _l)	4,751	E	78,36	x	x
\bar{U} (U _{sr})	28,022	R	110,929	E↑ (E _d)	56,58	x	x
U _{min}	10,84	x	x	E↓ (E _l)	37	x	x
U _{max}	60,18	x	x	M	33,64	x	x
x	x	x	x	R	87,7396	x	x
x	x	x	x	R↑ (R _d)	91,4205	x	x
x	x	x	x	R↓ (R _l)	3,16733	x	x
x	x	x	x	B	60,18	x	x
x	x	x	x	\bar{B} (B _{sr})	25,166	x	x



Slika 7. Grafički prikaz tačnost pozicioniranja X ose prema VDI/DGQ 3441



Slika 8. Grafički prikaz tačnost pozicioniranja X ose prema SRPS M.GO.101



Slika 9. Grafički prikaz tačnost pozicioniranja X ose prema DIN ISO 230-2

3. ZAKLJUČAK

Problematika izložena u radu odnosi se na ispitivanje tačnosti pozicioniranja mašina alatki. S obzirom na male vrednosti odstupanja tačnosti pozicioniranja na mašinama sa numeričkim upravljanjem ovakva ispitivanja je moguće izvesti samo primenom laserskih mernih sistema.

Osnovni cilj izvršenih ispitivanja je postizanje zadovoljavajuće tačnosti pozicioniranja za sve tri mašine. Prema dostupnim preporukama i standardima nije definisana vrednost dozvoljenih odstupanja pojedinih parametara pozicioniranja za određene vrste mašina alatki, pa je zbog toga podešavanje ove mašine vršeno sa ciljem da se maksimalno smanje vrednosti raspona odstupanja pozicioniranja i vrednosti sistematske i slučajne greške u pravcu ispitivanih osa. Prvo ispitivanje je uvek vršeno bez unetih korekcija u upravljačku

jedinicu mašine, a nakon toga je prema rezultatima merenja upisivana korekcija u svakoj tački. Obzirom da je ispitivanje vršeno u više koraka, zbog obimnosti, nisu prikazani rezultati koji prethode rezultatima koji su dati kao završni.

Poredeći navedene standarde može se konstatovati da se tačnost pozicioniranja NU mašina alatki definiša sa najviše parametara prema standardu DIN ISO 230-2, a sa najmanje prema SRPS M.GO.101. Takođe treba imati u vidu da najveći broj proizvođača NU mašina alatki podatke o tačnosti pozicioniranja prikazuje prema preporuci VDI/DGQ 3441. Pri obradi rezultata merenja svi standardi koriste određene statističke metode, pri čemu razlika u krajnjim rezultatima je posledica primenjene statističke metode i vrste grešaka koje se uzimaju u obzir. Polazeći od činjenice da većina proizvođača NU mašina alatki prikazuju karakteristike svojih mašina prema VDI/DGQ 3441 usvojeni su ovi rezultati kao »reporni« i na osnovi njih procenjene relativne razlike rezultata prema druga dva standarda. Podaci prikazani u navedenim tabelama pokazuju da odstupanja nisu ni malo zenemariva i da se kreću od nekoliko procenata pa do 30 %. Navedeno ukazuje da se pri donošenju zaključaka o kvalitetu neke NU mašine alatke sa stanovišta tačnosti pozicioniranja mora imati u vidu i standard - preopruga na bazi koje je vršeno ispitivanje. Isto tako je očigledno da se mogu porediti samo rezultati dobijeni primenom istog standarda-preporuke.

4. LITERATURA

- [1] Castro, H.F.F., Burdekin, M.: *Dynamic calibration of the positioning accuracy of machine tools and coordinate measuring machines using a laser interferometer*, Vol. 46, Issue 9, Pages 947–954, ISSN 0890-6955, 2003.
- [2] Castro, H.F.F.: *Uncertainty analysis of a laser calibration system for evaluating the positioning accuracy of a numerically controlled axis of coordinate measuring machines and machine tools*, Precision Engineering, Vol. 32, Pages 106–113, ISSN: 0141-6359, 2008.
- [3] DIN ISO 230-2, *Werkzeugmaschinen Prüfregeln für Werkzeugmaschinen Teil 2: Bestimmung der Positionierungsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen* (ISO 230-2 : 1997), 2000.
- [4] Jovičić, G., Bojanić, M.: *Analiza različitih prilaza za ispitivanje tačnosti pozicioniranja mašina alatki*, Ispitni rad u okviru doktorskih studija, Fakultet tehnički nauka, Novi Sad, 2014.
- [5] Laser Measurement System 5526A, *Operator's handbook supplement for straightness interferometers*, Hewlett Packard, Santa Clara, 1982.
- [6] Mullany, B.: *Evaluation And Comparison Of The Different Standards Used To Define The Positional Accuracy And Repeatability Of Numerically Controlled Machining Center Axes*, University of North Carolina, Charlotte, 2007.
- [7] SRPS M.GO.101:1991, *Mašine alatke - Uslovi ispitivanja tačnosti - Utvrđivanje tačnosti i ponovljivosti položaja elemenata mašina sa numeričkim upravljanjem*, 1991.
- [8] VDI/DGQ 3441, *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen Grundlagen*, 1977.
- [9] Zeljković, M., Borojev, Lj., Tabaković, S.: *Elaborat ispitivanja NU obrusilice BP 1600 - tačnost pozicioniranja*, Fakultet tehnički nauka, Novi Sad, 2002.
- [10] Zeljković, M., Tabaković, S., Mladenović, C.: *Elaborat ispitivanja NU struga Rafamet UBC 150 – tačnost pozicioniranja*, Fakultet tehnički nauka, Novi Sad, 2013.

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

COMPARATIVE REVIEW OF STANDARDS FOR TEST ACCURACY POSITIONING FOR CNC

Abstract: Positioning represent taking the position of the executive body machine tools. The positioning accuracy means the deviation of the actual position of the executive body of the machine programmed, with its multiple bidirectional positioning at different points in each of the coordinate axes (the independent movement along the axes - independent axes).

This paper presents a comparative view of the results obtained by applying different standards for testing the accuracy of positioning: SRPS M.GO.101., VDI / DGQ 3441 and DIN ISO 230-2.

Experiments were performed on the three CNC machine tools: heavy lathe, horizontal machining center and a grinder. Tests were performed with laser measuring system (LMS) 5526A the company "Hewlett-Packard" accuracy $0.5 \mu\text{m} / \text{m} \pm 0.2 \mu\text{m} / \text{m}$.

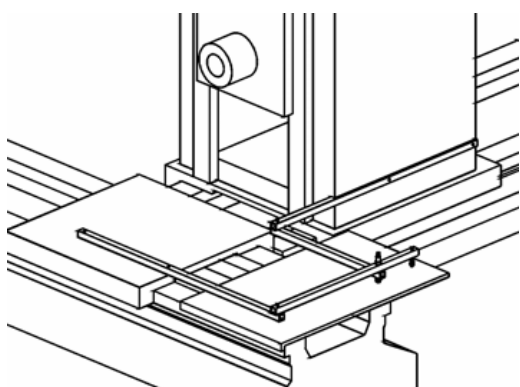
Key words: Positioning accuracy, laser measuring system, CNC machine tools

U ovakve mašine mogu se ubrojiti *Trijoint*, slika 1.a [3], mehanizam sa dva paralelograma slika 1.b [4], mašina *Specht*, slika 1.c [5], ravanski paralelni mehanizam sa tri stepena slobode, slika 1.d [6] i drugi.

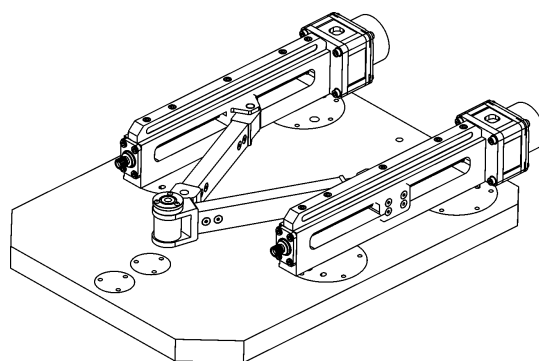
Osim svojih prednosti paralelni mehanizmi poseduju i nedostatke kao što su radni prostori nepravilnog oblika, postojanje singulariteta, rešavanje geometrijskih problema je znatno složenije. Kombinujući serijske i paralelne mehanizme pri čemu se koriste njihove prednosti a otklanjaju nedostaci, mogu se dobiti upotrebljivi hibridni mehanizmi za gradnju obećavajućih novih koncepcija mašina alatki.

Istraživanja na Mašinskom fakultetu su krenula sa dvoosnim paralelnim mehanizmom 2D TeMoPaM (**T**echnološki **M**odul sa **P**aralelnim **M**ehanizmom) [7-9], koji je pokazan na slici 2a. Uopštavanjem ovog mehanizma dobijen je dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam za gradnju stona dvoosne rekonfigurabilne mašine sa paralelnom kinematikom – MOMA (**M**odularna **M**ašina **A**latka sa upravljanjem otvorene arhitekture) [10-12]. Ravanski rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA je mehanizam sa dva stepena slobode, koji se sastoji od dve identične pogonske translatorne ose, po kojima se kreću dva klizača. Klizači su pomoću dve spojke povezane u paralelni mehanizam. Spojke su sa klizačima i međusobno povezane obrtnim zglobovima. Dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam se konfigurira prema programu gradnje po kome postoje ukupno 33 različite konfiguracije dvoosne mašine [10]. Jedna od tih mašina iz plana gradnje je pokazana na slici 2d, a još neke od njih i na slici 3.

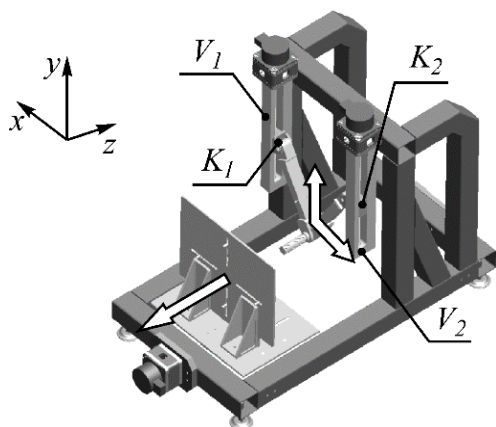
Dalji plan primene dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA je ugradnja ovog mehanizma u troosnu hibridnu verziju mašine MOMA-3. Mašina alatka MOMA-3 je stona hibridna mašina sa tri stepena slobode. Hibridni mehanizam čini paralelni mehanizam sa dva stepena slobode koji omogućuje kretanje alata u pravcu osa x i y , i serijski dodata treća osa koja omogućuje kretanje obratka duž ose z . CAD model jednog idejnog rešenja mašine MOMA-3 je prikazan na slici 2c [13]. Na slici je takođe prikazan koordinatni sistem mašine definisan standardom ISO-6983 [14]. Jedna od mogućih primena dvoosnog paralelnog mehanizma je i u koncepciji stona petoosne hibridne mašine H5D pokazane na slici 2d. Ovde se paralelni mehanizma koristi sa ostvarivanje pomeranja po x i y osi, uz dva pasivna translatorna pomeranja i trećom serijskom osom z . Preostala dva kretanja su rotacije serijskog dvoosno-obrtnog stola [15,16].



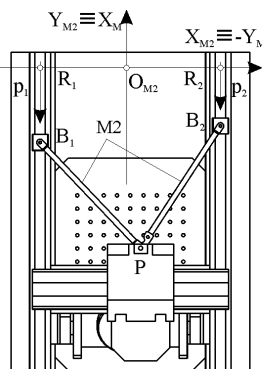
a) 2D TeMoPaM [9]



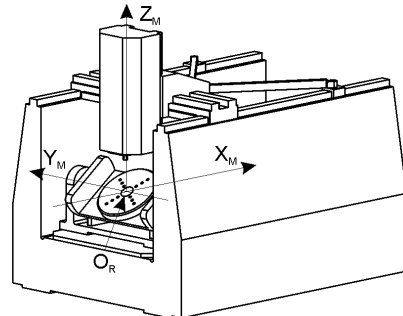
b) Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA [10]



c) Hibridna mašina MOMA-3 [13]



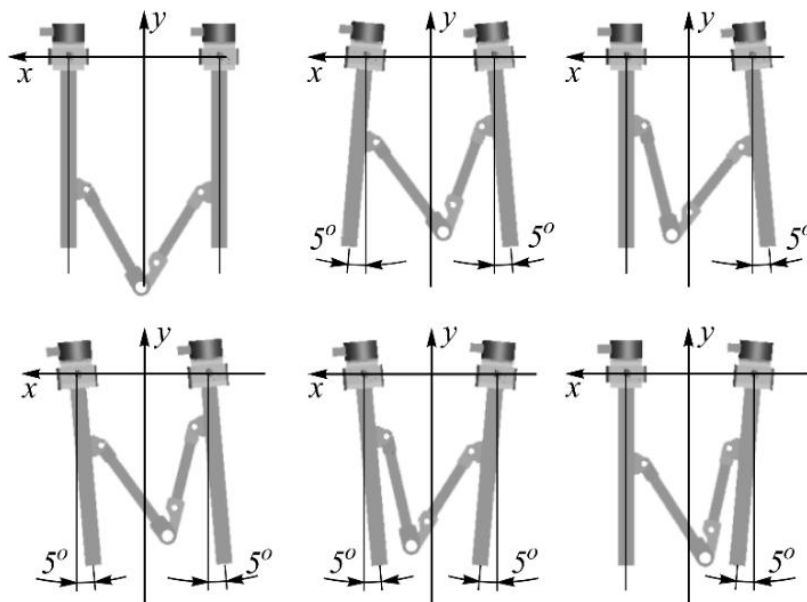
d) H5D Hibridna petoosna mašina alatka [15,16]



Slika 2. Koncepti mašina alatki na bazi dvoosnog paralelnog mehanizma

Paralelni mehanizam MOMA čine dve spojke konstantne dužine koje su međusobno zglobovno vezane. Svaka od spojki je svojim drugim krajem zglobovno vezana za klizače K_1 i K_2 koji se mogu kretati duž vodiča

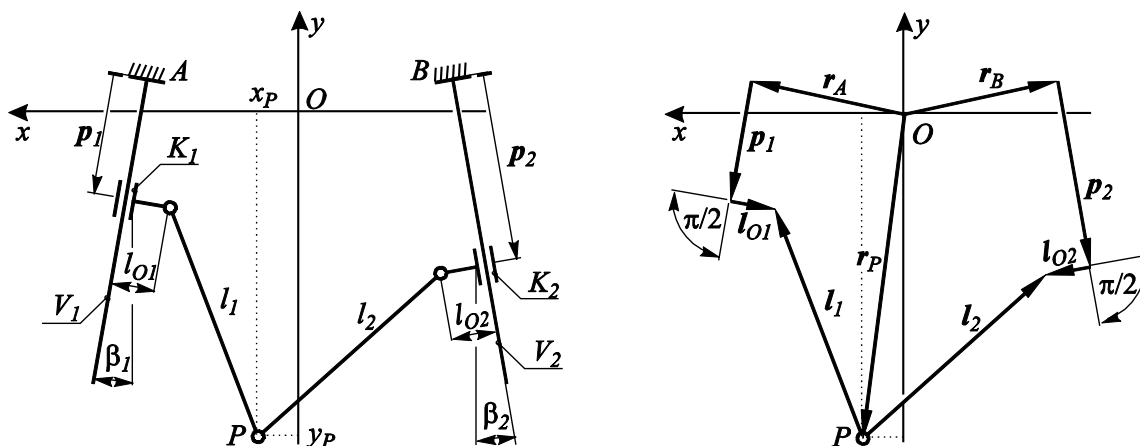
V_1 i V_2 , slika 2c. Dvoosni paralelni mehanizam je rekonfigurabilan i njegova konfiguracija se može lako i brzo menjati primenom pravila gradnje i konfiguratora, čime može dobiti veliki broj različitih konfiguracija kako dvoosnog paralelnog mehanizma tako i troosne hibridne mašine alatke. Neke od mogućih konfiguracija paralelnog mehanizma mašine MOMA su prikazane na slici 3. Rekonfigurabilnost paralelnog mehanizma, a samim tim i mašine sa hibridnim kinematikom povećava broj mogućih ostvarivih konfiguracija novih mašina. Iz tog razloga velika pažnja se posvećuje izučavanju i unapređenju ovakvih mašina čime se dobijaju konfiguracije sa optimalnom geometrijom u pogledu radnog prostora, singulariteta i pokretljivosti samog mehanizma. Predmet ovog rada je upravo optimizacija dužina spojki dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA, primenom globalnog indeksa pokretljivosti. Da bi se pristupilo metodologiji optimizacije, neophodno je prvo rešiti inverzni geometrijski problem (IGP) i odrediti Jakobijan matricu paralelnog mehanizma, što je pokazano u narednom poglavlju.



Slika 3. Neke od konfiguracija mašine MOMA

2. GEOMETRIJSKI MODEL PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

Uopšten geometrijski model paralelnog mehanizma sa slike 3, mašine alatke MOMA je prikazan na slici 4. Osim već uvedenih oznaka, sa slike 2c, uvedene su još i sledeće oznake: A, B – tačke u kojima su vodice vezane za noseću konstrukciju čime je onemogućeno bilo kakvo njihovo kretanje; r_A, r_B – vektori položaja tačaka A i B u odnosu na usvojeni nepokretni koordinatni sistem; P – platforma paralelnog mehanizma; r_P – vektor položaja platforme u odnosu na nepokretni koordinatni sistem; l_1, l_2 – dužine spojki; l_{O1}, l_{O2} – dužine ofseta; α_1, α_2 – ugao između vodica i ose x . Navedene veličine definišu geometriju paralelnog mehanizma i od njih zavisi oblik i veličina radnog prostora, singularni položaji mehanizma kao i sam rad mehanizma.



Slika 4. Geometrijski model paralelnog mehanizma mašine MOMA-3

Veličine p_1 i p_2 predstavljaju unutrašnje koordinate paralelnog mehanizma a x_p i y_p predstavljaju spoljašnje koordinate paralelnog mehanizma. Unutrašnje i spoljašnje koordinate su međusobno zavisne. Rešavanjem inverznog geometrijskog problema (IGP) paralelnog mehanizma mašine MOMA se dobija zavisnost unutrašnjih koordinata od spoljašnjih koordinata što se može predstaviti jednačinama (1). Rešavanjem direktnog geometrijskog problema (DGP) paralelnog mehanizma se dolazi do zavisnosti spoljašnjih koordinata od poznatih unutrašnjih koordinata što je predstavljeno jednačinama (2).

$$\begin{aligned} p_1 &= p_1(x_p; y_p) \\ p_2 &= p_2(x_p; y_p) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_p &= x_p(p_1; p_2) \\ y_p &= y_p(p_1; p_2) \end{aligned} \quad (2)$$

2.1 Rešavanje inverznog geometrijskog problema paralelnog mehanizma

Prema geometrijskom modelu paralelnog mehanizma mašine MOMA, sa slike 4, mogu se napisati sledeće vektorske sledeće jednačine:

$$\mathbf{r}_A + \mathbf{p}_1 + \mathbf{l}_{O1} = \mathbf{r}_P + \mathbf{l}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_B + \mathbf{p}_2 + \mathbf{l}_{O2} = \mathbf{r}_P + \mathbf{l}_2 \quad (4)$$

Projektovanjem jednačina (3) i (4) na ose nepokretnog koordinatnog sistema xOy pri čemu važi $\alpha_i = 3\pi/2 + \beta_i$, $i=1,2$ dobijaju se četiri skalarnе jednačine

$$\begin{aligned} x_A + p_1 \cdot \cos \alpha_1 + l_{O1} \cdot \sin \alpha_1 &= x_P + l_{1x} \\ y_A + p_1 \cdot \sin \alpha_1 - l_{O1} \cdot \cos \alpha_1 &= y_P + l_{1y} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_B + p_2 \cdot \cos \alpha_2 - l_{O2} \cdot \sin \alpha_2 &= x_P + l_{2x} \\ y_B + p_2 \cdot \sin \alpha_2 + l_{O2} \cdot \cos \alpha_2 &= y_P + l_{2y} \end{aligned} \quad (6)$$

Uvođenjem smena datih grupom jednačina (7)

$$\begin{aligned} v_1 &= x_A + l_{O1} \cdot \sin \alpha_1 \\ v_2 &= y_A - l_{O1} \cdot \cos \alpha_1 \\ v_3 &= x_B - l_{O2} \cdot \sin \alpha_2 \\ v_4 &= y_B + l_{O2} \cdot \cos \alpha_2 \\ v_5 &= 2[(v_1 - x_P) \cos \alpha_1 + (v_2 - y_P) \sin \alpha_1] \\ v_6 &= (v_1 - x_P)^2 + (v_2 - y_P)^2 - l_1^2 \\ v_7 &= 2[(v_3 - x_P) \cos \alpha_2 + (v_4 - y_P) \sin \alpha_2] \\ v_8 &= (v_3 - x_P)^2 + (v_4 - y_P)^2 - l_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

a potom sređivanjem i rešavanjem jednačina (5) i (6) dobijaju se jednačine (8) koje predstavljaju rešenje IGP-a paralelnog mehanizma mašine MOMA. Za obe unutrašnje koordinate postoje po dva rešenja a iz praktičnih razloga se uzimaju rešenja koja imaju manju vrednost jer ona zahtevaju kraće vođice.

$$\begin{aligned} p_{1,1,2} &= \frac{-v_5 \pm \sqrt{v_5^2 - 4v_6}}{2} \\ p_{2,1,2} &= \frac{-v_7 \pm \sqrt{v_7^2 - 4v_8}}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 Jakobijan matrica paralelnog mehanizma mašine MOMA-3

Ako se vektor unutrašnjih koordinata mašine MOMA zapiše kao $\mathbf{p}=[p_1 \ p_2]^T$ a vektor spoljašnjih koordinata kao $\mathbf{x}=[x_p \ y_p]^T$ onda Jakobijan matrica daje vezu između izvoda unutrašnjih i spoljašnjih koordinata po vremenu. Jakobijan matrica paralelnog mehanizma mašine MOMA je sledećeg oblika

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial x_p} & \frac{\partial p_1}{\partial y_p} \\ \frac{\partial p_2}{\partial x_p} & \frac{\partial p_2}{\partial y_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 + \frac{v_5 \cos \alpha_1 - 2(v_1 - x_p)}{\sqrt{v_5^2 - 4v_6}} & \sin \alpha_1 + \frac{v_5 \sin \alpha_1 - 2(v_2 - y_p)}{\sqrt{v_5^2 - 4v_6}} \\ \cos \alpha_2 + \frac{v_7 \cos \alpha_2 - 2(v_3 - x_p)}{\sqrt{v_7^2 - 4v_8}} & \sin \alpha_2 + \frac{v_7 \sin \alpha_2 - 2(v_4 - y_p)}{\sqrt{v_7^2 - 4v_8}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. OPTIMIZACIJA DUŽINE SPOJKI PARALELNOG MEHANIZMA MAŠINE MOMA

Za optimizaciju paralelnog mehanizma mašine MOMA koristi se izvedena Jakobijan matrica za koju se računa parametar Jakobijan matrice po sledećoj formuli [12,17,18]:

$$1 \leq \kappa = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \leq \infty \quad (10)$$

gde su $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ i $\sigma_2 = \sigma_{\min}$ vrednosti dobijene rešavanjem sledeće jednačine:

$$\det(\sigma^2 I - J^T J) = 0 \quad (11)$$

Globalni indeks pokrtljivosti je veličina čija vrednost pokazuje sposobnost paralelnog mehanizma da promeni svoju poziciju i izračunava se na sledeći način:

$$\eta = \sqrt{\eta_1^2 + (w_n \eta_2)^2} \quad (12)$$

gde je η_1 srednja vrednost parametra Jakobijan matrice za definisan radni prostor paralelnog mehanizma, η_2 količnik maksimalne i minimalne vrednosti parametra Jakobijan matrice i w_n težinski faktor koji po prešporukama iz literature ima vrednost 0.1 [17]

$$\eta_1 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \kappa(m, n) \quad (13)$$

$$\eta_2 = \frac{\max(\kappa(m, n))}{\min(\kappa(m, n))} \quad (14)$$

Optimizacija dužine spojki se vrši za definisan (koristan) radni prostor paralelnog mehanizma. Uprošten geometrijski model paralelnog mehanizma kao i granice radnog prostora su prikazane na slici 5. Za tako definisan radni prostor određuju se maksimalna i minimalna dužina spojki sa kojima platforma može da dostigne svaku tačku definisanog radnog prostora. Ako se proizvod transponovane Jakobijan matrice i Jakobijan matrice prikaže kao:

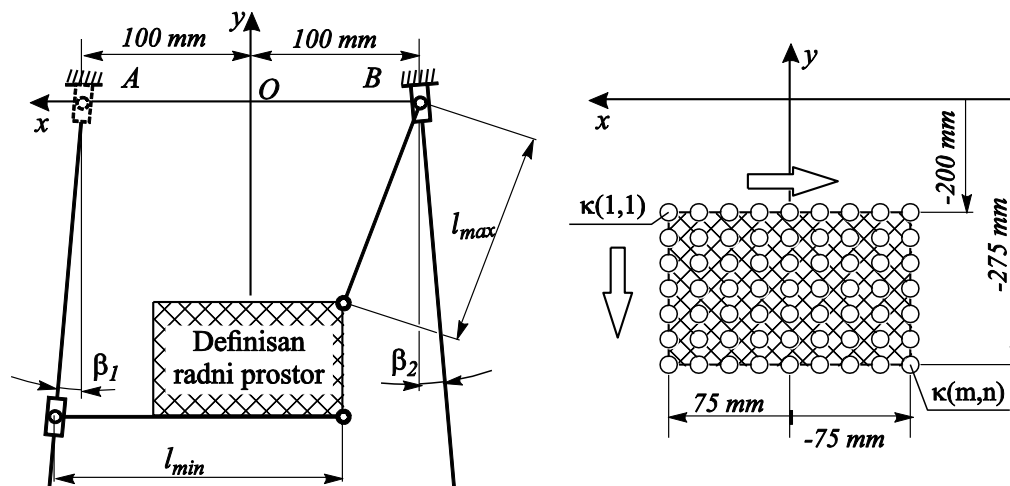
$$W = J^T J = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Na osnovu jednačine (11) onda se može napisati:

$$\sigma^4 - \sigma^2(W_{11} + W_{22}) + W_{11}W_{22} - W_{12}W_{21} = 0 \quad (16)$$

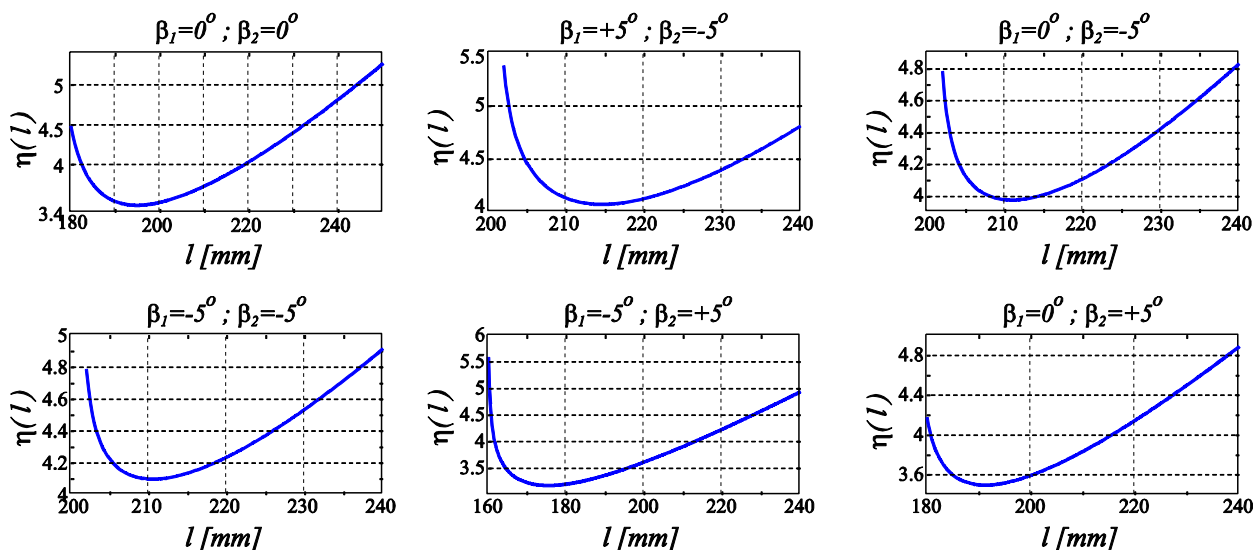
Rešavanjem jednačine (16) se dobijaju vrednosti σ_{\max} i σ_{\min} potrebne za izračunavanje parametra Jakobijan matrice $\kappa_{m,n}$ prema jednačini (10) i odnosi se na određenu tačku radnog prostora. Prema jednačinama (12),

(13) i (14) se izračunava globalni indeks pokretljivosti za ceo definisan radni prostor i odnosi se na jednu dužinu spojki. Postupak se vrši za sve dužine spojki u intervali $l_{min} - l_{max}$ i za svaku dužinu se dobija po jedna vrednost globalnog indeksa pokretljivosti. Dužina spojki koja daje $\eta = \eta_{min}$ je optimalna dužina za definisan radni prostor.



Slika 5. Izabrani deo radnog prostora mašine MOMA za koji se radi optimizacija dužina spojki

Optimizacija dužina spojki je primenjena za izračunavanje optimalne dužine spojki za različite konfiguracije paralelnog mehanizma mašine MOMA. Minimalne i maksimalne dužine spojki su određene grafičkim putem a potom je globalni indeks pokretljivosti η računat za sve dužine spojki od l_{min} do l_{max} sa korakom od $0,1mm$. Rezultat su dijagrami zavisnosti globalnog indeksa pokretljivosti od dužine spojki $\eta = \eta(l)$ prikazani na slici 6. U Tabeli 1. su date izračunate vrednosti optimalnih dužina spojki l_{opt} i globalnih indeksa pokretljivosti za konfiguracije paralelnog mehanizma sa slike 3.

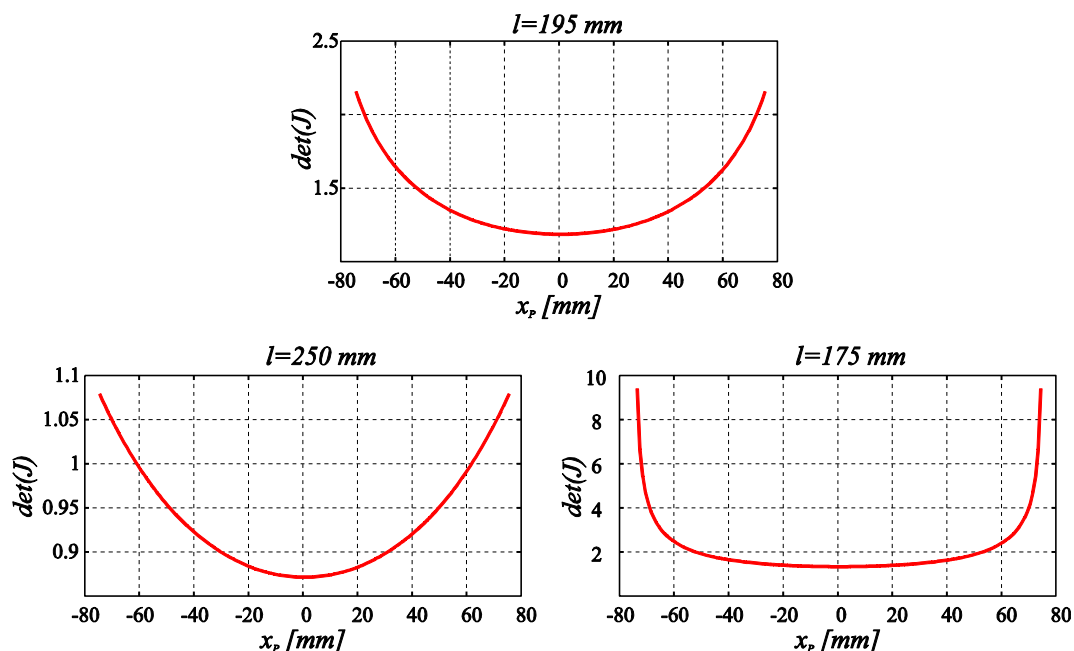


Slika 6. Zavisnost globalnog indeksa pokretljivosti η od dužine spojki l

Tabela 1. Rezultati optimizacije dužine spojki paralelnog mehanizma mašine MOMA-3			
$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	η	$l_{opt} [mm]$
0	0	3,5285	195,7
+5	-5	4,0764	214,6
0	-5	3,9779	210,9
-5	-5	4,0992	210,5
-5	+5	3,1786	175,4
0	+5	3,4991	191,2

Za konfiguraciju paralelnog mehanizma gde je $\beta_1=\beta_2=0^\circ$ i dužinama spojki $l_1=l_2=175\text{mm}$ i $l_1=l_2=250\text{mm}$ izračunate su vrednosti determinante Jakobijan matrice duž ose x i to za vrednosti koordinate platforme paralelnog mehanizma od $x_p=-75\text{mm}$ do $x_p=+75\text{mm}$ što odgovara granicama definisanog radnog prostora. Vrednosti su upoređene sa vrednostima determinante Jakobijan matrice za spojke dužine $l_1=l_2=l_{opt}$. Rezultati su prikazani na slici 7.

Na osnovu dijagrama koji pokazuju zavisnost $\det(J)=f(x_p)$, primećuje se da spojke čija je dužina $l < l_{opt}$ dovodi do velikih vrednosti $\det(J)$ u blizini granica definisanog radnog prostor. U graničnom slučaju za $l_1=l_2=175\text{mm}$ i kada je $x_p=\pm 75\text{mm}$ determinanta Jakobijan matrice ima vrednost $\det(J)=\infty$ što znači da se na granicama radnog prostora nalaze singulariteti. U suprotnom, spojke čije su dužine $l > l_{opt}$ smanjuju vrednosti $\det(J)$ u celom radnom prostoru a na koordinati $x_p=0$ povećavanjem dužine spojki $\det(J)$ teži vrednosti $\det(J)=0$.



Slika 7. Vrednosti determinante Jakobijan matrice duž ose x za paralelni mehanizam konfiguracije $\beta_1=\beta_2=0^\circ$ i dužinama spojki $l=l_{opt}=195\text{mm}$, $l=250\text{mm}$ i $l=175\text{mm}$

9. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio postaviti koncept jedne hibridne rekonfigurabilne mašine i definisati geometriju koja bi obezbedila optimalni rad mašine. Za mašinu alatku MOMA-3 je rešen inverzni geometrijski problem paralelnog mehanizma u a potom je i izvedena Jakobijan matrica paralelnog mehanizma. Izvedene jednačine su korištene za optimizaciju dužine spojki paralelnog mehanizma hibridne mašine i to za šest različitih konfiguracija. Za svaku od razmatranih konfiguracija dobijena je optimalna dužina spojki. Optimalne dužine spojki se razlikuju za svaku konfiguraciju što dovodi do zaključka da geometrija paralelnog mehanizma utiče na optimalnu dužinu spojki. Ova činjenica je naročito bitna za mašine kao što su razmatrane i pokazane mašine tipa MOMA, jer pri promeni konfiguracije mašine treba koristiti spojke odgovarajuće dužine. Od značaja je napomenuti da dobijene vrednosti za optimalnu dužinu spojki važe za definisane granice radnog prostora. Ukoliko postoji potreba za promenom granica radnog prostora potrebno je i odrediti novu optimalnu dužinu spojki da bi se izbegli singulariteti unutar radnog prostora. U planu daljih istraživanja je konceptijsko projektovanje novih kompleksnih mašina alatki sa osobinama rekonfigurabilnosti i multifunkcionalnosti, koje u sebi sadrže bar jedan dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA.

10. LITERATURA

- [1] Stewart D.: *A Platform With Six Degrees of Freedom*, The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965-66, Part 1, No 15, str. 371-386
- [2] Weck, M., Staimer, D.: *Parallel kinematic machine tools-current state and future potentials*, CIRP Annals Manufacturing Technology, vol. 51, no. 2, p. 671-683, 2002.

- [3] Šika, Z., Hamrle, V., Valášek, M., Beneš, P.: *Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines*, Mechanism and Machine Theory, Vol 50, 48-63, April 2012.
- [4] Jun, W., 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., 413-420, September 2007.
- [5] 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.
- [6] 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., May 2008.
- [7] 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.
- [8] Živanović, S.: *Tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 24. 7. 2000.
- [9] Živanović, S.: *Parallel Kinematic Machines*, International Journal of Production Engineering and Computers, Volume 3, Number 3, pp.49-54, 2000.
- [10] 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.
- [11] Glavonjić, M.: *Zadatak za seminarski rad. Tema 1: MOMA sa paralelnom kinematikom*. http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/pdf_m/zadatak_za_seminarski_komplet.pdf, septembar, 2013.
- [12] Glavonjić, M.: *Konfigurisanje mašina alatki*, Mašine alatke M podsetnik za temu AN3, http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/index_m.htm, decembar, 2011.
- [13] Vasilić, G.: *Rekonstrukcija učila MOMA-2 u troosnu mašinu alatku*, Diplomski (M.Sc.) rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2013.
- [14] ISO-6983: *Automation system and integration – Numerical control of machines – Program format and definition of address words*, International standard, 2001.
- [15] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Koncepcije multifunkciobnalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki*, Infoteh-Jahorina, Vol 13., 539-544, Mart 2014.
- [16] Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B.: *Jedna stona rekonfigurabilna mašina alatka sa hibridnom kinematikom*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo (u pripremi za štampu)
- [17] Jun, W., Tiemin, L., Xinjun, L., Liping, W.: *Optimal Kinematic Design of 2-DOF Planar Parallel Manipulator*, Tsinghua Science and Technology, Vol 12., 269-275, June 2007
- [18] Tian, H., Zhanxian, L., Meng, L., Derek, C., Clement, G.: *Conceptual Design and Dimensional Synthesis of a Novel 2-DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-Place Operations*, Journal of Mechanical Design, Vol 126., 449-455, May 2004

Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Glavonjić, M.

OPTIMISATION OF THE LENGTH OF LEGS OF THE 2-DOF RECONFIGURABLE PARALLEL MECHANISM – MOMA

Abstract: This paper describes a 2-axis reconfigurable parallel mechanism MOMA, and the possibility of its application. Inverse geometry problem for the parallel mechanism is solved and thereafter derived is Jacobian matrix. Equations can presents formalism which may be applied to any configuration of parallel mechanism MOMA. Shown is a method for optimisation length of legs. The method is based on global conditioning index. For different configuration of parallel mechanism were determined optimal length of legs. At the end is explanation the importance of optimal length of legs, what it offers and what is the result if length of legs are different of optimal length.

Key words: parallel mechanism, optimisation, reconfigurable machine tool, Global Conditioning Index



Danilov, I., Petrović, P.B., Lukić, N.¹⁾

TRIANGULACIJA STRUKTURIRANE SVETLOSTI U ROBOTSKOM ZAVARIVANJU²⁾

Rezime

Primena laserske triangulacije za identifikaciju stvarnog stanja okruženja robota u procesu zavarivanja je ograničena potrebom značajnog vremenskog resursa. Zbog paralelne triangulacije, senzorski sistemi bazirani na strukturiranoj svetlosti su bitno brži, ali i bitno kompleksniji. U ovom radu se navodi konceptualni okvir za triangulaciju strukturirane svetlosti na bazi utisnutog Grejovog koda, izvode se formalne osnove koncepta digitalizacije i diskutuju rezultati ostvareni na laboratorijskoj instalaciji robotske ćelije za zavarivanje sa multifunkcionalnim vizuelnim optičkim senzorskim sistemom realizovanim samogradnjom na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu - Laboratorija za Kibernetiku i Mehatronske sisteme (CMSysLab) - Centar za nove tehnologije (CeNT) u okviru projekta TR35007.

Ključne reči: robotsko zavarivanje, strukturirana svetlost, triangulacija

1. UVOD

Robotsko zavarivanje je istorijski gledano i po zastupljenosti u industrijskoj praksi, dominantna oblast primene industrijskih robota [1], [2]. Nasuprot ovoj činjenici, bitan napredak u tehnološkom smislu nije ostvaren dugi niz godina, mada za to postoje potrebe i tehnički preduslovi. Suštinski problem je u tome što tipična robotska ćelija za zavarivanje radi kao otvoren sistem, bez bilo kakve, ili sa vrlo rudimentarnom interakcijom sa okruženjem u kojem se izvršava radni zadatak. Ova slabost koja je opšte prisutna u postojećoj industrijskoj praksi bitno ograničava autonomiju, a samim tim i tehnološku vrednost robotskog sistema ove vrste. Programiranje robota za izvršavanje konkretnog zadatka je vrlo dugo i sposobnost sistema da reaguje na odstupanja od nominalnog stanja na osnovu kojeg je programiranje robota izvedeno ne postoji, ili je povezana sa mnogim teškoćama. Slabost ove vrste postaje posebno kritična u kontekstu koji nameće nova proizvodna paradigma masovne kastomizacije, kada se obim serija smanjuje, do nivoa pojedinačne proizvodnje, a istovremeno raste varijantnost [3]. U ovakvom kontekstu robot je u tehnološkom smislu inferioran u odnosu na čoveka i to u takvoj meri da biva skoro potpuno diskvalifikovan kao realna tehnološka alternativa.

Da bi se otklonio ovaj nedostatak sprovode se intenzivna istraživanja sa ciljem da se programiranje zadatka bitno pojednostavi i da se robotskom sistemu omogući funkcija praćenja realnog stanja sklopa koji se zavaruje: pre, tokom i posle procesa zavarivanja (na primer FP6 projekat *SMERobot*). Ključna senzorska tehnologija za izvršenje ovog zadatka su triangulacioni laserski senzori, tačkastog ili linijskog tipa. Mada vrlo precizni, rezolutni i robusni, ovi senzori imaju značajan nedostatak u smislu brzine akvizicije geometrije, koja je u osnovi bazirana na principu skeniranja. U ovom slučaju postoji jednostavno pravilo da je vreme skeniranja jednako vremenu zavarivanja, čime se bitno redukuje proizvodnost.

Alternativna tehnologija koja razrešava ovu slabost je bazirana na kompleksnim sensorima veštačkog gledanja koji u svojoj osnovi imaju triangulaciju strukturirane svetlosti. Izvor svetlosti umesto tačke ili linije, emituje prostorni snop svetlosti, koji u sebi sadrži određenu logičku strukturu, odnosno odgovarajući kodni sadržaj, koji je apriori poznat. Umesto skeniranjem, akvizicija geometrije se ostvaruje kvazistatičkim putem, izborom dovoljnog broja pogleda na sklop koji se zavaruje i/ili širu scenu u kojoj se on nalazi. Paralelnom triangulacijom ostvaruje se ekstremno brza i robusna digitalizacija, što ima posebnu vrednost za proces

¹⁾ Doktorant Ivan Danilov, dipl. inž. maš. - master, (idanilov@mas.bg.ac.rs), prof. dr Petar B. Petrović, (pbpetrovic@mas.bg.ac.rs), Doktorant Nikola Lukić, dipl. inž. maš.-master, (nlukic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu i nauku

robotskog zavarivanja. Dužina šavova na tipičnom sklopu koji se zavaruje može da bude i više desetina metara, a u uslovi u kojima se merenje odvija su u optičkom smislu vrlo nepovoljni, sa senkama, refleksijama i drugim oblicima optičkih smetnji.

Tehnologija optičkih sistema na bazi strukturirane svetlosti se razvija i uspešno primenjuje u oblasti dimenzione metrologije, a van proizvodnih tehnologija, ona se koristi za prostornu digitalizaciju skulptorskih površina u oblasti industrije zabave ili medicine. Primena u robotici i posebno u robotskom zavarivanju je relativno nova i u istraživačkom smislu predstavlja nedovoljno obradjenju oblast, [4, 5, 6, 7, 8].

U ovom radu se navodi konceptualni okvir za primenu sistema veštačkog gledanja na bazi triangulacije strukturirane svetlosti sa utisnutim Grejovim kodom. Diskutuju rezultati ostvareni na laboratorijskoj instalaciji realizovanoj na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu - Centar za nove tehnologije. Ova istraživanja su realizovana u okviru projekta TR 35007: 'Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju'.

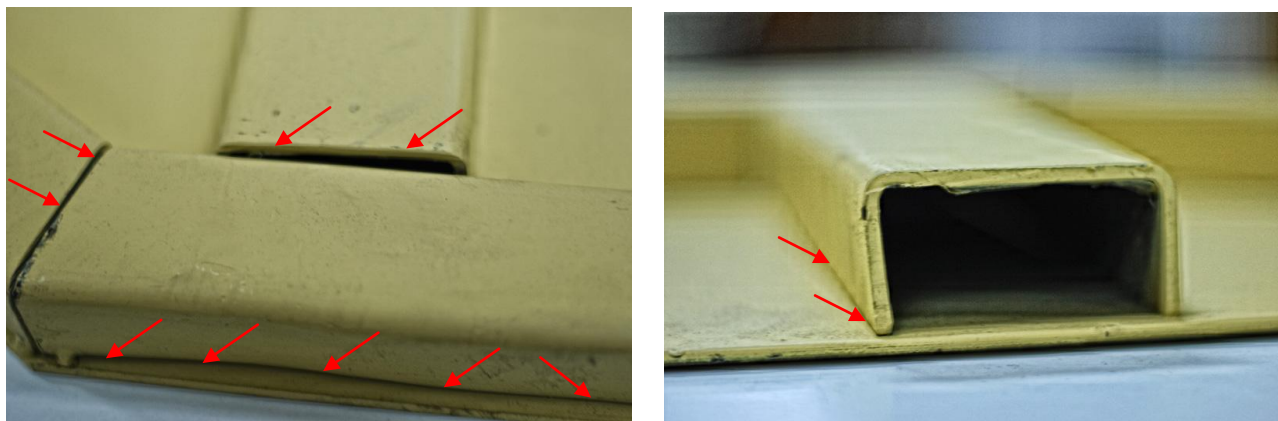
2. KONCEPT SISTEMA

Osnovni zahtev u procesu robotskog zavarivanja je prepoznavanje odstupanja od nominala u geometriji sklopa koji se zavaruje i geometriji radnog mesta. Suština je u tome da se adaptivnim ponašanjem robotskog sistema kroz sve faze izvršavanja zadaka, odnosno: pre, tokom i posle njegovog izvodjenja, kompenzuju greške koje utiču na kvalitet procesa zavarivanja ili ga u potpunosti onemogućavaju[9]. Ove greške se mogu grupisati u četiri osnovne grupe:

- Tip 1: Greške lokacije sklopa koji se zavaruje u odnosu na koordinatni sistem radnog prostora robota;
- Tip 2: Greške makro geometrije sklopa koji se zavaruje, uključujući i greške kompletnosti sklopa;
- Tip 3: Greška relativne lokacije spoja/šava u odnosu na lokalni koordinatni sistem sklopa koji se zavaruje;
- Tip 4: Greška mikrogeometrije spoja/šava;

Navedene greške, sem greške Tip 4, mogu da budu statičke i dinamičke. Pojava dinamičkih grešaka je posledica temperaturnih deformacija koje nastaju zbog enormnog unosa toplotne energije tokom procesa zavarivanja. To je posebno slučaj kod grešaka Tip 2 i Tip 3.

U svim navedenim grupama nesavršenosti, vizuelna informacija je direktni nosilac informacija. U cilju ilustrovanja problema, na slici 1 navodi se primer greške Tip 4 koji je identifikovan na uzorku stranice kontejnera kojim prizvodi kompanija Velpan iz Kikinde. Odstupanja ove vrste imaju strukturni karakter u odnosu na plan zavarivanja.

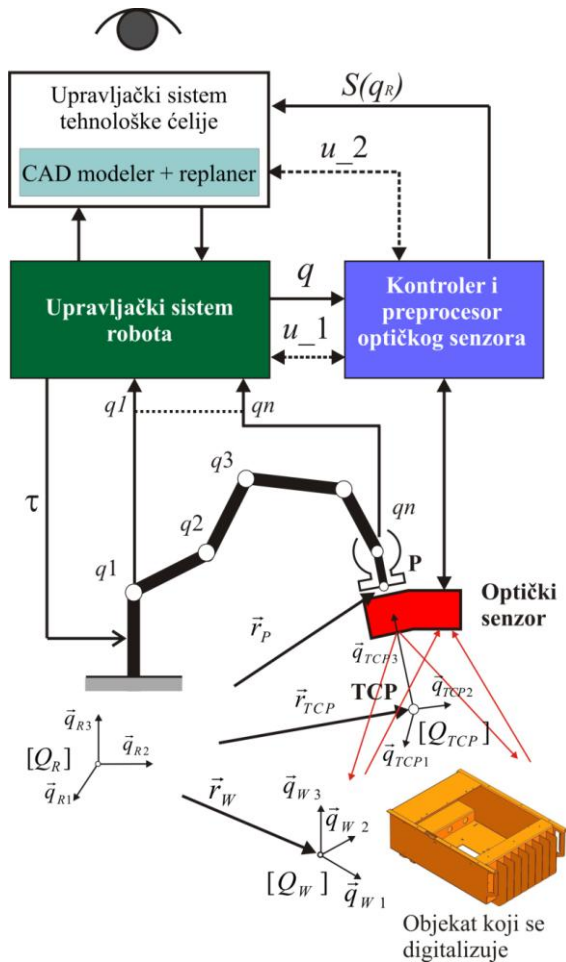


Slika 1. Primeri greške mikrogeometrije šava na sklopu uzorka stranice kontejnera firme Velpan

Opšta funkcionalna struktura robotskog sistema koji poseduje sposobnost akvizicije prostorne geometrijske informacije o okruženju prikazana je na slici 2.

Kao što je prikazano na slici, na vrh robota se ugrađuje odgovarajući senzorski sistem, koji pored pretvarača sadrži sklop za preprocesiranje slike ili nekog drugog oblika optičke informacije o okruženju. U opštem slučaju optička informacija je funkcija vremena, $S(t)$. Za izvršavanje zadataka zavarivanja od suštinskog značaja je da se optička informacija $S(t)$ spregne sa unutrašnjim koordinatama robota $q(t)$, a zatim i sa spoljašnjim koordinatnim sistemom robota, odnosno radnog prostora robota, $[Q_R]$. Za uspostavljanje ove sprege neophodno je da se poznaju transformacione matrice koje povezuju lokalni koordinatni sistem senzora $[Q_{TCP}]$, a takodje i lokalni koordinatni sistem u kojem je definisana nominalna geometrija sklopa koji se zavaruje $[Q_W]$. Transformacijama ove vrste digitalni model sklopa koji se zavaruje se dovodi na potreban

oblik $S(q_R)$, kojim se njegova kompletna geometrija iskazuje u koordinatnom sistemu radnog prostora robota. Transformacije ove vrste su neophodne da bi digitalizovani model sklopa koji se zavaruje mogao da se uvede u odgovarajući CAD modeler i modul replanera nominalnog zadatka zavarivanja. Na slici 2 su ovi moduli smešteni u upravljački sistem tehnološke ćelije koji upravlja radom sistema za zavarivanje u celini. U ovim modulima se ostvaruje jedna vrlo kompleksna funkcionalnost, komparacija digitalizovanog sklopa koji se zavaruje sa nominalnim CAD modelom. Komparacijom generisanog CAD modela koji odgovara realnom stanju stvari u radnom prostoru robota sa nominalnim modelom koji je takodje u CAD obliku identifikuje se greška i svrstava u neku od 4 tipska oblika koji su prethodno navedeni. Dalje se replanerom generiše nova, korigovana trajektorija ili novi, modifikovani plan zavarivanja.



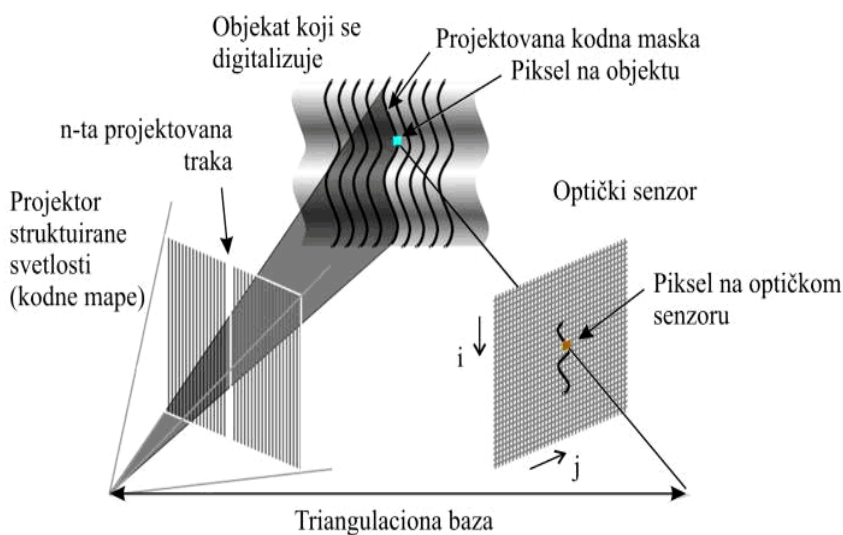
Slika 2. Opšta konfiguracija antropomornog robota za akviziciju geometrije radnog prostora u zadacima zavarivanja.

3. STRUKTURIRANA SVETLOST

Problem korespondencije je ključni problem kod digitalizacije prostornih objekata. Stereo gledanje koje je prisutno kod bioloških sistema povezano je sa nama nepoznatim algoritimima obrade signala i uspostavljanja korespondencije između piksela koji su zahvaćeni levim i desnim optički senzitivnim organom. Kod veštačkih sistema, taj problem je moguće relaksirati pomoću strukturirane svetlosti i njenom triangulacijom. Koncept rešavanja problema korespondencije primenom strukturirane svetlosti prikazan je na slici 3.

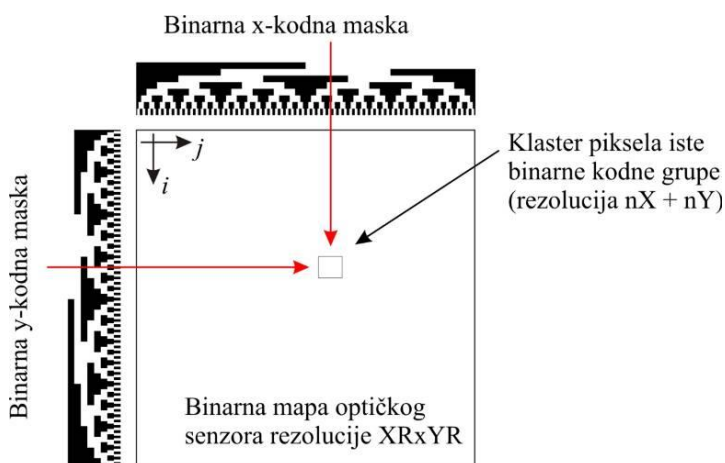
Programabilni izvor svetlosti, projektor, generiše odgovarajuću ravansku mapu poznatog kodnog sadržaja i projektuje je na scenu na kojoj se nalazi objekat koji se digitalizuje. Difuzni optički odraz projektovane svetlosti, zahvata se ravanskim optičkim senzorom poznate rezolucije. Analizom slike prepoznaju se promene, odnosno izobličenje projektovane binarne kodne mape. Merenjema ovih izobličenja moguće je triangulacionom geometrijom, svakom pikselu, ili grupi piksela, dodeliti treću prostornu koordinatu. Ovim se ravanska slika transformiše u prostorni oblak tačaka. Daljom obradom, odnosno teselacijom se ovako dobijen prostorni oblak prevodi u prostorni model scene i objekta koji se digitalizuje. Preslikavanje ove vrste je jednoznačno. Na ovaj način, kodni sadržaj ugrađen u svetlost kojom se osvetljava scena rešava problem korespondencije stereo gledanja.

Pod pojmom strukturirane svetlosti ovde se podrazumeva da postoji izvor svetlosti koji ima takvo svojstvo da generiše diskretne ravanske mape koje u vremenskom i/ili frekvencijskom domenu sadrži precizno definisan sistem kodiranja svakog od emitovanih piksela. Prema [10] varijantni, oblici sistema



Slika 3. Koncept prostorne digitalizacije geometrije primenom strukturirane svetlosti

obzir specifičnost primene. Za sistem robotskog zavarivanja, kvalitet vizuelizacije je od sekundarnog značaja. Ključne performanse su brzina, tačnost i robusnost na poremećaje optičke vrste. Iz tog razloga u okviru istraživanja koja se sprovode na projektu TR35007 izabran je sistem kodiranja koji je baziran na vremenskom multipleksiranju binarne mape sa utisnutim binarnim kodnim sadržajem. Ovaj sistem kodiranja je originalno koncipiran 1981, kada su Posdamer i Altschuler u svom radu izložili sistem za prostornu digitalizaciju baziranu na projekciji skevence od m binarnih mapa u obliku 2^n traka, $n = (1, m)$, kodiranih prirodnim binarnim kodom, [11]. Time je svakom pikselu dodeljen odgovarajući kodni string, binarna reč dužine m , pri čemu 0 odgovara potpuno neosvetljenom pikselu, a 1 potpuno osvetljenom pikselu (maksimalni intenzitet osvetljenosti). Kasnije je Inokuchi unapredio ovu šemu kodiranja uvodjenjem Grejovog koda, [12]. Grejov kod ima Hamingovu distancu 1 što ga čini robusnim na šum i ostale oblike



Slika 4: Šematski prikaz generatora binarnih mapa m -tog reda, kodiranih Grejovim binarnim kodom.

sekvenca od m kodnih mapa diskretizuje na 65536 prostornih klastera sa pikselima istog kodnog sadržaja (veličina klastera $N = n_X \times n_Y / 2^m$ piksela).

Treba uočiti razliku između diskretizacije koja se ostvaruje serijom kodnih mapa i diskretizacije optičkog pretvarača. Optički pretvarač mora da ima veću rezoluciju, najmanje za red veličine, odnosno da svaki prostorni klaster sadrži deset ili više desetina piksela. Svaki klaster se u daljoj obradi svodi na jednu tačku koja ga reprezentuje. Ta tačka može da bude centar klastera, c_{ij} . Alternativno, razvijene su metode koje klaster posmatraju kroz ivični piksel na prelazu između dva susedna klastera, s_{ij} , [13]. Svodjenje na centar klastera c_{ij} zahteva veći obim izračunavanja, ali se značajno smanjuje osetljivost na šum i druge vrste poremećaja. Triangulacijom se svakom centru klastera dodeljuju prostorne koordinate, a skup ovih klastera formira prostorni oblak tačaka.

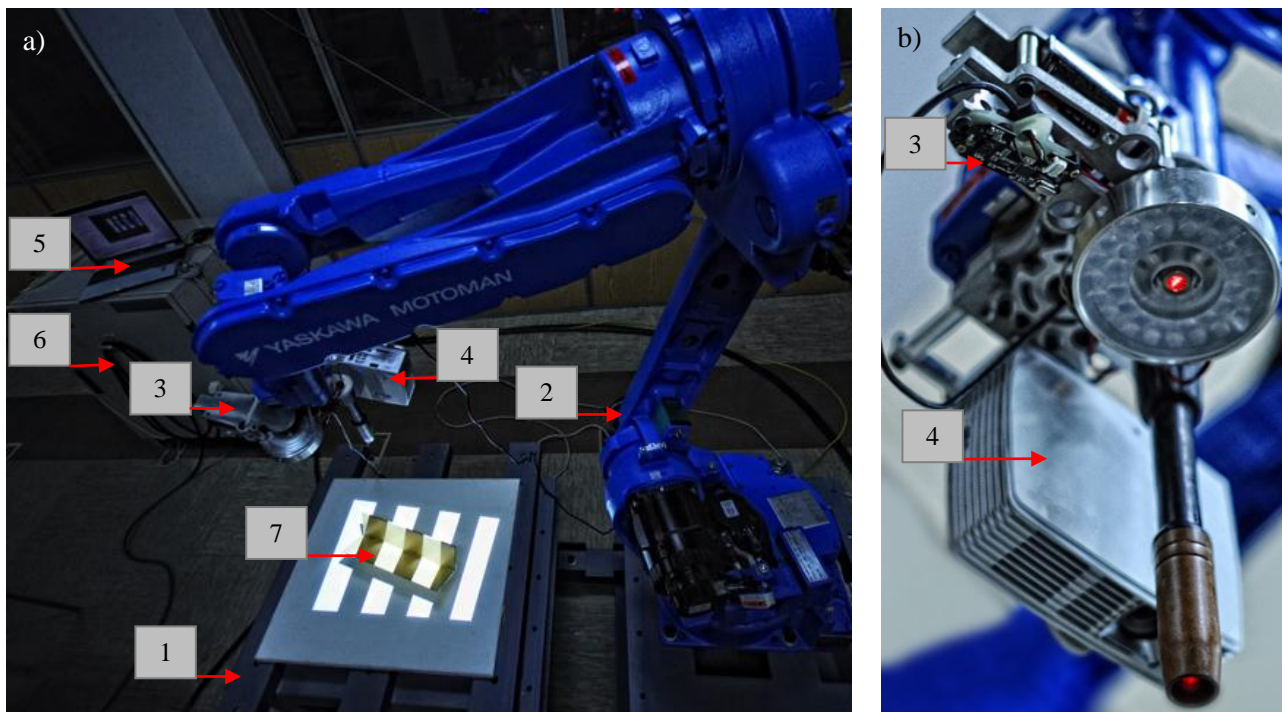
kodiranja klasifikuje u tri grupe: 1) kodiranje bazirano na vremenskom multipleksiranju, 2) kodiranje bazirano na prostornoj susednosti i 3) direktno kodiranje. Nezavisno od vrste kodiranja, utisnuti kodni sadržaj u svakom pikselu koji emituje svetlosni izvor omogućava: 1) njegovo jednoznačno prepoznavanje u prijemnom sistemu i 2) omogućava paralelnu triangulaciju bez problema korespodencije i 3) korekciju poremećaja koji se prirodno javljaju zbog niza nesavršenosti u celokupnom optičkom sistemu od strane prijemnog sistema.

Kod izbora sistema kodiranja i sinteze kodne mape treba uzeti u obzir specifičnost primene. Za sistem robotskog zavarivanja, kvalitet vizuelizacije je od sekundarnog značaja. Ključne performanse su brzina, tačnost i robusnost na poremećaje optičke vrste. Iz tog razloga u okviru istraživanja koja se sprovode na projektu TR35007 izabran je sistem kodiranja koji je baziran na vremenskom multipleksiranju binarne mape sa utisnutim binarnim kodnim sadržajem. Ovaj sistem kodiranja je originalno koncipiran 1981, kada su Posdamer i Altschuler u svom radu izložili sistem za prostornu digitalizaciju baziranu na projekciji skevence od m binarnih mapa u obliku 2^n traka, $n = (1, m)$, kodiranih prirodnim binarnim kodom, [11]. Time je svakom pikselu dodeljen odgovarajući kodni string, binarna reč dužine m , pri čemu 0 odgovara potpuno neosvetljenom pikselu, a 1 potpuno osvetljenom pikselu (maksimalni intenzitet osvetljenosti). Kasnije je Inokuchi unapredio ovu šemu kodiranja uvodjenjem Grejovog koda, [12]. Grejov kod ima Hamingovu distancu 1 što ga čini robusnim na šum i ostale oblike poremećaja. Prostorna susednost kodnih slogova Greyovog koda omogućava efikasnu identifikaciju, a zatim i korekciju greške. Ovo svojsvo je od izuzetnog značaja za primenu u realnim uslovima industrijske proizvodnje.

Broj kodnih mapa i rezolucija optičkog senzora određuju prostornu rezoluciju scene. Na slici 4 prikazan je slučaj generatora kodnih mapa šesnaestobitne rezolucije ($m = 16$). On generiše osam Grejovih kodnih mapa po horizontalnoj osi (x -osa) i osam kodnih mapa po vertikalnoj osi (y -osa). Ovakvom kodnom sekvencom generiše se $2^m = 2^{16} = 65536$ kodnih grupa, što znači da se scena, odnosno prostor na koji se kao uređena serija projektuje

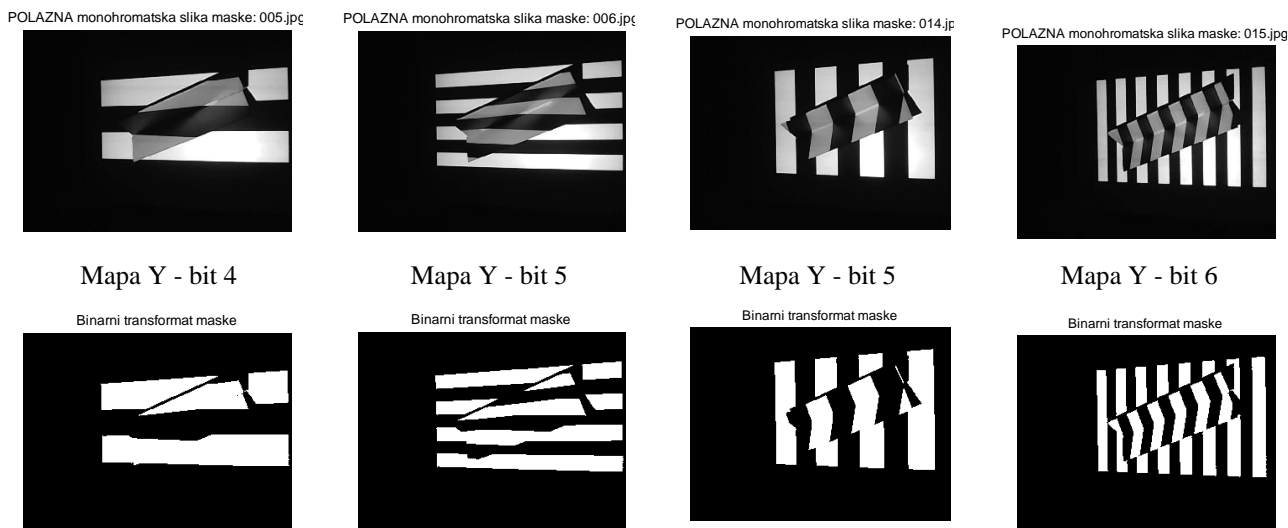
4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Praktična provera i usavršavanje razvijenih algoritama izvedena je u laboratorijskoj ćeliji za robotsko zavarivanje. Eksperimentalni sistem se sastoji iz sledećih komponenti: 1)Modularni sto i noseća konstrukcija robotske ćelije, 2) Robot za zavarivanje Yaskawa Motoman MA1400, 3)Modul prijemnog optoelektričnog pretvarača sa jednom kamerom rezolucije 640x480 i USB2 interfejsom, 4)Modul generatora strukturirane svetlosti rezolucije 1280x768 piksela, 5)Akviziциони računari za upravljanje kamerom i prihvatanje senzorskih signala sa kamere (monitoring funkcija u realnom vremenu), 6)Ćeliski kontroler koji upravlja radom robota i ostalih podsistema. 7)Scena i objekat koji se digitalizuje. Izgled robotske ćelije i sklop multifunkcionalnog vizuelnog optičkog senzorskog sistema koji je realizovan samogradnjom prikazan je na slici 5.



Slika 5: Robotski sistem za zavarivanje sa senzorskim sistemom baziranim na strukturiranoj svetlosti:
a)Eksperimentalna instalacija sa Yaskawa MA1400 robotom i b)Sklop senzorskog sistema.

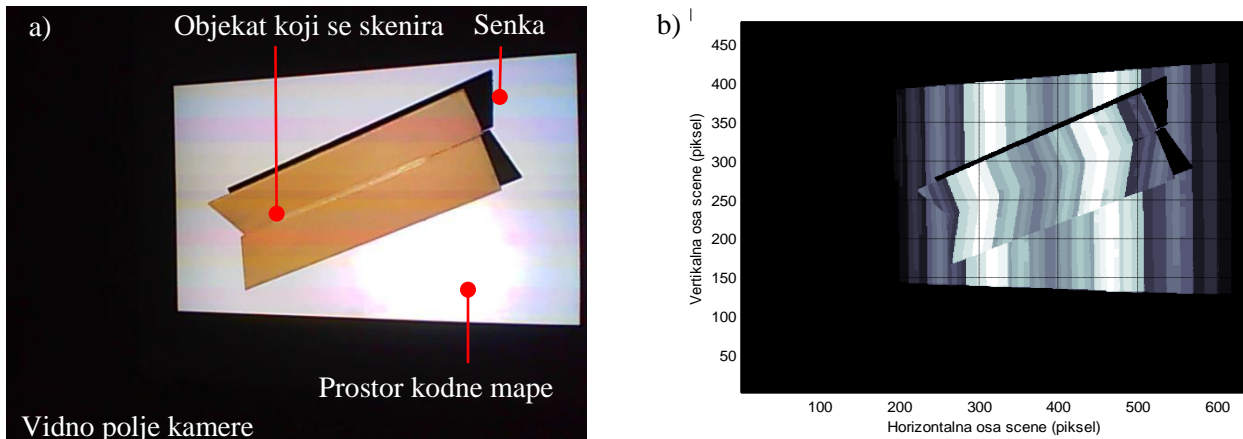
Na slici 6 navodi se deo serija slika dobijenih sukcesivnom projekcijom jedanaestobitne serije kodnih mapa, kojima se ukupni prostor zahvaćen optičkim senzorom diskretizuje na 2048 kodnih klastera, nominalne veličine 480 piksela. Svaki od jedanaest frejmova koje generiše kamera se prethodno obrađuje. Na slici su prikazani 4 i 5-ti bit Y kodne mape i 5 i 6-ti bit X kodne mape: originalni monohromatski oblik i binarni transformat sa zadatim pragom konverzije dobijen adaptivnim podešavanjem histograma.



Slika 6. Deo serije slika scene sa projektovanim binarnim kodnim mapama.

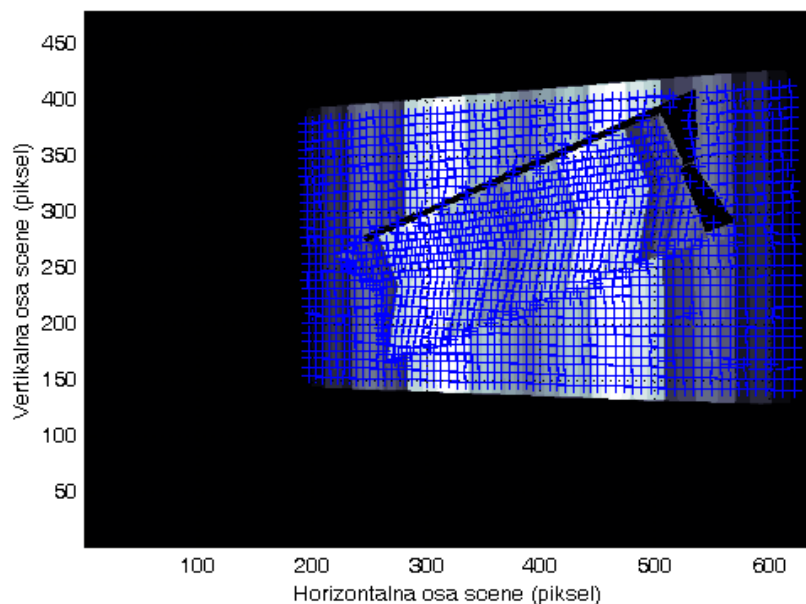
U levom delu slike 7 prikazano je vidno polje kamere u kojem se jasno može uociti test deo L profila koji je osvetljen uniformnom belom svetlošću koja definiše prostor kodne mape i senka dela u tom prostoru.

Generisani binarni transformati razolucije 640x480 se superponiraju sa ciljem da se za svaki piksel generiše odgovarajuća jedanaestobitna kodna grupa. Superponiranje binarnih sadržaja se ostvaruje concatenacijom, prateći vremenski redosled projekcije kodnih mapa, odnosno: $p_{ij} = b_{ij_{11}} \bullet b_{ij_{10}} \bullet \dots \bullet b_{ij_1}$. Ovakav string se pretvara u njegov decimalni ekvivalent i tako čuva u kompozitnoj matrici FS (p_{ij}) dimenzija 640x480. Ovim se skup od jedanaest binarnih frejmova svodi na jedan monohromatski frejm. Desni deo slike 7 predstavlja grafički prikaz ovog monohromatskog frejma na kojem su jasno uočljivi klasteri piksela iste kodne grupe, odnosno istih decimalnih vrednosti. Takođe, uočljivo je izobličenje projektovanih kodnih mapa. Na prikazu FS matrice se takođe uočava da je kodna grupa sa nultom decimalnom vrednošću najzastupljenija. To je posledica prisustva senki i nereflektivne pozadine scene. Eliminacijom svih piksela koji imaju nultu decimalnu vrednost, ovaj poremećaj se eliminiše.

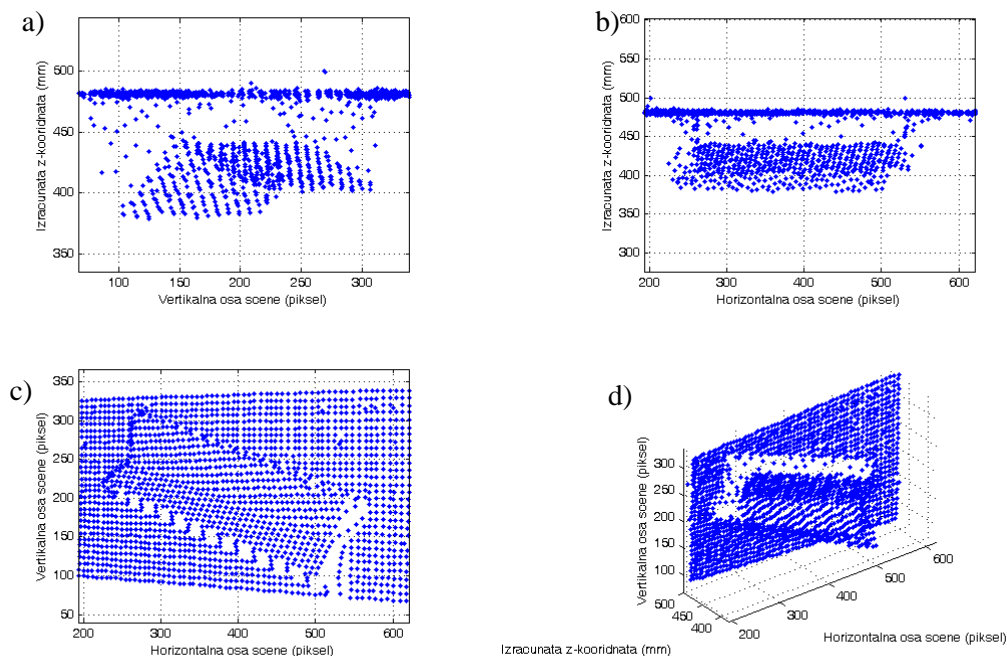


Slika 7: Prikaz scene koja se diskretizuj: a)Struktura scene i b)Grafički prikaz FS matrice dobijene akumulacijom binarnih matrica projektovanih kodnih mapa.

Dalja obrada FS matrice podrazumeva dve osnovne aktivnosti: 1)selekciju validnih klastera i 2)izračunavanje centara validnih klastera. Validnost klastera određuje se merom odstupanja broja piksela sadržanih u klasteru od nominalnog broja izračunatog za slučaj idealnog funkcionisanja mernog sistema i njegove kompaktnosti. U konkretnom slučaju je nominalni broj piksela 54. Margina se usvaja iskustveno i zavisi od konkretnog slučaja primene, ali $\pm 10\%$ bi mogla da bude dobra mera u opštem slučaju, što je i ovde korišćeno. Centri klastera se izračunavaju tako da se održava diskretnost prostora scene i dati su na slici 8. Opciono, moguće je ići na podpikselsku rezoluciju.

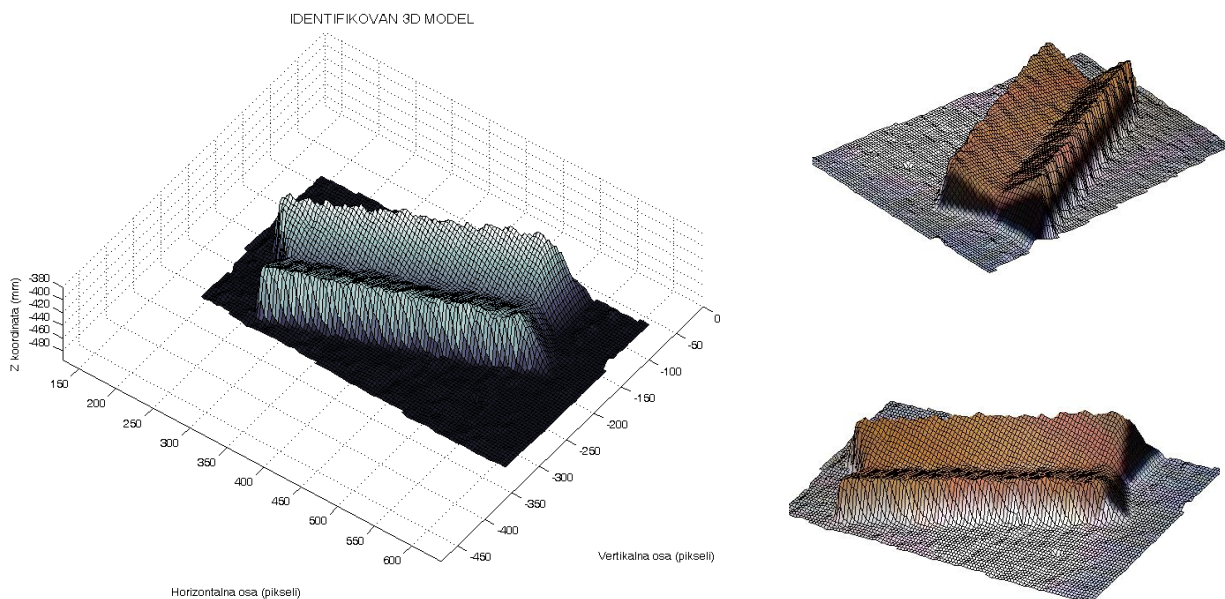


Slika 8: Centri klastera na grafičkom prikazu FS matrice



Slika 9: Prikaz centara klastera u: a) horizontalnoj x i z osi, b) vertikalnoj y i z osi, c) horizontalnoj x i vertikalnoj y osi, d) xyz prostoru

Kalibracijom je utvrđena zavisnost lokacije centar klastera i z -koordinata. Na osnovu izračunatih koordinata centara svih 2048 klastera, primenom kalibracione transformacije svakom centru klastera c_{ij} dodeljuje se pripadajuća z -koordinata. Na slici 9 mogu se videti centri klastera sa izračunatim z -koordinatama. Na ovaj način se dobija oblak tačaka koji se nekom od tesalacionih metoda prevodi u ekvivalentni prostorni model, [14, 15]. U levom delu slike 10 prikazuje se prostorni model scene i objekta koji se digitalizuje, a u desnom digitalni model presvučen kolor mapom sa originalnog frejma rezolucije 640×480 .



Slika 10. Generisani prostorni model scene i objekta koji se digitalizuje (levo), izveden iz primarnog oblaka tačaka i primenom uniformne interpolacione mreže sa 19481 tačaka. Model presvučen kolor mapom (desno) sa polaznog frejma osvetljenog uniformnom belom bojom.

5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati razvoja senzorske tehnologije za efektivnu interakciju robota i okruženja u okviru tehnološkog sistema za zavarivanje zahvaljujući samogradnji optičkog modula koji je pogodan za ugradnju na vrh robota. Triangulacija strukturirane svetlosti omogućava bitno povećanje brzine akvizicije geometrije scene u odnosu na uobičajena rešenja bazirana na laserskoj tačkastoj ili linijskoj triangulaciji. Niskorezolutni sistem, rezolucije 640×480 poseduje sasvim zadovoljavajuće performanse za primenu ove vrste. Dalja istraživanja će biti usmerena na izgradnji algoritama za automatsku segmentaciju slike, odnosno prepoznavanje geometrijskih primitiva i izračunavanje geometrije i lokacije šava sa vrlo velikom tačnošću.

6. LITERATURA

- [1] Sugar, T. G., Vanderborht B., Hollander, K. W., Lefeber, D.: *Compliant Actuator Design*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 81-94, September 2009.
- [2] J.N. Pires, A. Loureiro, and G. Bolmsjo, "Welding Robots: Technology, Systems Issues and Applications", Springer-Verlag London Limited 2006, ISBN-10: 1852339535
- [3] Petrović, P., Danilov, I., Lukić, N., Novi pristup u projektovanju ekstremno varijantnih proizvoda, Zbornik radova 37. JUPITER konferencija, 33. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2011, str. 3.26-3.35, ISBN: 978-86-7083-724-9
- [4] T.-J. Tarn, S.-B. Chen, C. Zhou (Eds.), *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN-10 3-540-73373-6.
- [5] J. B. Park, S. H. Lee, and I. J. Lee, Precise 3D Lug Pose Detection Sensor for Automatic Robot Welding Using a Structured-Light Vision System, *Sensors* 2009, 9, pp.: 7550-7565; doi:10.3390/s90907550
- [6] P. Petrović, Ž. Jakovljević, V. Miković, Robotizovani sistemi za beskontaktnu dimenzionu metrologiju bazirani na optičkoj triangulaciji - Deo 1: Koncept, Zbornik radova 36. JUPITER konferencije, 16. simpozijum Menadžment kvalitetom, Beograd 2010, str. 5.27-5.34, ISBN 978-86-7083-696-9
- [7] P. Petrović, Ž. Jakovljević, V. Miković, Robotizovani sistemi za beskontaktnu dimenzionu metrologiju bazirani na optičkoj triangulaciji - Deo 2: Praktična implementacija i validacija Zbornik radova 36. JUPITER konferencije, 16. simpozijum Menadžment kvalitetom, Beograd 2010, str. 5.35-5.42, ISBN 978-86-7083-696-9.
- [8] B.G. Batchelor and P.F. Whelan: *Intelligent Vision Systems for Industry*, Springer, 2002, ISBN-10: 3-540-19969-1.
- [9] Danilov, I., Petrović, P.B., Lukić, N. Eksperimentalna instalacija za ultra brzu optičku triangulaciju strukturirane svetlosti u robotizovanoj montaži, Zbornik radova 38. JUPITER konferencije, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2012, str. 3.140-3.148, ISBN 978-86-7083-757-7
- [10] D. Xu, M. Tan, X. Zhao, Z. Tu: Seam Tracking and Visual Control for Robotic Arc Welding Based on Structured Light Stereovision, *International Journal of Automation and Computing* 1 (2004) 63-75.
- [11] J. Salvi, Pattern codification strategies in structured light systems, *Pattern Recognition* 37, 2004, pp: 827-849.
- [12] J.L. Posdamer, M.D. Altschuler, Surface measurement by space-encoded projected beam systems, *Comput. Graph. Image Process.* 18 (1) (1982) 1-17.
- [13] S. Inokuchi, K. Sato, F. Matsuda, Range imaging system for 3-D object recognition, in: *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, 1984, pp. 806-808.
- [14] R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2004, ISBN-10:9780521540513
- [15] W. Wilke, *Segmentierung und Approximation großer Punktwolken*, Dissertation, Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2002.

Danilov, I., Petrović, P.B., Lukić, N.

STRUCTURED LIGHT TRIANGULATION IN ROBOTIC WELDING

Abstract: The paper presents first results in development of optical scanning technology which is dedicated for fast and robust identification of actual state of the environment in robotic welding process. Due to the parallel triangulation, developed sensory system which is based on structured light is significantly faster than line triangulation laser sensors, but significantly more complex. This paper describes a conceptual framework for structured light triangulation based on binary Gray coded maps and discuss of obtained results on a laboratory installation of robotic welding cell developed and realized at the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade/CeNT, CMSysLab, within project TR35007.

Key words: *robotic welding, structured light, triangulation.*



Durđević, A., Sedmak, A., Živković, A., Radisavljević, I. ¹⁾

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM ZA DOBIJANJE T-SPOJEVA OD LEURE ALUMINIJUMA

Rezime

U ovom radu autori predstavljaju rezultate istraživanja mogućnosti izrade T-spojeva od aluminijumske legure 5052-H32 postupkom zavarivanja trenjem sa mešanjem. Ova relativno nova metoda zavarivanja obezbeđuje ostvarivanje visoko kvalitetnih zavarenih spojeva, gde čvrstoća spoja dostiže čvrstoću osnovnog materijala. Eksperimentalnim zavarivanjem trenjem sa mešanjem izrađen je T-spoj pomoću alatne glodalice, specijalnog alata, specijalnog pomoćnog pribora i izborom odgovarajućih parametara zavarivanja. Rađeno je vizuelno ispitivanje, ispitivanje makrostrukture i dat je dijagram mikrotvrdoće. Na makroskopskim snimcima primećene su greške zavarenog spoja tipa tunela i neprovara, koje su ukazale na to da je previše toplote odvedeno tokom procesa zavarivanja zbog neodgovarajućeg materijala pomoćnog pribora.

Ključne reči: zavarivanje trenjem sa mešanjem, Al 5052 H32, T-spoj, parametri zavarivanja, greške

1. UVOD

Zavarivanje trenjem sa mešanjem- ZTM (na engleskom jeziku Friction Stir Welding) je relativno nov postupak zavarivanja nastao krejem 1991. godine na institutu za zavarivanje TWI. Postupak je već 1994. godine dobio komercijalnu primenu i izazvao veliku pažnju istraživača u praksi. Prva primena zavarivanja trenja sa mešanjem vezuje se za proizvodnju železničkih vozila i zavarivanje aluminijuma i njegovih legura. Danas se ovim postupkom uspešno zavaruje veliki broj čistih metala, legura metala, kao i nemetala. Ovaj postupak zavarivanja se koristi u proizvodnji šinskih vozila, automobilske industriji, avioindustriji, proizvodnji kosmičkih letelica, brodogradnji, proizvodnji procesne opreme, itd..

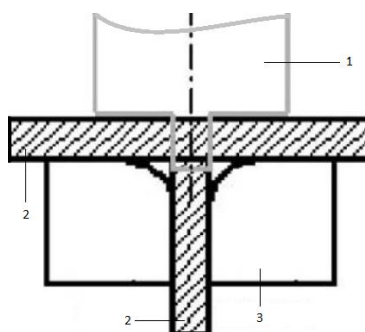
ZTM obezbeđuje spajanje materijala bez topljenja i korišćenja dodatnog materijala. Korišćenjem ovog postupka izbegnuti su problemi koji se javljaju kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, kao što su lokalno zagrevanje materijala do i preko tačke topljenja, a time se smanjuju mehanička svojstva materijala.

Spajanje materijala se vrši u čvrstoj fazi kombinovanim delovanjem toplote i mehaničkog rada. Alat i osnovni materijal ostaju u čvrstom stanju, a u zoni zavarivanja osnovni materijal se nalazi u blago razmekšanom, tj. plastičnom stanju usled dejstva toplote koja se javlja zbog trenja alata i osnovnog materijala. Temperature koje se javljaju tokom procesa ne prelaze tačku topljenja osnovnog materijala, i iznose oko 80 % od temperature topljenja. Kod legura aluminijuma kreću se u intervalu od 400-500 °C .

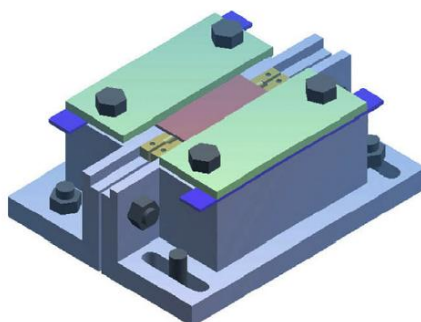
Postupak ima izuzetne karakteristike: jednostavan je i lako može da se automatizuje, energetski je ubedljivo najefikasniji, ekološki je apsolutno čist, zavareni spojevi imaju vrlo visok kvalitet, mogućnost zavarivanja u svim položajim jer je proces zavarivanja u čvrstom stanju, nisu neophodni sertifikovani zavarivači, mogućnost zavarivanja aluminijumskih ploča od 0,5-50 mm u jednom prolazu. Nedostaci procesa zavarivanja trenjem sa mešanjem su ti što ploče moraju da budu jako dobro stegnute, potrebna je podložna ploča prilikom zavarivanja, prisutna je rupa na kraju metala šava zbog izlaza alata i zahtev za različitom dužinom trna alata kada se zavaruju materijali različitih debljina [1-4].

T-spojevi proizvedeni zavarivanjem trenjem sa mešanjem se dobijaju spajanjem dva ili tri radna materijala. Pretežno se koriste za ojačavanje sudova pod pritiskom i konstrukcije trupa aviona. Na slikama 1. i 2. dati su pojednostavljeni primeri pozicioniranja alata za zavarivanje, radnih materijala i podložnih ploča i model pomoćnog pribora za postupak zavarivanja trenja sa mešanjem prilikom formiranja T-spoja [5].

¹⁾ Andrijana Durđević, Inovacioni centar, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, (andrijana.miler@yahoo.com), prof. dr Aleksandar Sedmak, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (asedmak@mas.bg.ac.rs), Aleksandar Živković, GOŠA FOM, Smederevska Palanka, (a.zivkovic@gosafom.com), Igor Radisavljević, Vojnotehnički institut Beograd, (igra@ptt.rs)



Slika 1. Pojednostavljeni prikaz T-spoja dobijenog postupkom ZTM, pozicioniranje: 1- alata, 2-radnih materijala i 3-podložnih ploča [5]



Slika 2. 3D model pomoćnog pribora za izvođenje zavarivanja trenjem sa mešanjem [6]

Da bi se popunila praznina između radnih materijala i radijusa podložne ploče, neopodno je da se poveća unos toplote i ostvari bolji transport, tj. mešanje omekšalog materijala. To se postiže povećanjem radijusa čela alata, da bi se ostvarila veća površina trenja i izborom adekvatne geometrije trna alata. Na kvalitet zavarenog spoja i kontrolu ovog postupka najviše utiče pet parametara zavarivanja: brzina obrtanja (rotacije) alata, brzina zavarivanja, vertikalna (pritisna) sila na radne materijale, ugao nagoba alata, dubina uranjanja alata i geometrija alata [7].

Tipične greške koje se javljaju u metalu šava kod T-spojeva su tuneli, neprovareni koren spoja i linije vezivanja. Sve ove greške se naravno mogu izbjeći pravilnim izborom parametara zavarivanja i načinom stezanja. Međutim, mehanizmi formiranja i prostiranja grešaka još uvek nisu dovoljno istraženi [8]. Dakle, svrha ovog eksperimenta je ispitivanje mogućnosti zavarivanja T-spojeva, uz izbor optimalnih parametara zavarivanja radi eliminisanja mogućih grešaka zavarenog spoja visokog kvaliteta.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

T-spoj je izrađen na alatnoj glodalici AG 400-MINA. Priključna snaga mašine je 12 kW, maksimalna brzina obrtanja 2500 o/min, maksimalni posmak je 4500 mm/min i radni prostor je $x=600$ mm, $y=400$ mm i $z=300$ mm. Zavarene su dve ploče dimenzija 30x175x5mm, od od aluminijumske legure Al 5052 H32, čiji je hemijski sastav prikatan u tabeli 1., a mehaničke osobine u tabeli 2. [9].

Tabela 1. Hemijski sastav legure Al 5052 H32

Legirajući element	Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti
Sadržaj u [%]	0,04	0,1	2,46	0,19	0,73	0,06	0,01

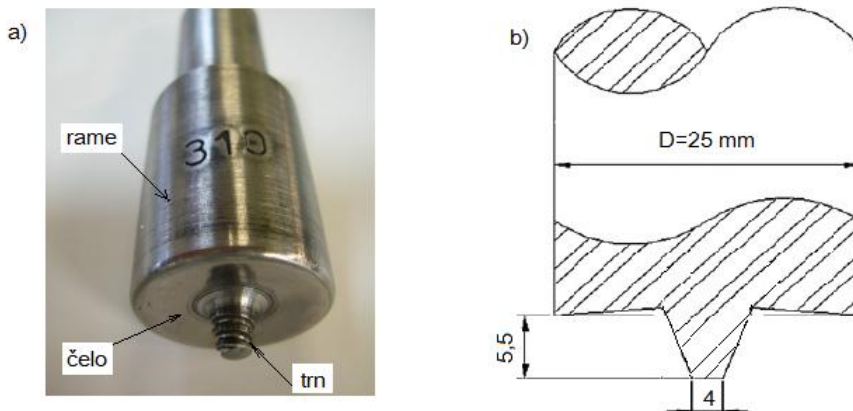
Tabela 2. Mehaničke osobine legure Al 5052 H32

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Tvrdoća HV5
Srednja vrednost	157	214	20	67

Specijalni alat koji je korišćen za zavarivanje ovim postupkom izrađen je od alatnog čelika H13, koji je nakon mašinske obrade termički tretiran. U tabeli 3. dat je hemijski sastav materijala alata [10]. Rame alata

je cilindričnog ovlika, dok je trn alata konusnog oblika, sa uglom konusa od 20°. Trn na sebi ima urezanu oblu desnu zavojnicu nagiba 5°, koja podstiče bolje mešanje i sekundarno tečenje razmekšalog materijala. Čelo alata je konkavnog oblika, sa rezervoarom. Fotografija alata sa osnovnim elementima alata je prikazana na slici 3. pod a), dok je deo ctreža alata sa osnovnim dimenzijama dat na istoj slici pod b).

Oznaka čelika	Tabela 3. Hemijski sastav čelika, sadržaj legirajućih elemenata %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
H13	0,38	1	0,38	≤0.03	≤0.02	5,15	1,35	-	1

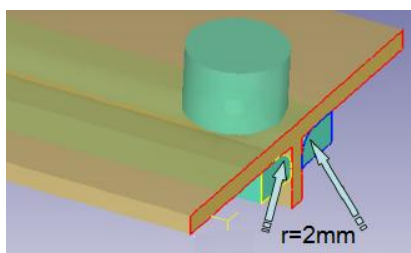


Slika 3. a) Fotografija alata sa osnovnim elementima i b) Deo radionočkog crteža alata sa osnovnim dimenzijama

Postupak eksperimentalnog zavarivanja je podrazumevao tri faze. Posle odabira mašine, alata, pomoćnog pribora i stezanja radnih materijala, pristupilo se zadavanju brzine obrtanja alata, ugla nagiba alata, brzine zavarivanja (translatornog kretanja alata) i dubine uranjanja alata. U tabeli 4. dati su pomenuti parametri.

Tabela 4. Parametri zavarivanja				
	$v_{rot} \left[\frac{o}{min} \right]$	$v_{zav} \left[\frac{mm}{min} \right]$	$\alpha [^\circ]$	Dubina uranjanja alata [mm]
Vrednost	950	30	1	5,8

Prva faza zavarivanja podrazumeva uranjanje trna alata koji se obrće u materijal. Tokom ovog procesa stalno se povećava temperatura u neposrednom kontaktu površina rotirajućeg alata i radnih materijala. Proces se nastavlja sve dok se temperatura ne poveća na temperaturu koja dovodi do omekšavanja radnih materijala. Omekšali materijal se kće oko trna alata usled njegove rotacije i usled prodiranja u materijal. Dolazi do neposrednog kontakta ramena alata sa površinom radnog materijala. Sam ulazak alata u materijal trajao je 1,5 min, dok je zadržavanje alata u materijalu (alat samo rotira) bilo 0,5 min. Nakon ove faze, sledi faza zavarivanja. Alat se kretao translatorno, zadatom brzinom zavarivanja, uz naravno konstantnu rotaciju. Omekšali materijal se transportuje oko trna alata, a i duž ose alata, između čela alata i čvrtstig zidova radnih materijala. Model ove faze je dat slikom 4, i trajao je 5 min. Tokom treće faze zavarivanja alat koji rotira prestaje translatorno da se kreće, izvlači se daleko od radnih materijala ostavljajući za sobom cilindričnu rupu.



Slika 4. 3D model druge faze zavarivanja [11]

Nakon izvedenog postupka zavarivanja izvršena su sledeća ispitivanja zavarenog T-spoja : vizuelno kontrola, metalografsko ispitivanje makrostrukture i ispitivanje mikrotvrdoće.

3. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

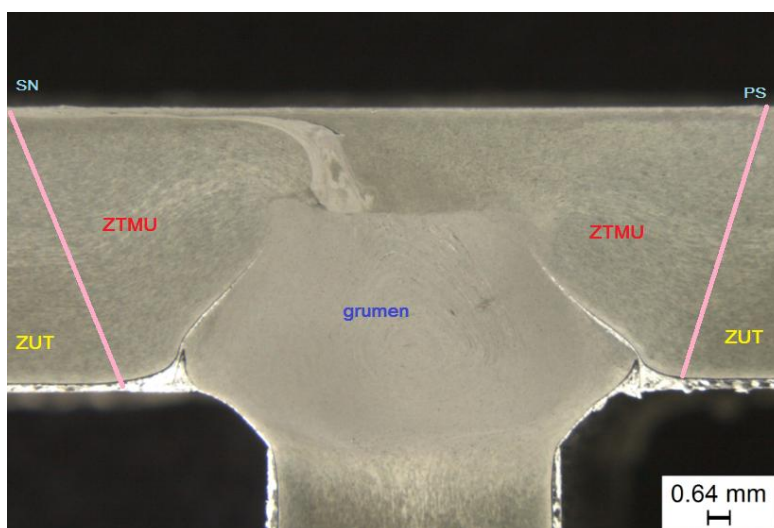
3.1. Kvalitet i struktura spoja

Prvo je urađeno vizuelna kontrola lica i korene strane metala šava, odmah po vađenju T-spoja iz pribora za stezanje. Na licu metala šav prikazan na slici 5., blago se nazirao tunel, ali nije moglo sa sigurnošću da se potvrdi njegovo prisustvo bez metalografskog ispitivanja. Uočen je i veći bljesak materijala na povratnoj strani metala šava. Bljesak je pojava koja se pravilnim izborom alata može minimizirati, ali ne i eliminisati.



Slika 5. Fotografija lica metala šava

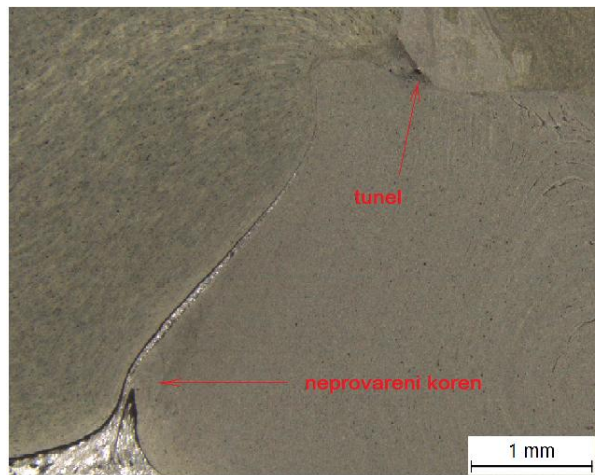
Metalografskim ispitivanjem makrostrukture uočene su strukturne promene, kao i tok materijala u metalu šavu. Na slici 6. uočavaju se mikrostrukturne zone spoja nastalog postupkom ZTM, i to su :zona uticaja toplote (ZUT), zona termo-mehaničkog uticaja (ZTMU) i zona mešanja (grumen). Pre metalografskog snimanja izvršena je standardna priprema uzoraka. Prvo je izvršeno isecanje uzorka iz T-spoja na testeri i poravnjavanje ivica. Uzorak je izvađen isecanjem upravno na pravac brzine zavarivanja. Zatim je urađeno šmirglanje, brušenje brusnim papirima, poliranje dijamantskom pastom i na kraju makro-nagrizanje rastvorom površine uzorka koja je normalna na pravac brzine zavarivanja.



Slika 6. Makroskopski snimak poprečnog preseka uzorka T-spoja nastalog postupkom ZTM

Uočava se mali tunel na strani napredovanja. Ta greška se javlja zbog nedovoljnog transporta materijala od povratne ka strani napredovanja metala šava.

Na korenoj strani metala šava, u neposrednoj okolini grumena, uočava se greška tipa neprovarenog korena (nesavršeno vezivanje). Ova greška se obično javlja usled nedovoljne penetracije alata u materijal. Ova greška čini inicijalnu prslinu u grumenu i zbog toga je smanjena zatezna čvrstoća spoja. Na slici 6. pokazane su greške tipa tunela i neprovarenog korena.

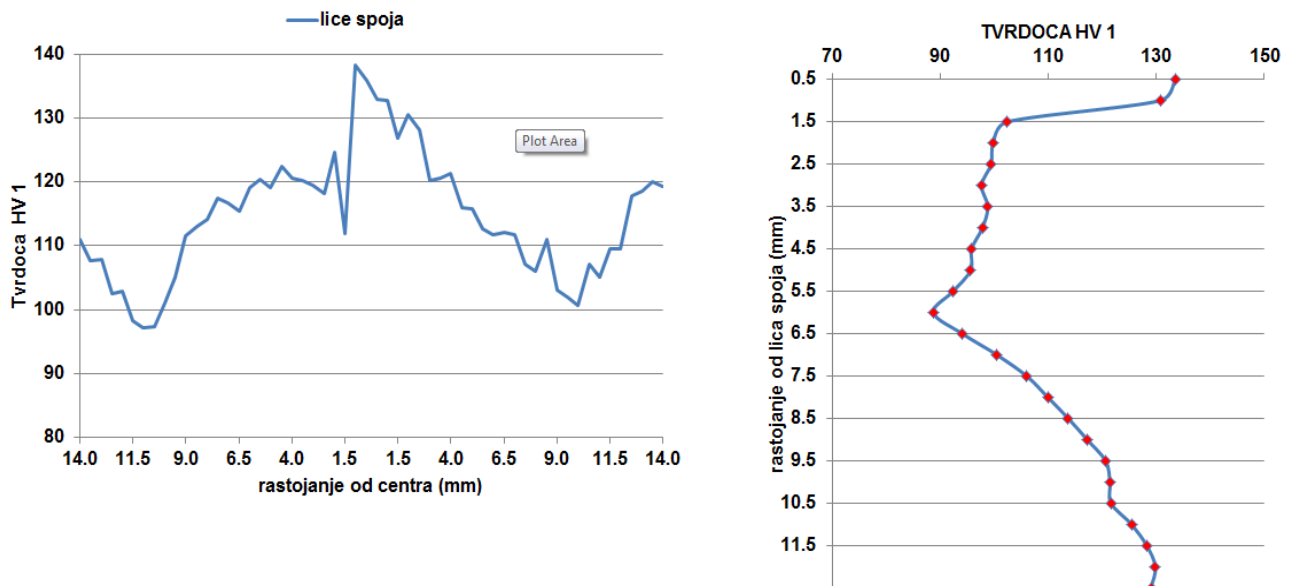


Slika 6. Snimci grešaka T-spoja

Jasno se vide koncentrični krugovi u strukturi grumena, koji su karakteristični za ovu oblast (slika 5. i 6.). U zoni grumena i dela zone termo-mehaničkog uticaja blizu grumena je fina, rekristalisana, sitnozrnasta struktura. To je tako iz razloga što su zrna u strukturi materijala grubo promešana. Struktura zrna u zoni uticaja toplote je slična kao i kod osnovnog materijala.

3.2. Raspodela mikrotvrdoća

Merenje mikrotvrdoće izvršeno je po Vickersovoj metodi. Korišćen je optički stereo mikroskop sa softverom za akviziciju slike i obradu podataka. Korišćena je sila od 9,807 N (1kg). Mikrotvrdoća je merena blizu lica metala šava, na svakih 0,5 mm, i u vertikalnom pravcu kroz centar metala šava, od lica ka korenu šava, na po 1 mm.



Slika 7. Dijagrami mikrotvrdoće T spoja u horizontalnom i vertikalnom pravcu

Sa dijagrama na slici 44. vidi se da je najveća tvrdoća prisutna u oblasti grumena, a da čak i dostiže tvrdoću osnovnog materijala. Ova promena tvrdoće je nastala zbog rekristalizacije i usitnjavanja strukture. Najmanje vrednosti tvrdoće su prisutne u oblasti ZUT-a, što je i očekivano, jer pri porastu temperature dolazi do uvaćanja zrna strukture.

4. ZAKLJUČCI

Pregledom literature, u Srbiji niko još nije izradio T-spoj, a zavarivanje trenjem sa mešanjem se još uvek

ne primenjuje. Izaborom parametara zavarivanja ustanovljeno je da je moguće uspešno zavariti T-spoj ovim postupkom, uz dodatna sveobuhvatna ispitivanja radi postizanja optimalne generisane toplote i dobijanja T-spoja očekivanog kvaliteta. Vizuelnim ispitivanjem nije moglo sa sigurnošću da se ustanovi prisustvo grešaka spoja. Na makroskopskom snimku uočena je greška tipa tunela i greška tipa neprovarene korene strane metala šava na dva mesta. Na osnovu iskustva stečenog tokom izrade eksperimenta, ove dve greške su posledica lošeg izbora materijala za stezni pomoćni pribor jer je prevelika količina toplote odvedena iz procesa. Dakle, da bi se dobio spoj bez grešaka sa datim alatom i parametrima zavarivanja, materijal steznog alata izrađenog od ugljeničnog čelika klase S355 po EN 10024 treba zameniti nekim materijalom koji manje provodi toplotu.

5. LITERATURA

- [1] Mijajlović, M., Milčić, D., Đurđanović, M., Grabulov, V., Živković, A., Perović, M., *Osnovni pojmovi kod postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem prema AWS D17.3/D17.3M:2010 i ISO 25239-1: 2011*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 57, br. 2, str. 61-68, 2012.
- [2] Radisavljević, I., Živković, A., Radović, N., *Eliminacija tunela pri zavarivanju trenjem alatom legure Al 5052-H32*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 57, br. 1, str. 5-12, 2012.
- [3] New aluminium alloys and fuselage structures in aircraft design, http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf, May, 2001.
- [4] Živojinović, D., *Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legure aluminijuma*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [5] Buffa, G., Fratini, L., Micari, F., Shivpuri, R., *Material Flow in FSW of T-joints: Experimental and Numerical Analysis*, Springer, br.1, pp. 1283-1286, 2008.
- [6] Fratini, L., Buffa, G., Filice, L., Gagliardi, F., *Friction stir welding of AA6082-T6 T-joints: process engineering and performance measurement*, Proc. IMechE, Vol. 220, pp. 669-676, 2005.
- [7] Hilgert, J., *Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding*, Dissertation 2012.
- [8] Rajiv, M., Murray, M., *Friction stir welding and processing*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2007
- [9] Mijatović, Z., Baloš, S., *Zavarivanje trenjem sa mešanjem legure aluminijuma i magnezijuma sa trouglastim oblikom trna*, Zbornik radova fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, br. 16, 2012.
- [10] Živković, A., *Uticaj geometrije alata za postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al 2024*, Doktorska disertacija, Beograd, 2011.
- [11] Grujčić, M., Arakere, G., Pandurangan, B., Hariharan, a., Yen, C.-F., and Cheeseman, B.A., *Development of a Robust and Cost-Effective Friction Stir Welding Process for Use in Advanced Military Vehicles*, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 20(1), pp 11-13, February 2011.

Đurđević, A., Sedmak, A., Živković, A., Radisavljević, I.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF FRICTION STIR WELDING FOR OBTAINING T-JOINTS OF ALUMINIUM ALLOY

Abstract: In this paper, the authors present the results of research into the possibility of production the T-joints of aluminium alloy 5052-H32 by friction stir welding process. This relatively new welding method realizes the high quality weld joints, where strength of joint reaches the strength of the base material. Experimental Friction stir welding process is used to make a T-joint using a milling machine, special tools, special support equipment, and selection of appropriate welding parameters. Visual inspection was processed and testing macrostructure and micro-hardness are given in the diagram. Defects in weldment, tunnel and kissing bonds, were observed in macroscopic recordings, which indicated that the heat was too much taken during the welding process due of inappropriate material of clamping support equipment.

Key words: friction stir welding, Al 5052 H32, T-joint, welding parameters, defects



Jovanović, D., Nedić, B. ¹⁾

SCRATCH TEST PREVLAKA HROMA ²⁾

Rezime

Galvanske prevlake hroma se nanose da bi površina osnovnog materijala dobila odgovarajuću otpornost prema habanju, tvrdoću, estetski utisak i dr. Ispitivanja galvanskih prevlaka hroma usmerena su najčešće na vezu hroma sa osnovnim materijalom, dok je veoma malo podataka o uticaju podloge na karakteristike prevlaka. U radu su prikazani rezultati istraživanja uticaja tvrdoće i topografije površine na adhezionna svojstva prevlake hroma ispitivana pomoću Scratch testa.

Ključne reči: galvanske prevlake hroma, tvrdoća, hrapavost, scratch test

1. UVOD

Stvaranje metalnih elektrolitičkih prevlaka na površini drugog metala ima dvostruku ulogu, zaštitu od korozije i promenu karakteristika površine metala, kao što su tvrdoća, električna provodljivost, dekoracija itd. Elektrohemijske prevlake tvrdog hroma većih debljina imaju dobru otpornost prema habanju, mali koeficijent trenja i dobru otpornost prema koroziji u različitim agresivnim sredinama. Od prevlaka tvrdog hroma velikih debljina zahteva se još da budu glatke, da imaju veliku tvrdoću i što bolju raspodelu debljine po površini koja se štiti. Jedan od postupaka kojim se mogu ostvariti ovakvi zahtevi je programirano elektrohemijsko taloženje u režimima jednosmerne i reversne struje [1- 5].

U zavisnosti od odabranog režima taloženja (gustine struje i temperature elektrolita) pri taloženju hroma jednosmernom strujom menjaju se osobine prevlaka (sjaj, otpornost na habanje i koroziju, tvrdoća, unutrašnja naprezanja u prevlaci, defekti na površini prevlaka). Isto tako pri taloženju hroma jednosmernom strujom javlja se problem kod prekida struje u procesu taloženja, zbog pasivnosti površine hroma. Gotovo je nemoguće istaložiti drugi sloj hroma sa zadovoljavajućim prijanjanjem za sloj istaložen pre prekida procesa [6, 7].

Uticaj vrste postupka obrade i uslova prethodne obrade kao i pripreme površina na koje se nanose prevlake, je veoma malo istraživano. Površinski slojevi obrađenih površina dobijenih različitim postupcima obrade mogu imati različitu strukturu, što se tek u periodu eksploatacije može ispoljiti. Prema tome, može se reći da se karakteristike površinskih slojeva formiraju kao rezultat različitih uslova obrade u tehnološkom lancu izrade gotovog dela. Osnovni parametri koji se nasleđuju kroz tehnološki proces izrade mogu se podeliti na dve grupe. S jedne strane to su parametri vezani za svojstva materijala: njegov sastav, strukturu, termička obrada, naponsko stanje i dr., dok su sa druge strane parametri vezani za makro i mikogeometriju površina (geometrijski parametri) [8, 9]. To ukazuje na kompleksnost problema i potrebu izučavanja.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Uzorci za ispitivanje su pločice dimenzija 15x10x6.3 mm (prema ASTM G 77). Kao podloga za nanošenje prevlaka odabran je specijalni čelik Č5730 (prema GOST-u 30HN2FA 1). Hemijski sastav ovog materijala je dat u tabeli 1. Posle izrade uzoraka glodanjem, izvršena je termička obrada poboljšanjem na različite tvrdoće. Završna obrada uzoraka vršena je brušenjem sa različitim režimima i poliranjem. Na ovaj način su dobijene različite karakteristike površinskog sloja i različite topografije površina uzoraka. U tabeli 2. date su karakteristike podloge za taloženje prevlaka.

¹⁾ Mr Desimir Jovanović, Fabrika oružja, Kragujevac,

Prof. dr Bogdan Nedić, Univerzitet u Beogradu, Fakultet inženjerskih nauka, (nedic@kg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR 35034: Istraživanje primene savremenih nekonvencionalnih tehnologija u proizvodnim preduzećima sa ciljem povećanja efikasnosti korišćenja, kvaliteta proizvoda, smanjenja troškova i uštede energije i materijala, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Tabela 1. Hemijski sastav materijala uzoraka

Hemijski sastav (%)									
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	S	P	Cu
0,27 -0,34	0,30 - 0,60	0,17 -0,37	2,0 -2.4	0,60 - 0,90	0,20 - 0,30	0,10 -0,18	max 0,025	max 0,025	max 0,25

Tabela 2. Karakteristike površine uzoraka pre nanošenja prevlaka hroma

Broj uzorka	1	2	3	4	5	6	7	8
Ra, μm	0.410	0.400	0.404	1.140	0.920	0.890	1.390	0.424
Tvrdoća posle termičke obrade, HRC	40	34	21	32	40	32	40	40

Prevlake hroma su taložene u programiranom režimu rada jednosmernom strujom, po zatom planu eksperimenta (tabela 3), pri stalnoj količini elektriciteta od 14Ah. U toku procesa taloženja, parametri jednosmerne struje su kontrolisani i regulisani u zadatim granicama. Korišćene anode su napravljene od olova sa 10 % antimona.

Tabela 3. Parametri jednosmerne struje

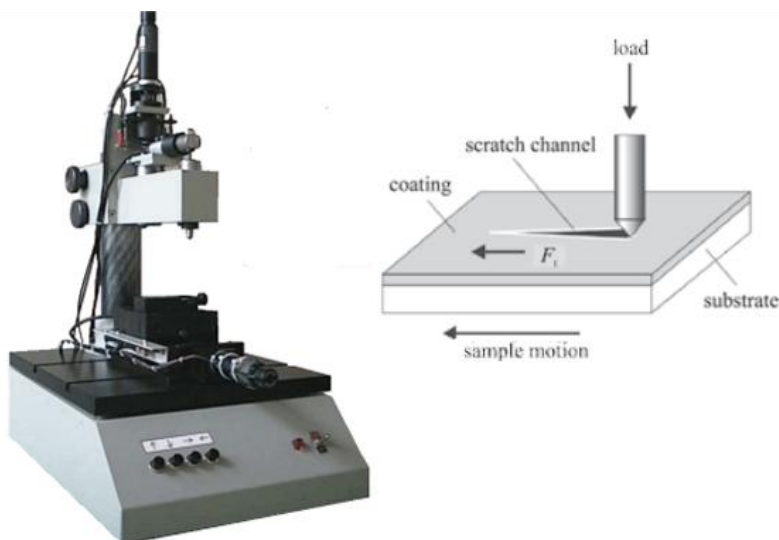
	Parametri galvanizacije	Programi taloženja prevlaka hroma			
		1	2	3	4
1	Gustina struje taloženja [A dm^{-2}]	30	30	70	70
2	Struja taloženja [A]	4.5	9	4.5	9
Radna temperatura taloženja je $55 \pm 1^\circ\text{C}$					

Hemijsko nagrizanje površine osnovnog metala obavljeno je u 20% rastvoru sumporne kiseline pri sledećim parametrima: radna temperatura 250°C i vremenu obrade 4 minuta.

Posle nagrizanja uzorci su detaljno ispirani u protočnoj vodi. Talozenje prevlaka hroma obavljeno je u hromatno-sulfatnom elektrolitu sledeće koncentracije:

- hrom (VI) oksid, CrO_3 od 250 do 270 g/dm^3 ,
- sumporna kiselina, H_2SO_4 od 2.5 do 2.7 g/dm^3 .

Elektrolit se formira sa koncentracijom na donjoj granici, ali kako tokom rada deo elektrolita ispari to se koncentracija pomera prema gornjoj granici. Ispitivanje je pokazalo da promena koncentracije u ovom opsegu nema uticaja na proces taloženja hroma prema zatom programu. Posle taloženja prevlaka uzorci su prvo detaljno ispirani u protočnoj vodi, a posle u toploj vodi i na kraju osušeni toplim vazduhom. Debljina istaloženih prevlaka kretala se u granicama od 28,40 do 40,57 μm .



Slika 1. Uređaj scratch tester ST-99

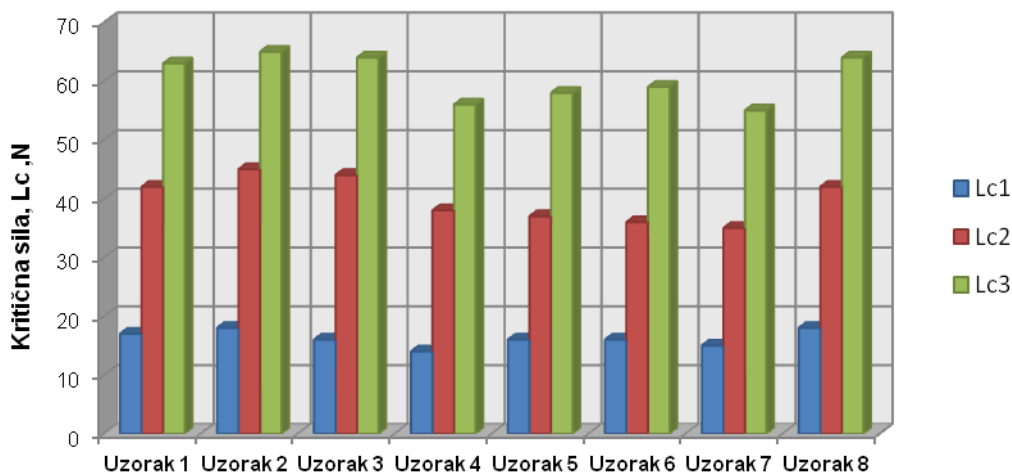
Ispitivanje prijanjanja prevlake za osnovni materijal, podlogu, izvršeno je metodom brazdanja. Test brazdanjem je proveden saglasno standardu ASTM D7187, da bi se dobile informacije o čvrstoći veze podloge i prevlake [10-12]. Ispitivanje je izvršeno na uređaju scratch tester ST-99, slika 1.

Ispitivanje je obavljeno sa sledećim parametrima:

- maksimalna normalna sila: 80 N,
- prirast sile: 200 N/min,
- brzina pomicanja uzorka: 40 mm/min,
- put uzorka: 9 mm.

3. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA

Na svakom ispitivanom uzorku određene su kritične sile L_{C1} , L_{C2} i L_{C3} . Kritična sila L_{C1} izaziva prve pukotine u tragu brazdanja. Kritična sila L_{C2} izaziva poprečne pukotine u tragu, dok se pri kritičnoj sili L_{C3} poprečne pukotine protežu od jednog kraja traga brazdanja do drugog. Kritična sila L_{C2} nalazi se na mestu prvog diskontinuiteta na krivoj sile trenja i očitava se sa apscise dijagrama, a isto tako i L_{C3} .



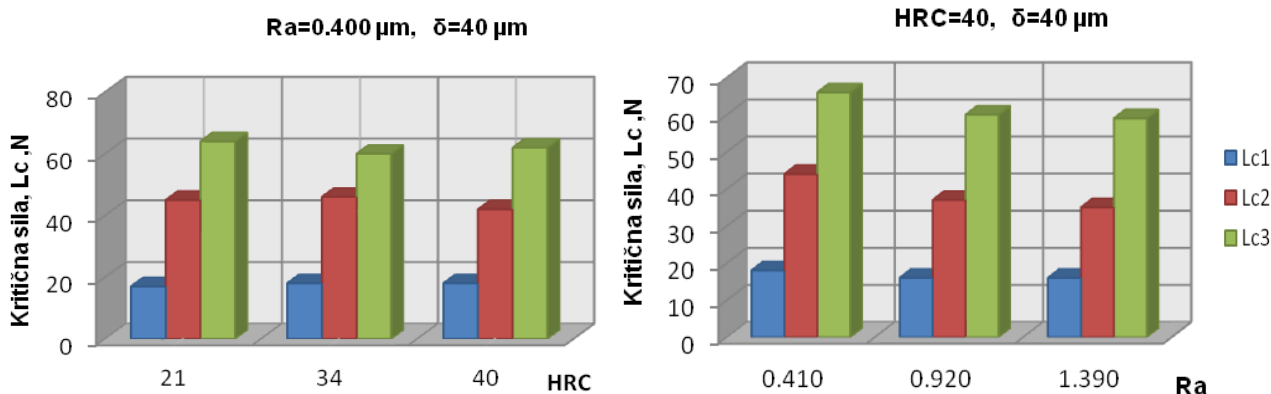
Slika 2. Kritične sile pri scratch testu

Vrednosti ovih sila izračunate su posle ispitivanja, merenjem udaljenosti karakterističnih oštećenja od početka otiska i date su u tabeli 4, a grafički prikaz na slici 2. Na svakom uzorku provedena su po tri ispitivanja, tri traga brazdanja, i određene su tri kritične sile.

Mikroskopskom analizom traga brazdanja na ispitivanim uzorcima i njihovim međusobnim poređenjem, uočavaju se iste promene na prevlakama, odnosno pri razaranju prevlake se ponašaju isto bez obzira na karakteristike podloge i parametre taloženja. Razlikuju se samo vrednosti kritičnih sila pri kojima dolazi do potpunog razaranja prevlake.

Na slici 3, prikazani su dijagrami kritičnih sila pri scratch testu za nekoliko uzoraka različitih karakteristika. Analizirani su uzorci koji imaju:

- istu tvrdoću podloge i debljinu prevlake i različitu hrapavost podloge, i
- istu hrapavost podloge i debljinu prevlake i različitu tvrdoću podloge.

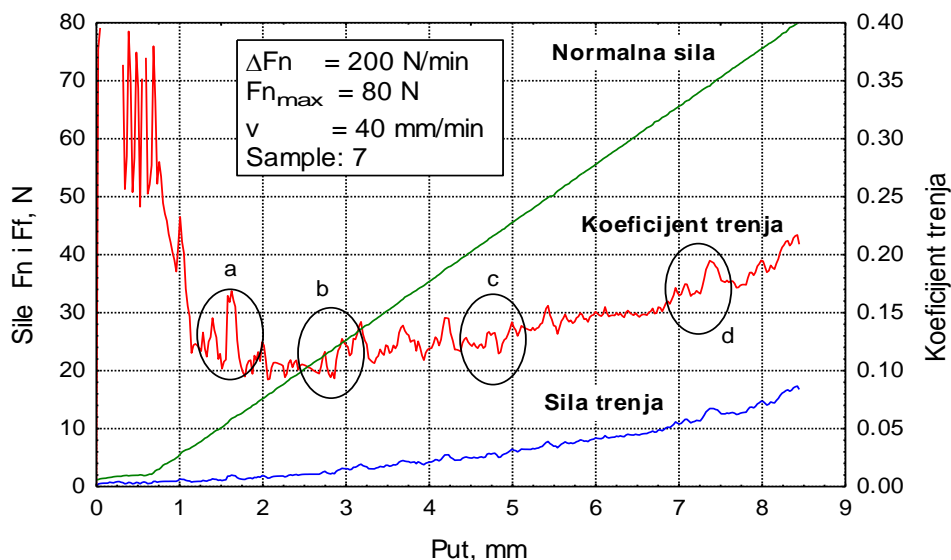


Slika 3. Kritične sile pri scratch testu

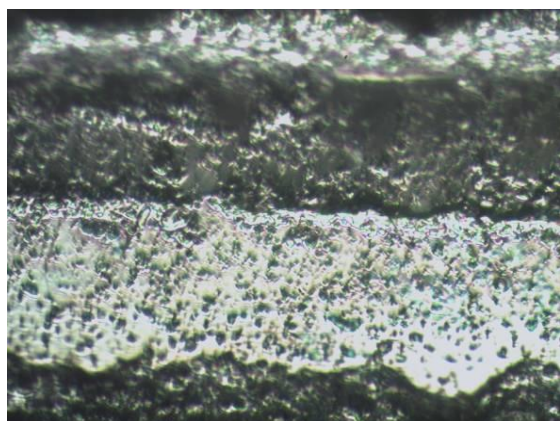
Analizom uticaja tvrdoće na vrednost kritičnih sila pri kojima dolazi do razaranja prevlake nisu uočene značajnije promene u zavisnosti od tvrdoće. Tvrdoće ispitivanih uzoraka je bila u intervalu od 21- 40 HRC. Da bi se utvrdilo postojanje uticaja tvrdoće podloge na veličine kritične sile L_c potrebna bi bila ispitivanja u širem opsegu tvrdoća.

Ako se posmatra zavisnost kritičnih sila L_c od hrapavosti podloge zapaža se da se da sa povećanjem hrapavosti u posmatranom intervalu dolazi do pada vrednosti kritičnih sila L_c , slika 3. Pri ovim ispitivanjima nije uočen uticaj debljine prevlake na vrednost kritičnih sila pri kojima dolazi do razaranja prevlake.

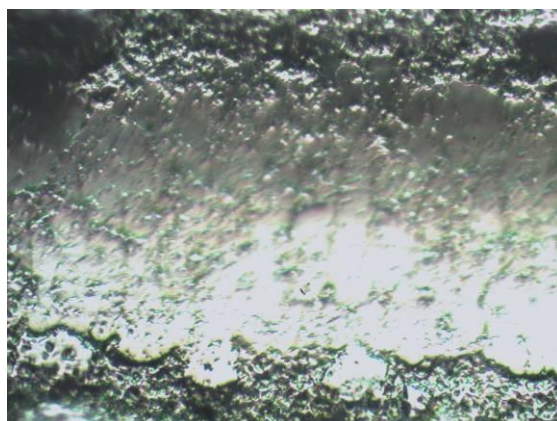
Na slici 4 prikazan je Scratch test dijagram za uzorak broj 7. Karakteristike podloge i debljina prevlake dati su u tabeli 4. Na dijagramu se uočavaju karakteristični delovi i područja u kojima dolazi do značajnije promene vrednosti koeficijenta trenja. Položaj ovih područja su locirana korišćenjem mikroskopa, odgovaraju nastanku razaranja prevlaka, za njih su snimljene fotografije izgleda površine scratch traga i određene kritične sile L_c . Na slikama 5a) do 5h) su prikazane fotografije sa karakterističnim mestima razaranja prevlake.



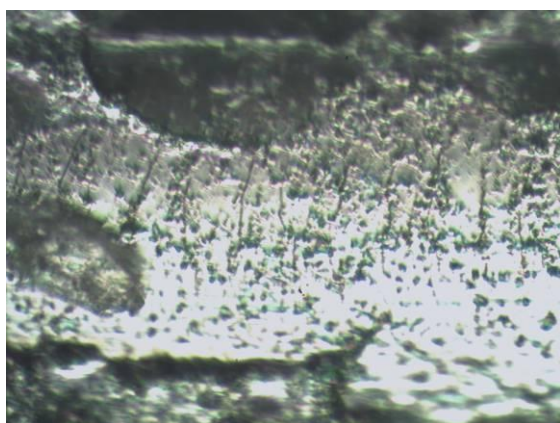
Slika 4. Scratch dijagram za uzorak broj 7



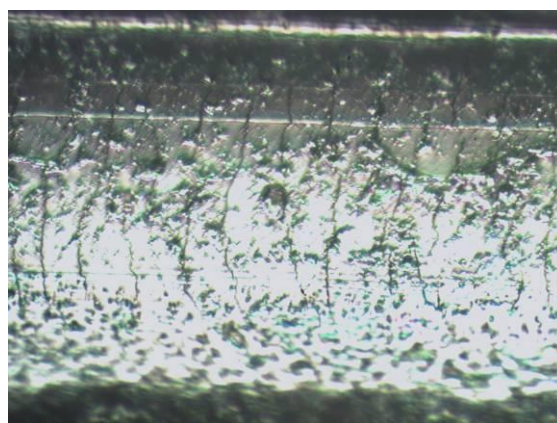
5a)



5b)



5c)

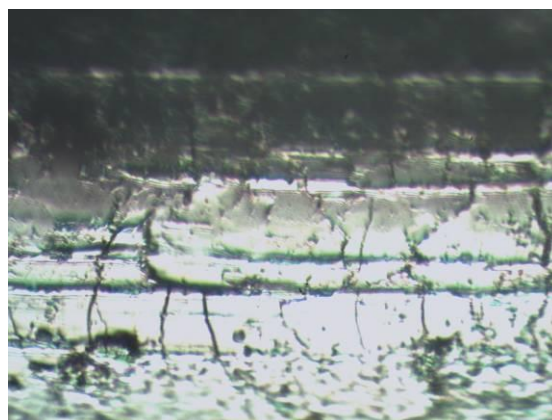


5d)

Na slikama 5a) i 5b) se vidi početak kontakta igle Scratch testera sa površinom. Pri tome dolazi do odnošenja hroma sa vrhova neravnina ili njegovog utiskivanja u površinu uzorka. Slikama 5c) i 5d), odgovara položaju b na dijagramu na slici 4, gde se uočava značajniji porast koeficijenta trenja i pojava prvih prskotina po prevlaci koje odgovaraju sili L_{c1} .

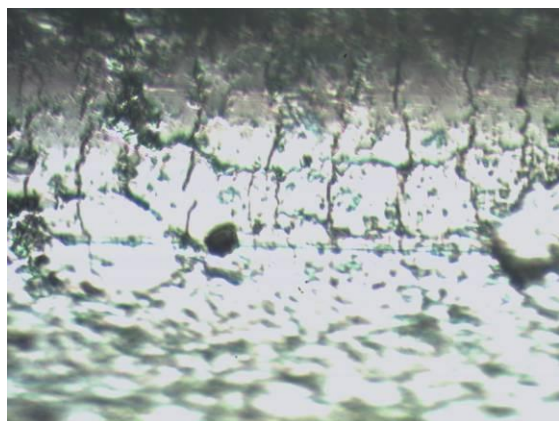


5e)



5f)

Sa slika 5e) i 5f) se vidi da u ovom slučaju dolazi do značajnijeg odnošenja prevlake hroma i zagrebavanja vrha neravnine veće zapremine. Koeficijent trenja raste i dolazi do nastanka bočnih prskotina na prevlaci koje odgovaraju sili L_{c2} .



5g)



5h)

Slika 5. Scratch test na uzorku broj 7

Slike 5g) i 5h) odgovaraju položaju d na dijagramu (slika 4) gde se jasno vide prskotine prevlake po celoj površini traga igle, koje odgovaraju sili L_{c3} . Početak oštećenja i pucanja prevlake vidi se sa slike 5f), a potpuno odnošenje prevlake sa podloge prikazano je na slikama 5g) i 5h).

Nezavisno od korišćenih tehnoloških parametara taloženja prijanjanje prevlake za osnovni metal bilo je dobro, kao i međusobno prijanjanje između samih slojeva.

4. ZAKLJUČAK

Prevlake hroma taložene su u programiranom režimu jednosmerne struje iz hromatno-sulfatnog elektrolita na temperaturi od 50°C . Prevlake su sjajne sa jasno izraženim ivičnim efektom. Ispitivane prevlake su istaložene na uzorcima sa različitom topografijom i tvrdoćom. Prijanjanje prevlaka hroma za osnovni metal, podlogu, je zadovoljavajuće, što potvrđuje valjanost postavljenog programiranog modela taloženja prevlaka hroma. Realizovanim ispitivanjima dobijeni su rezultati koji pokazuju da sa porastom hrapavosti površine podloge opada kritična sila L_C [13]. Rezultati istraživanja promene topografije površine su pokazali da nanošenjem prevlake dolazi do značajne promene topografije i da su radi uspostavljanja odgovarajućih zavisnosti potrebna veoma obimna istraživanja. Uočljiv je primetan trend rasta hrapavosti površine sa produženjem vremena taloženja odnosno, sa porastom debljine prevlake, dolazi do porasta hrapavosti, a što je u skladu sa literaturnim navodima [14, 15].

Realizovana ispitivanja i dobijeni rezultati ukazuju na postojanje zavisnosti između parametara stanja

podloge za taloženje prevlaka i karakteristika prevlaka. Uspostavljanje korelativnih veza je moguće realizacijom znatno većeg broja eksperimenata..

6. LITERATURA

- [1] Đorđević S., Maksimović M., Pavlović M., Popov K.: *Galvanotehnika*, Tehnička knjiga, Beograd, 1998,
- [2] Bayramoglu M., Onat B., Geren N.: *Statistical optimization of Process Parameters to obtain Maximum thickness and Brightness in chromium Plating*, J. of Materials Process-ing Technology, 2008,
- [3] Newby K. R.: *Functional chromium Plating*, Metal Finishing, 105 (10), 182,2007,
- [4] Грилихес Я. С., Тихонов И. К.: *Электrolитические и химические покрытия*, Химия, Ленинград, 1990,
- [5] Sully A., Brandis E.: *Chromium*, Plenum Press, New York. 1987,
- [6] N. Martyak, K. Newby, J. Mc Caskie, *Investigation of Wear in Electrodeposited Chromium Coatings*, Interfinish 96, 14th World Congress "Exposition International Convention Centre Birmingham UK, 1996,
- [7] N. V. Mandich, *Practical Problems in Bright and Hard Chromium Electroplating*, Metal Finishing, 6, 1999,
- [8] Зинченко В. М.: *Технологическая наследственность при изготовлении деталей*, Технология металлов, № 5, 2007,
- [9] Ящерицын П. И.: *Технологическое наследование эксплуатационных параметров деталей машин*, Справочник, Инженерный журнал, № 9, 2004,
- [10] K. Bewilogua, G. Brauer, A. Dietz, J. Gaebler, G. Goch, B. Karpuschewski, B. Szyszka: *Surface technology for automotive Engineering*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58, 2009,
- [11] S. J. Bull: *Can Scratch testing Be used as a Model for the abrasive Wear of Hard coatings*, Wear, 412,1999,
- [12] J. von Stebut: *Multi-mode Scratch testing – an European Standards*, Measurements and testing Study. Surface and Coatings Technology, 200, 2005,
- [13] Zivic F., Babic M., Adamovic D., Mitrovic S., Todorovic P., Favaro G., Pantic M.: *Influence of the surface roughness on adhesion of Chrome coatings on alloy tool steel x165crmov12*, Journal of the Balkan Tribological Association Vol. 18, No 2, 2012,
- [14] Jørgensen O., Horsewell A., Sørensen B.F., Leisner P.: *The cracking and spalling of multilayered chromium coatings*, Acta Metallur Mater., 43, 1995,
- [15] Popov K., Pavlović M., Pavlović Lj., Čekerevac M., Remović G. : *"Electrode surface coarsening in pulsating overpotential copper electrodeposition"*, Surf.Coat.Technol., 34, 1988.

Jovanović, D., Nedić, B.

SCRATCH TESTING OF Cr COATING SURFACES

Abstract: Most studies of Cr coatings focuses on the characterization of coatings and their links to the basic material, while very little is known about the effects of substrate on the characteristics of the coating. Surface finish has a great influence on determination of the physical and mechanical properties and structure of the surface layer. This paper presents the preliminary results scratch testing of Cr coating. The research was performed with samples of different hardness, different previous grinding and different thickness Cr coatings.

Key words: Cr coating, galvanic coating, scratch test, adhesion testing



Karabegović, I., Dolećak, V., Mićević, D.¹⁾

ULOGA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESIMA ZAVARIVANJA

Rezime

U radu je analizirana uloga industrijskih robota u proizvodnim procesima zavarivanja. Analizirana je godišnja primjena industrijskih robota i ukupna primjena industrijskih u Svijetu od 2009. godine do 2013. godine. Prikazana je uporedna analiza primjene industrijskih robota u svim procesima zavarivanja u Svijetu i kontinentima. Izvršena je analiza primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja kao što su: elektrolučno zavarivanje, tačkasto zavarivanje, lasersko zavarivanje, drugi procesi zavarivanja u koje ubrajamo ultrazvučnog zavarivanja, zavarivanje plin, zavarivanje plazmom te lemljenje u Svijetu, u onim zemljama Svijeta pojedinačno gdje je najveća primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja. Prikazan je trend primjene industrijskih robota onih zemalja koje u zadnjim godinama imaju jako visok rast primjene. Na kraju rada dati su zaključci u kojima se obrazlaže zašto je uloga industrijskih robota jako važna u procesima zavarivanja, i u kojim procesima zavarivanja kao i industrijskim granama je zastupljenost industrijskih robota najveća.

Ključne reči: robotika, industrijski robot, proces zavarivanja

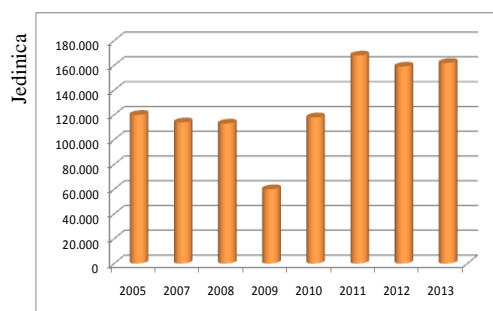
1. UVOD

Tehnologije zavarivanja zauzimaju značajno mjesto u mašingradnji, brodogradnji i procesnoj industriji. Istorijski gledano, neki postupci zavarivanja su stari koliko i otkriće metala (kovačko zavarivanje), međutim razvoj savremenih postupaka zavarivanja karakteriše kraj 19-tog i početak 20-tog vijeka. Prva uspješna primjena elektrolučnog zavarivanja netopljivom grafitnom elektrodom evidentirana je 1881. godine u Francuskoj. Specijalni postupci zavarivanja primjenjuju se u praksi, uglavnom poslije II Svjetskog rata razvijajući se u skladu sa potrebama i tehnološkim razvojem [1,2,3,4,8]. Ubrzani razvoj automobilske industrije i novih tehnologija ima direktan utjecaj na razvoj novih naučnih disciplina iz oblasti zavarivanja materijala. Pojava i razvoj novih materijala sa jedne strane, kao i razvoj inteligentnih sistema sa druge strane, rezultirali su modifikacijom postojećih postupaka zavarivanja i uvođenjem novih tehnika zavarivanja. Modifikacija postojećih postupaka zavarivanja, uglavnom je bazirana na izvore i uređaje za zavarivanje dajući tako nove tehnike zavarivanja sa kojima se pored tehnološkog razvoja uspješno zadovoljeni ekološki i zdravstveni aspekti zavarivanja. Primjene industrijskih robota u proizvodnim procesima zavarivanja raznih industrija se iz godine u godinu povećava. Razloga za ovakav trend povećanja ima dosta, a jedan od glavnih razloga je razvoj senzorske i informacione tehnologije koje se implementiraju u robotskim tehnologijama. Drugih uslova za stalnih trend povećanja ima mnogo kao što su: stalna automatizacija i modernizacija proizvodni procesa, zaštita radnika od teških fizičkih poslova, zaštita radnika od rada u neuslovnim prostorima, postizanje ovećeg kvaliteta, veće produktivnosti, niske cijene rada, itd. Automatizacija postupaka zavarivanja, naročito u automobilskoj industriji, dovela je do njihove integracije sa industrijskim robotima, te primjene inteligentnih sistema u procesima zavarivanja. Industrijski roboti se koriste za elektrolučno zavarivanje, tačkasto zavarivanje, zavarivanje laserom, lemljenje i druge vrste zavarivanja kao što su: ultrazvučno zavarivanje, zavarivanje plinom i zavarivanje plazmom.

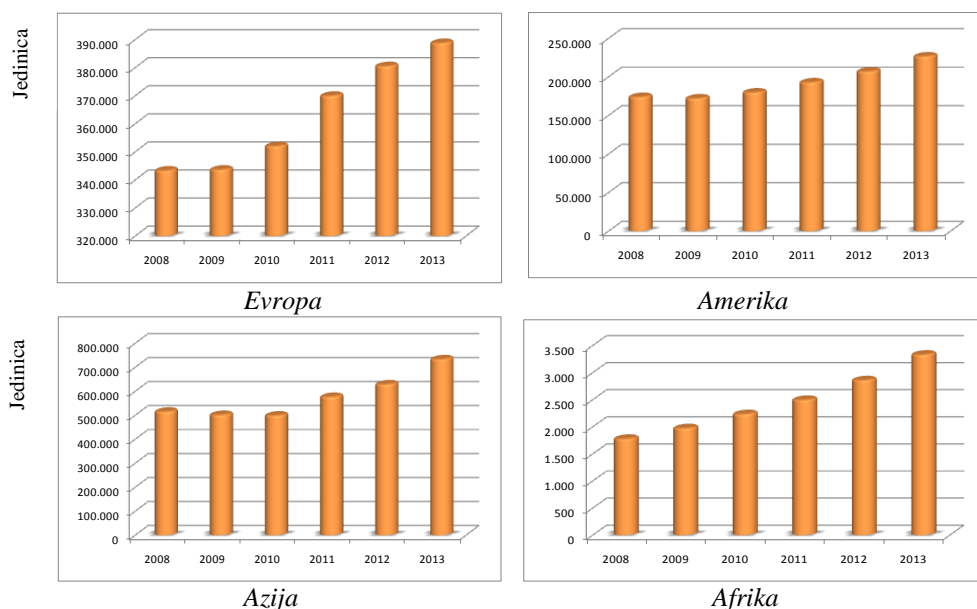
2. DISIMINACIJA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U SVIJETU

Primjena industrijskih prikazana je na slici 1. u Svijetu u periodu 2009 godine do 2013 godine. Prikazani podatci koji su navedeni u slikama i tabelama preuzeti su od International Federation of Robotics (IFR), podataka Ekonomske komisije pri UN za Evropu (UNECE) i Organizacije za ekonomsku kooperaciju i razvoj (OECD), kao i iz literature [1,2,3,5,6,7,8].

¹⁾ Prof. Dr.sc. Isak Karabegović, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet, (isak1910@hotmail.com), Akademik Vlatko Dolećak, Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, (vdolecek@gmail.com)
V. Prof. Dr.sc. Dušan Mićević, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet Beograd, (micevic@grf.bg.ac.rs)



Slika 1. Primjena industrijskih robota u svijetu na godišnjem nivou u periodu 2005-2013. godine



Slika 2. Ukupna primjena industrijskih robota po kontinentima za period 2008-2013. godine

Kao što vidimo sa slike 1. primjena industrijskih robota u Svijetu na godišnjem nivou u periodu 2008-2010. godine se kretala između 100.000 - 120.000 jedinica robota, gdje možemo primjetiti da je primjena robota u 2009. godini iznosila oko 60.000 jedinica zbog ekonomske i industrijske krize koja je bila u toj godini u Svijetu. U zadnje tri godine 2011 – 2013. primjena industrijskih robota ima rastući trend tako da se godišnja primjena robota kreće oko 160.000 jedinica. U koliko pogledamo ukupnu primjenu industrijskih robota po kontinentima vidimo da je na svakom kontinentu rastući trend iz godine u godinu. Na prvom mjestu je Azija sa primjenom industrijskih robota oko 700.000 jedinica, na drugom mjestu je Evropa sa oko 380.000 jedinica, zatim Amerika sa oko 220.000 jedinica i posljednja Afrika sa oko 3.200 jedinica industrijskih robota.

3.PRIMJENA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESU ZAVARIVANJA

Izvršena je analiza ukupne primjene industrijskih robota u Svijetu u slijedećim procesima zavarivanja: elektrolučno zavarivanje, tačkasto zavarivanje, zavarivanje laserom, lemljenje i druge vrste zavarivanja, te jedinične vrijednosti primjene su prikazane u tabeli 1. [2,3,4,5]

Proc.zav./Godina	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Elektrolučno zav.	129.748	128.728	134.200	138.400	142.805	145.971
Tačkasto zavarivanje	166.819	161.918	164.280	169.580	173.730	178.030
Zavarivanje laserom	1.987	2.022	2.186	2.776	2.982	3.186
Ostali procesi zav.	3.458	3.616	3.564	3.950	4.180	4.290
Proces lemljenja	2.987	2.844	2.509	2.720	2.845	2.950
Neodređeno	1.966	1.400	1.931	2.036	2.150	2.260
TOTAL Σ	306.975	300.528	308.670	319.460	328.280	336.175

Analizom tabele 1. možemo zaključiti da je na prvom mjestu po broju primijenjenih robota proces tačkastog zavarivanja i on se kreće između 160.000 – 180.000 jedinica robota u periodu od 2008. godine do 2013. godine. Na drugom mjestu je proces elektrolučnog zavarivanja po broju primijenjenih industrijskih robota koji se kreće između 120.000 – 146.000 jedinica u istom periodu 2008-2013. godine. Na trećem mjestu po primjeni industrijskih robota je laserski proces zavarivanja koji se kreće između 1.500 - 3.500 jedinica. Ovdje možemo uočiti da je primjena industrijskih robota u procesu lemljenja veća nego u procesu laserskog zavarivanja i kreće se oko 3.000 jedinica. Ovakav trend primjene industrijskih robota u procesima zavarivanja je očekivani jer se tačkasto zavarivanje najviše primjenjuje u proizvodnji karoserija automobila. Kao što je poznato trend proizvodnje automobila i teretnih vozila se iz godine u godinu povećava, tako na primjer u 1999. godini proizvedeno je oko 40 miliona automobila i oko 16 miliona teretnih vozila što daje ukupnu cifru oko 56 miliona vozila. U 2012. godini proizvedeno je oko 63 miliona automobila i oko 21 miliona teretnih vozila što ukupno proizvodnja u 2012.god. iznosi oko 84 miliona vozila. Dolazimo do zaključka da se za 13 godina proizvodnja vozila povećala za 28 miliona jedinica. Ovo nas navodi na činjenicu da je opravdana najveća primjena industrijskih robota u tačkastom procesu zavarivanja.

Kontinent / Godina	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Evropa	97.071	94.519	96.771	100.181	102.925	106.125
Amerika	73.683	70.961	70.534	72.994	74.947	77.198
Azija/Australija	135.377	134.137	140.425	145.299	149.419	153.585
Afrika	848	911	940	986	989	901
TOTAL Σ	306.975	300.528	308.670	319.460	328.280	336.175

Na osnovu tabele 2. gdje je prikazana ukupna primjena industrijskih robota u svim procesima zavarivanja po kontinentima, možemo zaključiti da po primjeni industrijskih robota u procesima zavarivanja na prvo mjesto pripada Aziji/Australiji gdje se u periodu 2008 – 2013 godine primjena povećala iz godine u godinu od 135.377 do 153.585 jedinica robota, što predstavlja prosjek godišnji oko 145.000 jedinica. Na drugom mjestu po primjeni industrijskih robota u procesu zavarivanja je kontinent Evropa gdje se u zadnjih šest godina u prosjeku primjenjuje oko 100.000 jedinica, dok treće mjesto po primjeni robota u procesima zavarivanja zauzima kontinent Amerika gdje je u periodu 2008 – 2013. ukupno primjenjeno na godišnjem nivou oko 72.000 jedinica. Na zadnjem mjestu je kontinent Afrika gdje je jako mala primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja u odnosu na druge kontinente i ona se kreće na godišnjem nivou oko 900 jedinica. Logičan je slijed primjene industrijskih robota po kontinentima jer oni kontinenti gdje se proizvodi najviše vozila tu je i primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja najveća. Izvršimo analizu primjene industrijskih robota u procesima zavarivanja u zemljama u Svijetu gdje je razvijena automobilska industrija, a to su sljedeće zemlje: Sjeverna Amerika (USA, Kanada, Meksiko), Japan, Republika Koreja, Kina, Tajland, Tajvan, Njemačka, Italija, Francuska, Španija. U sljedećoj tabeli 3. prikazana je godišnja primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja u nabrojanim zemljama [1,2,3,4,5].

ZEMLJE*/GOD.	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Kina	3.634	2.695	8.000	8.224	8.454	8.691
Japan	10.118	2.920	5.609	5.766	5.928	6.094
Njemačka	3.500	1.400	4.100	4.244	4.394	4.547
Sjeverna Amerika (USA, Kanada, Meksiko)	5.403	2.783	3.883	4.015	4.152	4.293
Republika Koreja	3.675	1.823	3.800	3.906	4.015	4.128
Tajland	547	458	1.449	1.490	1.532	1.575
Italija	1.050	480	800	828	857	886
Tajvan	547	258	605	622	639	658
Španija	730	430	580	604	625	670
Francuska	800	250	550	570	589	610

*U zadnje tri godine uzimata je prosječna primjena robota u procesu zavarivanja u odnosu na godišnju primjenu

U koliko izvršimo analizu tabele 3. gdje je prikazana primjena industrijskih robota u svim procesima zavarivanja u zemljama u svijetu gdje je razvijena automobilska industrija uočavamo da je do 2009. godine po primjeni robota na prvom mjestu bio Japan, a od 2009 – 2013. godine to mjesto je preuzela Kina, tako da je godišnja primjena industrijskih robota u procesu zavarivanja u toj zemlji najveća. U zadnje četiri godine prosječna primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja u Kini se kreće oko 8.400 jedinica svake godine. Poslije Kine na drugo mjesto dolazi Japan tako što je njegova primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja u zadnje četiri godine oko 5.800 jedinica robota po godini. Na treće mjesto je Njemačka u svijetu sa godišnjom primjenom oko 4.300 jedinica robota u zadnje četiri godine. Sjeverna Amerika (USA, Kanada, Meksiko) su na četvrtom mjestu po primjeni industrijskih robota u procesima zavarivanja u zadnje četiri godine sa oko 4.000 jedinica po godini, zatim na petom mjestu dolazi Republika Koreja sa prosječnom godišnjom primjenom oko 3.900 jedinica robota. Ovih pet zemalja u svijetu su vodeće po primjeni

industrijskih robota u procesima zavarivanja, jer se svake godine u ovim zemljama primjeni na godišnjem nivou oko 3.900 – 4.800 jedinica robota. Interesna je primjena industrijskih robota u Tajlandu jer se primjena kreće na godišnjem nivou kreće oko 1.500 jedinica robota u procese zavarivanja. U Italiji primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja kreće se oko 830 jedinica na godišnjem nivou. Zadnje tri zemlje Tajvan, Špania i Francuska kada je primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja je skoro ujednačena i ona se kreće oko 600 jedinica robota. Na osnovu tabele 3. Možemo da donesemo zaključak da je primjena industrijskih robota u procesima zavarivanja najveća u zemljama Azije gdje prednjači Kina i Japan. Moramo konstatirati da vodeću ulogu u primjeni robota u procesima zavarivanja preuzima zemlja Kina i ako je to do 2008 godine bio Japan. Dolazimo do zaključka da Kina razvija automobilsku industriju, i to je razlog zašto je ona na prvom jestu po primjeni robota u procesima zavarivanja, jer se u automobilskoj industriji koriste roboti za zavarivanje karoserija automobila. Sama činjenica da se za jednu karoseriju automobila koristi oko 7.000 tačaka za zavarivanje navodi nas na ovakav zaključak.

3. ZAKLJUČAK

Sve veća modernizacija i automatizacija proizvodnih procesa dovodi do sve veće primjene industrijskih robota, pa tako i u procesima zavarivanja. U svijetu se u 2013, godini primjenilo ukupno oko 1.450.000 jedinica industrijskih robota, od toga samo u procesima zavarivanja oko 335.000 jedinica robota. Na prvom mjestu po primjeni industrijskih robota je kontinent Azija/Australija, zatim na drugom mjestu Evropa i na trećem mjestu Amerika, dok je u Africi primjena zanemariva u odnosu na ova tri kontinenta što pokazuje tabela 2. Primjena robota u procesima zavarivanja: elektrolučno zavarivanje, tačkasto zavarivanje, zavarivanje laserom, lemljenje i druge vrste zavarivanja predstavljena je u tabeli 1. gdje je na prvom mjestu proces tačkastog zavarivanja što je i logično jer se proces tačkastog zavarivanja najviše koristi u proizvodnji karoserija automobila gdje su industrijski roboti najzastupljeniji. Na drugom mjestu je proces elektrolučnog zavarivanja, tako da ta dva procesa može se reći osnovana za primjenu industrijskih robota. Ostali procesi zavarivanja primjenjuju daleko manje robota u odnosu na tačkasti i elektrolučno zavarivanje. U koliko analiziramo primjenu industrijskih robota u procesima zavarivanja na prvo mjestu je Kina u zadnje četiri godine koja je naglo počela da razvija automobilsku industriju, dok je do sada to bio Japan sve do 2008. godine. Na kraju da zaključimo da industrijski roboti zauzimaju važnu ulogu u procesima zavarivanja, te se njihova primjena povećava razvojem senzorske, informacione i robotske tehnologije i trend povećanja u budućnosti će biti u uzlaznoj putanji.

4. LITERATURA

- [1] Karabegović I., Karabegović, E., Mahmić, M., Husak, E.: *Comparative Analysis of Robot Application in Welding Process at Continents Europe and Asia/Australia*, Dan varilne tehnike, industrijske robotike in transporta v industriji, Fakultet za strojništvo, Univerzitet Maribor, DVTIRT 2013, 30.05.2013. Lendava, Slovenia, 2013. (ISBN 978-961-248-393-7), pp.157-164, 2013.
- [2] Karabegović I., Karabegović, E., Pašić, S., Isić, S.: *World wide Trend of the Industrial Robot Applications in the Welding Processes*, International Journal of Engineering & Technology, 1112001-3737 IJET-IJENS vol: 12 N₀: 01, february 2012, IJENS, Pakistan, (ISSN 2077-1185), pp 69-74, 2012.
- [3] Doleček V, Karabegović I.: *Roboti u industriji*, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2008.
- [4] Doleček V, Karabegović I.: *Robotika*, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, 2002.
- [5] World Robotics 2010, United Nations, New York and Geneva, 2010.
- [6] World Robotics 2008, United Nations, New York and Geneva, 2008.
- [7] World Robotics 2006, United Nations, New York and Geneva, 2006.
- [8] Bakšys B., Fedaravičius A., *Robotu Technika*, Kaunas Technologija, Kaunas, 2004.

Karabegović, I., Doleček, V., Mićević, D.

THE ROLE OF INDUSTRIAL ROBOTS IN WELDING PROCESSES

Abstract: *In this paper the role of industrial robots in welding process was analyzed. An annual and total installation of industrial robots in the world for period 2009 to 2013 was analyzed. Comparative analysis of industrial robot application in all welding processes in the world and by continents is presented. Application of industrial robots in welding processes such as: arc welding, spot welding, laser welding, ultrasonic welding, plasma welding and soldering were analyzed for the world. Also analysis is presented for the countries where industrial robot applications in welding processes are significant. Trend of industrial robot applications in the countries with significant increasing of installations in last years is presented. At the end of the paper conclusions are given with elaboration why application of industrial robots in welding process is important. Also welding processes and industrial branches with the higher industrial robot installations are given.*

Key words: *robotics, industrial robot, welding process.*



Kvrgić, V, Dimić, Z, Cvijanović V, Mitrović, S. ¹⁾

ALGORITAM ZA POVEĆANJE TAČNOSTI PETOOSNIH MAŠINA ALATKI ²⁾

Rezime

Dat je novi algoritam za smanjenje uticaja geometrijskih, termičkih i kinematskih grešaka i grešaka nastalih usled nedovoljne krutosti sklopova petoosnih mašina alatki na zadate položaje reznog alata. Algoritam je baziran na izračunavanju matrice greške alata. Ovde se sve ugaone greške članova i sklopova mašine posmatraju kao infinitezimalne rotacije. Matrica greške je funkcija zadatih položaja komponenata mašine i grešaka ovih položaja. Da bi se ispravila greška tri translatorne i dve rotacione koordinate položaja alata, matrica njenog zadatog položaja se u svakom periodu interpolacije množi inverznom matricom greške položaja alata. Ovaj algoritam se može implementirati i u CNC sistem i u postprocesor.

Ključne reči: Kompenzacija greške; Petoosne mašine alatke; Upravljački algoritam

1. UVOD

U svetu se danas vrše mnoga istraživanja radi povećanja tačnosti obrade mašina alatki [1-6], što je tema i ovog rada. Geometrijske greške nastaju usled netačne obrade ili montaže delova mašine alatke ili usled pohabanosti njihovih uležištenja i linearnih vodica [7,8]. Utiču na paralelnost i upravnost elemenata mašine i na njihove položaje u odnosu na uležištenja. Imaju naveći uticaj na netačnost mašina. Sistematske su, ponovljive i vremenski nepromenljive, tako da se mogu izmeriti i memorisati. Kinematske greške nastaju usled netačnih pozicioniranja delova mašina prouzrokovanih netačnostima i zazorima prenosnika i zavojnih vretena [7]. Njihov uticaj se smanjuje direktnim mernim sistemima. Termičke greške nastaju usled promena temperature u radnom pogonu i lokalnog zagrevanja delova mašine usled zagrevanja motora i prenosnika mašine [8]. Izazivaju termičke deformacije delova mašina. Mogu biti merene ili procenjivane na osnovu merenja temperatura sklopova mašina. Greške nastale usled nedovoljne krutosti strukturnih delova mašine mogu biti izmerene i memorisane [7]. One zavise od težina ovih komponenti i sila rezanja koje izazivaju njihove elastične deformacije. Greške nastale usled deformacija reznog alata nisu predmet ovog rada.

U radu su članovi mašine i njihovi koordinatni sistemi označeni Denavit-Hartenbergovim parametrima (D-H). Pozicije i orijentacije članova mašine su reprezentovane homogenim transformacionim matricama. Da bi se dobili stvarni položaji alata u odnosu na obradak, greške delova mašine uzete su u obzir dodatnim geometrijskim parametrima ovih matrica. Matrica greške je dobijena na osnovu razlike zadatog i stvarnog položaja alata na osnovu aproksimacija malih ugaonih grešaka [1,2]. Služi za izračunavanje korigovane matrice položaja alata koje se vrši u svakom periodu interpolacije. Ovu matricu koristi inverzna kinematika radi izračunavanja uzastopnih položaja članova mašine potrebnih za ostvarivanje zadate putanje alata.

2. UPRAVLJAČKI ALGORITAM ZA POVEĆANJE TAČNOSTI PETOOSNIH MAŠINA ALATKI

2.1 Programiranje petoosnih mašina alatki

Petoosna obrada se programira CAM sistemom ili ručno, G kodom [7], u koordinatnom sistemu obratka. G kodom se zadaje pozicija X , Y i Z koordinata alata i njegova orijentacija definisana sa dva od tri Ojlerova

¹⁾ Vladimir Kvrgić (vladimir.kvrgic@li.rs), Zoran Dimić (zoran.dimic@li.rs), Vojkan Cvijanović (vojkan.cvijanovic@li.rs), Stefan Mitrović (stefan.mitrovic@li.rs) Lola Institut, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd

²⁾ Ovaj rad je podržan od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS kroz projekat "Istraživanje i razvoj nove generacije vertikalnih 5-osnih strugarskih centara" (2008-2010), br. 14026.

ili RPY ugla A , B i C ; ova dva ugla će biti označena sa α i β . Orijehtacija alata može biti zadata i vektorom pravca, koji je usmeren od vrha ka nosaču alata. Ako definišemo vektor prilaska obratku, koji je usmeren u z_r pravcu, sa $\mathbf{a}=a_x\mathbf{i}+a_y\mathbf{j}+a_z\mathbf{k}$, komponente vektora pravca alata su: $-a_x$, $-a_y$ i $-a_z$. \mathbf{i} , \mathbf{j} i \mathbf{k} su jedinični vektori duž osa osnove mašine. Izlaz iz CAM sistema je putanja alata definisana položajima alata (CL-cutter locations).

Putanja alata je data u CL fajlu podataka koji definiše koordinate alata X , Y i Z i vektor pravca $-a_x$, $-a_y$ i $-a_z$, u odnosu na koordinate obratka. Putanja između dve CL tačke je prava linija.

Korak koji sledi generisanje putanje alata je postprocesiranje, gde se program prevodi tako da bude čitljiv za određenu mašinu. Postprocesor konvertuje CL komande kretanja iz CL fajla podataka u komande kretanja NC programa (u G kod). Postprocesiran G-kod je ulaz u sledeći korak gde se putanja alata konvertuje u sekvencu uzastopnih pozicija osa mašina koje daju zadate položaje alata (inverzna kinematika).

2.2 Algoritam kompenzacije greške

U radu je 4×4 homogena matrica koja reprezentuje poziciju i orijentaciju koordinata x_m, y_m, z_m u odnosu na koordinate x_n, y_n, z_n označena sa ${}^n\mathbf{T}_m$. Ova matrica kada označava odnos dva uzastopna člana je označena sa \mathbf{A}_i , gde je $\mathbf{A}_i=\mathbf{A}(i-1,i)$.

Ako su izlaz iz sistema programiranja tri translatorne komponente i komponente vektora pravca, one treba da budu preračunate u dve ugaone komponente (deo direktne kinematike). Zatim se ugaone komponente konvertuju u matricu orijentacije alata (deo inverzne kinematike). Tako se dobija matrica $\mathbf{T}_{Td}=f(X_d, Y_d, Z_d, \alpha_d, \beta_d)$ željenog položaja i orijentacije alata u odnosu na obradak.

Na sl. 1 je matrica stvarne pozicije i orijentacije alata (realna mašina) označena sa \mathbf{T}_{Tr} . Matrica položaja alata za slučaj mašine koja nema greške (idealna mašina) je označena sa \mathbf{T}_{Ti} . Ako matricu greške označimo sa \mathbf{E} , matrica stvarnog položaja alata će biti:

$$\mathbf{T}_{Tr} = \mathbf{T}_{Ti}\mathbf{E} \quad (1)$$

Matrica položaja alata je funkcija koordinata članova mašine i grešaka ovih koordinata, dok je matrica položaja alata idealne mašine funkcija koordinata članova mašine. Za vertikalni petoosni strugarski centar, dat u tački 4, ove matrice glase: $\mathbf{T}_{Tr}=\mathbf{A}_{5r}^{-1}\mathbf{A}_{1r}\mathbf{A}_{2r}\mathbf{A}_{3r}\mathbf{A}_{4r}\mathbf{A}_T=f(d_1, d_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots)$ i

$\mathbf{T}_{Ti}=\mathbf{A}_{5i}^{-1}\mathbf{A}_{1i}\mathbf{A}_{2i}\mathbf{A}_{3i}\mathbf{A}_{4i}\mathbf{A}_T=f(d_1, d_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$. Matrica greške ove mašine dobijena iz jednačine 1 glasi:

$$\mathbf{E} = \mathbf{T}_{Ti}^{-1}\mathbf{T}_{Tr} = f(d_1, d_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots) \quad (2)$$

Ova matrica je funkcija koordinata članova mašine i grešaka ovih koordinata.

Radi korekcije greške pozicije i orijentacije alata mi ćemo matricu zadatog položaja i orijentacije alata $\mathbf{T}_{Td}=f(X_d, Y_d, Z_d, \alpha_d, \beta_d)$ pomnožiti sa desne strane inverznom matricom greške \mathbf{E}^{-1} . Tako ćemo dobiti korigovanu matricu željenog položaja alata koja daje tačan položaj alata u odnosu na obradak (sl. 1):

$$\mathbf{T}_{Tc} = \mathbf{T}_{Td}\mathbf{E}^{-1} \quad (3)$$

Da bi se ostvarila tačna zadata putanja alata, inverzna kinematika će u svakom interpolacionom periodu u realnom vremenu koristiti korigovanu matricu željenog položaja alata. Na ovaj način će važiti:

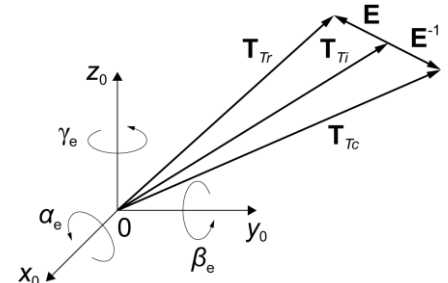
$$\mathbf{T}_{Ti} = \mathbf{T}_{Tc} \quad (4)$$

Radi izračunavanja promenljive matrice greške i korigovane matrice položaja alata \mathbf{T}_{Tc} u svakom periodu interpolacije će se prvo izračunavati matrice \mathbf{T}_{Ti} i \mathbf{T}_{Tr} , kako je to prikazano na slikama 2 i 3.

Sve ugaone greške članova mašine alatke mogu biti posmatrane kao infinitezimalne rotacije. Na taj način za rotaciju α_1 važi $\cos(\alpha_1)=1$ i $\sin(\alpha_1)=\alpha_1$. Ako je i β_1 takva rotacija, važi $\alpha_1\beta_1=0$. Ukoliko zamenimo redosled rotacija, dobićemo identičan rezultat. Ovo znači da su njihove rotacione matrice komutativne:

$$\mathbf{Rot}(x_0, \alpha_1)\mathbf{Rot}(y_0, \beta_1) = \mathbf{Rot}(y_0, \beta_1)\mathbf{Rot}(x_0, \alpha_1) \quad (5)$$

Rotaciona matrica tri infinitezimalna ugla je nezavisna od redosleda rotacija. Rotacija nastala od dve proizvoljne infinitezimalne rotacije je jednostavno predstavljena pomoću algebarske sume pojedinačnih komponenta rotacije oko svake ose. Drugim rečima, infinitezimalne rotacije su aditivne. Tako na primer, infinitezimalne rotacije oko osa x_1, y_1 i z_1 mogu biti predstavljene na sledeći način:

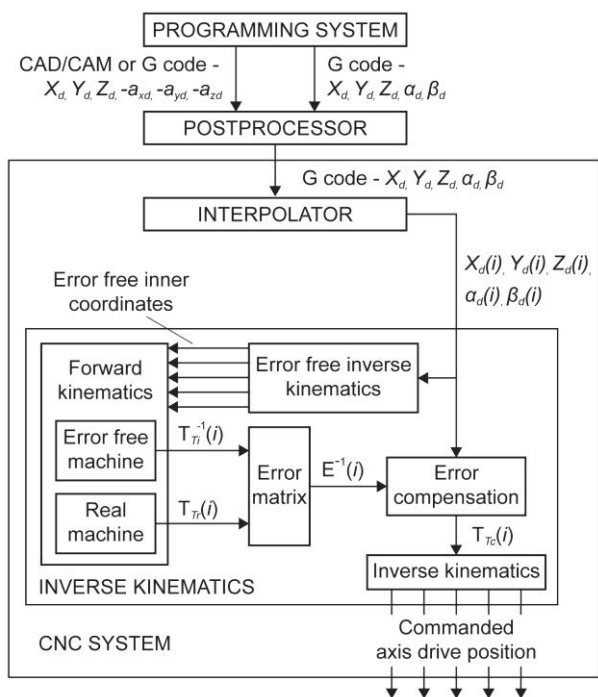


Slika 1. Zavisnost pozicije i orijentacije alata od grešaka članova mašine

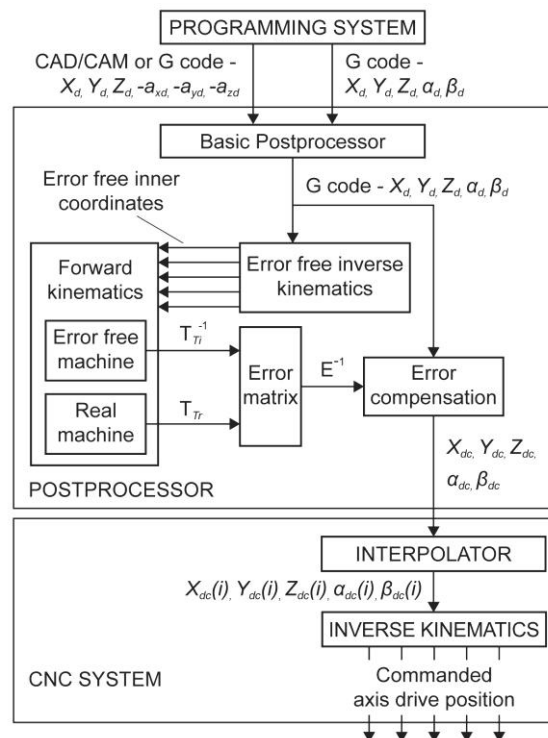
$$\begin{aligned}
& \mathbf{Rot}(x_1, \alpha_1) \mathbf{Rot}(y_1, \beta_1) \mathbf{Rot}(z_1, \gamma_1) \mathbf{Rot}(x_1, \alpha_2) \mathbf{Rot}(y_1, \beta_2) \mathbf{Rot}(z_1, \gamma_2) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_1 & \beta_1 \\ \gamma_1 & 1 & -\alpha_1 \\ -\beta_1 & \alpha_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_2 & \beta_2 \\ \gamma_2 & 1 & -\alpha_2 \\ -\beta_2 & \alpha_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_1 - \gamma_2 & \beta_1 + \beta_2 \\ \gamma_1 + \gamma_2 & 1 & -\alpha_1 - \alpha_2 \\ -\beta_1 - \beta_2 & \alpha_1 + \alpha_2 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \mathbf{Rot}(x_1, \alpha_1 + \alpha_2) \mathbf{Rot}(y_1, \beta_1 + \beta_2) \mathbf{Rot}(z_1, \gamma_1 + \gamma_2)
\end{aligned} \tag{6}$$

Ukoliko sve ugaone greške ortogonalne petoosne mašine alatke posmatramo kao infinitezimalne rotacije, na osnovu jednačina (5) i (6) možemo definisati matricu greške, datu jednačinom (2), na sledeći način:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_e & \beta_e & E_x \\ \gamma_e & 1 & -\alpha_e & E_y \\ -\beta_e & \alpha_e & 1 & E_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_e & -\beta_e & -E_x - \gamma_e E_y + \beta_e E_z \\ -\gamma_e & 1 & \alpha_e & \gamma_e E_x - E_y - \alpha_e E_z \\ \beta_e & -\alpha_e & 1 & -\beta_e E_x + \alpha_e E_y - E_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$



Slika 2. Predloženi sistem upravljanja sa kompenzacijom greške radi povećanja tačnosti petoosnih mašina alatki primenjen u CNC sistemu



Slika 3. Predloženi sistem upravljanja sa kompenzacijom greške radi povećanja tačnosti petoosnih mašina alatki primenjen u postprocesoru

U matrici \mathbf{E} , članovi α_e , β_e i γ_e reprezentuju rotacione greške položaja alata oko osa x_0 , y_0 i x_0 , respektivno, a članovi E_x , E_y i E_z reprezentuju greške pozicije alata u odnosu na ove ose, kako je prikazano na sl. 1. U tački 5 dat je primer koji verifikuje matricu greške \mathbf{E} u obliku datom jednačinom (7). Na osnovu jednačina (3) i (7) korigovana matrica zadate pozicije i orijentacije reznog alata je:

$$\mathbf{T}_{Tc} = \begin{bmatrix} n_{xd} - o_{xd}\gamma_e + a_{xd}\beta_e & o_{xd} + n_{xd}\gamma_e - a_{xd}\alpha_e & a_{xd} - n_{xd}\beta_e + o_{xd}\alpha_e & X_c \\ n_{yd} - o_{yd}\gamma_e + a_{yd}\beta_e & o_{yd} + n_{yd}\gamma_e - a_{yd}\alpha_e & a_{yd} - n_{yd}\beta_e + o_{yd}\alpha_e & Y_c \\ n_{zd} - o_{zd}\gamma_e + a_{zd}\beta_e & o_{zd} + n_{zd}\gamma_e - a_{zd}\alpha_e & a_{zd} - n_{zd}\beta_e + o_{zd}\alpha_e & Z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$X_c = X_d + n_{xd}E_{x1} + o_{xd}E_{y1} + a_{xd}E_{z1}, Y_c = Y_d + n_{yd}E_{x1} + o_{yd}E_{y1} + a_{yd}E_{z1}, Z_c = Z_d + n_{zd}E_{x1} + o_{zd}E_{y1} + a_{zd}E_{z1}$$

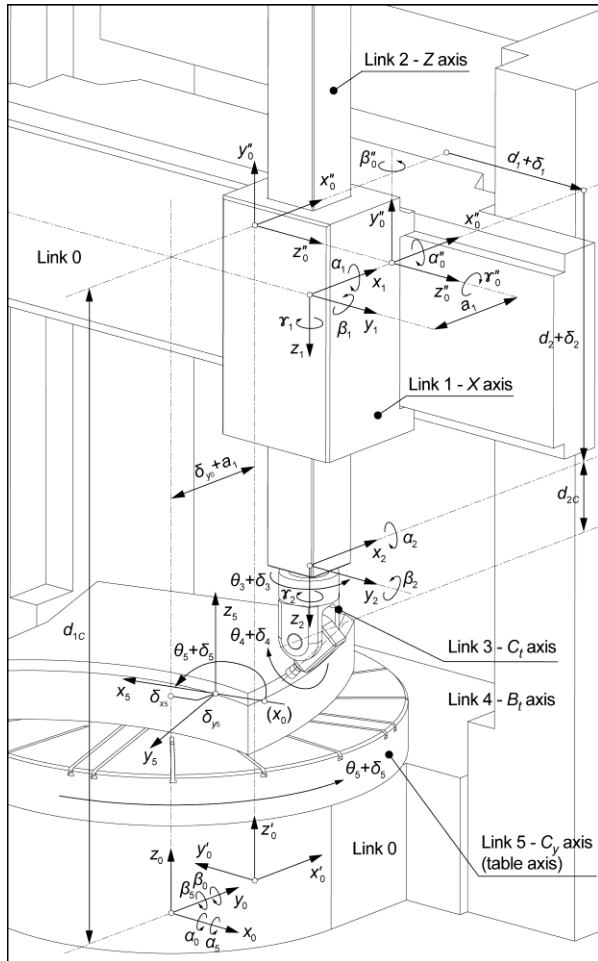
$$E_{x1} = -E_x - \gamma_e E_y + \beta_e E_z, E_{y1} = \gamma_e E_x - E_y - \alpha_e E_z, E_{z1} = -\beta_e E_x + \alpha_e E_y - E_z$$

Predloženi sistem upravljanja sa kompenzacijom greške netačnosti mašina alatki je dat na slikama 2 i 3. Sl. 2 prikazuje ovakav sistem primenjen u okviru CNC sistema. Ovde se vrši kompenzacija položaja alata u svakom interpolacionom periodu, najčešće na 5 do 10 ms. Ovo rešenje daje najbolje rezultate. Ono je primenljivo samo u slučaju kada je softver CNC sistema dostupan. Sl. 3 prikazuje primenu ovog algoritma u okviru postprocesora. Tada se pre interpolacije vrši kompenzacija zadatih položaja alata. Povećanje tačnosti ovde zavisi od gustine zadatih položaja alata. Kada je programirani put zadat CAM sistemom, odnosno CL

fajlom podataka, rastojanje između zadatih uzastopnih položaja alata je dovoljno malo, tako da se i na taj način može ostvariti kvalitetna kompenzacija greške netačnosti mašine.

3. OPIS GREŠAKA PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG CENTRA

U radu je predloženim algoritmom izvršena kompenzacija grešaka petoosnog strugarskog centra opisanog u [3]. Kod njega radni sto postaje osa C_y . Zakretanje ove ose zajedno sa pomeranjem reznog alata po X osi po određenom zakonu daje kretanje koje odgovara kretanju duž ose Y . Mašina ima dvoosnu glavu za glodanje i bušenje. Tako je dobijena mašina sa dve translatorne i tri rotacione ose (odnosno sa osama C_y , X , Z , B i C). Programiranje petoosnog glodanja ili bušenja je identično programiranju ovakvih obrada na petoosnoj portalnoj glodalici kod koje se radni komad ne pomera.



Slika 4. Koordinatni sistemi članova vertikalnog petoosnog strugarskog centra

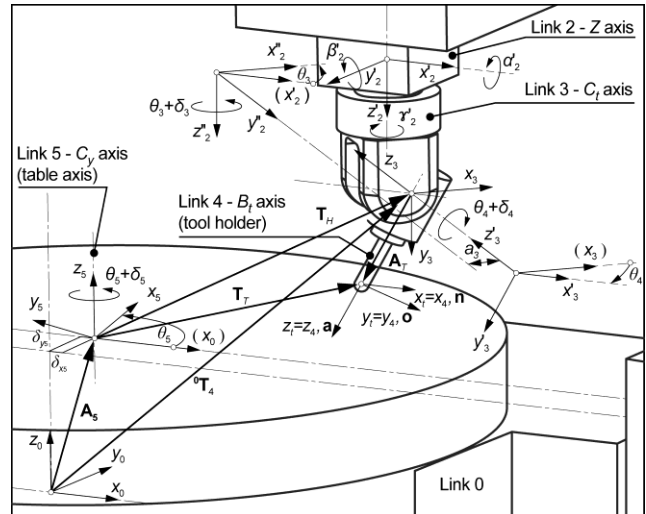


Tabla 1.

D-H parametri članova vertikalnog petoosnog strugarskog centra.

Član	Promenljiva	a [mm]	d [mm]	α [°]	θ [°]
1-X	$d_1=d_x$	a_1	d_{1c}	$\alpha_{1c}=90,$ $\alpha'_{1c}=90$	$\theta_{1c}=90$
2-Z	$d_2=d_z$	0	d_{2c}	0	0
3-C	$(-)\theta_3$	a_3	0	$\alpha_{3c}=90$	$\theta_{3c}=90$
4-B	θ_4	0	0	$\alpha_{4c}=-90$	0
5- C_y	θ_5	$a_5=r_T$	$d_{5c}=l_T$	0	0

3.1 Koordinatni sistemi članova mašine

Mašina se posmatra kao sistem sa dve celine koje kooperativno rade: jednu celinu čini zakretni radni sto sa obratkom a drugu serijski mehanizam sa 4 člana koji nose rezni alat, sl. 4. Član 0 je osnova mašine sa uležištenjem radnog stola, stubom i traverzom. Serijski članovi su označeni sa 1-klizač X ose (poprečni klizač), 2-Z osa (ram), 3-C osa ugaone glave i 4-B osa ugaone glave sa nosačem alata. Radni sto je osa C_y označena kao član 5. Prva dva serijska člana su translatorna, a ostali su rotacioni tako da su odgovarajuće promenljive $d_1=d_x$, $d_2=d_z$, θ_3 i θ_4 . Ugao zakretanja obratka je θ_5 . D-H parametri ove mašine su dati u tabeli 1.

3.2 Greške članova mašine

Za vertikalni petoosni strugarski centar (sl. 4) prepoznate su 24 greške koje mogu izazvati netačnost mašine. Translatorne greške su geometrijska δ_{0y} , kinematske δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 i δ_5 i termičke δ_{5x} i δ_{5y} . Ugaone greške su geometrijske i greške krutosti: α_0 , β_0 , α_0'' , β_0'' , γ_0'' , α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 , γ_2 , α_2' , β_2' , γ_2' , α_5 i β_5 .

3.3 Matrice koje definišu odnose između članova mašine

Ovde su date homogene transformacione matrice koje definišu stvarne translacije i rotacije između uzastopnih članova mašine. Sve uočene greške su uključene u ove matrice.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{1r} &= \mathbf{A}_r(0,1) = \text{Trans}(y_0, \delta_{0y}) \mathbf{Rot}(x_0, \alpha_0) \mathbf{Rot}(y_0, \beta_0) \text{Trans}(y_0, a_1) \text{Trans}(z_0, d_{1c}) \mathbf{Rot}(z_0, 90^\circ) \\
 &\mathbf{Rot}(x'_0, 90^\circ) \text{Trans}(z''_0, d_1 + \delta_1) \mathbf{Rot}(x''_0, 90^\circ) \mathbf{Rot}(x''_0, \alpha''_0) \mathbf{Rot}(y''_0, \beta''_0) \mathbf{Rot}(z''_0, \gamma''_0) \text{Trans}(x''_0, -a_1) \\
 \mathbf{A}_{2r} &= \mathbf{A}_r(1,2) = \mathbf{Rot}(x_1, \alpha_1) \mathbf{Rot}(y_1, \beta_1) \mathbf{Rot}(z_1, \gamma_1) \text{Trans}(z_1, d_2 + \delta_2) \mathbf{Rot}(x_2, \alpha_2) \mathbf{Rot}(y_2, \beta_2) \mathbf{Rot}(z_2, \gamma_2) \text{Trans}(z_2, d_{2c}) \\
 \mathbf{A}_{3r} &= \mathbf{A}_r(2,3) = \mathbf{Rot}(z_2, 90^\circ) \mathbf{Rot}(x'_2, \alpha'_2) \mathbf{Rot}(y'_2, \beta'_2) \mathbf{Rot}(z'_2, \gamma'_2) \mathbf{Rot}(z''_2, \theta_3 + \delta_3) \text{Trans}(x''_2, a_3) \mathbf{Rot}(x''_2, 90^\circ) \\
 \mathbf{A}_{4r} &= \mathbf{A}_r(3,4) = \mathbf{Rot}(z_3, \theta_4 + \delta_3) \mathbf{Rot}(x'_3, -90^\circ) \\
 \mathbf{A}_{5r} &= \mathbf{A}_r(0,5) = \mathbf{Rot}(x_0, \alpha_5) \mathbf{Rot}(y_0, \beta_5) \text{Trans}(x_0, \delta_{5x}) \text{Trans}(y_0, \delta_{5y}) \mathbf{Rot}(z_0, \theta_5 + \delta_3)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Položaj alata u odnosu na član 4 ovde je funkcija dužine l_T i poluprečnika r_T alata.

4. PRIMENA UPRAVLJAČKOG ALGORITMA NA PETOOSNI STRUGARSKI CENTAR

4.1 Direktna kinematika

Direktna kinematika izračunava poziciju i orijentaciju alata X_t, Y_t, Z_t, B_t i C_t u odnosu na položaje članova mašine datih promenljivama $d_1, d_2, \theta_3, \theta_4$ i θ_5 . Na osnovu jednačina (9), stvarna pozicija i orijentacija alata relativno u odnosu na obradak koji se zakreće je data jednačinom:

$$\mathbf{T}_{Tr} = \mathbf{A}_{5r}^{-1} \mathbf{A}_{1r} \mathbf{A}_{2r} \mathbf{A}_{3r} \mathbf{A}_{4r} \mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} n_{xi} - \varepsilon_4 c_4 s_{5-3} + \varepsilon_8 s_4 & o_{xi} - \varepsilon_4 c_{5-3} & a_{xi} + \varepsilon_4 s_4 s_{5-3} + \varepsilon_8 c_4 & X_r \\ n_{yi} - \varepsilon_4 c_4 c_{5-3} + \varepsilon_9 s_4 & o_{yi} + \varepsilon_4 s_{5-3} & a_{yi} + \varepsilon_4 s_4 c_{5-3} + \varepsilon_9 c_4 & Y_r \\ n_{zi} + \varepsilon_{12} c_4 & \varepsilon_{11} & a_{zi} - \varepsilon_{12} s_4 & Z_r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$X_r = X_i + \varepsilon_5 c_5 + \varepsilon_6 s_5 - \varepsilon_4 s_{5-3} a_3 + (\varepsilon_4 c_4 s_{5-3} - \varepsilon_8 s_4) r_T + (\varepsilon_4 s_4 s_{5-3} + \varepsilon_8 c_4) l_T$$

$$Y_r = Y_i - \varepsilon_5 s_5 + \varepsilon_6 c_5 - \varepsilon_4 c_{5-3} a_3 + (\varepsilon_4 c_4 c_{5-3} - \varepsilon_9 s_4) r_T + (\varepsilon_4 s_4 c_{5-3} + \varepsilon_9 c_4) l_T, Z_r = Z_i + \varepsilon_7 - \varepsilon_{12} c_4 r_T - \varepsilon_{12} s_4 l_T$$

$$\varepsilon_1 = \gamma''_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma'_2, \varepsilon_2 = \beta'_2 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha''_0 - \beta_0 + \beta_5, \varepsilon_3 = \alpha'_2 + \beta_1 + \beta_2 + \beta''_0 + \alpha_0 - \alpha_5, \varepsilon_4 = \varepsilon_1 + \delta_5 - \delta_3,$$

$$\varepsilon_5 = -\beta_5 d_{1c} - (\alpha''_0 + \beta_0 - \beta_5)(d_2 + \delta_2 + d_{2c}) - \alpha_1 d_{2c} + \delta_1 - \delta_{5x}$$

$$\varepsilon_6 = (\alpha_5 - \alpha_0) d_{1c} + (\beta''_0 + \alpha_0 - \alpha_5)(d_2 + \delta_2 + d_{2c}) + \beta_1 d_{2c} + \delta_{0y} - \delta_{5y}$$

$$\varepsilon_7 = (\beta_5 - \beta_0)(d_1 + \delta_1) - \alpha_0 a_1 + \varepsilon_{10} a_3 - \delta_2 - \beta_5 \delta_{5x} - \alpha_5(\delta_{0y} - \delta_{5y}), \varepsilon_8 = \varepsilon_2 c_5 + \varepsilon_3 s_5 - \delta_4 c_{5-3}$$

$$\varepsilon_9 = \varepsilon_3 c_5 - \varepsilon_2 s_5 + \delta_4 s_{5-3}, \varepsilon_{10} = \varepsilon_2 c_3 + \varepsilon_3 s_3, \varepsilon_{11} = \varepsilon_2 s_3 - \varepsilon_3 c_3, \varepsilon_{12} = \varepsilon_{10} - \delta_4$$

S druge strane, položaj alata u odnosu na obradak kod mašine koja nema greške je dat jednačinom:

$$\mathbf{T}_{Ti} = \mathbf{A}_{5i}^{-1} \mathbf{A}_{1i} \mathbf{A}_{2i} \mathbf{A}_{3i} \mathbf{A}_{4i} \mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} c_4 c_{5-3} & -s_{5-3} & -s_4 c_{5-3} & c_5 d_1 + c_{5-3}(a_3 - c_4 r_T - s_4 l_T) \\ -c_4 s_{5-3} & -c_{5-3} & s_4 s_{5-3} & -s_5 d_1 - s_{5-3}(a_3 - c_4 r_T - s_4 l_T) \\ -s_4 & 0 & -c_4 & d_{1c} - d_2 - d_{2c} + s_4 r_T - c_4 l_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

4.1.1 Matrica greške

Na osnovu jednačina (2), (10) i (11) članovi matrice greške date jednačinom (7) su:

$$\alpha_e = \varepsilon_4 s_4 - \varepsilon_{11} c_4, \beta_e = \varepsilon_{12}, \gamma_e = \varepsilon_4 c_4 + \varepsilon_{11} s_4, E_x = c_4(\varepsilon_{13} - \varepsilon_{14}(s_4 r_T + c_4 l_T)) - s_4(\varepsilon_7 - \varepsilon_{12}(c_4 r_T + s_4 l_T)),$$

$$E_y = \varepsilon_5 s_3 - \varepsilon_6 c_3 + \varepsilon_4(a_3 - c_4 r_T - s_4 l_T) + \varepsilon_{15}(s_4 r_T - c_4 l_T),$$

$$E_z = -s_4(\varepsilon_{13} - \varepsilon_{14}(s_4 r_T - c_4 l_T)) - c_4(\varepsilon_7 - \varepsilon_{12}(c_4 r_T + s_4 l_T)),$$

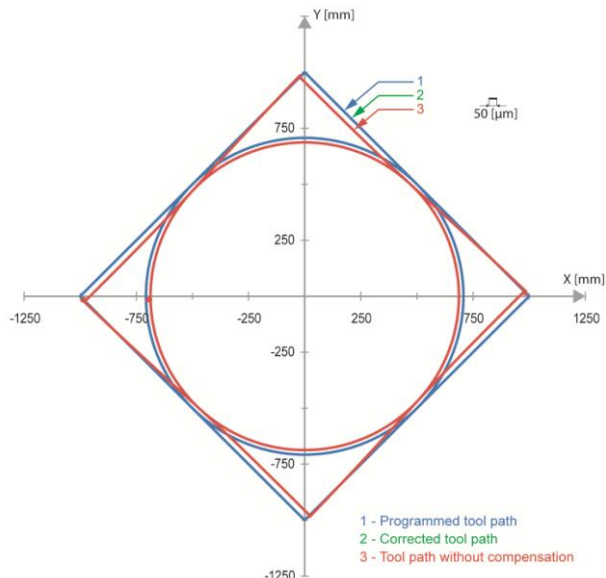
$$\varepsilon_{13} = \varepsilon_5 c_3 + \varepsilon_6 s_3, \varepsilon_{14} = c_{5-3} \varepsilon_8 - s_{5-3} \varepsilon_9, \varepsilon_{15} = s_{5-3} \varepsilon_8 + c_{5-3} \varepsilon_9 \tag{12}$$

5. REZULTATI: VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

Verifikacija predloženog algoritma kompenzacije greške petoosne mašine alatke će biti izvršena na vertikalnom petoosnom strugarском centru opisanom u poglavlju 4. D-H parametri ove mašine su: $a_1=300$,

$a_3=130$, $d_{1c}=1,745$, $d_{2c}=250$, $l_T=345$ i $r_T=12.5$ mm. U ovom primeru su korišćene sledeće vrednosti translatorskih grešaka: $\delta_1=0.1$, $\delta_2=0.1$, $\delta_{0y}=0.05$, $\delta_{5x}=0.05$ i $\delta_{5y}=-0.1$ mm. Za ugaone greške δ_3 , δ_4 , α_0 , β_0 , α_0'' , β_0'' , γ_0'' , α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 , γ_2 , α_2' , β_2' , γ_2' , α_5 i β_5 , korišćene su vrednosti 0.005729° , a za δ_5 je korišćena vrednost 0.006875° . Interpolacioni period CNC sistema je bio 5 ms.

Sl. 5 prikazuje primer programiranog kretanja mašine u odnosu na obradak bez i sa kompenzacijom greške. Prikazana je programirana putanja (1), korigovana putanja (2) i putanja alata bez kompenzacije (3). Greška putanje alata bez kompenzacije je na slici povećana 1000 puta, radi njenog jasnijeg prikazivanja.



Slika 5. Primer programirane i korigovane putanje alata i putanje alata bez kompenzacije

Tokom obrade se u svakom periodu interpolacije za svaku osu izračunava greška pre kompenzacije: $\Delta X_r=X_r-X_d$, $\Delta Y_r=Y_r-Y_d$, $\Delta Z_r=Z_r-Z_d$, $\Delta B_r=B_r-B_d$ i $\Delta C_r=C_r-C_d$ i greška

posle kompenzacije: $\Delta X=X_r-X_d+X_c-X_d$, $\Delta Y=Y_r-Y_d+Y_c-Y_d$, $\Delta Z=Z_r-Z_d+Z_c-Z_d$, $\Delta B=B_r-B_d+B_c-B_d$, $\Delta C=C_r-C_d+C_c-C_d$. Maksimalne apsolutne vrednosti ovih grešaka u ovom primeru su prezentovane u tabeli 2. Iz tabele 2 i slike 7 se vidi da je za zadate greške maksimalna apsolutna vrednost translatorskih grešaka bila manja od 0.2 μm i da je ugaona greška manja od 0.00004° , što znači da algoritam značajno povećava tačnost svake ose i daje zadovoljavajuću tačnost mašine. Greške posle kompenzacije postoje zbog toga što su ugaone greške članova mašine posmatrane kao infinitezimalne rotacije, što je prouzrokovalo odgovarajuće aproksimacije.

Tabla 2.

Greške osa mašine pre i posle kompenzacije.

$\max \Delta X_r $ [mm]	$\max \Delta Y_r $ [mm]	$\max \Delta Z_r $ [mm]	$\max \Delta B_r $ [°]	$\max \Delta C_r $ [°]
0.2652	0.2108	0.1062	0.030732	0.024064
$\max \Delta X $ [μm]	$\max \Delta Y $ [μm]	$\max \Delta Z $ [μm]	$\max \Delta B $ [°]	$\max \Delta C $ [°]
0.065	0.133	0.159	0.000011	0.000037

6. ZAKLJUČAK

U radu je dat novi algoritam za kompenzaciju netačnosti petoosnih mašina alatki. Radi smanjenja izračunavanja matrice greške, sve ugaone greške članova mašine su posmatrane kao infinitezimalne rotacije. Novi algoritam je primenjen na vertikalnom petoosnom strugarskom centru. Pokazano je da on bitno povećava tačnost obrade i da može biti primenjen kako u CNC sistemu, tako i u postprocesoru.

7. LITERATURA

- [1] Srivastava, A.K., Veldhius, S.C., Elbestawit, M.A.: *Modelling geometric and thermal errors in a five-axis CAN machine tool*, Int J Mach Tools Manuf 35(9), 1321–1337, 1995.
- [2] Mahbubur, R.M.D., Heikkala, J., Lappalainen, K., Karjalainen, J.A.: *Positioning accuracy improvement in five-axis milling by post processing*, Int J Mach Tools Manuf, 37(2), 223–236, 1997.
- [3] Kvrđić, V., Dimić, Z., Cvijanović, V., Ilić, D., Bucan, M.: *A control algorithm for a vertical 5-axis turning centre*, Int J Adv Manuf Technol 61(5), 569–584, 2012.
- [4] Tsai, C.-Y., Lin, P.D., *The mathematical models of the basic entities of multi-axis serial orthogonal machine tools using a modified Denavit–Hartenberg notation*, Int J Adv Manuf Technol 42, 1016–1024, 2009.
- [5] Uddin, M.S., Ibaraki, S., Matsubara, A., Matsushita, T.: *Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors*, Precision Engineering 33, 194–201, 2009.
- [6] Kvrđić, V., Dimić, Z., Cvijanović, V., Vidaković, J., Kablar, N.: *A control algorithm for improving the accuracy of five-axis machine tools*, Int J of Production Research, Vol. 52, No. 10, 2983–2998, 2014.
- [7] López de Lacalle, L.N., Lamikiz, A.: *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer Verlag, (2008) ISBN: 978-1-84800-379-8.
- [8] Liu H., Li B., Wang X., Tan G.: *Characteristics of and measurement methods for geometric errors in CNC machine tools*, Int J Adv Manuf Technol 54, 195–201, 2011.

Kvrgić, V, Dimic, Z, Cvijanovic V, Mitrović, S.

AN ALGORITHM FOR IMPROVING THE ACCURACY OF FIVE-AXIS MACHINE TOOLS

Abstract: *An algorithm for reducing the influence of geometrical, thermal, kinematic and stiffness errors in five-axis machine tool components on the desired tool position and orientation is given. This new algorithm is based on the calculation of the cutting tool error matrix. All angular errors of the machine links are here considered as infinitesimal rotations. The error matrix is a function of the commanded machine component positions and the errors in these positions. To correct errors in the three translational and two angular tool positions, a matrix of commanded tool position and orientation is multiplied by the inverse error matrix in every period of the tool trajectory interpolation. This control algorithm can be implemented both in the CNC system and in the postprocessor.*

Keywords: *Error compensation; Five-axis machine tools; Control algorithm*

Kokotović, B., Slavković, N. ¹⁾

VERIFIKACIJE PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA PRI OBRADI CILINDRIČNIM VRETNASTIM GLODALIMA ²⁾

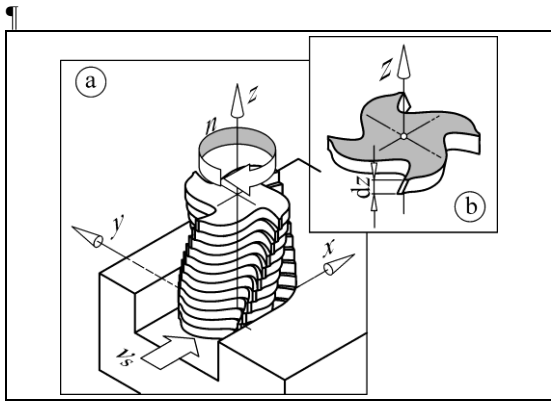
Rezime

U konceptu virtuelne obrade (VM), bitnu funkciju predstavlja predikovanje sila duž programirane putanje. To je važno kako za ocenu projektovanog tehnološkog procesa, tako i za njegovu optimizaciju, kroz off-line podešavanje parametara obrade. U radu je primenjen makromehanički model sila rezanja i procedura predikovanja trenutnih vrednosti sila glodanja, zasnovan na simulaciji obrtanja alata diskretizovane rezne geometrije. Obavljena je procedura eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja. Poznati simulacioni model je unapređen detaljima koji se odnose na radialno bacanje sečiva alata i na složenije mape zahvata. Eksperimentalno je potvrđen kvalitet predstavljene procedure kroz skup reprezentativnih primera obrade.

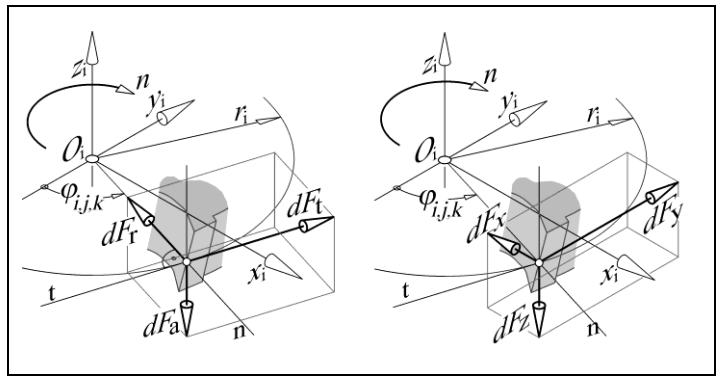
Ključne reči: obrada vretenstim glodalom, modeliranje, predikovanje sila, eksperimentalna verifikacija

1. UVOD

Procedure predikovanja sila pri obradi alatima složenije geometrije polaze, po pravilu, od diskretizacije reznog dela alata. Za slučaj vretenastih glodala sa zavojnim zubima ova diskretizacija podrazumeva identifikaciju diskova (kao na slici 1) konačno male debljine dz dužine elementarnih sečiva dL .



Slika 1. Diskretizacija reznog dela glodala



Slika 2. Plan sila na elementarnoj dužini sečiva

Komponente sile rezanja na elementarnoj dužini sečiva [1], koje pripada i -tom disku i j -tom sečivu glodala su, kao na slici 2 (pokazani su otpori):

$$dF_t(i, j) = dF_{tc}(i, j) + dF_{te}(i, j) = K_{tc} h_s(i, j) \cdot dz + K_{te} dL$$

$$dF_r(i, j) = dF_{rc}(i, j) + dF_{re}(i, j) = K_{rc} h_s(i, j) \cdot dz + K_{re} dL$$

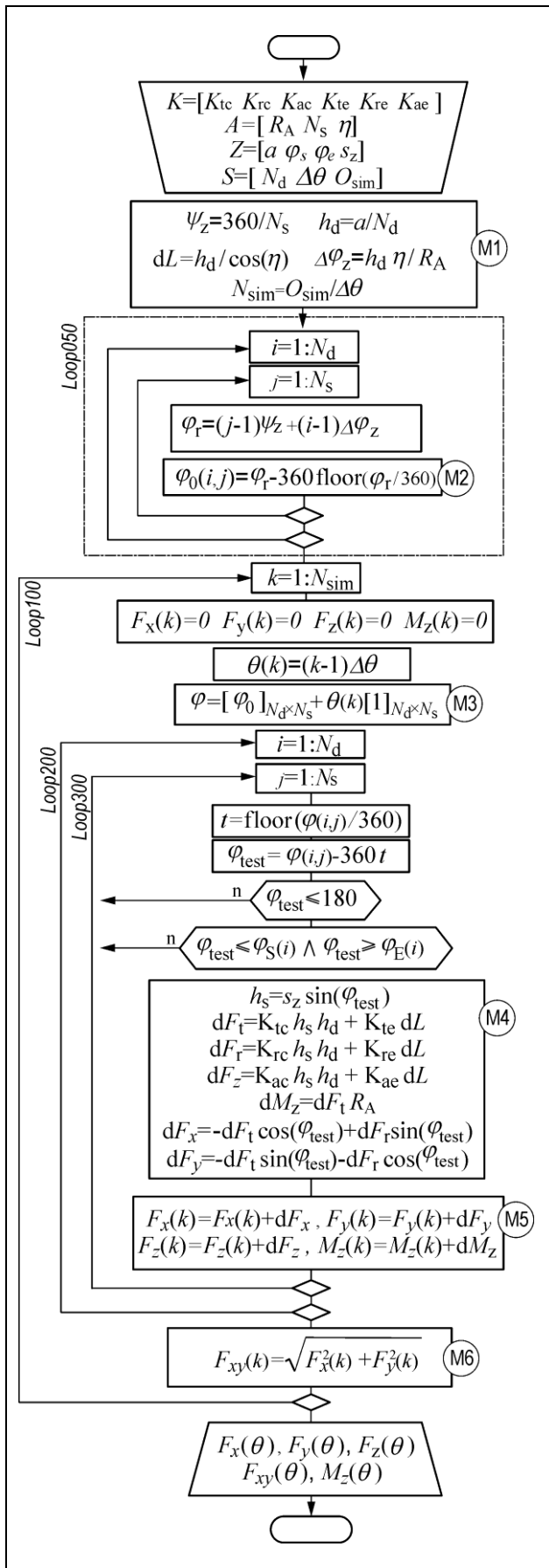
(1)

$$dF_a(i, j) = dF_{ac}(i, j) + dF_{ae}(i, j) = K_{ac} h_s(i, j) \cdot dz + K_{ae} dL$$

¹⁾ Doc. dr Branko Kokotović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs)

Nikola R. Slavković, dipl.inž.maš., asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR035022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.



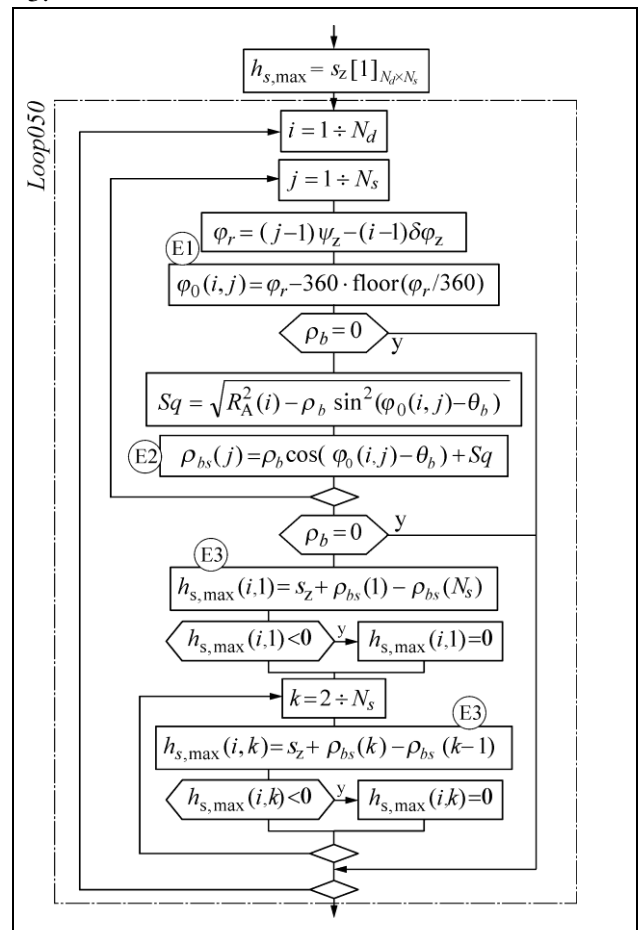
Slika 3. Predikovanje trenutnih vrednosti komponenata sile – osnovni model

Koordinatni sistem je pravougli desni sa osom x , koja se poklapa sa vektorom v_s brzine pomoćnog kretanja. Koordinatni početak je na vrhu glodala. Svaka od sila dF_t , dF_r i dF_a je dualne prirode [1] i obuhvata efekte smicanja u zoni rezanja dF_{mc} i efekte trenja u tercijalnoj zoni rezanja $dF_{m,e}$ ($m=t, r, a$). Komponente dF_{mc} se smatraju linearnom funkcijom trenutnog preseka strugotine ($h_s dz$) a ivične komponente $dF_{m,e}$ su srazmerne dužini sečiva u kontaktu (dL).

U k -tom koraku simulacije obrtanja glodala ugaoni položaj elementarnog sečiva je određen uglom $\varphi(i,j,k)$. U idealnom slučaju, kada nema radijalnog bacanja reznog dela alata, sva elementarna sečiva cilindričnog vretenastog glodala će se obrtati sa radiusom $R_A=D/2$. Tada je moguće promenu debljine strugotine definisati kao funkciju koraka po zubu s_z :

$$h_{s,n}(i,j,k) = s_z \sin \varphi(i,j,k) \quad (2)$$

Uz ovakvu pretpostavku, za slučaj jednostavnih mapa zahvata, dijagram toka simulacije trenutnih vrednosti sila je kao na slici 3.



Slika 4. Početni uslovi za slučaj radijalnog bacanja reznog dela glodala

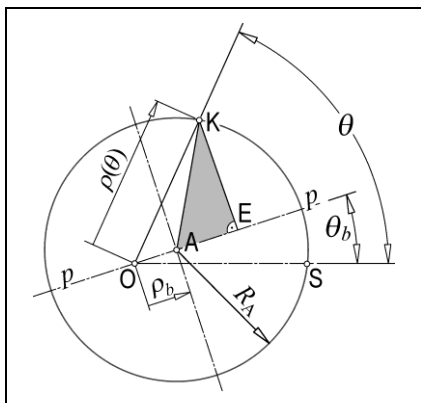
Skup ulaznih parametara za proceduru pokazanu na slici 3 čine:

- podskup koeficijentata komponentnih sila rezanja, $K = [K_{tc} K_{te} K_{rc} K_{re} K_{ac} K_{ae}]$,
- podskup atributa alata, $A = [R_A N_s \eta]$ (R_A – nazivni poluprečnik, $N_s = z$ – broj sečiva, η – ugao nagiba sečiva),
- podskup parametara zahvata, $Z = [s_z \varphi_S \varphi_E a]$ (s_z – korak po zubu; φ_S, φ_E – ulazni i izlazni ugao zahvata; a – dubina) i
- podskup parametara same simulacije, $S = [N_d \Delta\theta O_{sim}]$ (N_d – broj diskova glodala na datoj dubini glodanja a , $\Delta\theta$ – ugaoni inkrement simulacije obrtanja alata; O_{sim} – ugao, u okviru punog obrta, koji je predmet simulacije).

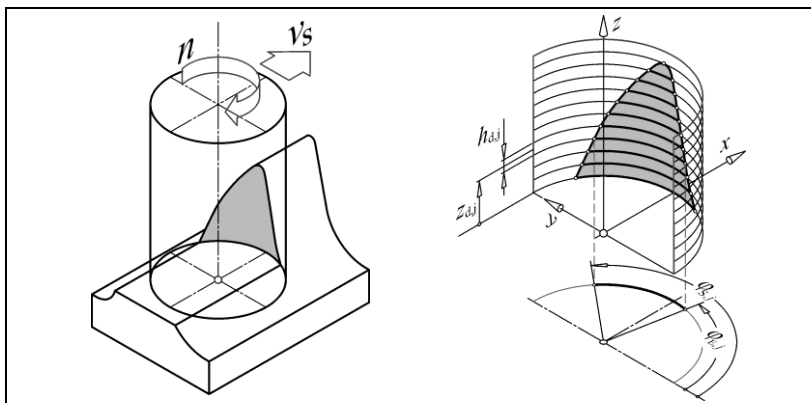
U slučaju radijalnog bacanja [2], svako elementarno sečivo diskretizovanog reznog dela glodala se obrće sa drugačijim radijusom i trenutni presek strugotine se izračunava kao:

$$h_s(i, j, k) = h_{s, \max}(i, j) \sin \varphi(i, j, k) \quad (3)$$

što podrazumeva promenu u modulu M4 osnovne procedure. Svako sečivo (i, j) diskretizovanog reznog dela glodala se karakteriše svojom veličinom $h_{s, \max}(i, j)$. Vrednosti za $h_{s, \max}(i, j)$ se određuju u korigovanoj petlji (Loop050) za određivanje početnih položaja pojedinih sečiva [3], kako je pokazano na slici 4. Pod pretpostavkom da je geometrijska osa reznog dela glodala translirana radijalno u odnosu na osu obrtanja, radijalno bacanje reznog dela se definiše preko dva parametra: ρ_b [mm], kao rastojanja tih dveju osa i θ_b [°] koje predstavlja ugao vektora ρ_b prema potegu vrha izabranog referentnog zuba glodala na njegovom čeonom delu [5], kao na slici 5.



Slika 5. Stvarni radijus obrtanja tačke na obimu glodala



Slika 6. Obrada vretenastim glodalom pri složenijim mapama zahvata, ulazni i izlazni uglovi zahvata

Procedura pokazana na slici 3 se odnosi na najjednostavniji slučaj, a pored nultog radijalnog bacanja podrazumeva jednostavnu mapu zahvata, definisanu sa tri parametra (dubina a , ulazni i izlazni ugao zahvata: φ_S, φ_E). U brojnim praktičnim slučajevima mapa zahvata (površ kontakta obratka i omotača rotirajućeg glodala) je složenijeg oblika i zahteva definisanje para ($\varphi_{S,i}, \varphi_{E,i}$) ulaznog i izlaznog ugla zahvata za svaki od $i=1 \div N_d$, diskova diskretizovane rezne geometrije glodala, kao na slici 6. Tačnije, aproksimacija mape zahvata skupom lukova u ekvidistantnim ravnima, na rastojanju dz , u opštem slučaju bi podrazumevala mogućnost definisanja parova ulaznih i izlaznih uglova za proizvoljan broj lukova u svakoj od tih ravni. U praktičnoj implementaciji ove procedure, izvedene u programskom okruženju Matlab, postavljeno je ograničenje da za svaki disk glodala mogu biti definisana do dva luka. Na taj način je moguće opisati vrlo veliki broj praktičnih slučajeva pri obradi ravanskih kontura cilindričnim vretenastom glodalom: istosmerno i suprotnosmerno glodanje, glodanje žljeba, proširivanje žljeba, kao i prelazni režimi ulaza i izlaza alata u/z materijala obratka.

U okviru obavljenih istraživanja [3] programska implementacija (program *sim1rev.m*) opisane procedure je razvijena sa ciljem da posluži kao rutina, koja se ponavlja u većem broju tačaka, sa ciljem razvoja procedure predikovanja reprezentativnih (min,max) vrednosti komponenata sile glodanja duž programirane putanje glodala.

Verifikacija procedure predikovanja sila i njene programske implementacije podrazumevaju dve faze. To su identifikacija specifičnih sila (koeficijenta sile), odnosno vektora $K = [K_{tc} \ K_{te} \ K_{rc} \ K_{re} \ K_{ac} \ K_{ae}]$, za izabrani par koji čini materijal obratka, s jedne strane i materijal alata i geometrija njegovog reznog dela, sa druge strane. Detalji identifikacije ovih koeficijenata su pokazani u poglavlju 2 ovog rada. Drugu fazu čini sama verifikacija procedure, koja podrazumeva poređenje profila trenutnih vrednosti komponenata sile glodanja i to predikovanih, kroz opisanu proceduru, i dobijenih merenjem u eksperimentima sa obradom.

Za ilustraciju je izabrana obrada legure aluminijuma AlZn4Mg2 vretenastim cilindričnim glodalima od HSSE, sa reznom geometrijom koja je definisana grudnim uglom od 11° i uglom nagiba zavojnih zuba od 30° . Razmatranje je ograničeno na komponente sile glodanja u ravni obrade.

2. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA GLODANJA

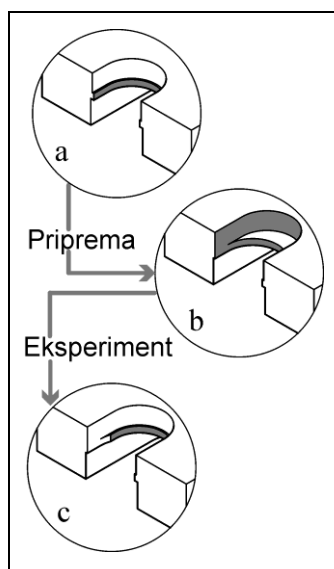
Jedan od postupaka eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja, kakav se često navodi u literaturi [1,4,5], podrazumeva niz eksperimenata obrade žljeba u punom materijalu glodalom odgovarajuće rezne geometrije i broja zuba z . U nizu od N_e takvih eksperimenata se, pri konstantnoj dubini a i širini glodanja $b=D$, varira korak po zubu $s_{z,p}$ ($p=1 \div N_e$), u reprezentativnom intervalu i tokom obrade se formiraju vremenski zapisi pojedinih komponenata sile glodanja (F_x , F_y i F_z). Iz takvih vremenskih zapisa se izdvaja interval koji odgovara punom obrtu alata i unutar njega se izračunavaju srednje vrednosti komponenata (\bar{F}_x , \bar{F}_y i \bar{F}_z) za svaki eksperiment, odnosno za svaki korak po zubu $s_{z,p}$.

U [1] su dati dokazi da se srednje vrednosti komponenata sile glodanja u zavisnosti od koraka po zubu, u slučaju obrade žljeba, mogu opisati linearnim funkcijama:

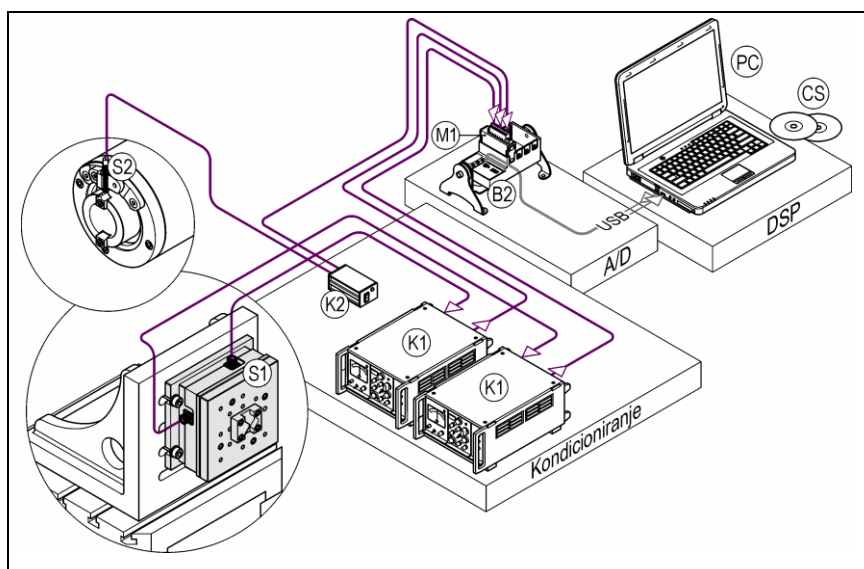
$$\begin{aligned} \bar{F}_X &= \bar{F}_{Xc}s_z + \bar{F}_{Xe} = -\frac{za}{4} K_{rc}s_z - \frac{za}{\pi} K_{re} \\ \bar{F}_Y &= \bar{F}_{Yc}s_z + \bar{F}_{Ye} = \frac{za}{4} K_{tc}s_z + \frac{za}{\pi} K_{te} \\ \bar{F}_Z &= \bar{F}_{Zc}s_z + \bar{F}_{Ze} = \frac{za}{\pi} K_{ac}s_z + \frac{za}{2} K_{ae} \end{aligned} \quad (4)$$

Dovoljan broj (N_e) tačaka u dijagramima $\bar{F}_x(s_z)$, $\bar{F}_y(s_z)$ i $\bar{F}_z(s_z)$ dopušta da se odrede parametri svakog od tri linearna modela (\bar{F}_{Xc} , \bar{F}_{Xe} , \bar{F}_{Yc} , \bar{F}_{Ye} , \bar{F}_{Zc} , \bar{F}_{Ze}) nekim od regresionih metoda i da se na osnovu (4) odrede nepoznate specifične sile: K_{tc} , K_{te} , K_{rc} , K_{re} , K_{ac} i K_{ae} .

Umesto serije uobičajenih testova sa obradom žljeba, ovde se u svakom testu obrađuje tanka lamela materijala, kako je pokazano na slici 7, tako da se izbegava obrada sečivima na čeonom delu glodala.



Slika 7. Priprema obratka i obrada tanke lamele

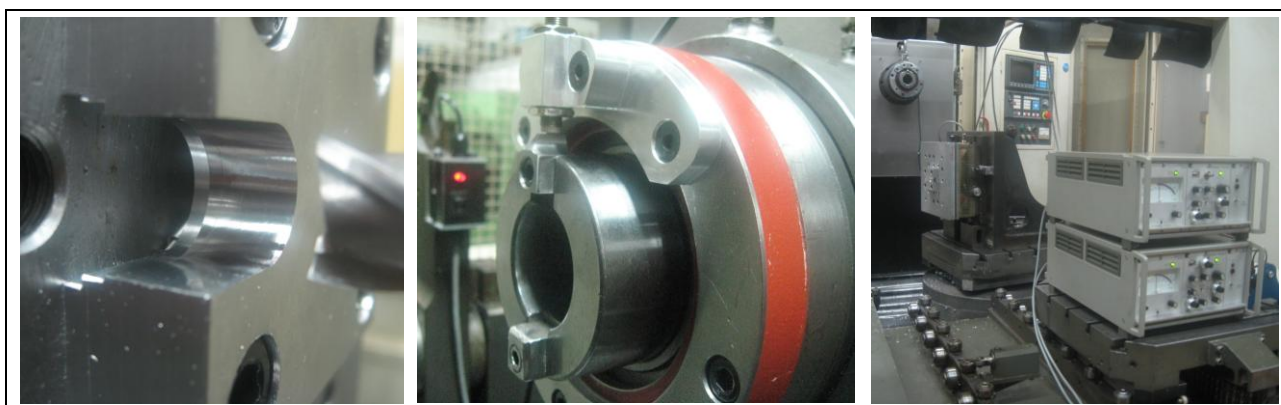


Slika 8. Instalacija za formiranje vremenskih zapisa komponenata sile glodanja

Svakom testu prethodi obrada, kojom se formira lamela koja će imati vrlo mali prepust u odnosu na ostatak priprema, kako bi se izbegao uticaj elastičnih deformacija pri njenoj obradi. Pripremom lamele (slika 7a,b) se obezbeđuje i da tokom njene obrade (slika 7b,c) nema kontakta obimnog dela glodala sa ostatkom materijala (ispod i iznad lamele).

Obrada u svim testovima je vršena bez hlađenja, na horizontalnom obradnom centru (LOLA HMC500/40). Instalacija za merenje i akviziciju podataka je pokazana na slici 8. Ulazi modula za akviziciju su signali dveju komponentata sile sa dinamometra. Treći ulazni signal je okidački signal sa induktivnog prekidača, koristan u naknadnoj obradi vremenskih zapisa za izdvajanje perioda koji odgovara punim obrtima glavnog vretena. Pri izboru intervala koji odgovara punom obrtu alata, unutar vremenskog zapisa, potrebno je izabrati one njegove delove koji ne odgovaraju prelaznim režimima, kao što je zahvatanje pune širine glodanja, na početku, ili faza usporavanja na kraju programiranog hoda.

Oznake na slici 8 su: četvorokanalni (X/Y/Z/Mz) dinamometar sa mernim trakama, Kaprom DYN-F4M1-85 (S1) pričvršćen za ugaonik na stolu obradnog centra, induktivni beskontaktni prekidač, normalno otvoreni (S2), jednokanalni merni most sa nosećom frekvencijom 5kHz, HBM-KWS3082A (K1), baterijski modul 9VDC Kaprom PS-B-9VDC (K2), 4-kanalni analogni naponski ulazni modul sa simultanim uzorkovanjem 16 bit, 100 kS/s/CH, NI 9215 (M1), USB 2.0 CompactDAQ sistem, NI cDAQ-9174 (B2), računar konfigurisan za rad sa sistemom za akviziciju podataka (PC) i programski paket NI LabView (CS₁) i Matlab (CS₂). Detalji pripreme obradnog sistema i merne instalacije pokazani su na slici 9.

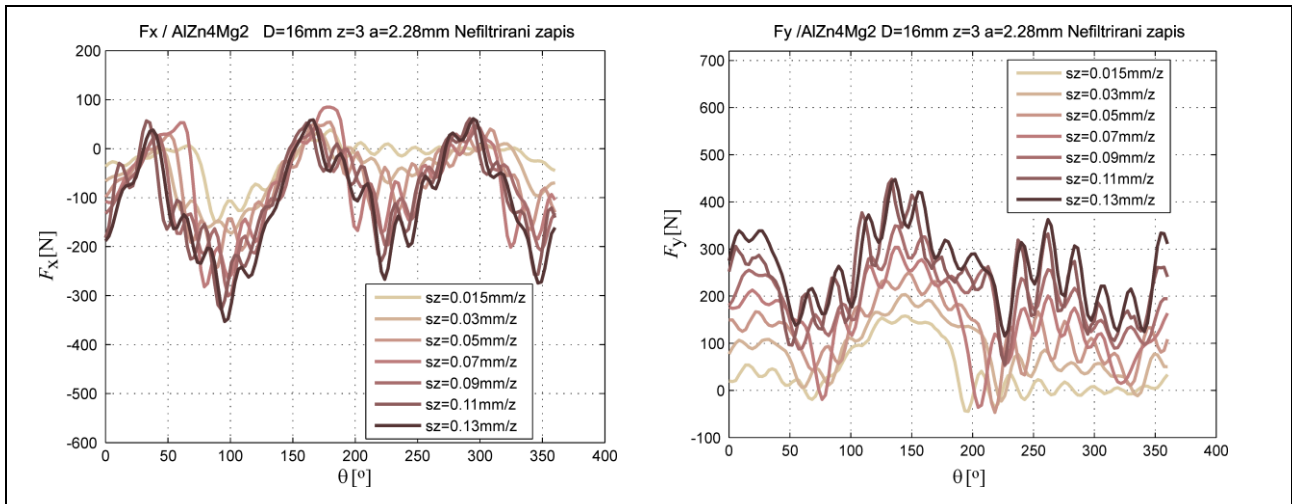


Slika 9. Detalji pripreme eksperimenata za identifikaciju specifičnih sila rezanja

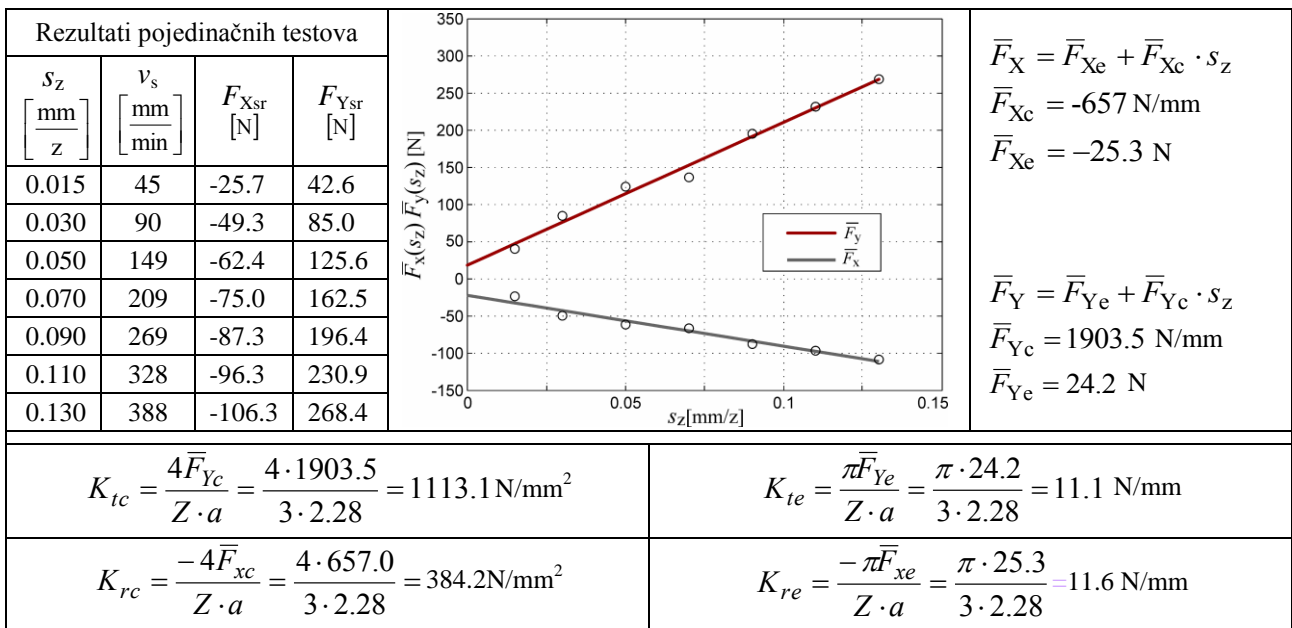
Detalji pripreme i izvođenja niza eksperimenata, radi formiranja vremenskih zapisa promene komponentata F_x i F_y , sile glodanja, pokazani su u tabeli 1. U svakom od 7 eksperimenata je vršena obrada tanke lamele materijala (prema slici 7) iste debljine i širine koja je jednaka prečniku reznog dela glodala. Svaki od ovih eksperimenata je izveden sa drugačijim korakom po zubu, u intervalu od 0.015 do 0.13 mm/z. Vremenski zapisi dveju komponentata sile glodanja, izolovani na punom obrtu alata su pokazani na slici 10. Za svaki od ovako dobijenih zapisa izdvajaju se srednje vrednosti za F_x i F_y . Te vrednosti i parametri linearnih funkcija, kojima su opisane zavisnosti $\overline{F}_X(s_z)$ i $\overline{F}_Y(s_z)$, kao i konačno identifikovane specifične sile rezanja (K_{lc} , K_{le} , K_{rc} i K_{re}), pokazani su na slici 11. Pomenuti parametri (koeficijent pravca i odsečak na ordinatnoj osi) su određeni korišćenjem Matlab funkcije *polyfit*.

U dijagramima vremenskih zapisa je, pored perioda ulaska zuba glodala u zahvat, uočljiva i dinamička komponenta više frekvencije koja se može pripisati uticaju dinamike mehaničke strukture dinamometra. Radi smanjenja ovog uticaja, srednje vrednosti \overline{F}_X i \overline{F}_Y su, za svaki eksperiment, računane iz vremenskih zapisa za 5 punih obrta.

Tabela 1. Uslovi izvođenja eksperimenata za identifikaciju specifičnih sila rezanja	
Materijal obratka	AlZn4Mg2 (EN AW 7019), $R_m=390\text{Mpa}$, 125HB. Pripremak: 84 x 74 x 26mm
Alat	Vretenasto glodalo sa cilindričnom drškom (DIN327) HSSE(8%Co), Prečnik reznog dela $D_A=16\text{mm}$, 3 zuba, Nagib zavojnice sečiva $\eta=30^\circ$, Grudni ugao $\gamma=11^\circ$
Stezanje alata	Držač ISO40/glava za elastične stezne čaure; Stezna čaura OZ40 $\varnothing 16$ (DIN ISO 15488).
Obrada	Širina glodanja $b= D_A$, bez kontakta čeonih sečiva sa obratkom. Dužina sečiva u kontaktu $a=2.28\text{ mm}$. Broj obrta glavnog vretena $n=995\text{min}^{-1}$ (odgovara brzini rezanja $v=50\text{m/min}$). Obrada duž ose +X, mašine.
Specifičnosti akvizicije podataka	Brzina odabiranja (uzorkovanja) $n_s=2200\text{ S/s}$, Vreme obuhvaćeno svkim zapisom $T_A=4\text{s}$. Analogni filter (hadverski) $f_F=2000\text{Hz}$ (Butterworth).



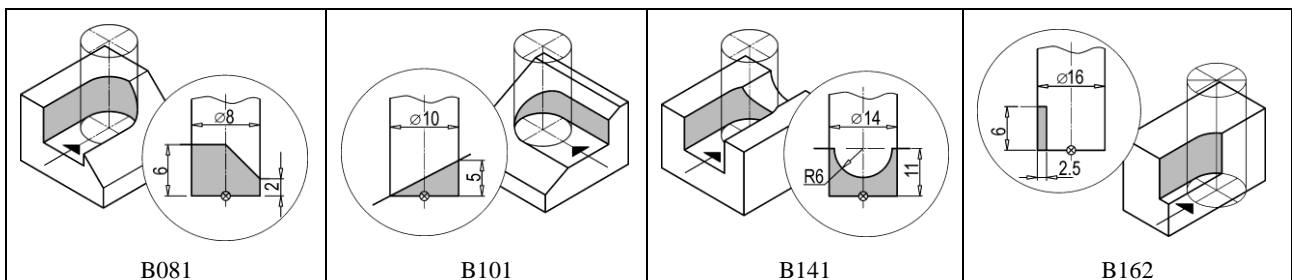
Slika 10. Dijagrami vremenskih zapisa (izdvojenih na punom obrtu alata) za komponente sile F_x i F_y



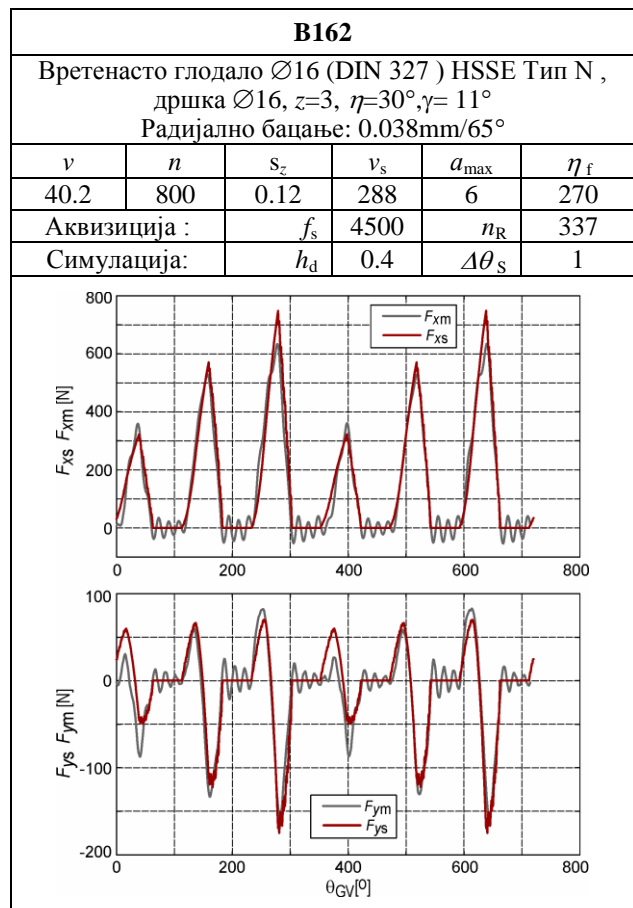
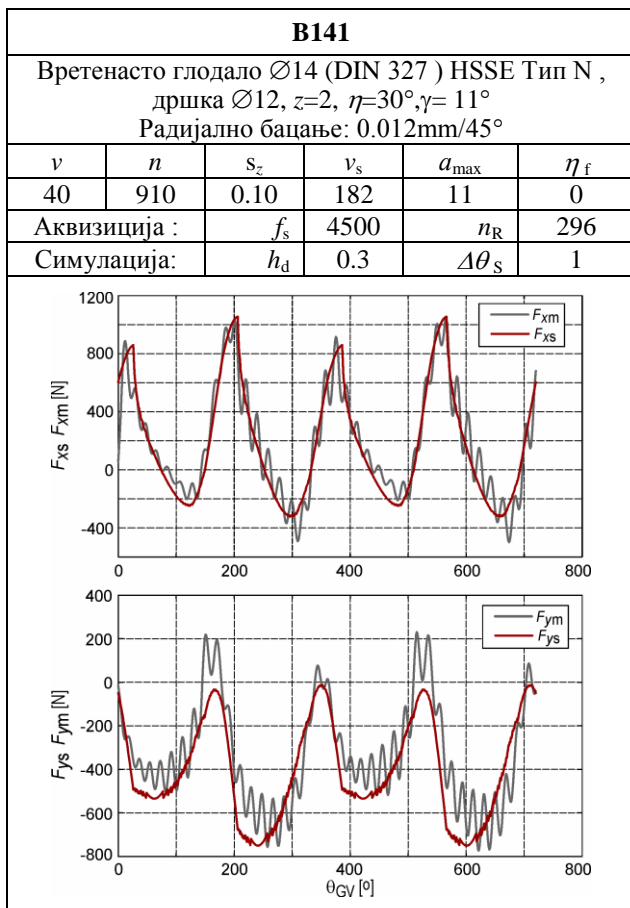
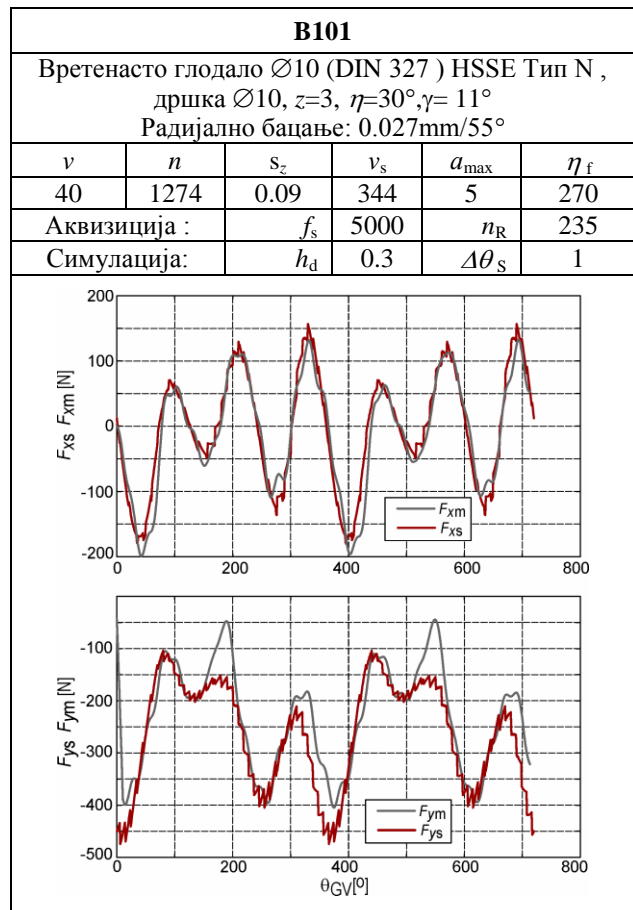
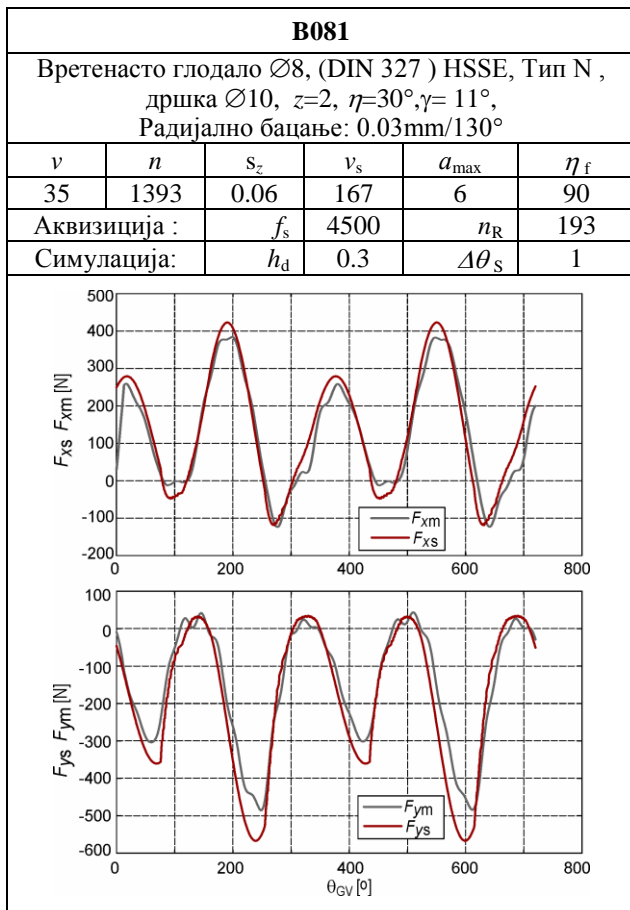
Slika 11. Identifikacija specifičnih sila rezanja na osnovu serije obavljenih eksperimenata

3. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA GLODANJA

Verifikacija pokazanog algoritma za predikovanje sila glodanja, kao i identifikovanih specifičnih sila rezanja je ostvarena kroz niz od 20 eksperimenata [3], sa različitim nazivnim prečnicima i brojevima zuba glodala i pri različitim mapama zahvata i pri različitim programiranim koracima po zubu. Ovde je za ilustraciju pokazan podskup od 4 eksperimenata, za koje su mape zahvata pokazane na slici 12.



Slika 12. Mape zahvata u eksperimentima za verifikaciju procedure predikovanja sila glodanja



Слика 13. Мапе захвата у експериментима за верификацију алгорита и идентификованих коефицијената

Podrazumeva se da je materijal obratka, u svim eksperimentima, onaj za koji su određene specifične sile rezanja (AlZn4Mg2). Eksperimenti su izvedeni na obradnom centru, pomoću iste instalacije (slika 8), koja je korišćena u eksperimentalnoj identifikaciji specifičnih sila rezanja. Detalji izvođenja pojedinih eksperimenata, sa uporednim dijagramima merenih (F_{xm}, F_{ym}) i predikovanih (F_{xs}, F_{ys}) komponenta sile glodanja, pokazani su na slici 13. Na slici su korišćene oznake: η_f [°] za ugao koji zaklapa vektor brzine v_s prema pozitivnom smeru ose +X obratka, f_s [S/s] za frekvencija odabiranja u instalaciji za akviziciju podataka, n_R za broj odabiraka koji u eksperimentu odgovara jednom punom obrtu alata, h_d [mm] za debljinu diskova diskretizovanog reznog dela alata, kakva je korišćena u simulaciji i $\Delta\theta_s$ [°] za ugaoni inkrement simulacije obrtanja alata. Profili, koji se obrađuju, birani su na način da se jednostavno mogu izračunati ulazni i izlazni ugao zahvata, za svaki disk diskretizovane rezne geometrije.

U vremenskim zapisima merenih komponenta sile glodanja uočljiv je različit uticaj dinamike dinamometra. To se može tumačiti činjenicom da obrada u pojedinačnim primerima nije vršena u istim pravcima u odnosu na ose dinamometra (ugao η_f). I u slučajevima kada je ovaj uticaj naglašen (Primer B141, slika 13), može se uočiti zadovoljavajući kvalitet predikcija komponenta sile glodanja, kako u pogledu kvaliteta tako i kvantitativno. U sva 4 primera prisutan je uticaj radijalnog bacanja sečiva glodala, naročito u primeru B162. S obzirom na saglasnost eksperimentalnih i predikovanih profila promene trenutnih vrednosti komponenta sile glodanja jasno je da je deo procedure, koji vrši korekciju trenutne debljine strugotine saglasno parametrima radijalnog bacanja, neophodan za ostvarenje pouzdanih predikcija.

4. ZAKLJUČAK

Opisana procedura predikovanja sila glodanja je zasnovana na poznatom simulacionom modelu obrtanja alata diskretizovane rezne geometrije i makromehaničkog modela sila ne elementarnoj dužini sečiva. U odnosu na osnovni model, procedura predikovanja sila (i njena programska implementacija) pri glodanju cilindričnim vretenastim glodalima je upotpunjena na način da se u obzir uzimaju i parametri radijalnog bacanja reznog dela glodala. Dodatno unapređenje se odnosi na mogućnost predikovanja sila za slučaj složenijeg oblika mape zahvata. Kroz skup obavljenih eksperimenata pokazan je dobar kvalitet predikcija komponenta sile glodanja čime je potvrđena, kako pouzdanost same procedure i njene programske implementacije, tako i skupa eksperimentalno identifikovanih specifičnih sila rezanja.

5. LITERATURA

- [1] Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A.: *Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp.216-224, Transactions of the ASME, 1996.
- [2] Kline, W.A., DeVor, R.E. : *The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling*, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 2, pp.123–140, 1983.
- [3] Kokotović, B.: *Obrada glodanjem u virtuelnom obradnom sistemu*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [4] Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H., Sanz, C.: *A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, pp.765-774, 2010.
- [5] Wang, M., Gao, L., Zheng, Y.: *An examination of the fundamental mechanic of cutting force coefficients*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 78, pp.1-7, 2014.

Kokotovic, B., Slavkovic N.

VERIFICATION OF THE PROCEDURE FOR PREDICTING OF FORCES IN FLAT END MILLING OPERATIONS

Abstract: In the Virtual Machining (VM) concept, predicting of cutting forces along programmed tool path has an important function. Such function is important for evaluation of designed machining process as well as for its optimization through off-line adjustment of machining parameters. In this paper macro-mechanical model of cutting forces was used as well as procedure of milling force predicting, based on simulation of tool revolution with discretized cutting geometry. Experimental procedure for determination of specific cutting forces was conducted. Well-known simulating model was upgraded with details referred to runout of cutter and for more complex shapes of tool engagement maps. Quality of the proposed procedure was examined through the series of machining tests.

Key words: end milling, modelling, cutting force prediction, experimental verification.

Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., Đurđev, M.: ¹⁾

STANJE I TREND RAZVOJA U OBLASTI PROJEKTOVANJA ZA IZRADU-DFM ²⁾

Rezime

U životnom ciklusu proizvoda centralno mesto zauzima razvoj proizvoda, u okviru koga se generiše kvalitet proizvoda, ali i najveći broj grešaka, koje je neophodno otkloniti u što ranijoj fazi njegovog razvoja. Uspesah razvoj proizvoda podrazumeva takva rešenja koja su pogodna za sve faze životnog ciklusa, od projektovanja pa do reciklaže i odlaganja. U cilju razvoja tehnologičnih proizvoda razvijeni su mnogi alati i tehnike za odlučivanje, koje figurišu pod nazivom projektovanje za izvrsnost–DfX, među kojima su najznačajnije projektovanje za izradu–DfM i projektovanje za montažu–DfA.

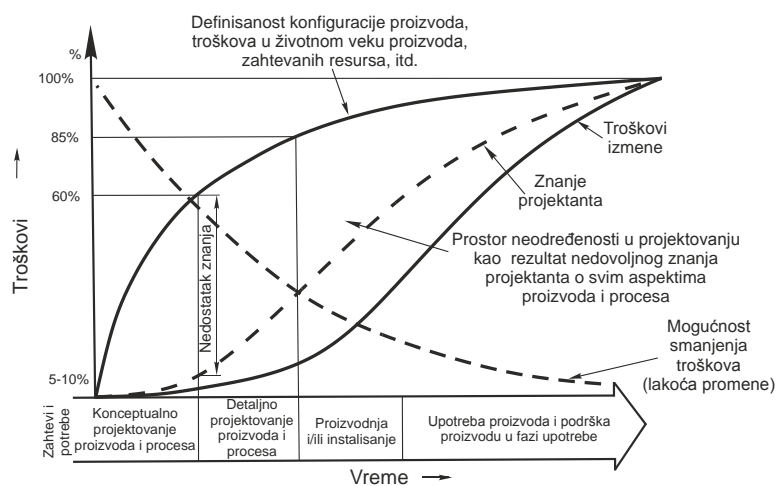
Osnovni predmet istraživanja u okviru ovog rada se odnosi na analizu stanja i trendovi razvoja u oblasti DfM-a, kroz pregled određenih metodologija i programskih sistema.

Ključne reči: Projektovanje za izradu–DfM, metode, softverska rešenja

1. UVOD

Razvoj kvalitetnih proizvoda podrazumeva takva rešenja koja su pogodna za sve faze njihovog životnog ciklusa, od projektovanja, preko izrade, pa sve do reciklaže i odlaganja. U tom cilju razvijeni su mnogi alati i tehnike koje figurišu pod nazivom *projektovanje za izvrsnost–DfX* (Design for eXcellence). Dve najznačajnije tehnike u okviru DfX-a su *projektovanje za izradu–DfM* (Design for Manufacturing) i *projektovanje za montažu–DfA* (Design for Assembly), koje se danas uglavnom posmatraju objedinjeno pod terminom *projektovanje za izradu i montažu–DfMA* (Design for Manufacturing and Assembly) [1,2,3].

Uticao projektovanja i proizvodnje proizvoda na ukupne troškove, vreme i kvalitet proizvoda zavisi od vrste proizvoda, tipa proizvodnje, okruženja i mnogih drugih tehnoeekonomskih faktora. Generalno, konceptualno projektovanje u ukupnim troškovima proizvodnje učestvuje sa 5-10%, ali pogrešne odluke u ovoj fazi razvoja proizvoda mogu da utiču na povećanje troškova proizvodnje i preko 60%, slika 1.



Slika 1. Prostor neodređenosti u razvoju proizvoda [4]

¹⁾ Doc. dr Dejan Lukić, e-mail: luki@d.uns.ac.rs; Doc. dr Mijodrag Milošević, e-mail: mido@d.uns.ac.rs; MSc Goran Jovičić, e-mail: goran.jovicic@d.uns.ac.rs; MSc Mića Đurđev, e-mail: mdjurdjev@live.com; Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad.

²⁾ 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", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Zbog svega navedenog potrebno je problem proizvodnje razmatrati što je moguće ranije, još u fazi projektovanja proizvoda, odnosno razvoja njegovog koncepta, jer su troškovi usled izmena na proizvodu veći ukoliko se te izmene izvrše u kasnijoj fazi razvoja proizvoda, shodno pravilu desetica³.

Prethodno iznete činjenice pokazuju značaj primene DfMA metoda u brzom razvoju kvalitetnih, ekonomičnih i konkurentnih proizvoda. Osnovna tema ovog rada je usmerena na prikaz stanja i osnovnih trendova razvoja u oblasti DfM-a.

2. KRATAK ISTORIJAT RAZVOJA DfM-a

Prvo prepoznavanje značaja DfM-a pojavljuje se u toku priprema za Drugi svetski rat sa ciljem da se proizvede kvalitetno oružje u što kraćem vremenskom periodu. Mnoga kvalitetna oružja su razvijena od strane malih multidisciplinarnih timova, prevashodno konstruktora i tehnologa. Nakon rata odeljenja za projektovanje proizvoda i tehnologije izrade su ponovo razdvojena, da bi tek kasnih 70-ih, usled uvećanja globalne konkurencije i težnje da se skрати vreme razvoja proizvoda, projektovanje za proizvodnju DfMA postalo ponovo aktuelno. Upravo tada dolazi do primene koncepta konkurentnog inženjerstva uz istovremeni razvoj većeg broja metodologija i odgovarajućih softvera iz oblasti DfX-a, odnosno DfMA.

Međutim, ako se pogledaju istorijske činjenice, može se videti da osnovni ciljevi DfM-a nisu potpuno novi. Tako su zanatske radionice oduvek pokušavale da projektuju upotrebljiv proizvod koji nije skup za proizvodnju, odnosno uvek je postojala težnja razvoja tehnoloških proizvoda. Vrlo često je zanatsku radionicu predstavljao jedan čovek, koji je istovremeno bio konstruktor, tehnolog, proizvođač i prodavac proizvoda, čime su aktivnosti razvoja i proizvodnje proizvoda bile integrisane [5].

Neki od značajnijih primera primene aspekata DfM-a kroz istoriju su [1,6]:

- *Eli Whitney, u USA (kraj XVIII veka) - razvio je sistem proizvodnje musketa na principu zamenljivosti delova koje je standardizovao, čime je značajno unapredio dotadašnji način izrade istih, gde je jedan majstor ručno izrađivao jednu pušku. U istom period nezavisno od njega LeBlanc je po sličnom principu razvio sistem proizvodnje musketa u Francuskoj.*
- *Henry Ford (početak XX veka) – razvio automobil “model T” koristeći principe jednostavnosti u radu, apsolutne pouzdanosti, visokog kvaliteta materijala i izrade, jednostavnosti održavanja, pri čemu je prvi primenio proizvodnu traku za montažu automobila.*
- *Udruženje inženjera ASME – serija priručnika koji su se počeli pojavljivati od 1941. god, pa su tako u priručniku “Metals Engineering Processes” iz 1958. god. date smernice projektantima za poboljšanje tehnološkosti metalnih komponenti koje se izrađuju livenjem, kovanjem i rezanjem.*
- *Uputstva i smernice za projektovanje proizvoda u okviru pojedinih kompanija, kao što je npr. General Electric-ova publikacija pod nazivom “Manufacturing Productibility Handbook” iz 1960. godine.*
- *Mitrofanov i Sokolovski (60ih godina XX veka)– postavili su temelje grupne i tipske tehnologije i dr.*

Osamdesetih godina prošlog veka DfM i DfA koncepti su bili prihvaćeni u mnogim preduzećima. Danas postoje brojne metodologije za DfMA aktivnosti, koje se uglavnom baziraju na:

- *Grupama pravila o proizvodnji koje će projektanti primenjivati pri razvoju konstrukcije proizvoda,*
- *Specijalizovanim softverskim rešenjima za izbor materijala i procesa, procenu troškova i dr.*
- *Softverskim programima – “revizorima” ugrađenim u CAD sisteme, koji automatski primenjuju pravila i daju savete za poboljšanje konstrukcije proizvoda i vrše procenu troškova,*

3. MESTO, ULOGA I ZADACI DfM-a, STANJE I TRENDVI RAZVOJA

Za koncept *projektovanje za izradu* - DfM (Design for Manufacturing) se najjednostavnije može reći da predstavlja projektovanje za laku izradu. U okviru ovog koncepta uzimaju se u obzir ograničenja koja se odnose na mogućnost izrade još u ranoj fazi projektovanja. Inženjeri projektanti mogu da vrše selekciju između različitih materijala i tehnoloških procesa sa ciljem da kvantitativno i brzo procene vreme proizvodnje i troškove proizvoda [7,8,9].

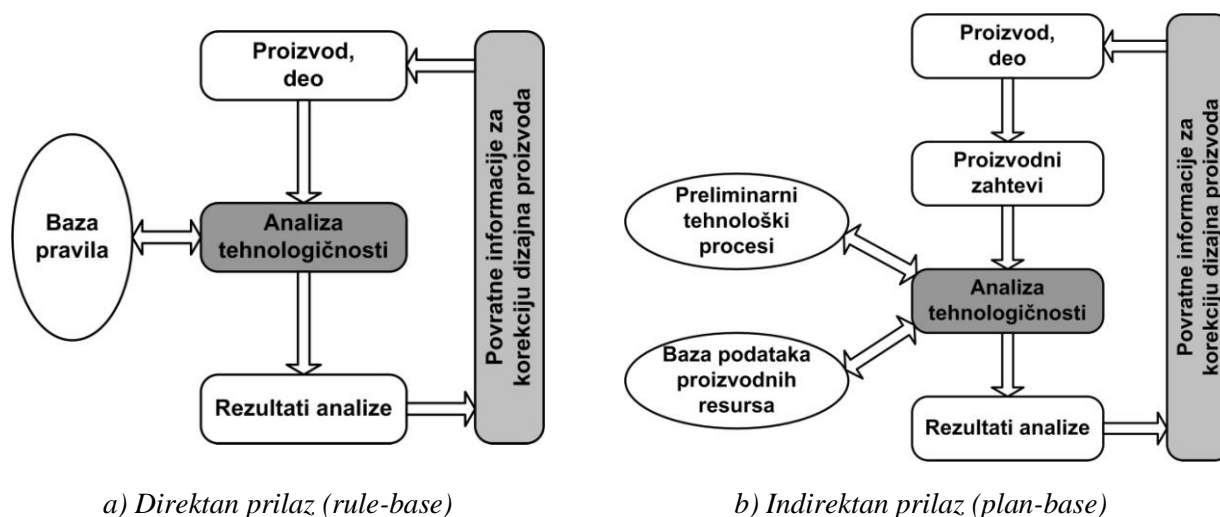
U literaturi se često sreće izraz analiza tehnološkosti proizvoda, kao aktivnost čiji se zadaci u velikoj meri podudaraju sa zadacima DfM-a [10]. Svoje ime ova aktivnost je dobila od termina „tehnološkost proizvoda“, koja predstavlja meru pogodnosti proizvoda za izradu, montažu, eksploataciju, održavanje i dr. Prema [11] sistemi analize tehnološkosti se dele prema *prilazu, oceni tehnološkosti i nivou*

³ Otkrivena greška i njena ispravka u razvoju proizvoda iznosi 1 novčanu jedinicu, u proizvodnji 10 novčanih jedinica, dok nakon plasmana na tržište ona iznosi 100 novčanih jedinica.

automatizacije.

Postoje dva osnovna prilaza za analizu tehnološkičnosti [12]:

- *Direktan prilaz ili prilaz baziran na pravilima (rule-base), slika 2a.* Pravila se koriste da se identifikuju atributi dizajna proizvoda koji nisu zadovoljavajući. Ovaj prilaz je pogodan za near-net proizvodnju, ali je manje pogodan za proizvodnju većine elektro-mašinskih delova zbog većeg broja zahvata i operacija, kao i njihove kombinacije, čime je otežano direktno utvrđivanje tehnološkičnosti konstrukcije proizvoda.
- *Indirektan prilaz ili prilaz baziran na tehnološkim procesima (plan-base), slika 2b.* Prvo se na bazi dizajna proizvoda projektuje konceptualno ili idejno rešenje tehnološkog procesa, a potom se modifikuju razni delovi procesa i odgovarajućeg dizajna u cilju smanjenja troškova.



Slika 2. Osnovni prilazi u analizi tehnološkičnosti [12]

Ocena tehnološkičnosti može biti [11]:

- *Binarna ocena* – Primarni oblik ocene tehnološkičnosti, sa jednostavnim izveštajem da li je za određeni skup atributa konstrukcija proizvoda tehnološkična ili nije (ocena 0 ili 1).
- *Kvalitativna ocena* – Projektant daje kvalitativne ocene tehnološkičnosti proizvoda na osnovu odgovarajućeg tehnološkog procesa. Na primer u [13] proizvod se ocenjuje kao "loš", "prosečan", "dobar" i "odličan". Ponekad se ovakve ocene tehnološkičnosti teško interpretiraju i upoređuju, npr. u situaciji ako projektanti imaju više alata za ocenu tehnološkičnosti,
- *Kvantitativna ocena* – Ovaj tip uključuje šeme za ocenu konstrukcije proizvoda dodeljivanjem numeričke ocene za pojedine attribute na osnovu određene apstraktne skale, koja može biti sa različitim rasponom vrednosti (ocena 0÷1, 0÷10). Isto kao i kod kvalitativnog ocenjivanja postoji problem kod interpretacije ocene, upoređivanja i kombinovanja više skala.
- *Ocena na bazi vremena i troškova* – Kako sve proizvodne operacije i zahvati imaju merljivo vreme i troškove oni se mogu koristiti kao osnova za ocenu tehnološkičnosti proizvoda. Ovakva ocena se ne može direktno koristiti za utvrđivanje da li je projektant postigao zadovoljavajući nivo tehnološkičnosti proizvoda, ali predstavlja realan pogled na problem proizvodnje posmatranog proizvoda sa stanovišta zadovoljenja rokova proizvodnje i cene proizvoda i može se uspešno koristiti za donošenje odluka da li neki deo ili proizvod uopšte proizvoditi ili ne.

Nivo automatizacije pokazuje nivo učešća projektanta u donošenju odluka, kao i tip informacija koje se prosleđuju projektantu.

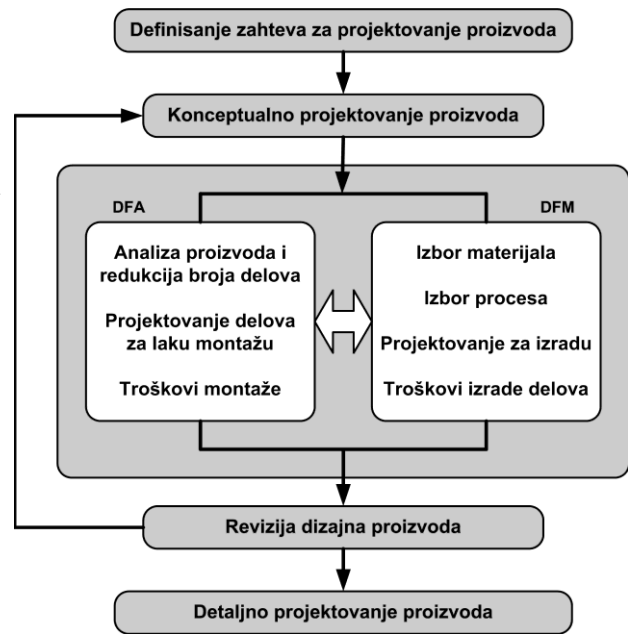
- *Količina i vrsta interakcije projektanta* – Kod nekih sistema projektant mora posebno da predstavi proizvod pomoću tipskih oblika iz baze podataka, dok se kod nekih sofisticiranih sistema prepoznavanje tipskih oblika vrši automatski ili uz određenu pomoć projektanta.
- *Količina i vrsta povratnih informacija* – Najviše sistema za analizu tehnološkičnosti obezbeđuje neku vrstu ocene tehnološkičnosti kompletne konstrukcije proizvoda, dok neki sistemi daju dekompoziciju ocene tehnološkičnosti pojedinih atributa proizvoda. Kod pojedinih sistema, pored ocene tehnološkičnosti, daju se i preporuke za redizajn pojedinih površina, tipskih oblika delova ili pak proizvoda u celini.

Strategijski posmatrano osnovna uloga DfMA metoda u okviru razvoja proizvoda je :

- Osnova za studiju simultanog inženjerstva kako bi se odredile smernice koje će pojednostaviti konstrukciju proizvoda, smanjiti troškove izrade i montaže i stvoriti mogućnost procene određenih poboljšanja na konstrukciji proizvoda,
- Alat za proučavanje konkurentskih proizvoda i vrednovanje odgovarajućih procesa izrade i montaže i
- Alat za procenu očekivanih troškova.

Prikaz mesta i zadataka projektovanja za izradu i montažu u okviru projektovanja proizvoda prikazana je na slici 3, odakle se može videti da su osnovni zadaci DfM-a orijentisani na:

- Analizu tehnološkičnosti konstrukcije proizvoda,
- Kombinovani izbor materijala i tehnoloških procesa izrade i
- Procenu vremena i trškova izrade.



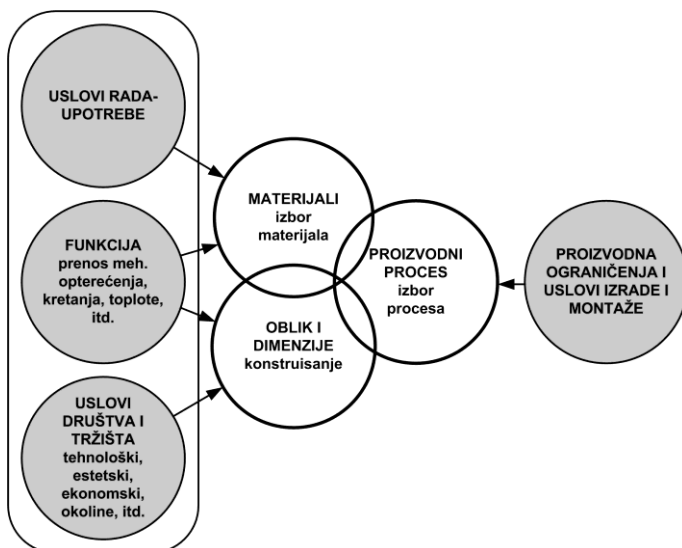
Slika 3. Mesto i zadaci DfM i DfA [4]

Zadatak razvoja i osvajanja proizvodnje novog proizvoda je višedimenzionalni problem koji određuju zahtevi uslova rada i eksploatacije proizvoda, njegova funkcionalnost i uslovi koje određuju društvo i tržište, sa jedne strane, i proces proizvodnje u uslovima ograničenja izrade i montaže, slika 4.

U svakom slučaju, kombinacija izabranih materijala i procesa izrade i obrade priprema mora biti kompatibilna, jer se tokom projektovanja, proizvodnje i primene proizvoda moraju ispuniti zahtevi inženjerskog dizajna. Postoje dva osnovna prilaza za izbor kandidata kombinacije materijal/proces za proizvodnju proizvoda „prvo materijal pa proces” i “prvo proces pa materijal” [2].

Kod prilaza *prvo materijal pa proces proizvodnje*, projektanti prvo biraju klasu materijala na osnovu ulaznih proizvodnih zahteva, nakon toga se vrši izbor mogućih priprema i procesa proizvodnje, uključujući i mogućnost izbora optimalnog procesa proizvodnje. Kod prilaza *prvo proces proizvodnje pa materijal*, projektanti prvo projektuju preliminarni tehnološki proces, a potom se vrši izbor i evaluacija odgovarajućih potencijalnih materijala na osnovu ulaznih proizvodnih zahteva.

Problemom izbora tehnoloških procesa bavili su se mnogi autori, kao što su [1,3,4,7,8,9,15]. Na slici 5 dat je osnovni algoritam izbora tehnološkog procesa, koji u suštini sadrži najbitnije faze izbora, zajedničke za većinu metodologija.



Slika 4. Povezanost konstruisanja, izbora materijala i izbora procesa proizvodnje pri razvoju proizvoda [14]



Slika 5. Faze izbora tehnoloških procesa [7]

U **prvoj fazi** u okviru preslikavanja zahteva dizajna proizvoda, definišu se:

- *Funkcije, odnosno zahtevi koji se očekuju od procesa, kao i vrsta procesa koje je potrebno primeniti,*
- *Ograničenja u okviru kojih se identifikuje željena klasa materijala, klasa oblika i atributi procesa i*
- *Kriterijumi za ocenu i izbor tehnoloških procesa.*

U **drugoj fazi**, koja se naziva fazom izvodljivosti [9], vrši se provera postavljenih ograničenja i eliminacija neodgovarajućih procesa. Ova faza se analitički najčešće realizuje pretraživanjem tabela u kojima su matricno definisane *moгуćnosti ili ograničenja tehnološkog procesa* s obzirom na attribute proizvoda, proizvodnje i procesa. Najčešći atributi, odnosno kriterijumi su *vrsta materijala, oblik, količine, tačnost*, i dr.

U **trećoj fazi**, koja se naziva faza optimizacije, vrši se rangiranje mogućih tehnoloških procesa prema definisanom/im kriterijumima optimizacije, odnosno funkciji/ama cilja. Najčešći kriterijumi optimizacije su vreme i troškovi izrade i kvalitet proizvoda.

U **četvrtoj fazi** se najbolje rangirani procesi detaljno analiziraju i ispituju u cilju dobijanja dodatnih i potvrđnih informacija o kvalitetu izbora. Razmatraju se eventualne moguće štetne posledice i ako se utvrdi da ima nekih bitnih nedostataka usvaja se sledeći proces po rangu vrednosti.

U literaturi se ova oblast sreće i pod terminom konceptuano projektovanje tehnoloških procesa (*Conceptual Process Planning-CPP*) [16], a odgovarajući programski sistemi pod imenom Conceptual CAPP [17]. Neki od razvijenih sistema iz ove oblasti su detaljnije opisani u [18,19]: CAMPS (*Computer-Aided Material and Process Selection*), EPSS (*Expert Processing Sequence Selector*), CMS (*Cambridge Materials Selector*) i CPS (*Cambridge Process Selector*), COMPASS (*Computer Oriented Material, Processes and Apparatus Selection System*), MaMPS (*Material and Manufacturing Process Selection*), MAS (*Manufacturing Advisory Service*), i dr.

Troškovi i vreme proizvodnje predstavljaju osnovno merilo za ekonomičnost konstrukcije proizvoda. 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 [20] metode za određivanje troškova se dele na *intuitivne, komparativne, analogne, parametarske i analitičke*.

Tabela 1. Metode za određivanje troškova [20]

Metoda	Opis	Najbolja primena	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 %

Za detaljno, ili završno projektovanje preporučuju se analitičke metode kojima se vrši proračun troškova, kao što je ABC (*Activity-Based Costing*) metoda, odnosno TD ABC (*Time-Driven Activity-Based Costing*), i dr. U metaloprerađivačkoj industriji savremene metode se baziraju na troškovima obrade tipskih oblika (feature based) [20,21].

Vreme i troškovi se u velikom broju slučajeva određuju paralelno jer su u međusobnoj korelaciji. Za procenu vremena proizvodnje uglavnom se koriste standardne metode na osnovu unapred definisanih vremena pokreta i zahvata, kao i nekih pokazatelja karakteristika proizvoda i procesa, pri čemu se koriste i odgovarajuće tehnike, kao što je regresiona analiza [22], tehnike veštačke inteligencije [23,24], itd.

Najpoznatije DfMA metodologije koje se danas najviše koriste su: *Boothroyd-Dewhurst (DFMA)* [3], *Lucas-Hull (DfA)* [25] i *Hitachi* (eng. *Assembly Evolution Method-AEM*) [26], koje su detaljnije prikazane u [27]. Na osnovama ove tri metodologije razvijeni su i odgovarajući programski sistemi:

- *DFMA, Boothroyd Dewhurst Inc., USA, prema metodologiji Boothroyd-Dewhurst [28], u okviru koga figuriše modul DFM Concurrent Costing namenjen za izbor materijala i procesa, i brzu procenu troškova proizvodnje.*
- *TeamSET, CSC Computer Sciences Ltd, UK, prema metodologiji Lucas-Hull [4,29] u okviru koga figuriše modul za procenu troškova izrade baziran na parametarskoj metodi.*

- *AEM, Hitachi Corp., Japan, prema metodologiji koju su razvili Miyakawa i Ohashi [30].*

Pored ovih metodologija, postoje i mnoge druge kao što su na primer: *AREM* (eng. *Assembly Reliability Evaluation Method*) za procenu pouzdanosti montaže, *FMEA* (eng. *Failure Modes and Effects Analysis*) za analizu uzroka i efekata potencijalnih otkaza, *FBME* (eng. *Feature Based Manufacturability Evaluation*) za procenu tehnološkičnosti konstrukcije proizvoda pomoću tipskih oblika, *DAC* (eng. *Design for Assembly Cost Effectiveness*) projektovanje za smanjenje troškova montaže, *AOD* (eng. *Assembly Oriented Design*) za uporedno projektovanje sklopova i delova, *Nippodenso*, sistematskog prilaza kod projektovanja za montažu (eng. *A systematic approach to Design for Assembly*), i mnoge druge.

U domaćim uslovima razvijaju se uglavnom individualna programska rešenja. kao što je rešenje prikazano u [31]. U radovima [32,33,34] prikazano je DfM programsko rešenje, koje se sastoji od modula za analizu tehnološkičnosti konstrukcije delova, izbor i ocenu tehnoloških procesa i procenu troškova njihove izrade. U radu [35] prikazano je DfM programsko rešenje koje je integrisano u CATIA programski sistem, namenjeno za razvoj tehnoloških zupčastih prenosnika. U radu [36] je prikazan sistem za kolaborativno projektovanje tehnoloških procesa u okviru koga je omogućena ekspertska ocena tehnoloških procesa na osnovu mišljenja i predloga stručnjaka iz raznih oblasti i država posredstvom interneta.

U poslednjih nekoliko godina, velike kompanije u CAX oblasti su svoje proizvode proširile u pravcu razvoja PLM sistema. Tako, na primer, PTC koji je razvio Pro/Engineer (Creo) je razvio i Windchill (www.ptc.com/product/windchill/cost), Siemens koji je razvio UniGraphics (NX) ima svoj PLM sistem (www.plm.automation.siemens.com/en_us), Dassault Systemes koji je razvio CATIA-u i komercijalizovao SolidWorks ima svoj PLM Solutions (www.3ds.com/solution). Svi ovi sistemi nude procenu troškova tokom životnog ciklusa proizvoda uključujući i procenu troškova proizvodnje. CAD bazirani softveri za procenu troškova i/ili analizu tehnološkičnosti konstrukcije proizvoda i delova integrisani su kao posebni moduli u odgovarajuće CAD sisteme ili mogu biti zasebne aplikacije koje se uglavnom mogu ugraditi u CAD sisteme [37]. Neki od ovih softvera su:

- *DFMPro* (dfmpro.geometricglobal.com). koji se veoma uspešno integriše u okviru raznih CAD platformi. Namenjen je za analizu tehnološkičnosti konstrukcije u CAD okruženju (DFMPro-Rule Manager) gde se na bazi pravila i smernica može izvršiti korekcija konstrukcije, kao i za procenu troškova izrade delova mašinskom obradom, obradom lima, brizganjem plastike, livenjem i procenu troškova montaže.
- *SolidWorks Costing* (www.solidworks.com) koji je u potpunosti integrisan u SolidWorks, namenjen je za procenu troškova delova od lima i delova koji se proizvode mašinskom obradom.
- *Autodesk Simulation DFM* (www.autodesk.com) koji može da se integriše u razne CAD platforme, namenjen je za analizu tehnološkičnosti delova od plastike, procenu troškova proizvodnje i uticaja na životnu sredinu.
- *SEER-DFM* (www.galarath.com) koji je projektovan za korisnike u oblasti upravljanja, finansija, inženjerstva, industrijskog projektovanja, kao i u proizvodnji. Koristi se za ocenu parametara procesa i kompromisno (trade-off) vrednovanje različitih faktora (kao npr. pogodnost izrade i montaže, izbor materijala i procesa, nivo grešaka i popravki, procenu troškova).
- *MicroEstimating* (www.microest.com) je razvijen od strane firme *Micro Estimating System Inc.*, nudi računarnom podržano projektovanje tehnoloških procesa (CAPP) i procenu troškova u mašinskoj industriji i proizvodnji, koristeći emulaciju mašina alatki, obradu baziranu na znanju (Knowledge-based) i automatsko prepoznavanje tipskih oblika (Automatic Feature Recognition).
- *Costimator®* (www.mtisystems.com) je namenjen za lako konfigurisanje proizvoda uzimajući u obzir mogućnosti proizvodnog pogona. Sistem sadrži stotine modela procesa i troškova, što podrazumeva širok spektar proizvodnih procesa i funkcija koje su implementirane u unapred definisane i praktično proverene modele troškova proizvodnje. Procena troškova se može vršiti na bazi tri metode parametarske procene, procene zasnovane na tipskim oblicima (feature-based) i detaljne procene na bazi odgovarajućih modela troškova.
- *aPriori Production Cost Management* (www.apriori.com) kao alat za procenu troškova proizvodnje mašinskom obradom, livenjem i brizganjem plastike.
- *CustomPartNet* (www.custompartnet.com), koji predstavlja onlajn alat za procenu troškova proizvodnje. Ovaj alat omogućava korisnicima da brzo i efikasno vrše proračune na bazi kojih se olakšava projektovanje i vrši procena troškova.
- *DISCUS* (www.discussoftware.com) je DfM alat koji procenjuje pogodnost za izradu na osnovu tipskih oblika, karakteristika dela i pravila za proizvodnju.

4. ZAKLJUČAK

Imperativ savremene proizvodnje je integracija, kolaboracija i simultano izvođenje poslovnih funkcija preduzeća u cilju brzog razvoja kvalitetnih, ekonomičnih i konkurentnih proizvoda koji će zadovoljiti uslove globalnog tržišta. Troškovi nastali tokom projektovanja proizvoda i tehnoloških procesa njihove izrade učestvuju u malom delu ukupne cene proizvoda, međutim, odluke koje se donose tokom ovih procesa značajno utiču na ukupne troškove razvoja proizvoda i od suštinske su važnosti za tržišni uspeh. Zbog toga je potrebno zadatak proizvodnje razmatrati što je moguće ranije, još u etapi projektovanja proizvoda, odnosno razvoja njegovog koncepta, jer su troškovi izmene veći ukoliko se one izvrše u kasnijoj fazi razvoja proizvoda. U cilju ispunjenja ovih zahteva, razvijene su odgovarajuće DfX metode, dok je u ovom radu akcenat dat na projektovanje za izradu (DfM) sa opisom najznačajnijih metodologija i odgovarajućih programskih sistema.

Kako se danas izrađuju različiti proizvodi koji u svojoj konstrukciji sadrže manji broj komponenti, novije materijale, integrisane i specifične delove, standardne delove i podsklopove, kao i jednostavnije procedure izrade i montaže, može se slobodno reći da su metodologije projektovanja za izradu i montažu bitan deo skoro svakog projekta. Prema podacima proizvodnih sistema koji su primenili ove metodologije postiže se povećanje kvaliteta proizvoda uz smanjenje troškova proizvodnje čak do 50%, što permanentno ukazuje na značaj njihove primene u preduzećima koja žele da opstanu na globalnom tržištu.

5. LITERATURA

- [1] Bralla, J. G.: *Design for Manufacturability Handbook*, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [2] Corrado, P.: *Design for Manufacturing: A structured Approach*, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2001.
- [3] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W.: *Product Design for Manufacturing and Assembly*, 3rd Edition, Taylor&Francis, New York, 2011.
- [4] Swift, K.G., Booker, J.D.: *Process Selection: From Design to Manufacture*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [5] Herrmann, J.A, Cooper, J., Gupta, S.K, Hayes, C.C., Ishii, K., Kazmer, D., Sandborn, P.A., Wood, W.A.: *New Directions In Design For Manufacturing*, Proceedings of the 8th Design and Engineering Technical Conference, DETC 2004-57770, pp. 853-861, Salt Lake City, Utah, 2004.
- [6] Gupta S.K., Nau S.K.: *A Systematic Approach for Analyzing the Manufacturability of Machined Parts*, Computer Aided Design, Vol. 27, No. 5, pp.343-352, 1995.
- [7] Ashby M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, 2005.
- [8] Dieter, E. G.: *ASM Handbook-Material Selection and Design*, Vol. 20, Ohio, 1997.
- [9] Creese, R.C.: *Introduction to Manufacturing Processes and Materials*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.
- [10] Todić, V., Stanić, J.: *Osnove optimizacije tehnoloških procesa izrade i konstrukcije proizvoda*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002.
- [11] Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D., Nau, D.S.: *Automated Manufacturability Analysis: a Survey*, Research in Engineering Design, Vol. 9. pp. 168–190, 1997.
- [12] Miko, B., Szegh, I., Kutrovacz, L.: *Preliminary Planning of Part Manufacturing Process*, Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng., Vol. 43, No. 2, pp. 97-106, 1999.
- [13] Ishii, K.: *Modeling of Concurrent Engineering Design*, In Kusiak, A.(Ed.), *Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 19-39, 1993.
- [14] Filetin, T.: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [15] Halevi, G., Weill, D., R.: *Principles of Process Planning*, Chapman & Hall, London, 1995.
- [16] Feng, S., Zhang Y.: *Conceptual Process Planning—A definition and functional decomposition*, *Manufacturing Science and Engineering*, Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol.10, pp.97-106, 1999.
- [17] Luttervelt, C.A.: *Research Challenges in CAPP*, Production Engineering and Computers, Vol. 4, No. 5, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, pp. 5-18, 2002.
- [18] Febransyah, A.: *A Feature-based Approach to Automating High-Level Process Planning*, Doctoral thesis, Faculty of North Carolina State University, 2001.
- [19] Todić V., Lukić D., Milošević M., Vukman J., Jovičić G.: *Computer Aided Conceptual Process Planning – A Short Review*, 11th Anniversary International conference on accomplishments in Electrical and mechanical Engineering and Information Technology, FME, Banja Luka, pp. 367-373, 2013.

- [20] 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.
- [21] H'Mida, F., Martin, P., Vernadat F.: *Cost Estimation in Mechanical Production: the Cost Entity Approach Applied to Integrated Product Engineering*, International Journal of Production Economics, Vol.103, No.1, pp.17-35, 2006.
- [22] Antolić, D.: *Procena vremena izrade proizvoda regresionim modelima*, Magistrski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [23] Mucientes, M., Vidal, J.C., Bugarin, A., Lama, M.: *Processing times estimation in a manufacturing industry through genetic programming*, 3rd International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems, Witten-Bommerholz, Germany, pp. 95-100, 2008.
- [24] Sudiarso, A., Putranto R.A.: *Lead Time Estimation of A Production System using Fuzzy Logic Approach for Various Batch Sizes*, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. III, London, pp. 2231-2233, 2010.
- [25] The University of Hull: DFA Analysis Overview, URL http://www2.hull.ac.uk/discover/mapp/sandpit/dfa/dfa_analysis.aspx,
- [26] Miyakawa, S., Ohashi, T.: *The Hitachi Assemblability Evaluation Method (AEM)*, Proceedings of 1st International Conference on Product Design for Assembly, 1986.
- [27] Jovičić G., Lukić D., Todić V., Milošević M., Vukman J.: *Projektovanje za izradu i montažu u okviru projektovanja za izvršot: prilazi, metode i metodologije*, Tehnika, Vol. 2, pp. 234-242, 2014.
- [28] DFMA software, URL:<http://www.dfma.com/software/>
- [29] TeamSET software, CSC Manufacturing, Solihull, UK., URL: www.teamset.com
- [30] Miyakawa, S., Ohashi, T., Iwata, M.: *The Hitachi New Assemblability Evaluation Method (AEM)*, Trans. North Am. Manuf. Res. Inst. SME, pp. 352-359, 1990.
- [31] Ćosić, I., Anišić, Z., Lazarević, M.: *Tehnologije montaže*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [32] Lukić, D.: *Razvoj opšteg modela tehnološke pripreme proizvodnje*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2012.
- [33] Lukić D., Todić V., Milošević M., Jovičić G., Vukman J.: *Software development for conceptual process planning*, 11th Anniversary International conference an accomplishments in Electrical and mechanical Engineering and Information Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, pp. 375-381, 2013.
- [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.
- [35] Ristić, M.: *Projektovanje proizvoda sa aspekta tehnoložnosti*, Magistrski rad, Mašinski fakultet, Niš, 2012.
- [36] Milošević, M.: *Kolaborativni sistem za projektovanje tehnoloških procesa izrade proizvoda baziran na internet tehnologijama*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [37] 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.

Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., Đurđev, M.:

STATE AND DEVELOPMENT TREND IN SCOPE OF DESIGN FOR MANUFACTURING – DfM

Abstract: *In the product life cycle central place occupies product development in which are generate quality of the products, but and the greatest number of errors, that need to be removed at the earliest possible stage of it's development. Successful product development involves solutions which are suitable for all stages of the life cycle, from design to the recycling and disposal. In order to develop manufacturability products, developed many tools and techniques for decision making, that included in Design for eXcellence – DfX, among which the most important Design for Manufacturing – DfM and Design for Assembly –DfA. The main research subject in this paper refers to the state analysis and development trends in DfM, through a review of certain methodologies and softwares.*

Keywords: *Design for Manufacturing – DfM, methodologies, softwares*



Lukić, N., Petrović, P.B., Danilov, I. ¹⁾

AKTUATOR PROMENLJIVE KRUTOSTI²⁾

Rezime

Ovim radom saopštavaju se rezultati istraživanja generalizovane mehaničke impedanse industrijskih humanoida, sa posebnim fokusom na razvoj aktuatora promenljive krutosti. U radu su navedene teoretske postavke opšteg dinamičkog modela i sistema upravljanja, uz sistematizaciju i analizu varijantnih konfiguracija aktuatora. Razvijeni algoritmi upravljanja krutošću implementirani su na eksperimentalnoj platformi. Dobijeni rezultati pokazuju uspešnu realizaciju zadatog oblika ponašanja. Prototip aktuatora promenljive krutosti razvijen je i realizovan na Mašinskom fakultetu u Beogradu, Centar za nove tehnologije (CeNT), Laboratorija za kibernetiku i mehatronske sisteme, u okviru projekta TR35007.

Ključne reči: industrijski humanoid, aktuator promenljive krutosti, upravljanje

1. UVOD

Novi tehnološki i inženjerski zahtevi u kontekstu paradigme masovne personalizacije i ekstremne diverzifikacije [1, 2] imaju implikacije na sve faze realizacije proizvoda, a posebno su delikatni za domen tehnologije montaže, gde je evidentna funkcionalna nedovoljnost postojećih tehnoloških entiteta. Rešenje ovog problema traži se u razvoju fundamentalno novog koncepta industrijskih robota - industrijskih humanoida, kao novih tehnoloških entiteta koji će svojim performansama, pre svega u ponašanju, biti sposobni da ostvare performanse koje su vrlo slične čoveku u okviru izvršavanja zadataka manuelne montaže, [2]. Aktuelne istraživačko-razvojne aktivnosti koje uvode humanoidne robote u domen proizvodnih tehnologija usmerene su kroz strateške projekte, na primer: PHRIENDS, SMErobot, DLR/KUKA LWR ili ROSETTA, [2]. Intenzivan razvoj kroz pomenute okvire rezultirao je potpuno novim robotima kao što su FRIDA, LWR 4, KUKA LBR iiwa i UR, od kojih su neki i do danas ostali na nivou koncepta sa namenom za dalja istraživanja i rad u laboratorijskim uslovima, a neki su postali komercijalno dostupni. Međutim, i pored već ostvarenih navedenih rezultata, ova oblast je ostala otvorena za dalji razvoj i unapredjenja, posebno imajući u vidu specifične zahteve koje nameću različiti aplikativni aspekti.

Ključni istraživački koncept za razvoj i izgradnju industrijskih humanoida, kroz koji je moguće ostvariti adaptibilnost u fizičkoj interakciji sa okruženjem, uključujući i kolaborativni rad sa čovekom, jeste upravljanje generalizovanom krutošću robota. Po definiciji, generalizovana krutost manipulacionog robota u spoljašnjem koordinatnom sistemu X_R (prostor radnog zadatka), koja određuje funkciju pomeraja robota unutar njegovog konfiguracionog prostora Q_R pod dejstvom spoljašnje generalizovane sile na vrh robota, definisana je opštom relacijom, [2, 3]:

$$F = K_x(X - X_0) = K_x \delta X \quad (1)$$

gde je: $F \in R^m$ - vektor spoljašnje generalizovane sile koja deluje na vrh robota, $K_x = K_H \in R^{m \times m}$ - simetrična matična funkcija generalizovane krutosti manipulacionog robota, $X_0 \in R^m$ - vektor nominalnog položaja vrha robota, $X \in R^m$ - vektor stvarnog položaja vrha robota i $\delta X \in R^m$ - vektor pomeraja vrha robota (odziv na pobudu silom F).

Uticaj krutosti segmenata kinematskog mehanizma robota na generalizovanu krutost je najčešće od sekundarnog značaja. Dominantan uticaj ima popustljivost servo akucionog sistema. Sa aspekta

¹⁾ Doktorant Nikola Lukić, dipl. inž. maš.-master, (nlukic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Petar B. Petrović, (pbpetrovic@mas.bg.ac.rs), doktorant Ivan Danilov, dipl. inž. maš. - master, (idanilov@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu i nauku

upravljivosti krutošću robota servo aktuacioni sistem ima ključnu ulogu. Za uslov malih odstupanja od nominalne trajektorije, kongruentnom transformacijom generalizovane matrice krutosti (1), dolazi se do relacije koja definiše matricu krutosti aktuacionog sistema robotskog mehanizma, [3]:

$$K_X \rightarrow K_q = J^T(q)K_X J(q), K_q \in R^{n \times n} \quad (2)$$

Aktuaciona matrica krutosti K_q je simetrična, pozitivno definitna i u opštem slučaju nedijagonalna. Ključni zadatak u upravljanju generalizovanim krutošću industrijskog humanoida je fizička realizacija takvog aktuacionog sistema koji uvek može da generiše aktuacionu matricu krutosti K_q za zadatu matricu generalizovane krutosti K_X . Svojstva aktuacionog sistema robota koja zadovoljavaju relaciju (2) se u opštem slučaju ne mogu generisati rešenjima koja se koriste kod konvencionalnih robota.

Prethodno postavljen zahtev za upravljanje krutošću robota putem aktuacionog sistema je polazna tačka razvoja generičke osnove industrijskih humanoida, koju predstavlja aktuator promenljive krutosti (*Variable stiffness acutator* - VSA). Primena industrijskih humanoida u proizvodnim tehnologijama, i kompleksnost koju sa sobom nosi uvođenje robota u kolaborativni rad sa čovekom, uključujući i mnoge druge vidove fizičke interakcije sa okruženjem, nameću širok korpus naučno-istraživačkih aktivnosti potrebnih za razvoj aktuatora promenljive krutosti. Konstrukciona rešenja aktuatora [4, 5] variraju u zavisnosti od pristupa u izgradnji i od aplikativnih aspekata, pa tako na primer imamo: biološki inspirisane, mono i poliartikulisane aktuatore (sa jednim ili više servo-motora), zatim aktuatore sa eksplicitnim ili implicitnim upravljanjem krutošću, itd. Razvoj algoritama, zakona i strategija upravljanja direktno se proširuje sa nivoa aktuatora na kompletnu robotsku strukturu, gde se kao veoma bitni teoretski okviri izdvajaju linearizacija povratnom spregom [6], i upravljanje energijom sistema bazirano na svojstvu pasivnosti [7]. Važan sadržaj u kontekstu fizičke interakcije predstavlja estimacija krutosti u kontaktu sa okruženjem, u realnom vremenu [8]. Neizostavan aspekt u izgradnji industrijskih humanoida za kooperativan rad sa čovekom je bezbednost [9], što takodje ima direktan uticaj pri definisanju projektnih zahteva za realizaciju aktuatora promenljive krutosti.

U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja u domenu promenljive generalizovane mehaničke popustljivosti i podatljivosti industrijskih humanoida u teoretskom i eksperimentalnom kontekstu, sa posebnim fokusom na aktuator promenljive krutosti kao osnovni gradivni element. Pored navodjenja analitičkih modela i postavke varijantnih konstruktivnih koncepata aktuacionog sistema sa upravljivom mehaničkom impedansom, detaljno se navode rezultati eksperimentalnih istraživanja koja su ostvarena na razvijenom i fizički realizovanom prototipu aktuatora promenljive krutosti.

2. DINAMIČKI MODEL I STRUKTURA SISTEMA UPRAVLJANJA

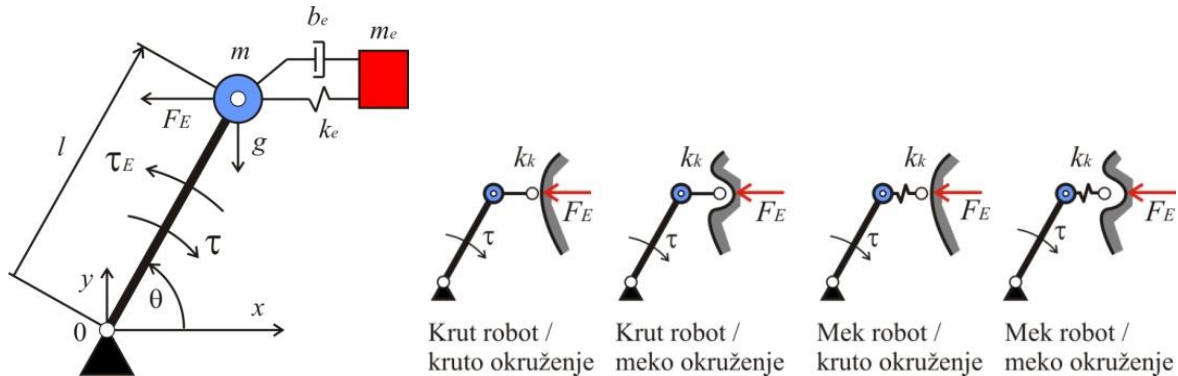
Nezavisno od varijantnog rešenja aktuacionog sistema industrijskog humanoidnog robota, svaki od njegovih servo aktuatora, pored kinematske funkcije koja postoji kod konvencionalnih robota, mora da poseduje i svojstvo upravljive krutosti, uključujući i svojstvo pasivnog kretanja pod dejstvom spoljašnje sile. Zglob robota koji je pogonjen ovakvim aktuatorom nazivamo i mekim zglobom (*soft joint*). Njegov osnovni zadatak je da lokalno ostvari: 1) upravljivu aktivnu pokretljivost, 2) upravljivu pasivnu pokretljivost (povratna pokretljivost) i 3) upravljivu popustljivost (reaktivna interakcija sa okruženjem), [3]. Ovaj zadatak se prirodno proširuje i na funkciju aktivnog upravljanja kontaktnom silom, u smislu sledjenja zadate trajektorije sile u interakciji sa okruženjem, ili dalje, funkcijom prenosa energije na okruženje u impulsnom ili nekom drugom obliku inspirisanom biomimetičkim aspektima. Ovako definisan upravljački zadatak je vrlo kompleksan, bitno kompleksniji od onog koji postoji kod konvencionalnog robota.

Za izgradnju robotskog aktuatora prema prethodno navedenim zahtevima u nastavku se definiše dinamički model kao osnova za dalju realizaciju. Aktuator promenljive krutosti, ili meki zglob, moguće je posmatrati kao manipulator sa jednim upravljanim stepenom slobode, ugaona koordinata θ . Njegov dinamički model je definisan relacijom (3) i određuje pogonski moment τ kao upravljačku veličinu koja uravnotežava: inercijalni član ml^2 , viskozni disipativni član, disipativni član tipa nelinearnog Kulonovog trenja (mada za analizu stabilnosti treba uzeti mnogo realističniji model koji sadrži i komponentu Stribekovog negativnog viskoznog trenja), gravitacioni član mg i moment kontaktne sile τ_E , koja nastaje kroz različite oblike interakcije sa okruženjem i u upravljačkom smislu ima karakter spoljašnjeg poremećaja:

$$\tau = ml^2\ddot{\theta} + v\dot{\theta} + \mu \operatorname{sgn} \dot{\theta} + mgl \cos \theta + \tau_E \quad (3)$$

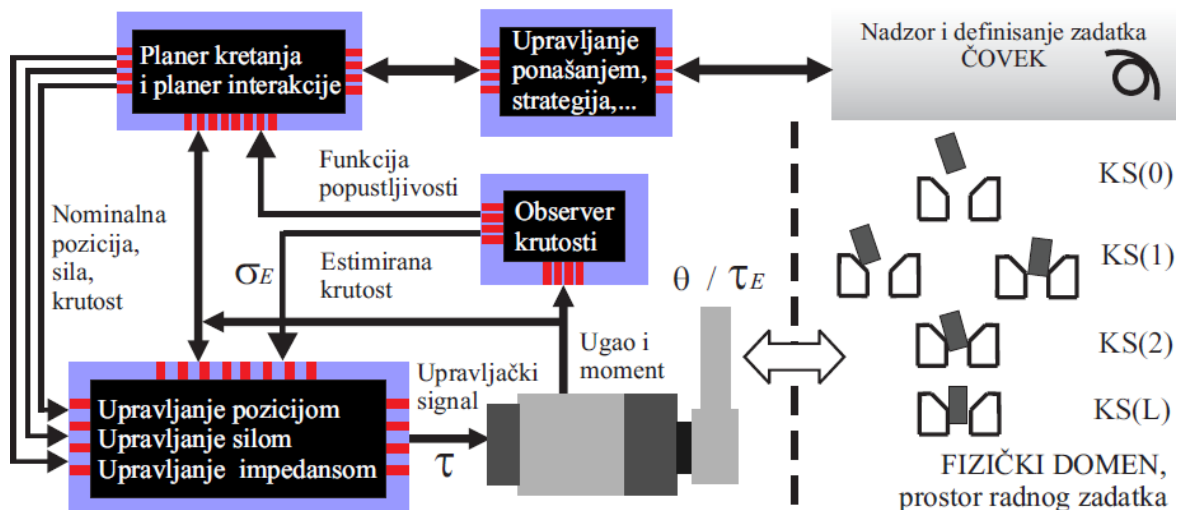
Značenje pojedinih veličina prikazano je na slici 2. Model je nelinearan u svojoj osnovi. Zbog jednostavnosti, na ovom nivou razmatranja zanemarena su mehanička svojstva pogona.

Upravljački sistem treba da obezbedi dve elementarne upravljačke funkcije: 1) upravljanje pozicijom zgloba, ugaona koordinata θ sa njenim prvim i drugim izvodom po vremenu, i 2) upravljanje po sili, koje ima zadatak da oblikuje interakciju sa okruženjem svedenu na njen ekvivalent τ_E (na primer, proces spajanja delova u robotizovanoj montaži u potpunosti opisuje generalizovani vektor sile čiji je karakter uslovljen nizom kontaktnih situacija). Kombinujući elementarne modele moguće je izgraditi složeni sistem upravljanja ponašanja mekog zgloba (slika 3), koji uključuje planer kretanja i planer interakcije sa okruženjem.



Slika 2. Dinamički model aktuatora promenljive krutosti u interakciji sa okruženjem, karakteristični slučajevi

Interakcija sa okruženjem može da bude elementarna kroz ostvarivanje željene krutosti ili popustljivosti, ili vrlo kompleksna poput one koja postoji u zadacima montaže ili dinamičke interakcije sa prenosom energije različitog vremenskog profila. Poseban oblik ponašanja odnosi se na funkciju pasivnog kretanja, koja omogućava pasivnu pokretljivost pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja sa potpunom kompenzacijom gravitacionih i svih disipativnih članova i delimičnu ili potpunu kompenzaciju inercijalnih članova. Estimator krutosti mekog zgloba je sastavni deo upravljačkog sistema, pri čemu se nominalna krutost ili funkcija popustljivosti, u slučaju kompleksnijih interakcija sa okruženjem, pojavljuju kao zadata vrednost koje aktuator promenljive krutosti mora da ostvari.



Slika 3. Osnovna arhitektura upravljačkog sistema aktuatora promenljive krutosti na primeru fizičke interakcije sa okruženjem tokom procesa spajanja delova u robotizovanoj montaži

Primenom koncepta particije upravljačkog zakona na deo koji ostvaruje funkciju upravljanja po grešci (linearni zakon servo upravljanja) i deo koji ostvaruje upravljanje po modelu, zakon upravljanja po poziciji moguće je izraziti u obliku, [3]:

$$\tau = \alpha \tau' + \beta, \quad (4)$$

pri čemu je servo upravljanje po grešci, $e = (\theta_0 - \theta)$, definisano relacijom:

$$\tau' = \ddot{\theta}_o + k_v \dot{e} + k_p e, \quad (5)$$

a deo koji u ovakav upravljački zakon unosi estimirane komponente modela aktuatora promenljive krutosti i moment koji dolazi od interakcije sa okruženjem i meri se odgovarajućim senzorskim sistemom (potpuno znanje o interakciji sa okruženjem), glasi:

$$\begin{aligned}\alpha &= \widehat{m}l^2 \\ \beta &= \widehat{v}\dot{\theta} + \widehat{\mu} \operatorname{sgn} \dot{\theta} + \widehat{m}gl \cos \theta + \tau_E\end{aligned}\quad (6)$$

Upravljanje po poziciji definisano sa (4), (5) i (6) omogućava linearizaciju nelinearnog upravljačkog zadatka.

Za sintezu elementarnog zakona upravljanja po sili, neophodno je uspostaviti relaciju izmedju pomeraja vrha robota i kontaktne sile. Fokusirajući se samo na elastičnu komponentu kontaktne sile (polazi se od pretpostavke da je ona dominantna u odnosu na disipativnu i inercijalnu komponentu) nameće se potreba poznavanja statičke krutosti kontakta. Statička krutost kontakta je definisana superpozicijom redno spregnutog para generalizovane krutosti vrha robota k_X i krutosti okruženja k_E (kao na slici 2), odnosno važi:

$$k_K = \frac{k_X k_E}{k_X + k_E} . \quad (7)$$

Na osnovu prethodne relacije dalje se definiše ekvivalent fizičke interakcije aktuatora promenljive krutosti sa okruženjem:

$$\tau_E = k_K \delta \theta . \quad (8)$$

Relacija (8) pokazuje fizičku nerazdvojivost sile od pomeraja (sila i pomeraj su osnovne kinetostatičke veličine). U realnosti, fizičkom domenu, nemoguće je upravljati silom bez upravljanja pomerajem i obrnuto (dualizam sile i pomeraja), što je suština upravljanja generalizovanom krutošću.

Na osnovu (7) i (8), očigledno je da je upravljanje kontaktnom silom moguće i da se to može ostvariti upravljanjem generalizovane krutosti robota. Najčešće je krutost okruženja konstantna, a u odredjenim slučajevima i pasivno promenljiva. U posebnom slučaju, kada je okruženje robota aktivno (slučaj kod dvorukih robota gde se u radu simultano koriste obe ruke, pri čemu se jedna ponaša kao okruženje), onda je moguće upravljanje i krutošću okruženja.

Smenom relacije (8) u dinamički model aktuatora promenljive krutosti (3), pogonski moment se izražava samo u funkciji kontaktne sile, odnosno momenta koji ona generiše u odnosu na osu zgloba [3]:

$$\tau = ml^2 k_K^{-1} \ddot{\tau}_E + h(\dot{\tau}_E, \tau_E, k_K^{-1}, \phi) + mgl \cos(k_K^{-1} \tau_E) + \tau_E \quad (9)$$

Primenjujući koncept particije upravljačkog zakona (4), analogno upravljanju po poziciji, definše se zakon upravljanja po sili, [3]. Na ovaj način uspostavlja se fizička sprega izmedju dva upravljačka zakona (upravljanje pozicijom i momentom) čime se ostvaruje upravljanje krutošću, odnosno funkcijom popustljivosti, koja je u opštem slučaju proizvoljna funkcija pozicije zgloba θ .

3. AKTUACIONA KONFIGURACIJA

Generalno, postoje dva osnovna varijantna oblika za realizaciju aktuatora promenljive krutosti [4, 5]. Prvi je baziran na primeni jednog servoupravljanog motora, koji istovremeno ostvaruje pokretanje pogonjenog segmenta po zadatoj ugaonoj poziciji i funkciju popustljivosti. Drugi varijantni oblik je baziran na primeni dva servoupravljana motora, od kojih prvi upravlja ugaonom pozicijom, a drugi funkcijom popustljivosti.

Mada na prvi pogled dovoljno, varijantno rešenje sa jednim servopogonom poseduje inherentan problem observacije krutosti u realnom vremenu [8], a zatim i njeno ostvarivanje u skladu sa postavljenim nominalnim zadatkom. Mada je uz odgovarajuće rešenje observera krutosti ovaj zadatak moguće rešiti na zadovoljavajući način, upravljačka kompleksnost je uvek ograničavajući faktor.

Drugo rešenje je u osnovi bazirano na antagonističkom konceptu pogona [4]. Suština ovog pristupa je da se deo upravljačke funkcije distribuira na mehanički sistem, odnosno da se popustljivost ugradi u strukturu aktuatora, ali tako da je moguće njeno upravljanje (*morphological computation*). Redundantnom aktuacijom

relaksira se problem observacije krutosti u realnom vremenu. Suština ovog koncepta prikazana je na slici 4 (prisutan kod bioloških sistema).

Dva prednapregnuta elastična elementa (opruge u generičkom smislu), A i B, međusobno jednake krutosti $k = k_A = k_B$ deluju na centralni segment, S, parom sila istog intenziteta, ali suprotnog smera. Jednačina statičke ravnoteže ovakvog sistema glasi:

$$F = -F_A + F_B = -k(x - x_{0A}) + k(x_{0B} - x) = -2kx + k(x_{0B} - x_{0A}) \quad (13)$$

pri čemu su sa x_{0A} i x_{0B} označene unutrašnje koordinate aktuacionog para A i B, a sa x je označena unutrašnja koordinata pozicije ravnoteže segmenta S. Diferenciranjem (13) po koordinati x dobija se ekvivalentna krutost sistema:

$$k_X = -\frac{dF}{dx} = -2k \quad (14)$$

Očigledno je da ekvivalentna krutost za slučaj linearnih aktuacionih elemenata ne zavisi od unutrašnjih koordinata aktuatora A i B. Ona zato nije upravljiva. Kod aktuatora sa nelinearnom krutošću to nije slučaj, [4]. Na primer, ukoliko je krutost aktuatora određena polinomom drugog reda, onda relacija (13) dobija oblik:

$$F = -k(x - x_{0A})^2 + k(x_{0B} - x)^2 = -2kx(x_{0A} - x_{0B}) + k(x_{0B}^2 - x_{0A}^2) \quad (15)$$

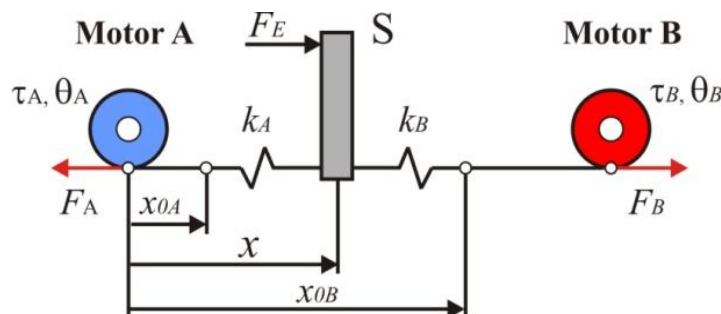
odakle je ekvivalentna krutost:

$$k_X = \frac{dF}{dx} = 2k(x_{0A} - x_{0B}) \quad (16)$$

U ovom slučaju, krutost je funkcija unutrašnjih koordinata aktuatora i ona je upravljiva. Dva stepena slobode omogućavaju da se pored upravljanja ekvivalentnom krutošću, upravlja i pomerajem segmenta S. Iz relacije (15) sledi pozicija statičke ravnoteže segmenta S:

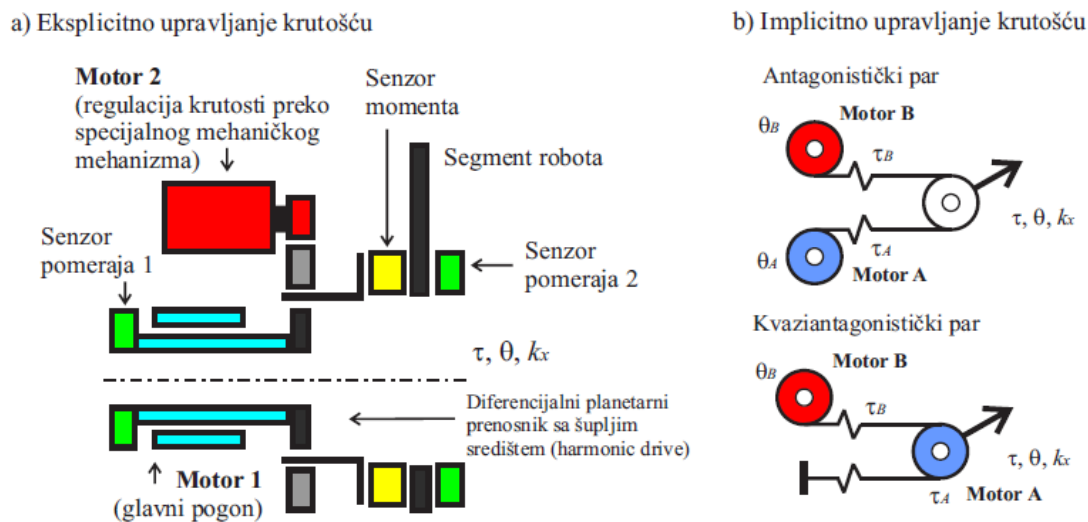
$$2kx(x_{0A} - x_{0B}) + k(x_{0B}^2 - x_{0A}^2) = 0 \Rightarrow x = \frac{x_{0A}^2 - x_{0B}^2}{2(x_{0A} - x_{0B})} = \frac{x_{0A} + x_{0B}}{2} \quad (17)$$

Ukoliko na S deluje neka spoljašnja sila, onda će ravnotežni položaj (17) biti uspostavljen na drugoj poziciji, što je određeno sa (16). Upravljanje krutošću k_X koja je u opštem slučaju proizvoljna funkcija pozicije zgloba, odnosno $k_{X0} = k_{X0}(x)$, kao i upravljanje interakcijom sa okruženjem, odnosno intenzitetom kontaktne sile F_E , ostvaruje se preko (16) i linearizovanog zakona pozicionog upravljanja (4).



Slika 4. Koncept aktuacione redundanse tipa antagonističkog aktuacionog para (a), primer varijantnog rešenja sa nelinearnim elastičnim elementom

Koncept aktuacione redundanse ove vrste omogućava stvaranje velikog broja konstrukcionih rešenja mekog zgloba - aktuatora. Generalno, sva varijantna rešenja se mogu svrstati u dve osnovne klase: aktuatori sa eksplicitno upravljanjem krutošću i aktuatori sa implicitno upravljanjem krutošću (slika 5).

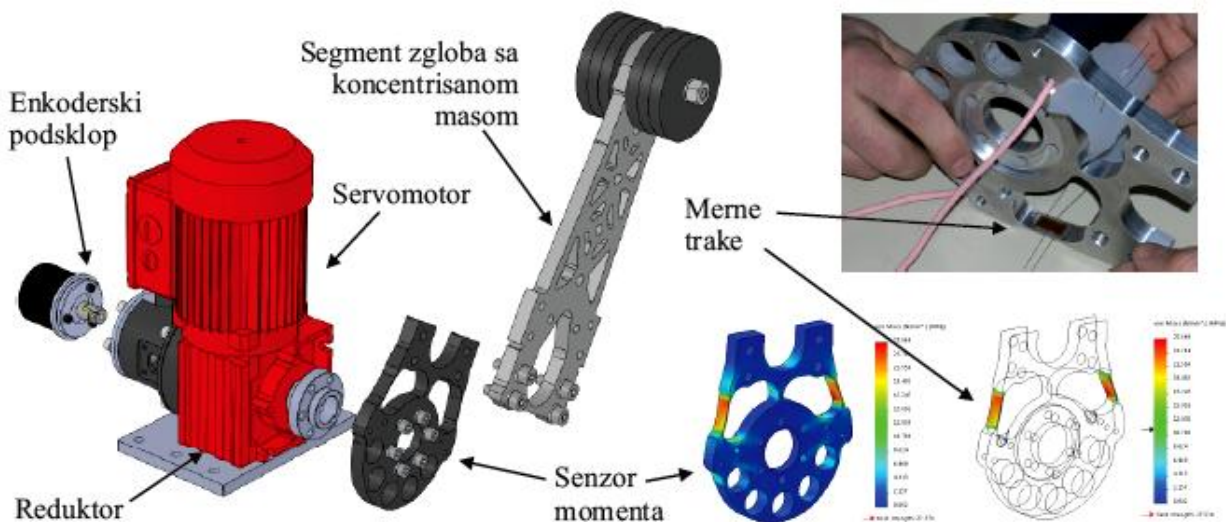


Slika 5. Koncept redundantno aktuiranog zgloba. Implicitno i eksplicitno upravljanje krutošću

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

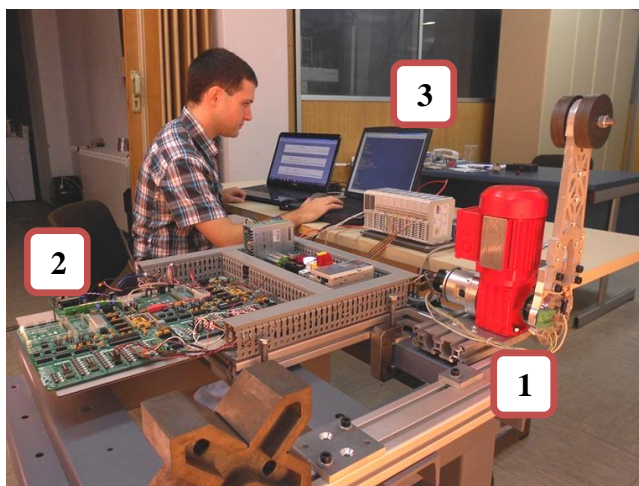
U cilju praktičnih provera varijantnih zakona upravljanja i sticanja praktičnih iskustava u radu sa aktuatorom promenljive krutosti koji poseduje mogućnost simultanog upravljanja pozicijom i kontaktnom silom, i posebno, realizaciju varijantnih oblika krutosti u interakciji sa okruženjem, uključujući i funkciju pasivnog kretanja, u Centru za nove tehnologije, CeNT, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, razvijen je i fizički realizovan prototip prikazan na slikama 6 i 7.

Na slici 6 prikazan je pogonski sistem aktuatora koji je baziran na kaveznom asinhronom motoru upravljanom pomoću frekventnog regulatora sa mogućnošću upravljanja vektorom magnetskog fluksa. Sastavni deo pogonskog sistema je samokočiv reduktor (SEW Spiroplan WAF10). Ugaona koordinata zgloba i ugaona brzina prate se pomoću brojačkog enkodera, a pogonski moment koji se prenosi iz okruženja na segment robota prati se pomoću senzora sile baziranog na mernim trakama (varijanta polovinskog i punog mosta). Detalji tela senzora sile integrisanog u segment robota prikazani su takođe na slici 6, sa naglašenim rezultatima projektovanja i proračuna senzora primenom metode konačnih elemenata.



Slika 6. Model aktuatora promenljive krutosti sa detaljima analize senzora sile i ugradnje mernih traka

Prototip aktuatora promenljive krutosti je realizovan tako da se senzorski sistem, enkoder i senzor momenta, nalaze na strani segmenta, pa se dve ključne kinetostatičke veličine, pomeraj i sila, mere na strani segmenta. Suština je u tome da se samo ovim načinom ugradnje senzora omogućuje kvalitetno upravljanje krutošću. U suprotnom, kada se ugaoni pomeraj i moment mere na strani motora kao što je kod mnogih postojećih rešenja slučaj, tada se koristan informacioni sadržaj o interakciji sa okruženjem drastično umanjuje postojanjem reduktora velikog prenosnog odnosa, sa zazorom i uz negativne efekte trenja.



1. Aktuator promenljive krutosti sa ugrađenim senzorskim sistemom za merenje ugaonog pomeraja i momenta

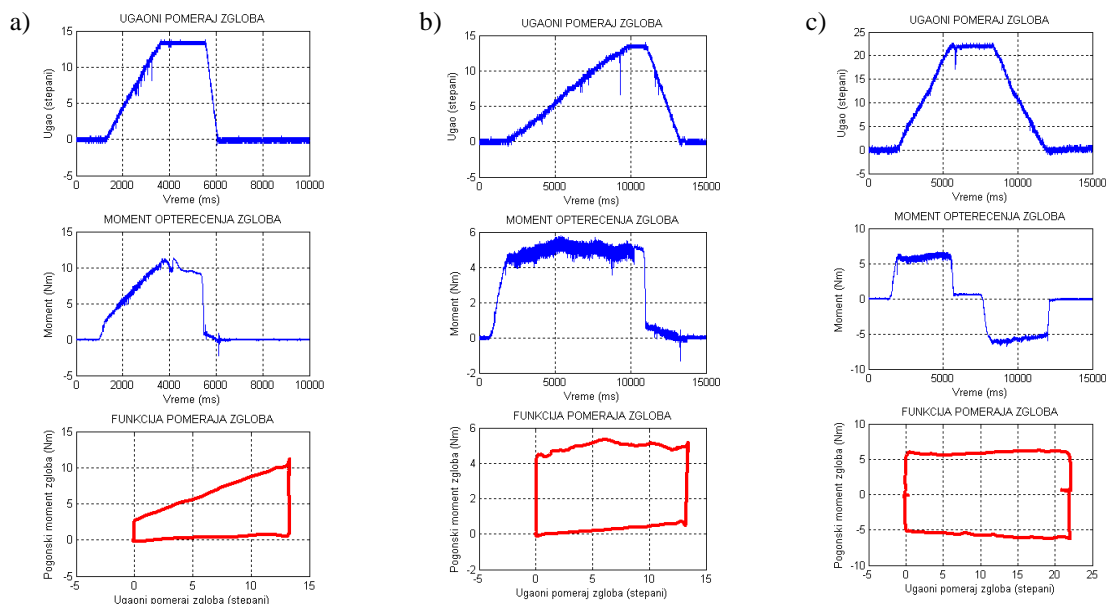
2. Upravljački sistem otvorene arhitekture za rad u realnom vremenu, baziran na multiprocesorskoj platformi

3. Razvojno okruženje sa simulacionim modelima i sistemom za akviziciju eksperimentalnih podataka

Slika 7. Eksperimentalna instalacija aktuatora promenljive krutosti sa razvojnim okruženjem

Upravljački sistem razvijenog aktuatora promenljive krutosti baziran je na multiprocesorskoj platformi otvorene arhitekture, za rad u realnom vremenu. Osnovu upravljačkog sistema čine 32-bitni mikrokontroleri (ARM Cortex, klase M4, radnog takta 168 MHz).

Primer ponašanja zgloba za tri karakteristična slučaja zadatog ponašanja: 1) linearna opruga zadate krutosti, 2) opruga konstantne krutosti (konstantna reaktivna sila, nezavisna od pomeraja) i 3) povratno kretanje, prikazani su na slici 8. Za sva tri slučaja ponašanja navode se po tri grafika: 1) ugaoni pomeraj u funkciji vremena, 2) moment opterećenja zgloba koji se meri senzorom sile koji je integrisan u strukturu segmenta, takodje u funkciji vremena i 3) funkcija pomeraja koja iskazuje zavisnost otpora zgloba u odnosu na njegov ugaoni pomeraj (prikazano crvenom linijom).



Slika 8. Tri tipična slučaja ponašanja aktuatora promenljive krutosti u interakciji sa okruženjem

Na slici 8a) prikazan je slučaj kada je ponašanje aktuatora programirano tako da generiše funkciju linearne opruge, odnosno opruge koja generiše krutost koja je linearno spregnuta sa ugaonim pomerajem i koeficijentom proporcionalnosti k_x . Na korespondentnim graficima jasno se uočava vremenski profil pomeraja zgloba koji ima trapezni oblik. Dejstvom spoljašnje sile generisane od strane mekog okruženja (ljudska ruka) zglob ostvaruje popustljivo kretanje i pomera se za 13° gde postoji vremenski plato, mirovanje, a zatim po prestanku dejstva spoljašnje sile, segment se vraća u inicijalni položaj.

Na slici 8b) prikazano je ponašanje aktuatora promenljive krutosti za slučaj zadatog konstantnog otpora, što je ekvivalentno slučaju dejstva pneumatskog cilindra ili mehanizma protivtega. Na grafiku koji prikazuje vrednost momenta koji deluje na segment, jasno se vidi rastući i opadajući karakter, što se sasvim jasno

pokazuje na trećem grafiku gde je prikazana funkcija pomeraja, odnosno karakteristika krutosti. Funkcija ima izraženu histerezisnu petlju, koja iznosi 4Nm i koja dolazi od zadatog praga donje vrednosti momenta na koji reaguje upravljački sistem i unutrašnjeg trenja prenosnika aktuatora promenljive krutosti. Na histerezisnoj petlji se jasno uočava približno konstantan otpor, što pokazuje da i u ovom slučaju akcioni sistem i njemu pridodat upravljački sistem efikasno i kvalitetno realizuju zadati oblik ponašanja - konstantan moment (otpor) od 5Nm.

Na slici 8c) je prikazan slučaj ponašanja aktuatora sa svojstvom pasivnog kretanja. Na pobudu spoljašnjim momentom u jednom smeru aktuator popušta, održavajući konstantan otpor, koji je unapred definisan kao i u slučaju 8b). Po prestanku dejstva pobudne sile, aktuator zadržava dostignutu poziciju, bez povratnog kretanja, što je suštinska odlika pasivnosti. Kao i u slučaju 8b), upravljački sistem aktuatora ostvaruje zadatak uz prisustvo histerezisne petlje sa karakterističnim delom u negativnoj poluravni.

5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada predstavljen je koncept aktuatora promenljive krutosti, kao osnovnog gradivnog elementa industrijskih humanoida. Izložen je detaljan opis dinamičkog modela aktuatora, zatim arhitektura sistema upravljanja, a takodje su analizirani i prikazani varijantni konstrukcioni pristupi sa svojim prednostima i nedostacima. Razvijeni upravljački algoritam koji je implementiran i fizički realizovan na multiprocesorskom upravljačkom sistemu pokazuje sposobnost realizacije zadatog oblika ponašanja aktuatora - robotskog zgloba. Dalja istraživanja će biti usmerena ka unapredjenju dinamičkih karakteristika upravljačkog sistema, podjednako u delu upravljačkog zakona i mehaničkog hardvera. Takodje, biće sprovedena istraživanja ka implementaciji i usavršavanju ponašanja zgloba u ostvarivanju ograničenog zadatog kretanja i sledjenja zadate kontaktne sile.

6. LITERATURA

- [1] Jovane, F., Koren, Y., Boër, C.R.: *Present and Future of Flexible Automation - Towards New Paradigms*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 2, pp. 543–560, 2003.
- [2] Petrović, P., Lukić, N., Danilov, I.: *Industrijski humanoidi - novi koncept robota za kolaborativni rad čovek-mašina u sistemima za robotsku montažu*, Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, str. 3.126-3.139, Beograd, maj 2012.
- [3] Petrović, P., Lukić, N., Danilov, I.: *Eksperimenti sa mekim zglobovima industrijskog humanoida*, Zbornik radova 57. ETRAN konferencija, Zlatibor, Jun 2013. (**Nagrada za najbolji rad na sekciji za robotiku**)
- [4] Sugar, T. G., Vanderborht B., Hollander, K. W., Lefeber, D.: *Compliant Actuator Design*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 81-94, September 2009.
- [5] Albu-Schäffer, A., et al.: *From Torque Feedback-Controlled Lightweight Robots to Intrinsically Compliant Systems*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 15., pp. 20-30., January 2008.
- [6] Palli, G., Melchiorri, C.: *Robust Control of Robots with Variable Joint Stiffness*, International Conference on Advance Robotics, pp. 1-6, Munich, IEEE, June 2009.
- [7] Albu-Schäffer, A., Ott, C., Hirzinger, G.: *A Unified Passivity based Control Framework for Position, Torque and Impedance Control of Flexible Joint Robots*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 26., No. 1., pp. 23-39., January 2007.
- [8] Grioli, G., Bicchi, A.: *A real-time parametric stiffness observer for VSA devices*, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 5535-40.; June 2011.
- [9] Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., De Luca, A., Hirzinger, G.: *Collision detection and reaction: A contribution to safe physical Human-Robot Interaction*, IROS, 3356-63., Nice, IEEE, September 2008.

Lukić, N., Petrović, P.B., Danilov, I.

VARIABLE STIFFNESS ACTUATOR

Abstract: This paper presents results in research of generalized mechanical impedance of the industrial humanoid robots, with special focus on development of variable stiffness actuator (VSA). In addition to basic dynamic models and control system architecture, analysis of variant concepts of the actuation system are carried out. Various algorithms for stiffness/compliance control are developed and experimentally verified. Achieved results show a successful execution of the programmed compliant behaviour in physical interaction with the environment. VSA prototype is developed and realized at the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade/CeNT, CMSysLab, within project TR35007.

Key words: Industrial humanoid, Variable stiffness actuator, Control



Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ.¹, Trifković, B.², Potran, M.³, Brajljli, T.⁴

PRIMENA INTEGRISANOG SISTEMA ZA PRECIZNO I BRZO PRECIZNO LIVENJE U STOMATOLOGIJI⁵

Rezime

U radu se prikazuje primena ekspernog sistema za razvoj simulacionog modela za precizno livenje (IC) i brzo precizno livenje (RIC) metalne substrukture za metalo-keramičku krunicu. Ovaj prototipni ekspertni sistem (ES) je nastao kao potreba za automatizacijom procesa projektovanja i izrade metalne substrukture. Sistem je namenjen za stomatološke livačke mašine koje podržavaju upravljači sistem CASTCONTROL. U radu se prikazuje struktura sistema i hardverska podrška. Razvijeni integrisani CAD/CAE/RE/RP sistem je parametarski, objektno-orijentisan, zasnovan na modelskim formama, veštačkoj inteligenciji, distributivnoj bazi podataka i arhitekturi table.

Ključne reči: integrisani sistem, precizno livenje, brzo precizno livenje

1. UVOD

Precizno livenje (IC) i brzo precizno livenje (RIC) predstavljaju najzastupljenije tehnologije livenja u stomatologiji. Odlivci su obično geometrijski vrlo kompleksni oblici sa visokim zahtevima u pogledu mehaničkih, hemijskih, fizičkih i tehnoloških osobina. Relativno niska cena procesa, minimalni gubici biokompatibilne legure, visok kvalitet odlivka i relativno kratko vreme izrade predstavlja osnovni razlog primene ove tehnologije. Nedostaci ove tehnologije ogledaju se u pojavi poroznosti, zaostalih napona, deformacija, gasnih uključaka, hemijskih i fizičkih neujednačenosti. Ovi nedostaci se mogu umanjiti pravilnim projektovanjem simulacionog modela, kalupa i parametara livenja primenom ekspernih sistema. Ekspertni sistemi se koriste u fazama konceptualnog i detaljnog projektovanja simulacionog modela i tehnologije livenja [2, 3, 5, 7]. Cilj integracije sistema sa RP je povećanje kvaliteta substrukture i smanjenje vremena izrade [1].

2. METODOLOGIJA RAZVOJA SIMULACIONOG MODELA

Ekspertni sistem (ES) treba da poseduje arhitekturu koja je integralna nad celokupnim prostorom znanja i omogućava kontinualan tok projektovanja simulacionog modela. Glavne komponente ES su:

- Korisnički interfejs:
 - obezbeđuje interaktivan rad korisnik-ES,
 - obezbeđuje razvoj i održavanje baze znanja.
- Baza podataka (BP):
 - sadrži činjenice, podatke i informacije.

¹) dr Ivan Matin, prof. dr Miodrag Hadžistević, prof. dr Janko Hodolić, doc. dr Đorđe Vukelić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 485 2332, Fax: 381 21 454 495, (matini@uns.ac.rs).

²) dr Branka Trifković, Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet, Klinika za stomatološku protetiku, Rankeova 4, 11000 Beograd, Srbija, Tel: +381 11 2433 433, (branka.trifkovic@stomf.bg.ac.rs).

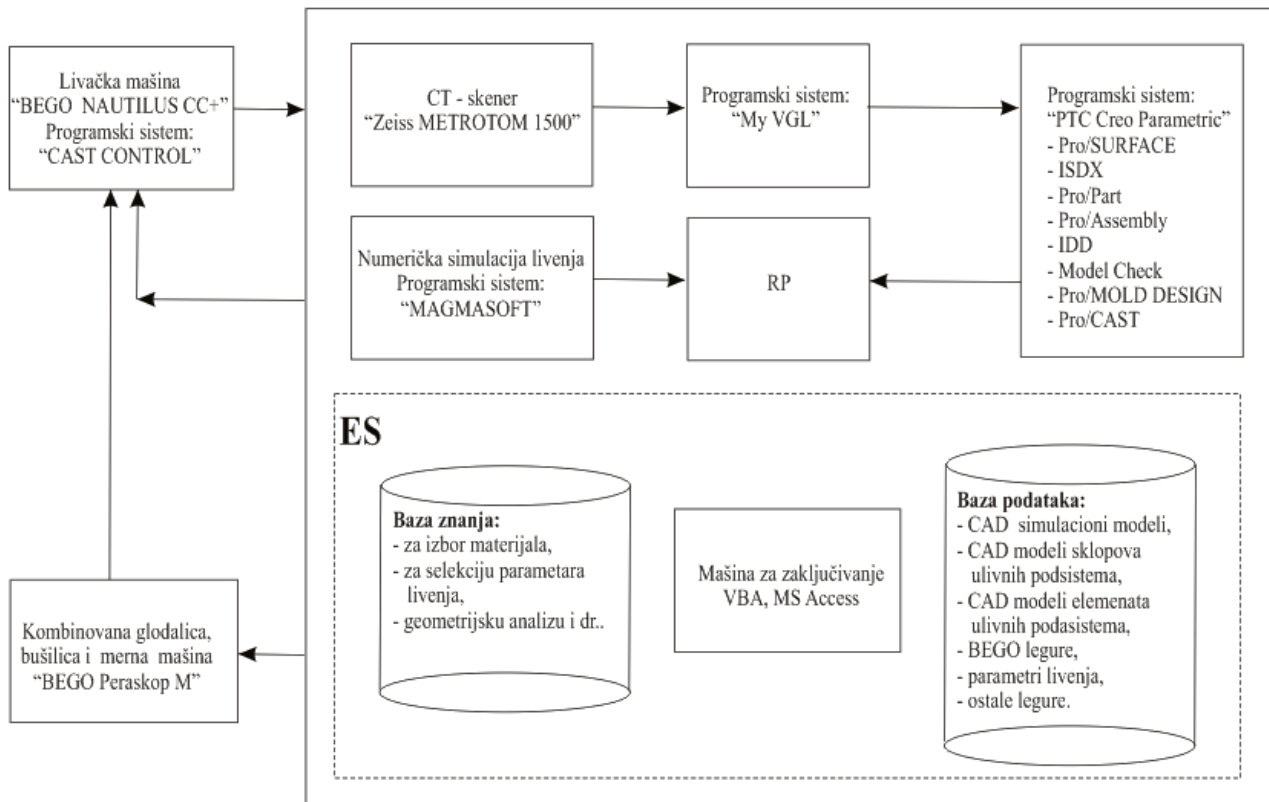
³) dr Michal Potran, Univerzitet u Novom Sadu, Medicinski fakultet, Departman za stomatologiju, Hajduk Veljkova 12, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel: +381 21 420 677, Fax: +381 21 662 4153 (michalpotran@gmail.com).

⁴) dr Tomaž Brajljli, Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Institut za proizvodno mašinstvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija, Tel: +386 2 220 7596, Fax: +386 2 220 7996, (tomaz.brajli@um.si).

⁵) U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-35020: "Istraživanje i razvoj metoda modeliranja i postupaka izrade dentalnih nadoknada primenom savremenih tehnologija i računarom podržanih sistema", koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj R. Srbije.

- Baza znanja:
 - sadrži znanje kodirano pravilima.
- Radna memorija:
 - sadrži trenutno aktuelne činjenice.
- Mašina za zaključivanje:
 - Zaključuje vršeci pravilo sa najvišim prioritetom u agendi.
- Sistem za objašnjavanje:
 - objašnjava korisniku način korišćenja i rezonovanja ekspertnog sistema.

Tok projektovanja simulacionog modela i uprošćena arhitektura ES-a je prikazana na slici 1.



Slika 1. Tok projektovanja simulacionog modela i struktura ekspertnog sistema

ES zauzima centralno mesto i položaj u projektovanju simulacionog modela (slika 1). Baza znanja, BP i mašina za zaključivanje mora pravovremeno obezbediti čitanje, modifikaciju, razvoj i dvosmerni prenos informacija sa sledećim programskim sistemima:

- ZEISS CALYPSO,
- My VGL,
- Creo Parametric (Pro/E),
- MAGMASOFT i
- CAST CONTROL.

CAD model se generiše na osnovu oblaka tačaka dobijenih skeniranjem na CT skeneru „Zeiss Metrotom 1500” korišćenjem programskog sistema „Zeiss Calypso“ i „My VGL”. Dobijeni model, predstavlja facet model koji se dalje rekonstruiše u solid korišćenjem programskog sistema Creo Parametric (Pro/E). [4, 7]. U narednom koraku, u okviru numeričke simulacije u programskom sistemu MAGMASOFT se vrši određivanje parametara preciznog livenja, izbor materijala, i geometrije ulivnog podsistema. Parametri livenja, materijala i modela ulivnog podsistema se učitavaju iz BP, koja sadrži:

- standardne „BEGO“ materijale,
- materijale koji ne spadaju u grupu materijala proizvođača „BEGO“,
- parametre livenja,

- režime obrade za kombinovanu glodalicu, bušilicu i mernu mašinu „BEGO Paraskop M“,
- modele ulivnih podsistema sa odgovarajućim srednjim prečnicima ulivnih kanala ($\varnothing 4\text{mm}$, $\varnothing 6\text{mm}$, $\varnothing 8\text{mm}$, i dr.), uglove osa ulivnih kanala prema vertikalnoj ravni (12° , 15° , 18° , 20° , 22° i dr.) i odgovarajuće zapreminama ulivnih čaša, i
- podatke o livačkoj mašini “BEGO Nautilus CC+”.

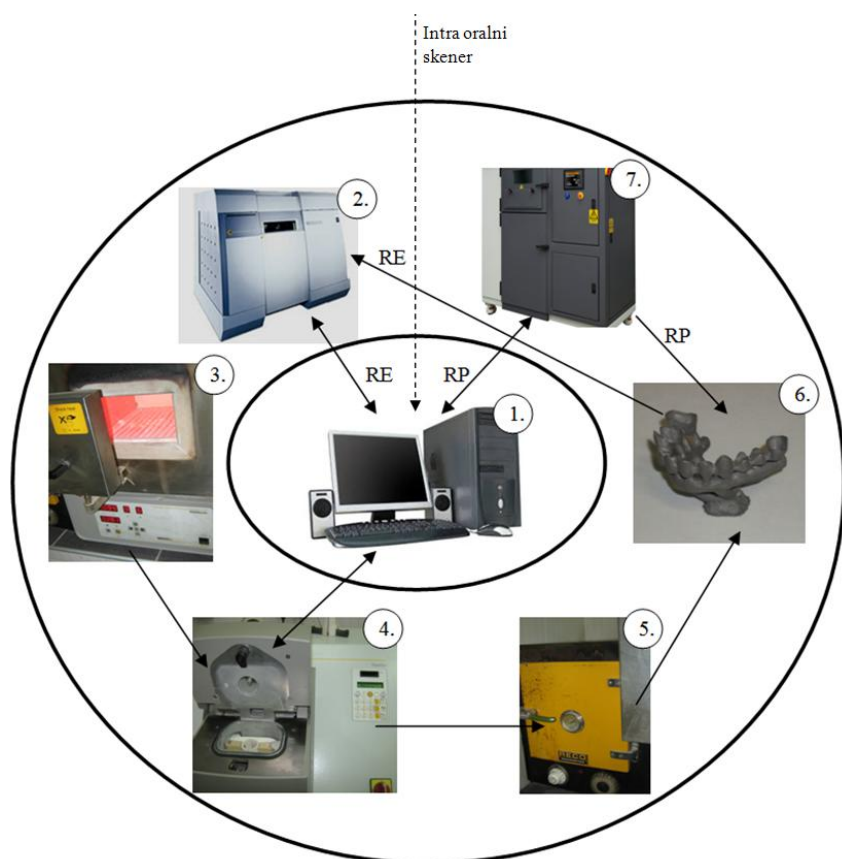
BP je objektno-orijentisana i relaciona. VBA, MS Excell i MS Access se koriste za razvoj BP. Baza znanja je sastavljena od sledećih vrsta znanja: deklarativno, proceduralno, meta-znanje, heurističko i strukovno znanje. Najčešće upotrebljavano znanje je deklarativno, odnosno inferentno, a najčešće primenjivano pravilo je produkciono [5]. ES sadrži sledeće podmodule (izvore znanja) za:

- livačke parametre,
- ulivne podsisteme,
- selekciju livačkih materijala,
- geometrijsku analizu simulacionog modela, i
- modeliranje simulacionog modela.

Rešavanje problema uključuje donošenje odluka između podmodula koji sadrže stručna znanja. Svaki izvor znanja generiše delimično rešenje. Izvor znanja može da generiše rešenja na osnovu drugih rešenja. Konačno rešenje se postiže kada su sva parcijalna rešenja ispunila definisana pravila i ograničenja od strane korisnika, odnosno ekspertnog sistema.

3. OPREMA PODRŽANA EKSPERTNIM SISTEMOM

Razvijeni integrisani sistem može da koristi snimke generisane uređajima za intraoralnu digitalizaciju (LAVA COS, CEREC, E4D, Trios, Siemens Sensation i dr.) i ekstraoralnu digitalizaciju (Zeiss Metrotom i sl.) s ciljem generisanja u početku poligonalnog a kasnije solid modela. Oprema neophodna za projektovanje i izradu metalne substrukture podržana od ES-a je prikazana na slici 2.



Legenda:

1. Računar (Fujitsu P400),
2. 3D skener (Zeiss Metrotom 1500),
3. Peć za žarenje (BEGO Miditherm),
4. Mašina za livenje (BEGO Nautilus CC Plus),
5. Uređaj za hlađenje (Reco)
6. metalna substruktura
7. Mašina za lasersko sinterovanje metala (CONCEPT LASER MLAB).

Slika 2. Hardverska podrška projektovanju i izradi metalne substrukture za metalokeramičku krunicu

Računar (1) vrši distributivno direktno/indirektno upravljanje nad opremom. Direktno se upravlja 3D skenerom, mašinom za livenje (4) i mašinom za lasersko sinterovanje (7). Peč za žarenje (3) i uređaj za hlađenje (5) nisu povezani sa računarom, ali se parametri za njihovo optimalno korišćenje određuju pomoću programa CASTCONTROL i numeričke simulacije u sistemu MAGMASOFT [6]. ES bira „kod“ upravljačkog programa CASTCONTROL i obezbeđuje parametarsku vezu sa rezultatima simulacije. Metod rezonovanja na osnovu pravila (RBR), metod ograničenja (CSM), metod tekućih podataka (CDM), linearno programiranje (LP) i iterativni redizajn (IR) predstavljaju primenjene gradivne metode za razvoj ES-a.

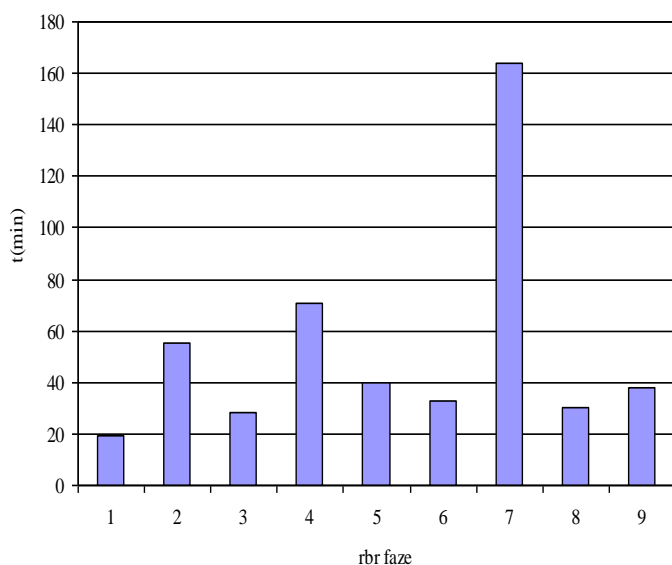
4. REZULTATI PRIMENE EKSPERTNOG SISTEMA

Primena ES smanjuje ukupno vreme izrade metalne substrukture (6) koja sadrži 12 odlivaka a prikazana je na slici 2. Ukupno vreme potrebno za proizvodnju metalne substrukture iznosi 472 min. Vreme izrade krunice je 280 min. Vreme za pripremu simulacionog modela za RP iznosi 18 min, a vreme SLM postupaka je 109 min. Tabela 1 prikazuje nekolicinu od više izlaznih parametara iz ekspertnog sistema.

Tabela 1. Izlazni parametri iz ekspertnog sistema

Oznaka	Veličina
Maksimalna temperatura kalupa	$T_{kalupa\ max}=1000\ ^\circ C$
Minimalna temperatura kalupa	$T_{kalupa\ min}=900\ ^\circ C$
Preporučena temperatura kalupa	$T_{kalupa\ min}=920\ ^\circ C$
Režim zagrevanja	#4
Temperatura livenja	$T_{liv}=1450\ ^\circ C$
Relacioni kod pod programa upravljačkog programa CASTCONTROL	193
Izabrani livački materijal	Wirobond LFC
Grupa pripadnosti materijala	Grupa_CoCr
Proizvođač BEGO	DA
Prečnik ulivnih kanala	$d_1=4\ mm$
Prečnik razvodnih kanala	$d_2=5\ mm$
Predloženi model ulivnog podsistema, ugao 33°	model_12.prt
Preporučeno vreme hlađenja	$\tau_h = 141\ s$

Vremena trajanja pojedinih faza izrade metalne substrukture su prikazani na slici 3.



Legenda:

1. Vreme za digitalizaciju objekta,
2. Vreme za pre procesiranje i rekonstrukciju poligonalnog modela,
3. vreme za numeričku simulaciju,
4. vreme izrade gipsanog modela,
5. vreme za modeliranje voštanog modela,
6. vreme predgrevanja,
7. centralno vreme livenja (vreme testiranja mašine+vreme ulivanja+vreme hlađenja),
8. vreme za vađenje vatrostalnog bloka, peskiranje, i
9. mašinsko vreme glodanja/brušenja odlivka.

Slika 3. Vreme trajanja faza izrade metalne substrukture

Procenat kvalitetnih odlivaka se povećao korišćenjem ES za 12-18% u zavisnosti od broja odlivaka sadržanih u jednoj substrukтури, uz smanjene ukupnog vremena izrade.

5. ZAKLJUČAK

Metalna substruktura (6) i druge substrukture koje nisu prikazane u radu, a proizvedene su na isti način uz primenu ES-a, potvrđuju smanjenje ukupnog vremena izrade, uz povećanje procenta kvalitetnih odlivaka. Sve predhodno pokazuje da prikazani integrisani sistem predstavlja originalno, autentično i svrsishodno rešenje koje zadovoljava OSA i OSI standarde za posmatrano hardversko okruženje. ES predviđa mogućnost dobijanja CAD simulacionog modela RE inženjerskim modeliranjem, koji se zatim transformiše u fizički model RP-om i koji služi za proveru generisanog CAD modela, što diže kvalitet primene IC na područje RIC tehnologije. Razvijeni ES omogućava:

- automatizaciju modeliranja simulacionog modela metalne substrukture za metalokeramičku krunicu,
- određivanje parametara preciznog livenja simulacijom,
- izbor ulivnih podsistema i materijala substrukture iz BP,
- upotrebu i razvoj BP i baze znanja,
- skraćanje vreme izrade metalne substrukture,
- povećanje kvaliteta odlivka i
- distributivnu direktnu/indirektnu vezu sa opremom.

Dalje istraživanje će biti razvoj kolaborativnog sistema, postojećih izvora znanja i stvaranje novih primenom veštačke inteligencije. Dalje istraživanje će se odnositi na ocenu mogućnosti integracije sa sistemima „3D Doctor“ i „GOM Inspect“, dok će se deo istraživanja usmeriti na „CCD/Laser“ i/ili „PSD/laser“ metode digitalizacije.

6. LITERATURA

- [1] Brajliah, T., Kostevsek, U., Zupancic, H. T., Paulic, M., Irgolic, T., Balic, J., Hadzistevic, M., Drstvensek, I.: *Comparison of manufacturing technologies of fixed structures in prosthetic dentistry*, Journal of Production Engineering, Vol.17., No 1., pp.67-70, 2014.
- [2] Cheah, C.M., Chua, C.K., Lee, C.W., Feng, C., Totong, K.: *Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25: pp. 308–320., 2005.
- [3] Er, A., Dias, R.: *A rule-based expert system approach to process selection for cast components*, Knowledge-Based Systems, 13, pp.225-234, 2000. Yue, Sh., Wang, G., Yin, F., Wang, Y.: *Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.139, pp.465-468., 2003.
- [4] Matin, I., Potran, M., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, DJ., Puskar, T., Drstvensek, I., Vrba, I.: *Development of the simulation model for casting of metal substructure of metal-ceramic crown*, Journal of Production Engineering, Vol.16., No 2., pp.49-53, 2013.
- [5] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, Đ., Puškar, T., Potran, M., Drstvenšek, I.: *Razvoj ekspertnog sistema za projektovanje simulacionog modela metalne substrukture za metalokeramičku krunicu*, ETIKUM, 109-114, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2014.
- [6] Matin, I., Hadžistević, M., Hodolić, J., Vukelić, DJ., Puškar, T., Potran, M.: *Razvoj simulacionog modela substrukture za metalokeramičku krunicu*, ETIKUM, 79-82, Novi Sad, FTN, Novi Sad, jun 2013.
- [7] Yue, Sh., Wang, G., Yin, F., Wang, Y.: *Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.139, pp.465-468., 2003.

Matin, I., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, DJ., Trifkovic, B., Potran, M., Brajliah, T.

APPLICATION OF THE INTEGRATED SYSTEM FOR INVESTMENT CASTING AND RAPID INVESTMENT CASTING IN DENTISTRY

Abstract: Paper presents the application of an expert system for the development of simulation model of metal substructure of metal-ceramic crown for investment casting (IC) and rapid investment casting (RIC). This prototype expert system (ES) has emerged as a need for automation of design and development of the simulation model. The system is designed especially for the dental casting machines that supports control system called CASTCONTROL by manufacturer BEGO. This paper presents general structure and the required hardware support for developed expert system. This integrated CAD / CAE / RE / RP system is parametric, object-oriented, based on feature technology, artificial intelligence, database distribution and blackboard architecture.

Key words: ES, IC, RIC



Milutinović, D., Dimić, Z., Živanović, S., Slavković, N.¹⁾

UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE 6-OSNOG ROBOTA ZA OBRADU KAO HORIZONTALNE I/ILI VERTIKALNE 5-OSNE MAŠINE ALATKE²⁾

Rezime

U radu je prikazan razvijeni prototip sistema za upravljanje i programiranje 6-osnog robota za višeosnu obradu. Razvijeni sistem je baziran na generalizovanom pristupu modeliranja koji omogućava emuliranje horizontalnih i/ili vertikalnih 5-osnih mašina alatki čime se omogućava programiranje u G-kodu i korišćenje postojećih CAD/CAM sistema za višeosnu obradu. Mogućnost rekonfigurisanja odnosno emuliranja i horizontalne i vertikalne 5-osne mašine alatke u toku jednog zadatka omogućava višestranu obradu vrlo složenih delova u jednom postavljanju.

Ključne reči: obrada robotima, kinematičko modeliranje, upravljanje i programiranje

1. UVOD

Složenost programiranja robota je posledica nedovoljne kooperativnosti proizvođača robota u poređenju sa proizvođačima mašina alatki koji su bili spremni da koriste CAD/CAM sisteme na bazi standarda ISO6983 (RS274), odnosno G- kod. Razlozi za ovo leže u relativno malom tržištu robota, ali i nespremnosti proizvođača robota da otkriju detalje svojih upravljačkih algoritama i softvera. Iz ovih razloga istraživači na institutima i univerzitetima kao i proizvođači robota i CAD/CAM softvera razvijaju svoja softverska rešenja s ciljem da programiranje robota za obradu približe programiranju mašina alatki [1-3]. U takva softverska rešenja spadaju translatore G-koda, specifična postprocesorska rešenja itd.

U cilju doprinosa efikasne primene robota za obradu razvijen je sistem upravljanja i programiranja u G-kodu za robote sa 6 stepeni slobode vertikalne zglobove konfiguracije pri 5-osnoj obradi. U radu je predstavljen koncept sistema upravljanja otvorene arhitekture koji može biti lako primenljiv od strane operatera CNC mašina alatki. Razvijen je i generalizovani pristup modeliranja 6-osnog robota iz kojeg se emuliraju različiti tipovi vertikalnih i horizontalnih 5-osnih mašina alatki.

Verifikacija sistema upravljanja i programiranja je izvršena obradom složenog probnog dela. Troosne i 5-osne obrade su vršene na vertikalnoj mašini alatki konfiguracije (X, Y, Z, A, B), vertikalnoj mašini alatki konfiguracije (X, Y, Z, A, C) i horizontalnoj mašini alatki konfiguracije (X, Y, Z, A, B) koje su emulirane iz 6-osnog robota vertikalne zglobove konfiguracije.

2. KONCEPT PETOOSNE OBRADU ROBOTIMA

Koncept razvijenog sistema upravljanja i programiranja otvorene arhitekture sa programiranjem u G-kodu je baziran na:

- Generalizovanom pristupu modeliranja standardizovanog 6-osnog robota koji se koristi da emulira različite tipove vertikalnih i horizontalnih 5-osnih mašina alatki;
- PC real-time Linux platformi i EMC2 (Enhanced Machine Control) softverskom sistemu [4,5];
- Mogućnosti primene postojećih CAD/CAM softvera i metoda reverznog inženjerstva sa

¹⁾ prof. dr Dragan Milutinović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dmilutinovic@mas.bg.ac.rs), Zoran Dimić, Lola institut, Beograd, (zoran.dimic@li.rs), doc dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Nikola Slavković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs).

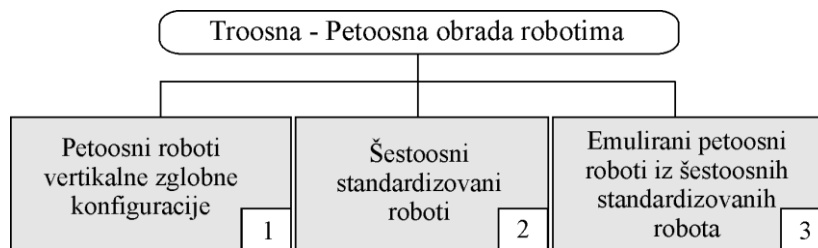
²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR_35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

implementiranim postprocesorima za 3-osnu i 5-osnu obradu;

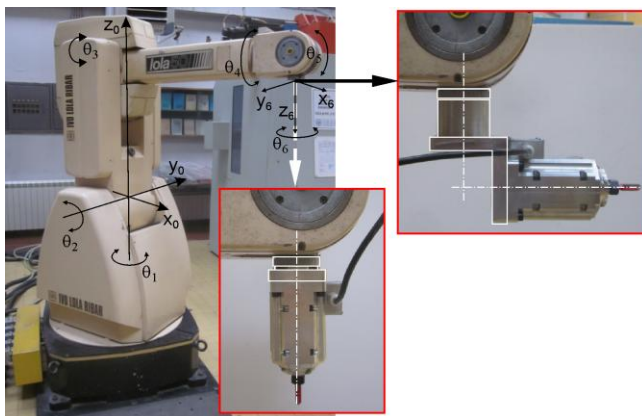
- Mogućnosti rekonfigurisanja robota, bez fizičke intervencije, odnosno mogućnosti emuliranja i horizontalne i vertikalne 5-osne mašine alatke u toku jednog zadatka za slučaj višestranne obrade vrlo složenih delova u jednom postavljanju;
- Virtuelnim robotima za verifikaciju razvijenog sistema upravljanja i programiranja, a kasnije i za verifikaciju i simulaciju programa za obradu na robotu.

Troosna do 5-osna obrada robotima koja se vrši na 5-osnim i 6-osnim robotima vertikalne zglobne konfiguracije, slika 1, obuhvata sledeće slučajeve:

- 3- do 5-osnu obradu 5-osnim robotima vertikalne zglobne konfiguracije;
- 3- do 5-osnu obradu standardizovanim 6-osnim robotima vertikalne zglobne konfiguracije pri čemu su aktivne sve ose robota u toku obrade;
- 3- do 5-osnu obradu 5-osnim robotima vertikalne zglobne konfiguracije koji se emuliraju iz standardizovanog 6-osnog robota pri čemu su ose četvrtog ili šestog zgloba blokirane;



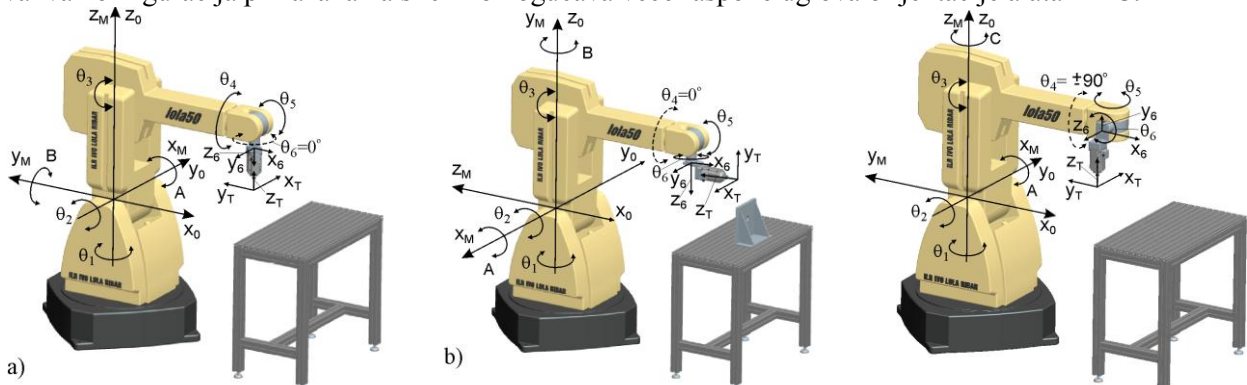
Slika 1. Troosna i petoosna obrada robotima sa 5 i 6 stepeni slobode



Slika 2. Eksperimentalni 6-osni robot

Za testiranje i verifikaciju razvijenog prototipa sistema upravljanja i programiranja korišćen je eksperimentalni 6-osni robot, slika 2. Eksperimentalni 6-osni robot može biti konfigurisan kao 5-osni robot na različite načine. Na slici 3 su prikazana dva osnovna tipa 5-osnih robota. Petoosni robot sa slike 3a), na kome je blokirana šesta osa, predstavlja specijalizovani 5-osni robot i dalje je posmatran u radu kao vertikalna glodalica konfiguracije (X,Y,Z,A,B) [6,7]. Petoosni robot sa slike 3b), na kome je blokirana četvrta osa, predstavlja standardizovani 5-osni robot i dalje je posmatran u radu kao horizontalna glodalica

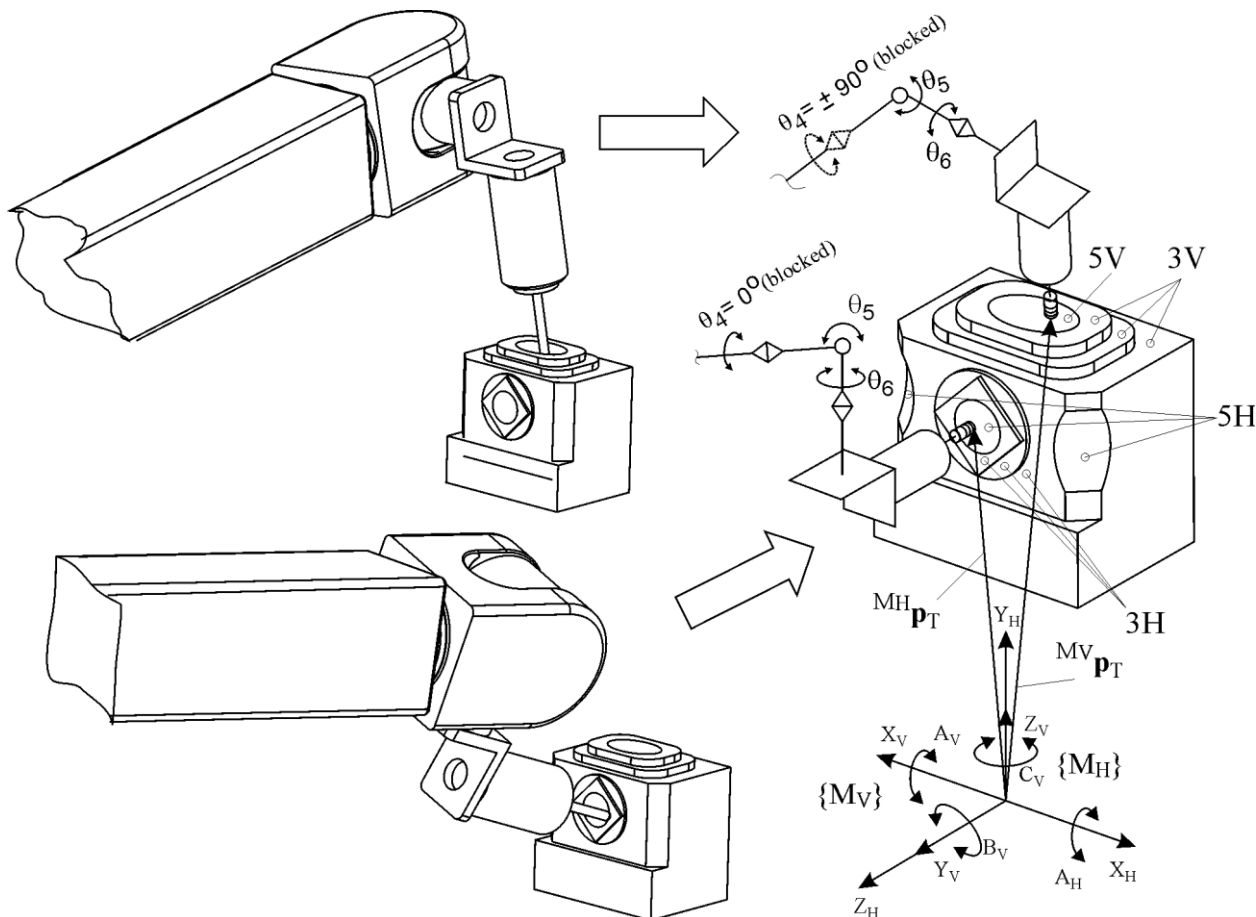
konfiguracije (X,Y,Z,A,B) [6,7]. Pored ove dve konfiguracije 5-osnih robota 6-osni robot može da se koristi za 5-osnu obradu i u drugim konfiguracijama. U cilju emuliranja nekih drugih tipova 5-osnih mašina alatki u radu se prikazuje konfiguracija mašine alatke kao vertikalne glodalice konfiguracije (X,Y,Z,A,C) [6,7]. Ovakva konfiguracija prikazana na slici 4 omogućava veće rasponse uglova orijentacije alata A i C.



Slika 3. Emulacija dva osnovna tipa 5-osnih robota konfigurisanih iz 6-osnog robota

Slika 4. 6-osni robot konfigurisan da emulira 5-osnu vertikalnu mašinu alatku konfiguracije (X,Y,Z,A,C)

U slučaju veoma kompleksnih delova koji zahtevaju višestranu obradu predstavljeni sistem upravljanja i programiranja omogućava rekonfiguraciju robota, bez fizičke intervencije, u različite vertikalne i horizontalne mašine alatke. Ovakva rekonfiguracija rešava problem singulariteta robota i ograničenja kretanja u zglobovima robota. Kao primer na slici 5 je pokazan slučaj radnog predmeta na kome se gornja složena površina obrađuje programima za vertikalnu 5-osnu mašinu alatku konfiguracije $(X_V, Y_V, Z_V, A_V, C_V)$, dok se prednja složena površina obrađuje programima za horizontalnu 5-osnu mašinu alatku konfiguracije $(X_H, Y_H, Z_H, A_H, B_H)$.



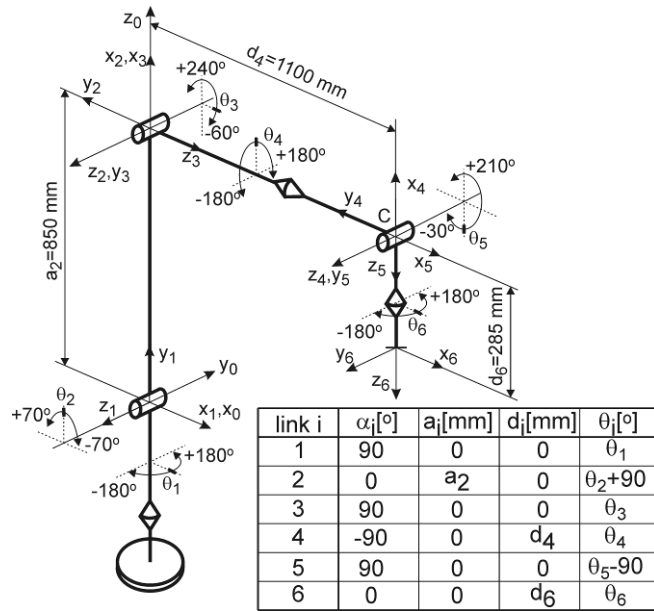
Slika 5. Primer rekonfiguracije robota u različite tipove 5-osnih mašina alatki

3. KINEMATIČKO MODELIRANJE

Za modeliranje eksperimentalnog 6-osnog robota, slika 2, korišćen je Denavit-Hartenbergov (D-H) pristup [8,9]. Prvo su segmentima dodeljeni D-H koordinatni sistemi. Pozicija i orijentacija između ovih koordinatnih sistema je opisna pomoću homogenih transformacija. Matrica ${}^{i-1}_i A$ opisuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema (i) u odnosu na koordinatni sistem ($i-1$). Na slici 6 su pokazani D-H koordinatni sistemi, kinematički parametri i ograničenja u zglobovima eksperimentalnog 6-osnog robota.

Na osnovu D-H parametara formirane su transformacione matrice ${}^{i-1}_i A$, $i=1,2,\dots,6$. Sada se, kao što je poznato, direktni kinematički problem odnosno pozicija i orijentacija koordinatnog sistema (x_6, y_6, z_6) u odnosu na koordinatni sistem baze (x_0, y_0, z_0) za dati vektor unutrašnjih koordinata robota $\theta = [\theta_1 \dots \theta_6]^T$ i specificirane parametre segmenata može definisati kao

$${}^0_6 T = {}^0_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A \cdot {}^5_6 A = \begin{bmatrix} {}^0_6 R & {}^0_6 \mathbf{p}_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{x6} & j_{x6} & k_{x6} & p_{x6} \\ i_{y6} & j_{y6} & k_{y6} & p_{y6} \\ i_{z6} & j_{z6} & k_{z6} & p_{z6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



Slika 6. D-H koordinatni sistemi i kinematički parametri eksperimentalnog 6-osnog robota

S obzirom da se posljednje tri ose robota seku u tački C rešen je inverzni kinematički problem 6-osnog robota na dobro poznat način [8,9].

Primena generalnog modela eksperimentalnog 6-osnog robota u cilju 5-osne obrade na različitim tipovima horizontalnih i vertikalnih 5-osnih mašina alatki, sa slika 3 i 4, emuliranih iz 6-osnog robota zahteva sledeću transformaciju

$${}^M_T T = {}^M_0 T \cdot {}^0_6 T(\theta_1, \dots, \theta_6) \cdot {}^6_T T = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & X_M \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & Y_M \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & Z_M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^M_T R & M \mathbf{p}_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gde je

$${}^0_6 T = {}^0_6 T(\theta_1, \dots, \theta_6; \theta_6 = 0^\circ \vee \theta_4 = 0^\circ \vee \theta_4 = \pm 90^\circ) \quad (3)$$

U jednačini (2) vektor pozicije ${}^M \mathbf{p}_T$ predstavlja poziciju vrha alata u referentnom koordinatnom sistemu mašine {M}, dok se matrica ${}^M_T R$ koja definiše orijentaciju koordinatnog sistema alata {T} u odnosu na koordinatni sistem {M} za različite slučajeve 5-osnih mašina alatki, sa slika 3 i 4, emuliranih iz 6-osnog robota može definisati kao:

- za slučaj vertikalne 5-osne mašine alatke kofiguracije (X,Y,Z,A,B) kao ${}^M_T R = R_{YM,B} \cdot R_{XM,A}$, slika 3a),
- za slučaj horizontalne 5-osne mašine alatke kofiguracije (X,Y,Z,A,B) kao ${}^M_T R = R_{XM,A} \cdot R_{YM,B}$, slika 3b), i
- za slučaj vertikalne 5-osne mašine alatke kofiguracije (X,Y,Z,A,C) kao ${}^M_T R = R_{ZM,C} \cdot R_{XM,A}$, slika 4.

pri čemu matrice $R_{XM,A}$, $R_{YM,B}$ i $R_{ZM,C}$ predstavljaju osnovne matrice rotacije.

Kao što se vidi sa slika 3 i 4, koordinatni sistem alata {T} se definiše relativno u odnosu na koordinatni sistem (x_6, y_6, z_6) homogenim matricama ${}^6_T T$, dok se koordinatni sistem (x_0, y_0, z_0) definiše relativno u odnosu na koordinatni sistem mašine {M} homogenim matricama ${}^M_0 T$. Nakon formiranja odgovarajućih

homogenih matrica 6T_7 i M_0T , na osnovu jednadžine (3), za slučajeve emuliranih mašina alatki sa slika 3 i 4, jednačina (2) može biti napisana kao

$${}^0T(\theta_1, \dots, \theta_6; \theta_6 = 0^\circ \vee \theta_4 = 0^\circ \vee \theta_4 = \pm 90^\circ) = {}^M_0T^{-1} \cdot {}^M_7T \cdot {}^6T_7^{-1} \quad (5)$$

Iz jednačine (5) se rešavaju direktni i inverzni kinematički problem emuliranih 5-osnih mašina alatki, slike 3 i 4, uzimajući u obzir ograničenja u kretanjima zglobova robota i singularitete, na dobro poznat način [8,9].

4. SISTEM UPRAVLJANJA I PROGRAMIRANJA

Sistem upravljanja robota je baziran na PC Linux platformi i upravljačkom softveru otvorene arhitekture EMC2 [5], koji je namenjen za upravljanje mašinama alatkama i robotima serijske i paralelne kinematike. EMC2 je izrađen na osnovi NIST-ove (National Institute of Standards and Technology) [4] RCS (Real-time Control System) metodologije i programiran je korišćenjem RCS biblioteke. Sistem za programiranje robota za obradu je uobičajen i ostvaruje se primenom raspoloživog CAD/CAM sistema.

Na slici 7 je pokazana uprošćena struktura sistema upravljanja i programiranja [10]. Polazi se od CAD modela za koji se u CAD/CAM sistemu generiše putanja alata (CLF – Cutter Location File). Za dobijenu putanju alata prvo se vrši njena verifikacija u raspoloživom softveru za simulaciju uklanjanja materijala, a zatim pristupa postprocesiranju CLF radi dobijanja G-koda. Robot LOLA50 se može konfigurisati u tri različite konfiguracije petoosnih mašina za obradu. Prvo se vrši izbor horizontalne ili vertikalne konfiguracije mašine, a zatim se bira postprocesor, saglasno standardu ISO6983, za dobijanje G-koda. Robot LOLA50 može da koristi konfigurisano upravljanje za sledeće konfiguracije mašina:

- (H) 5-osna horizontalna mašina (X,Y,Z,A,B),
- (V) 5-osna vertikalna mašina (X,Y,Z,A,B),
- (V) 5-osna vertikalna mašina (X,Y,Z,A,C),

gde X,Y,Z predstavljaju poziciju vrha alata, dok A, B i C predstavljaju uglove orijentacije alata. U svim pomenutim varijantama robot izvodi sva kretanja, dok je obradak nepokretan.

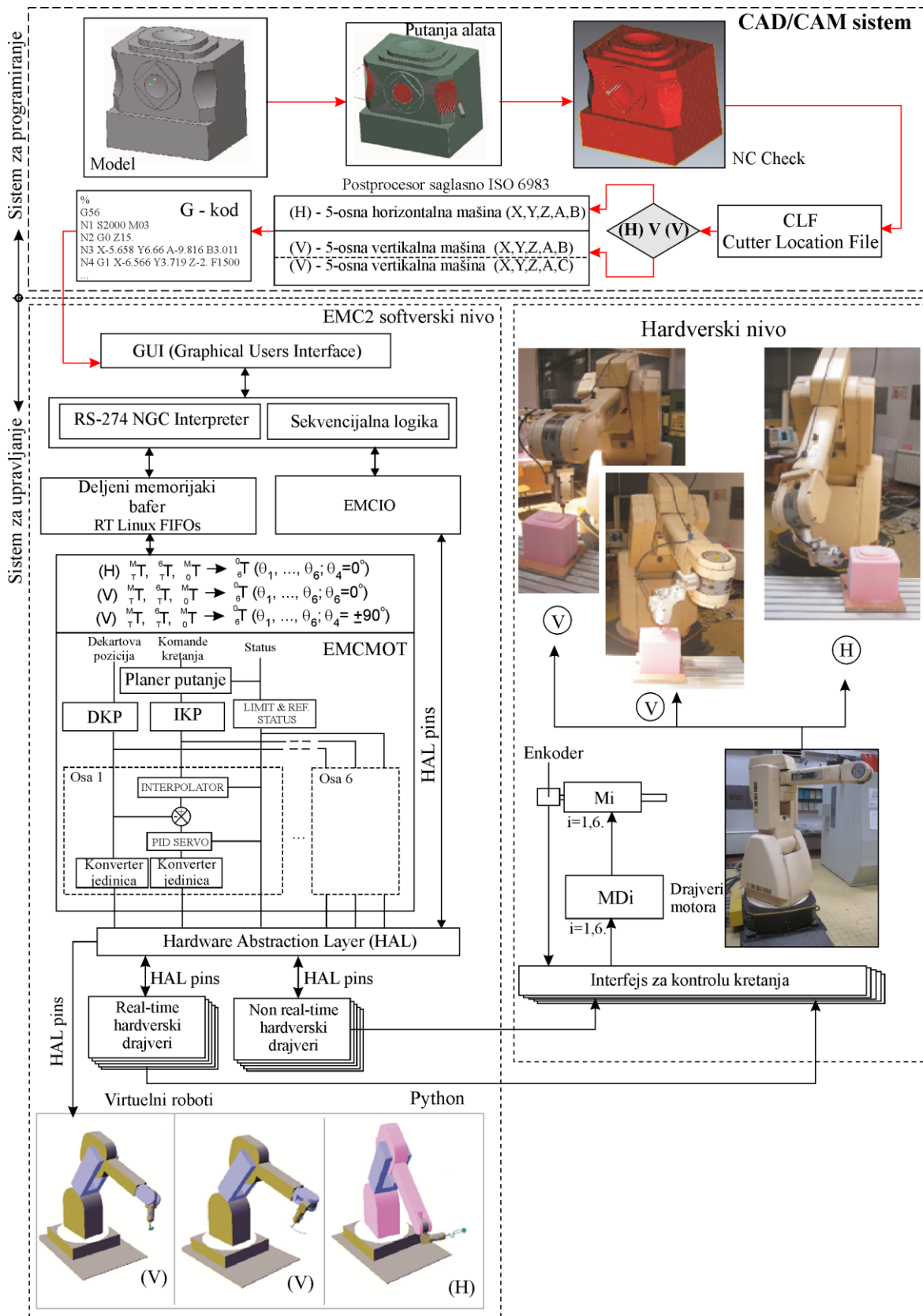
Posle postprocesiranja CLF-a za izabranu konfiguraciju robota, dobijeni G-kod se učitava u upravljački softver EMC2, gde se najpre vrši verifikacija programa na virtuelnoj mašini u realnom vremenu, slika 7, a zatim se upravljački signali sa sigurnošću mogu usmeriti ka izabranom realnom robotu kao petoosnoj glodalici. Virtuelni robot je konfigurisan preko nekoliko klasa predefinisanih u objektno orijentisanom jeziku Python.

EMC2 sadrži četiri programska modula: kontroler kretanja (EMCMOT), kontroler diskretnih ulaznih/izlaznih signala (EMCIO), kontroler procesa koji ih koordiniše i kolekciju tekstualnih ili grafičkih korisničkih interfejsa (GUI). Kontroler kretanja (EMCMOT) je modul koji radi u realnom vremenu i izvršava planiranje putanje, izračunavanje inverzne i direktne kinematike i određivanje željenih izlaza prema drajverima motora. Kontroler diskretnih ulazno/izlaznih (U/I) signala (EMCIO) upravlja svim U/I funkcijama koje nisu direktno povezane sa stvarnim kretanjima osa mašine. Kontroler procesa (EMCTASK) je projektovan slično diskretnom U/I kontroleru i odgovoran je za interpretiranje instrukcija G-koda. Kontroler procesa koordinira aktivnosti kontrolera kretanja i diskretnog U/I kontrolera. Ove aktivnosti su sadržane u NC programu, odnosno nizu instrukcija G i M koda, koje kontroler procesa interpretira i prosleđuje ih kontroleru kretanja ili diskretnom U/I kontroleru u odgovarajućim vremenskim trenucima. Grafički korisnički interfejs (GUI) spada u eksterne programe koji se koriste za pokretanje i komunikaciju sa EMC-om. Ova komunikacija podrazumeva uključivanje/isključivanje mašine, pomeranje osa mašine u ručnom režimu, slanje svih osa u referentni položaj, prelazak na automatski režim rada, start i stop programa. Između nekoliko korisničkih interfejsa izabran je najnapredniji AXIS interfejs, koji je vrlo intuitivan za korišćenje i koji poseduje veliki prozor sa grafičkom simulacijom putanje alata. Ovaj interfejs je proširen i prema specifičnim potrebama za primenu predloženog robotskog obradnog sistema.

HAL (Hardware Abstraction Layer) je zamišljen kao fleksibilni interfejs između kontrolera kretanja sa jedne strane i svega onoga što je potrebno za vezu sa korisnikom i mašinom sa druge strane. Pod tim se podrazumeva mnoštvo hardverskih interfejsa prema mašinama koji omogućavaju spregu kontrolera kretanja sa aktuatorima i mernim sistemima, kao i spregu sa virtuelnim robotima, koji se pogone identičnim upravljačkim signalima kao i realni roboti.

Prilikom pokretanja sistema upravljanja vrši se izbor između upravljanja virtuelnog ili stvarnog robota, slika 7. Uobičajeno je prvo pokrenuti virtuelni robot, izvršiti njegovu inicijalizaciju i postaviti obradak, a

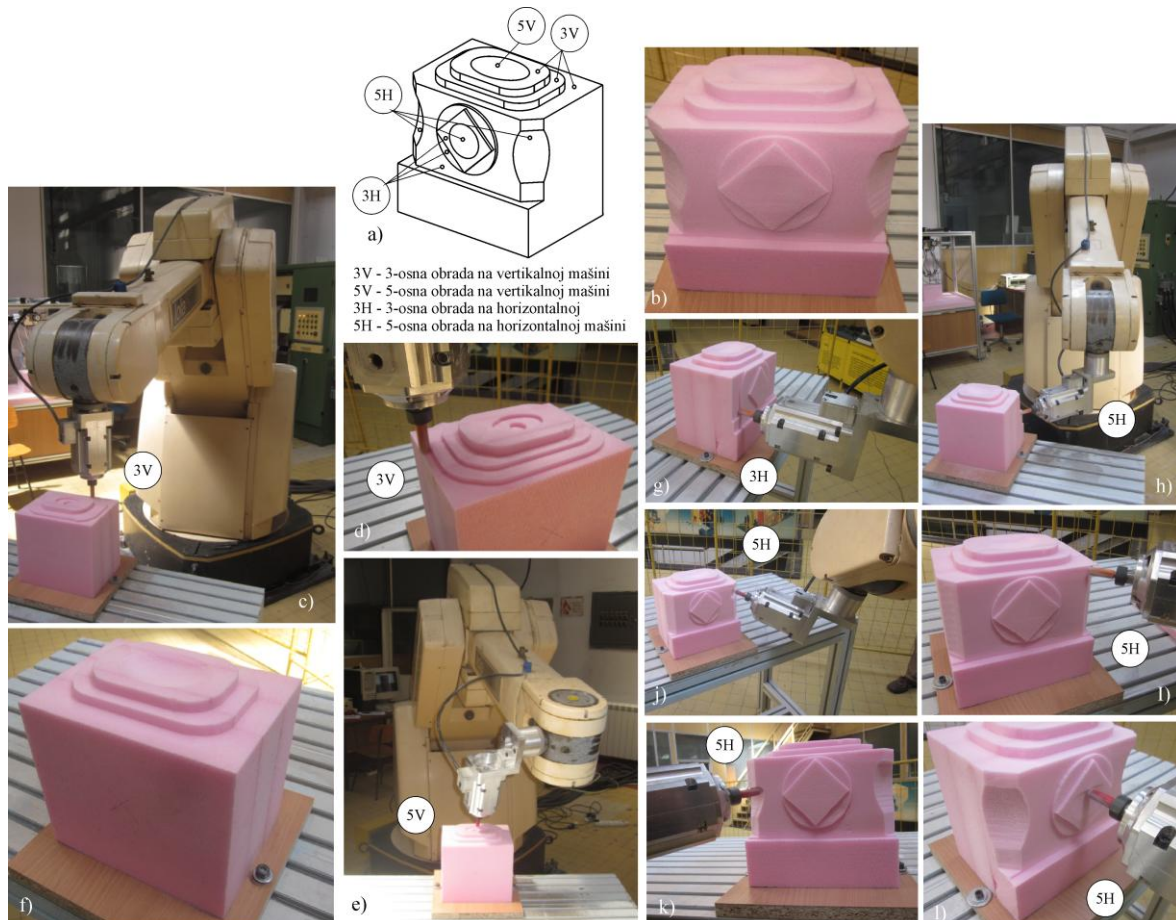
onda pristupiti testiranju programa na dva načina: (i) prvi, učitavanjem G-koda u AXIS interfejs EMC2 softvera, na ekranu će se prikazati putanja alata i (ii) drugi, koji je od krucijalne važnosti, jer uključuje virtuelni robot za završnu verifikaciju programa. Posle ovih verifikacija program se može bezbedno izvršavati na izabranoj konfiguraciji robota za obradu.



Slika 7. Struktura sistema upravljanja i programiranja

5. EKSPERIMENTI

Verifikacija sistema za upravljanje i programiranje za različite konfiguracije 5-osnih mašina razmatranih u radu, je realizovana obradom probnog dela koji zahteva višestranu obradu. Obradni sistem za obradu robotom omogućava i rekonfigurisanje robota iz jedne u drugu konfiguraciju na dva načina: bez fizičkih intervencija i sa fizičkom intervencijom (dodavanje nove interfejs ploče, slika 2), što je takođe bilo predmet verifikacije. Za programiranje je korišten CAD/CAM sistem PTC Creo2, sa idejom da se programiranje razmatranih robota za obradu ne razlikuje od programiranja 5-osnih vertikalnih i/ili horizontalnih mašina konfiguracija (X,Y, Z, A,B) i/ili (X, Y, Z, A, C). Pre obrade programi se testiraju na dva načina: grafičkom simulacijom putanje alata u grafičkom korisničkom okruženju AXIS u sistemu upravljanja EMC2, i na virtuelnom robotu za završnu verifikaciju programa. Na slici 8a je pokazan projektovani probni deo za višestranu obradu sa naznakom koji se delovi geometrije obrađuju troosno, koji petoosno i na kojoj konfiguraciji mašine, horizontalnoj ili vertikalnoj. Izgled završno obrađenog probnog dela od stirodura posle obrade pokazan je na slici 8b. Etape tokom obrade pokazane su na slikama od 8c do 8l.



Slika 8. Obrada test dela koji zahteva višestranu obradu

Detalji o samom toku obrade sa slike 8, mogu se iskazati i ovako:

- 3-osna obrada 3V, slika 8c,d, gornje površine probnog dela;
- 5-osna obrada 5V, slika 8e, udubljenja dela elipsoida, i izgled završno kompletno obrađene gornje strane probnog dela, slika 8f;
- Predobrada i završna 3-osna obrada 3H, prednje strane probnog dela sa izgledom po uzoru na uobičajene probne delove, slika 8g;
- 5-osna (3+2) obrada, koja predstavlja obaranje ivica sa prednje strane pod 45° , 5H, slika 8h, 8i;
- 5-osna obrada 5H, delova kalota na oborenim ivicama sa prednje strane, slika 8j, 8k;
- 5-osna obrada 5H, kalote u sredini sa prednje strane, slika 8l.

Ovim eksperimentima je potvrđena mogućnost realizacije rekonfigurabilnog sistema upravljanja za različite konfiguracije 5-osnih robota za obradu razmatranih u ovom radu. Ovakav sistem se može direktno koristiti od strane CNC operatera i programera pri obradu delova sa kompleksnom geometrijom, od mekih materijala niže i srednje klase tačnosti.

6. ZAKLJUČAK

Razvijeni sistem upravljanja je baziran na generalizovanom pristupu modeliranja koji omogućava emuliranje različitih tipova horizontalnih i/ili vertikalnih 5-osnih mašina alatki, konfiguracija (X,Y,Z,A,B) za vertikalne i horizontalne mašine i konfiguracije (X,Y,Z,A,C) za vertikalnu mašinu. Sistem za programiranje je baziran na G-kodu čime je omogućeno korišćenje postojećih CAD/CAM sistema za višeosnu obradu. Eksperimentima obrade složenog probnog dela je potvrđena mogućnost realizacije rekonfigurabilnog sistema upravljanja za različite konfiguracije 5-osnih mašina. Ovim eksperimentom je verifikovano i emuliranje i horizontalne i vertikalne 5-osne mašine alatke u toku jednog zadatka čime se omogućava višestrana obrada složenih delova u jednom postavljanju bez fizičke intervencije na robotu. S obzirom da je programiranje bazirano na G-kodu sistem upravljanja i programiranja mogu direktno koristiti CNC operateri i programeri mašina alatki.

7. LITERATURA

- [1] Li W., Red E., Jensen G., Evans M.: *Reconfigurable mechanisms for application control (RMAC) applications*, Computer-Aided Design & Applications, 4(1-4), 549-556, 2007.
- [2] DePree J., Gesswein C.: *Robotic machining white paper project-Halcyon Development*, <http://www.halcyondevelop.com>, 2008.
- [3] Milutinovic D., Glavonjic M., Slavkovic N., Dimic Z., Zivanovic S., Kokotovic B., Tanovic Lj.: *Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53(9-12), 1217-1229, 2011.
- [4] NIST, <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rcslib/>, oktobar, 2014.
- [5] LinuxCNC, <http://www.linuxcnc.org/>, oktobar, 2014.
- [6] Lee R.S., She C.H.: *Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 13(9), 658-665, 1997.
- [7] ISO 841:2001 *Industrial automation systems and integration - Numerical control of machines - Coordinate system and motion nomenclature*.
- [8] Craig J.J.: *Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd ed.*, Addison-Wesley, 1989.
- [9] Spong M.W., Vidyasagar M.: *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
- [10] Milutinovic, D., Slavkovic, N., Zivanovic, S., Glavonjic, M.: *Low-cost control and programming system for five-axis machining by articulated robots with 5 and 6 DOF*, 5th International Conference on Manufacturing Engineering, Proceedings, 133-142, Thessaloniki, Mechanical Engineering Department, School of Engineering, Aristoteles University Thessaloniki, october, 2014.

Milutinovic, D., Dimic, Z., Zivanovic, S., Slavkovic, N.

CONTROL AND PROGRAMMING OF 6-AXIS MACHINING ROBOT EMULATED AS HORIZONTAL AND/OR VERTICAL 5-AXIS MILLING MACHINE

Abstract: This paper presents prototype of control and programming system of 6-axis machining robot. Developed control and programming system is based on generalized modelling approach. Generalized modelling approach enables emulating of horizontal and/or vertical 5-axis milling machines i.e. programming in G-code and using of existing CAD/CAM system for multi-axis machining. The possibilities of emulating horizontal and vertical 5-axis milling machines during the one task enables the multifaceted machining of complex parts in one setup of work piece.

Keywords: robot machining, kinematic modelling, control and programming



Mitrović, S, Dimić, Z, Kvrđić, V.¹⁾

SISTEM ZA SIMULACIJU I NADZOR RADA ROBOTSKIH ČELIJA²⁾

Rezime

U okviru ovog rada je predstavljen sistem za simulaciju i nadzor robotskih ćelija, realizovan na bazi softverskih alata otvorene arhitekture, koji omogućava verifikaciju robotskih programa i praćenje rada robota u realnom vremenu. Opisan je način funkcionisanja simulacionog sistema, date su osnove interaktivne grafike i metode modeliranja u OpenGL okruženju. Simulacioni sistem je uspešno primenjen na robotskoj ćeliji koju čine dva industrijska robota – „lola 15“ i „lola 50“ i robokolica „robo 1000“.

Ključne reči: rad u realnom vremenu, simulacija, OpenGL, industrijski roboti

1. UVOD

Trodimenzionalno simulaciono okruženje omogućava efikasnu i bezbednu verifikaciju robotskih upravljačkih programa i prikaz rada robota. Komercijalno dostupna rešenja proizvođača robota imaju visoku cenu, zatvorenu softversku i hardversku arhitekturu, pa kao takvi i ograničenu primenu. U radu je predložen univerzalno primenljivo, trodimenzionalno simulaciono okruženje za verifikaciju robotskih programa, sa integrisanom funkcijom nadzora rada robotskih ćelija, razvijeno na bazi softverskih alata otvorene arhitekture. Pokazano je da je usvojen pristupom moguće izgraditi pouzdan sistem zadovoljavajućih performansi, sa visokim stepenom fleksibilnosti, koji se može primeniti na bilo kom robotu.

Iz širokog spektra dostupnih softverskih alata, za realizaciju predloženog sistema su odabrani OpenGL, omniORB i QGLViewer. OpenGL, kao alat za definisanje virtuelnog prostora, već je našao svoju primenu u oblasti proizvodnog mašinstva, a posebno kod grafičkog modeliranja mašina i roboti [2,3]. Savremeni softverski sistemi otvorene arhitekture za upravljanje mašinama i robotima, kao što je EMC2 [5], neizostavno uključuju 3D simulaciona okruženja razvijena na bazi OpenGL-a.

2. INTERAKTIVNO GRAFIČKO OKRUŽENJE

OpenGL je okruženje za programiranje (API – Application Programming Interface) koje se koristi za upravljanje grafičkim hardverom. OpenGL se upotrebljava za generisanje programabilne, interaktivne, 2D i 3D grafike. Ima veoma široku oblast primene i može se koristiti za izradu grafičkih okruženja (interfejsa), raznih vrsta simulacija, CAD/CAM/CAE modela, računarskih igrica, animiranih filmova... OpenGL je nezavisan od jezika pomoću kog se implementira i nezavisan je od hardvera na kom se koristi.

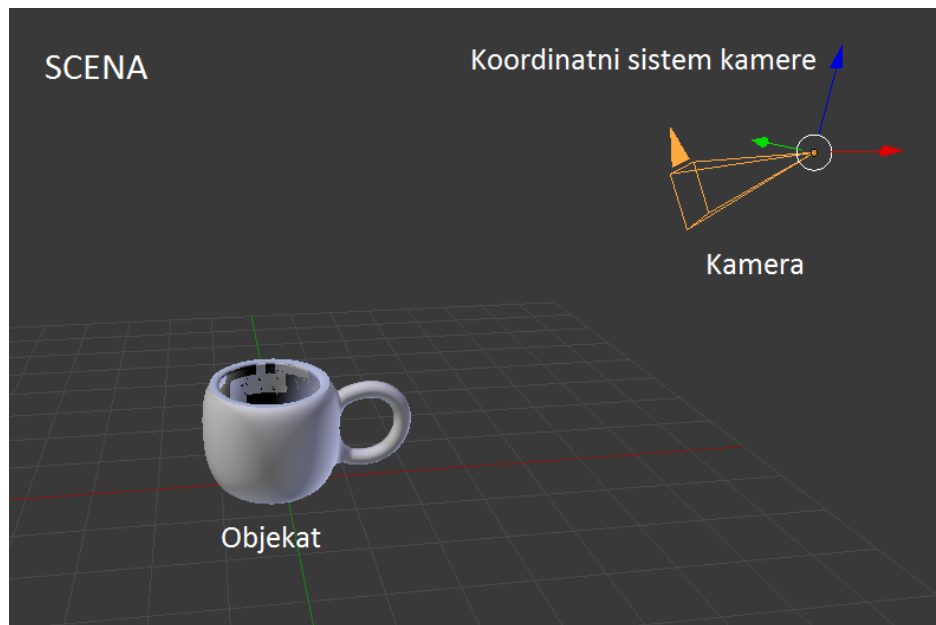
OpenGL je koncipiran kao virtuelni, trodimenzionalni prostor, sa globalnim (*world*) koordinatnim sistemom. Unutar virtuelnog prostora se postavlja scena. Scenu čine objekti koje želimo prikazati, osvetljenje, pozadine, teksture i specijalni efekti. Kamera se postavlja tako da deo scene u kadru bude prikazan na željeni način (*Slika 1.*). Po završetku pripremnih radnji, moguće je pokrenuti OpenGL program. Izlaz iz programa je slika ili animacija. U slučaju da generisana slika ne zadovoljava zadate kriterijume, vrše se potrebne korekcije, OpenGL se iznova pokreće i proces se ponavlja.

¹⁾Stefan Mitrović, mast. inž. maš, Lola Institut, Beograd, (stefan.mitrovic@li.rs)

Zoran Dimić, dipl. ing. el, Lola Institut, Beograd, (zoran.dimic@li.rs)

dr Vladimir Kvrđić, dipl. maš. ing, Lola Institut, Beograd, (vladimir.kvrgic@li.rs)

²⁾U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR35023, koji podržava Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.



Slika 1. OpenGL scena – primitivni objekat i kamera

Svaki složeni objekat na virtuelnoj sceni se može prikazati kombinacijom tri grafička elementa, pomoću tačke, duži i trougla. Od krajnjeg korisnika zavisi kako će dostupne elemente kombinovati, koji će algoritam primeniti, koji će jezik koristiti i kako će se doći do finalnog oblika 3D/2D modela.

Pozicija i orijentacija objekata se u openGL okruženju definišu matrično, upotrebom homogenih transformacija. Promena matrice homogenih transformacija datog objekta se manifestuje promenom pozicije i/ili orijentacije objekta na ekranu.

Homogenim transformacijama se definišu i pozicija i orijentacija kamere u virtuelnom prostoru. Željena slika scene se dobija kada se kamera pozicionira i orijentiše prema zahtevima. Kamera predstavlja referentni koordinatni sistem u odnosu na koji se generiše slika scene. Posebnim skupom openGL funkcija se menjaju parametri kamere.

Ako se promeni pozicija ili orijentacija kamere ili objekata, ako se promeni osvetljenje, pozadina, tekstura, dolazi do promene slike na ekranu. Korišćenjem ove zavisnosti razvijena su interaktivna grafička okruženja. Signali sa ulaznih uređaja menjaju vrednosti promenljivih na osnovu kojih se generiše slika scene. Interakcijom sa ulaznim uređajem, korisnik menja vrednosti bitnih parametara i diktira stanje unutar grafičkog okruženja. Rezultat je promena slike na ekranu u skladu sa signalima koji stižu sa ulaznog uređaja, bilo da je u pitanju miš, tastatura, džojstik, panel osetljiv na dodir, 3D kontroler...

3. MODELIRANJE ROBOTA

Postupak modeliranja u openGL okruženju se znatno razlikuje od postupka koji se primenjuje kod rada sa posebnim softverom za modeliranje. OpenGL se programira da prikaže zahtevani oblik. Ručno programiranje ima smisla samo pri izradi jednostavnih modela, jer je za izradu složenih modela neefikasno i nepouzđano.

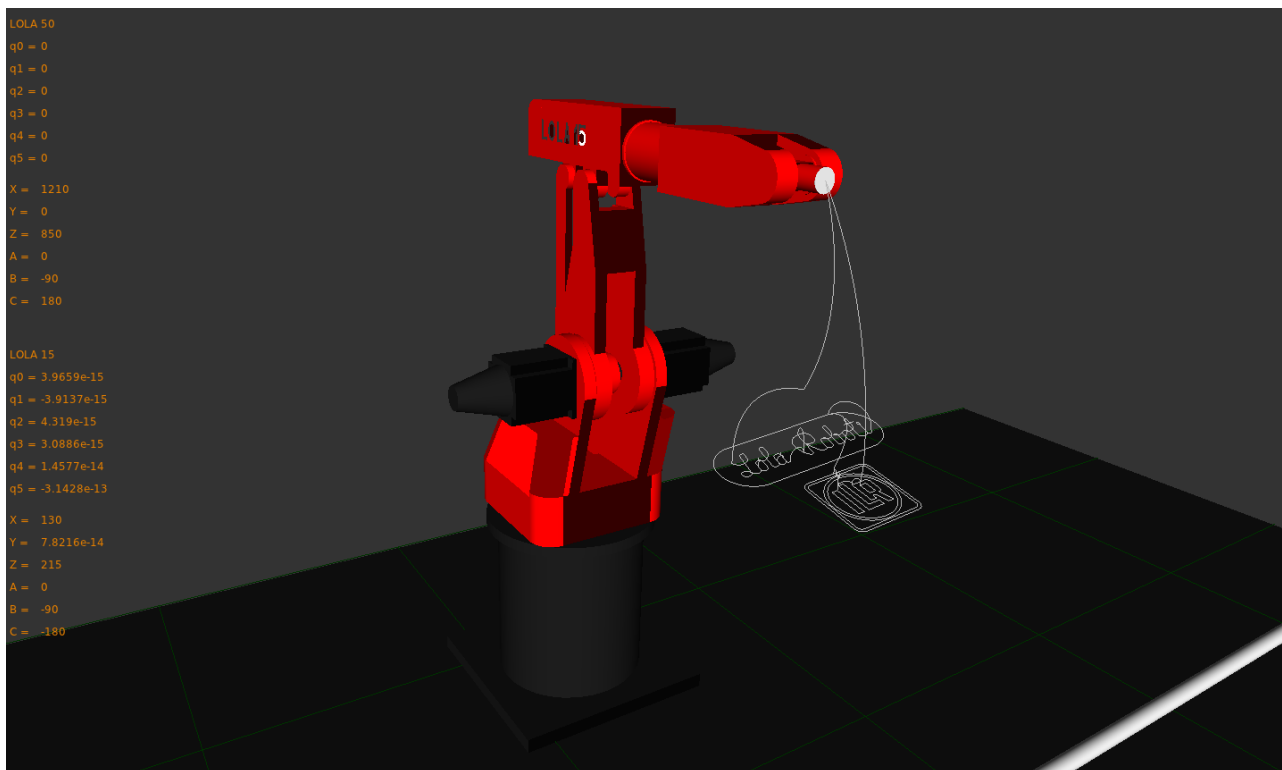
Problem modeliranja se može prevazići dvojako:

1. pojednostavljenjem procesa ručnog programiranja upotrebom dodatnih dostupnih biblioteka i razvojem sopstvenih biblioteka grafičkih primitiva i alata;
2. upotrebom specijalizovanog softvera za modeliranje - SolidWorks, Catia, 3dStudioMax, Maya, Blender. Mana ovog pristupa je što se iz matičnog formata izabranog softvera mora izvršiti konverzija u format koji se može učitati u openGL. Za konverziju najčešće ne postoje gotovi translatore, nego se moraju napisati.

Predloženi sistem za simulaciju i nadzor robotskih ćelija omogućava ručno modeliranje robota, uz korišćenje biblioteke jednostavnih objekata – primitiva. Biblioteka definiše funkcije koje generišu

prizmatične, cilindrične, konusne i druge 3D i 2D oblike u openGL-u, potrebne za generisanje modela složenog objekta, kao što je šestoosni vertikalni robot.

Objekat se modelira u odnosu na izabrani globalni ili lokalni koordinatni sistem. Polazna tačka je postojeći tehnički crtež objekta. Prema crtežu se započinje modeliranje. U prvom prolazu se korišćenjem dodatnih funkcija generiše grubi model objekta. U drugom prolazu se vrši nadogradnja postojeće strukture dodavanjem detalja i elemenata koje bi bilo zametno odmah modelirati. Teži se upotrebi primitiva i dodatnih funkcija u oba prolaza. Pošto se model programira ručno, korišćenje primitivnih funkcija openGL-a je neophodno prilikom izrade detalja. Prikaz gotovog modela dat je na slici (Slika 2.).



Slika 2. Izgled gotovog 3D modela robota „lola 15“. Vidi se hodograf vrha end-efektora, generisan u toku rada robota.

Podrazumeva se da virtuelni i realni robot imaju identičnu kinematičku strukturu. Virtuelni robot po obliku i izgledu treba da bude što bliži realnom. Dimenzije segmenata su saglasne sa dimenzijama definisanim projektnom dokumentacijom robota. Segmenti su u strogoj međusobnoj kinematičkoj zavisnosti. Virtuelni robot ne može dostići pozicije i ne može se kretati na način nemoguć za realnog robota.

Robot je modeliran po segmentima, a svaki segment je opisan unutar posebne funkcije. U toku simulacije, sve funkcije se pozivaju i prikazuju odgovarajuće segmente robota, bazu i okolinu unutar posebne aplikacije, koja omogućava translaciju, rotaciju, udaljavanje i približavanje pogleda, kao i odabir i pokretanje članova virtuelnog robota. Koordinatni sistem je dodeljen svakom segmentu virtuelnog robota u skladu sa Denavit – Hartenbergovim kinematičkim parametrima.

Kinematika virtuelnog robota je rešena i sadržana u posebnoj h-datoteci i učitava se u simulator prilikom pokretanja aplikacije. Samo jezgro simulatora je univerzalno. U slučaju rada sa drugim robotom, ili potpuno drugim tipom mašine, potrebno je izvršiti izmenu kinematike i grafičkog modela mašine i simulator je spreman za rad sa novim objektom.

4. VERIFIKACIJA RAZVIJENOG SISTEMA

Sistem za simulaciju i nadzor robotskih ćelija ima „online“ i „offline“ segment. „Online“ segment je podsistem za nadzor rada robota, koji mora biti povezan sa upravljačkom jedinicom. U toku rada robota, upravljačka jedinica šalje informacije sa enkodera robota podsistemu za nadzor. Prema dobijenim informacijama podsistem za nadzor pomera segmente virtuelnog robota na ekranu. Krajnji rezultat je da i

realni i virtuelni robot vrše identična kretanja u toku izvršavanja programa, što omogućava udaljeno praćenje rada robota.

Podsistem za simulaciju je „offline“ deo sistema i služi za proveru robotskih programa. Može se izvršavati na bilo kom računaru, jer ne zahteva vezu sa upravljačkom jedinicom robota. Ulaz u podsistem za simulaciju je objektni kod koji se dobija kompilacijom koda pisanog u odgovarajućem robotskom jeziku. Simulacioni podsistem, prema naredbama iz objektnog koda, pomera segmente virtuelnog robota. Tokom simulacije je moguće iscertavati trajektoriju virtuelnog end-efektora, što olakšava analizu kretanja. Potencijalne greške u kodu robotskog programa se manifestuju u toku izvršavanja programa na virtuelnom modelu. Od operatera se očekuje da greške uoči i ispravi.

Hardverska osnova robotske upravljačke jedinice je personalni računar visokih performansi. Uobičajena hardverska konfiguracija računara je proširena sa dve PCI robotske upravljačke kartice. Softverska osnova je linuxs ubuntu operativni sistem, koji radi u realnom vremenu. Operativni sistem je podešen tako da najveći stepen prioriteta imaju upravljački zadaci, a ne korisnički zahtevi i aplikacije. Mora se obezbediti stabilnost upravljačkog sistema i neosetljivost na akcije korisnika koje se ne odnose na upravljanje.

Sistem za simulaciju i nadzor robotskih ćelija se može implementirati direktno u upravljačku jedinicu, ili može biti na udaljenom računaru. Pošto je u pitanju distribuirani sistem, koji se sastoji iz različitih segmenata, bilo je potrebno primeniti CORBA protokol pomoću omniORB aplikacije. CORBA (**C**ommon **O**bject **R**equest **B**roker **A**rchitecture) predstavlja tehnologiju distribuiranih objekata, koja je zamišljena da bude nezavisna od korišćenog programskog jezika [4]. Koncept distribuiranih objekata polazi od ideje da odvojeni delovi programskog paketa pisani na različitim programskim jezicima, koji su pokrenuti na različitim računarima, mogu da rade zajedno, kao jedna aplikacija ili skup usluga [3]. ORB (**O**bject **R**equest **B**roker) je centralni deo koji obavlja komunikaciju između objekata. ORB omogućava da se putem računarske mreže izvršavaju programski pozivi usmereni od jednog računara ka drugom, pri čemu se objekti mogu nalaziti na istom računaru, ili na različitim računarima, povezanim preko mreže [3]. ORB se ponaša kao magistrala.

Pomoću CORBA protokola moguće je uspostaviti vezu između robotske upravljačke jedinice, koja radi u realnom vremenu u okviru jednog operativnog sistema, i softvera za simulaciju i nadzor, koji radi u okviru drugog operativnog sistema, na drugom računaru. CORBA protokol bi se koristio i u slučaju da se softver za simulaciju i nadzor integriše direktno u robotsku upravljačku jedinicu, jer upravljački softver i simulacioni softver nisu objedinjeni unutar jedne aplikacije.

Za posmatranje i interakciju sa simulacionim modelom koristi se softver QGLViewer. Funkcije QGLViewer-a u toku simulacije su translacija i rotacija pogleda, uvećanje i smanjenje prikaza. QGLViewer je integralni deo simulacionog okruženja i olakšava dodelu koordinatnih sistema segmentima, definisanje dužina segmenata, definisanje rotacionih i translacionih zglobova tokom izgradnje modela robota.

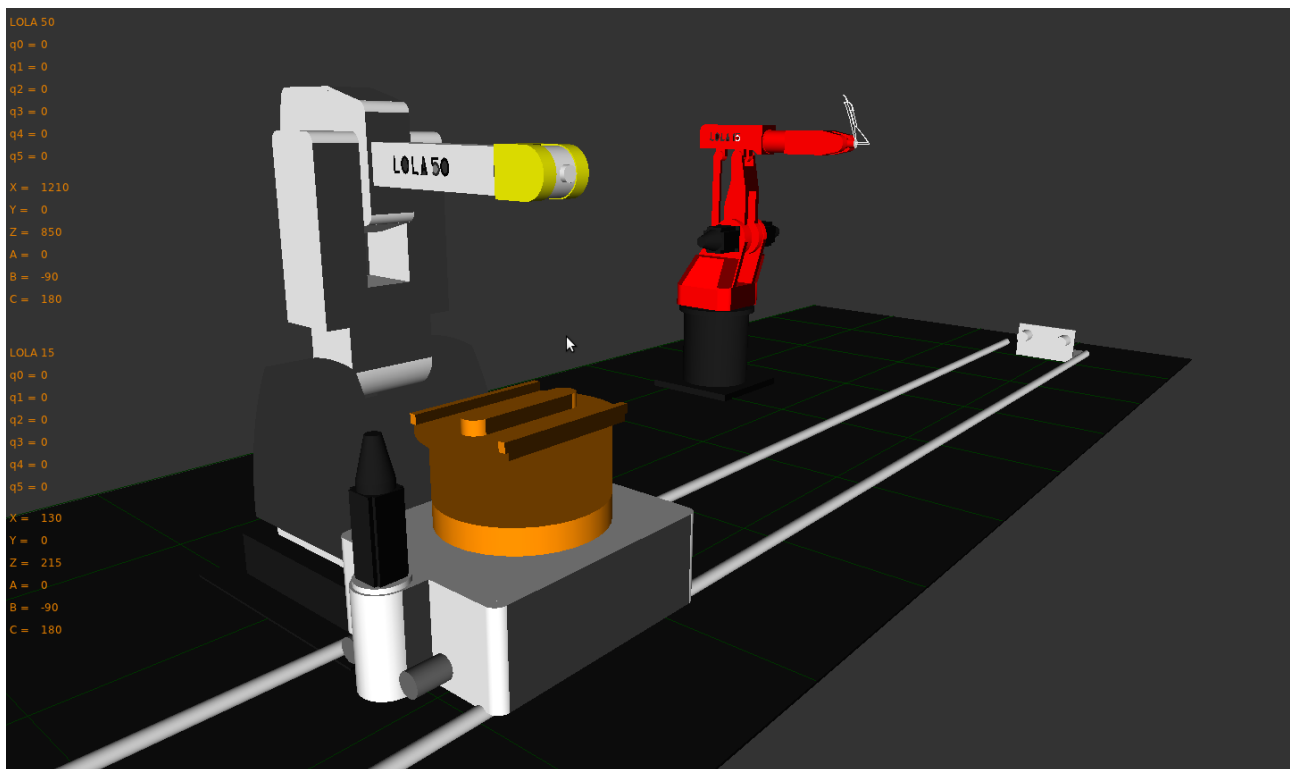
Opisani simulacioni sistem je realizovan u okviru laboratorije za robote i mašine alatke razvojno – istraživačkog instituta „Ivo Lola Ribar“ iz Beograda.

Šestoosni roboti vertikalne zglobne konfiguracije „lola 15“ i „lola 50“ su upravljani novim sistemom. Na oba robota su stare upravljačke jedinice zamenjene personalnim računarima sa PCI karticama za upravljanje robotima. PCI robot-kartice su povezane sa svim senzorima robota i sa neophodnim delovima elektroinstalacije.

PC upravljačke jedinice koriste linuxs ubuntu operativni sistem, koji radi u realnom vremenu. U upravljačke jedinice je integrisan upravljački softver i sistem za nadzor rada robota. Simulacioni sistem je postavljen na udaljenom računaru, jer se provere programa najčešće ne vrše u laboratoriji.

Robotski program se prvo kompiluje do objektnog p-koda, koji prihvata simulator. Kada se provera p-koda unutar simulatora uspešno izvrši, ispravan p-kod se prebacuje na upravljačku jedinicu izabranog robota.

Naredbom za početak rada, realni robot počinje sa izvršavanjem kretanja zadatih u p-kodu. Ceo proces se prati i može se videti na ekranu, u okviru sistema za nadzor. Ako se uključi funkcija praćenja kretanja virtuelnog robota, na ekranu će biti iscertavan i hodograf pozicije end-efektora. Po završetku programa, robot se vraća u zadatu početnu poziciju, spreman za sledeći zadatak. Prikaz virtuelne robotske ćelije dat je na slici (*Slika 3.*).



Slika 3. Prikaz virtualne robotske ćelije, sa robotima „lola 50“, „lola 15“ i robokolicima „robo 1000“. Hodograf end-efektora robota „lola 15“ je generisan u toku inicijalizacije robota.

5. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj rada je prikaz modeliranja, simulacije i nadzora robota pomoću sistema izgrađenog upotrebom univerzalnog hardvera i upotrebom softvera otvorene arhitekture.

Dalja istraživanja idu u smeru integracije praćenja rada više robota u jednoj virtualnoj laboratoriji, gde će akcenat biti stavljen na detekciju kolizije, kooperativni rad i transport materijala, delova i uređaja robokolicima između stanica.

Ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta podržanog strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, pod brojem TR35023.

6. LITERATURA

- [1] Lutovac, M., Dimić, Z., Ferenc, G., Vidaković, J., Kvirgić, V.: *Distribuirani sistem za kontrolu robota korišćenjem CORBA protokola*, Lola Institut, Beograd.
- [2] Živanović, S., Glavonjić, M., Dimić, Z.: *Konfigurisanje virtualne mašine troosne glodalice sa paralelnom kinematikom za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja*, INFOTEH – Jahorina, Vol. 11, 464 – 469, March 2012.
- [3] Lee, R. S., Lin, Y. H.: *Development of universal environment for constructing 5-axis virtual machine tool based on modified D-H notation and OpenGL*, Robotics and Computer – Integrated Manufacturing, issue 26, 253 – 262, 2010.
- [4] Greg Ippolito - CORBA, C++ and Linux, YoLinux.com, <http://www.yolinux.com/TUTORIALS/CORBA.html>
- [5] EMC2 Manual http://www.linuxcnc.org/docs/2.6/pdf/LinuxCNC_User_Manual.pdf
- [6] Dave Shreiner, Graham Sellers, John Kessenich, Bill Licea-Kane – OpenGL Programming Guide, Eighth Edition, ISBN: 978-0-321-77303-6
- [7] Angel, E., Shreiner, D.: *Interactive Computer Graphics: A Top Down Approach Using OpenGL*, Fifth Edition, ISBN: 978-0321535863
- [8] Deitel, P., Deitel, H.: *C How To Program*, Sixth Edition, ISBN: 978-0-13-612356-9

SYSTEM FOR SIMULATION AND SUPERVISION OF ROBOTIC CELLS

Abstract: *In this paper, a system for simulation and supervision of robotic work cells is given. Developed system, built utilizing open-source tools, enables surveillance of robotic activities in real-time and verification of robotic programs. Functioning of given system is described, as well as basics of interactive computer graphics and methods of modelling in OpenGL. Proposed system is successfully applied on robotic cell which consists of two industrial robots – „lola 15“ and „lola 50“ and automated guided vehicle „robo 1000“.*



Mošorinski, P., Mulić, V., Rančić, M.¹⁾

PARAMETRI GLAVNOG OTPORA REZANJA PRI OBRADI PLASTIČNIH MASA NA STRUGU

Rezime

U radu je izložen eksperimentalni postupak i način izračunavanja parametara glavnog otpora rezanja pri obradi plastičnih masa rezanjem na strugu. Za jednu konkretnu vrstu plastične mase (PTFE) određeni su vrednosti specifičnog otpora rezanja Ck_1 , kao i konstante X_1 i Y_1 . Ove veličine figurišu u opštem izrazu za izračunavanje glavnog otpora rezanja $F_1 = Ck_1 \times t^{X_1} \times s^{Y_1}$.

Ključne reči: plastične mase, obrada rezanjem na strugu, glavni otpor rezanja, parametri

1. UVOD

Masovna primena plastičnih masa za izradu delova industrijskih proizvoda zahteva istraživanje i optimizaciju procesa njihove obrade. Uobičajne metode za obradu kao što su livenje, brizganje, presovanje, često ne mogu da zadovolje kriterijume kvaliteta obrađene površine, oblika, tačnosti dimenzija, niske cene. Iz ovih razloga sve se više koriste metode obrade rezanjem kao što su: struganje, bušenje, glodanje i druge. S obzirom da u našoj stručnoj literaturi nedostaju detaljnije preporuke za izbor parametara režima obrade, istraživanja u ovoj oblasti su opravdana i neophodna. U ovom radu izlažu se neki do sada dobijeni rezultati.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Istraživanjem procesa mašinske obrade polimernih materijala (plastičnih masa) autori se bave već dugi niz godina a neki rezultati su do sada bili objavljeni.

U radu (1) su razmatrane tehnološke mogućnosti izrade delova od plastičnih masa. Izložene su osnovne zakonitosti obrade rezanjem kao i njihova klasifikacija prema obradljivosti.

Razmatranje hrapavosti obrađene površine u procesu obrade na strugu izloženo je u radu (2). Za slučaj obrade tekstolita eksperimentalnim putem je utvrđena zavisnost maksimalne hrapavosti obrađene površine od geometrije alata i režima pri kome se vrši obrada.

Toplotnim fenomenima koji se dešavaju u zoni rezanja pri obradi plastičnih masa autori su se bavili u radu (3). Prikazana je merna instalacija za izvođenje eksperimenata. Izložene su vrednosti temperatura koje se ostvaruju u karakterističnim tačkama zone rezanja.

Eksperimentalno merenje glavnog otpora rezanja pri obradi rezanjem na strugu i određivanje specifičnog otpora rezanja autori su predstavili u radu (4).

Deo rezultata istraživanja koji se odnosi na određivanje parametara za izračunavanje glavnog otpora rezanja izložen je u ovom radu.

¹⁾ Predrag Mošorinski, dipl.maš.inž., Tehnička škola Zrenjanin, e-mail: mosha_zr@yahoo.com
Spec.Veselin Mulić, dipl.maš.inž., VTŠSS Zrenjanin, e-mail:
Dr Milorad Rančić, dipl.maš.inž., VTŠSS Zrenjanin, e-mail: rancicmil@ptt.rs

3. SILE (otpori) REZANJA

Za određivanje sile (otpora) rezanja pri obradi plastičnih masa rezanjem (struganjem), u ovom radu, biće korišćena analogija sa rezanjem metala. Ako prihvatimo opšti slučaj kosog rezanja, prema autorima (5) i (6), onda se rezultujuća sila rezanja razlaže na tri međusobno upravne komponente:

F1 – glavna sila rezanja

F2 – sila prodiranja

F3 – sila pomoćnog kretanja

Od svih ovih komponenti najbitnija je glavna sila rezanja F1, a druge dve sile se izražavaju u funkciji od nje. Zato se posebna pažnja posvećuje metodama merenja i izračunavanja sile F1. U literaturi postoje više metoda za eksperimentalna merenja glavnog otpora rezanja kao i više analitičkih izrada za izračunavanja njene vrednosti. U ovom radu izražena je računarska metoda za eksperimentalno merenje a za izračunavanje ove sile koristiće se analitički prošireni izraz koji, prema brojnim autorima, ima oblik:

$$F1 = Ck \times t^{x1} \times s^{y1}$$

gde su:

t [mm] – dubina rezanja

s[mm/o] – korak

Koeficijenti Ck1, X1, Y1 zavise od vrste materijala.

Ck1 je specifični otpor rezanja za površinu poprečnog preseka strugotine A = 1 mm².

Utvrđivanje vrednosti ovih konstanti pri obradi mašinske plastike, u ovom slučaju, polietilena (PTFE), biće suštinski zadatak u ovom radu.

4. REZULTATI MERENJA

U tabeli 1 prikazane su izmerene vrednosti električne struje ampermetrom CNC struga EMCO F5 i statistika (Imax, Imin, Isr) brojnih nizova za 7 merenja tokom struganja plastike različitim režimima. Korekcionni faktori za skaliranje PLC-a (k_{max}, k_{min}, k_{sr}) izračunati su i uvršćeni u tabelu po formuli $k_{max,min,sr} = I_A / (I_{PLC})_{max,min,sr}$ količnik izmerenih vrednosti ampermetra i PLC-a.

Tabela 1. Statistika rezultata merenja struje I i korekcionni faktori za ampermetar/PLC

		0p	1p	2p	3p	4	5	6	7
ampermetar	(A)	0.85	1.7	1.4	1	1.1	0.9	2.5	1.9
PLC									
Imax	(A)	7	17	21	7	12	21	29	
kmax		0.121	0.100	0.067	0.143	0.092	0.043	0.086	
Imin	(A)	3	1	0	1	10	1	4	
kmin		0.283	1.700	-	1.000	0.110	0.900	0.625	
Imsr	(A)	3.00	16.00	3.25	4.00	11.07	13.00	16.50	
ksr		0.283	0.106	0.431	0.250	0.099	0.069	0.152	

U tabeli 2 izložene su vrednosti sile struganja F₁(N) dobije se po formuli:

$$F_1 = \frac{U \cdot I}{L \cdot \omega} \dots\dots\dots 4.1$$

U kojoj je električni napon poznat i iznosi U=220V, kao i slobodna dužina noža tj.zamišljena konzola L=0.02m, dok je ugaona brzina ω=26, 37(o/s). Struja I izračunata je kao proizvod vrednosti korekcionnog faktora k_{sr} i stuje izmerene PLC-om po formuli I=k_{sr}xI_{PLC}

Tabela 2. Sila struganja F1 dobijena po formuli 4.1

0-merenje	1-merenje	2-merenje	3-merenje	4-merenje	5-merenje	6-merenje
F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(N)
149	9	226	218	17	60	53
149	9	1056	240	17	66	27
149	111	1207	240	35	66	478
298	148	1358	240	70	66	849
298	158	1358	240	70	66	876
298	148	1358	240	87	66	796
347	158	1283	240	70	66	902
298	148	1358	218	70	60	690
298	148	1358	240	87	66	796

Eksperimentalna merenja i izracunati rezultati u tabelama 1. i 2. izvršeni su za rezime koji su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3.

		0-merenje	1-merenje	2-merenje	3-merenje	4-merenje	5-merenje	6-merenje
t	(mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2
vs	(mm/min)	80	80	300	300	80	80	300
s=vs*n	(mm/o)	0.133	0.067	0.500	0.250	0.133	0.067	0.500
n	(o/min)	600	1200	600	1200	600	1200	600
$\omega=\pi n/30$	(o/s)	62.8	126	62.8	126	62.8	126	62.8

5. MATEMATIČKI MODEL ZA ODREĐIVANJE TRAŽENIH PARAMETARA

Analitička zavisnost režima struganja plastike može se prikazati formulom

$$F_1 = C_{k1} \cdot t^{x_1} s^{y_1} \dots\dots\dots 5.1$$

koja se dalje logaritmovanjem leve i desne strane transformiše u jednakost

$$\ln F_1 = \ln C_{k1} + x_1 \ln t + y_1 \ln s \dots\dots\dots 5.2$$

Za jednu kombinaciju režima struganja može se napisati sistem linearnih algebarskih jednačina u sledećem obliku:

$$\begin{aligned} \ln F_{1\max} - \ln C_{k1\max} &= x_1 \ln t + y_1 \ln s \\ \ln F_{1\min x} - \ln C_{k1\min} &= x_1 \ln t + y_1 \ln s \end{aligned} \dots\dots\dots 5.3$$

Prema sistemu algebarskih jednačina 5.3 može se napisati njihov matrični oblik

$$\begin{pmatrix} \ln F_{1\max} - \ln C_{k1\max} \\ \ln F_{1\min x} - \ln C_{k1\min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln t & \ln s \\ \ln t & \ln s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots 5.4$$

Specifični otpor rezanja (struganja) plastike dobija se za ostvareni jedinični poprečni presek strugotine $A=txs=1x1=1\text{mm}^2$. Eksperimentalnim putem je dobijena srednja vrednost specifičnog otpora rezanja.

U radu (4) utvrđjena je njegova vrednost u (N/mm²):

$$C_k = 143,5 \times 10^6$$

Rešavanjem sistema jednačina 5.3 dobijene su vrednosti parametara X1 i Y1 :

$$X_1 = 1,0248$$

$$Y_1 = 0,7622$$

6. ZAKLJUČAK

Ukrštanjem matrice merenja za vrednosti sile otpora rezanju F_{1max} i F_{1min} i $Ck_{1max-min}$ a na osnovu skaliranja u programu Matlab dobijeni rezultati predstavljaju vrednosti parametara X_1 i Y_1 koji se mogu prihvatiti. Skaliranje PLC-a je izvršeno prema raspoloživoj mašini (STRUG EMCO F5 CNC) a prema korekcionom faktoru iz Tabele 1. Ukrštanjem drugih rezultata merenja i korišćenjem korekcionih faktora dobili bi se ostali rezultati traženih parametara koji bi se nalazili u optimalnim okvirima i ne bi bitnije odstupali od dobijenih. Na osnovu faktora skaliranja može se zaključiti da ovaj faktor u značajnoj meri utiče na dobijene rezultate i potrebno je ponavljati postupke merenja kako bi se dobio optimalan faktor skaliranja a rezultati traženih parametara bili precizniji.

7. LITERATURA

- [1] Ljevar A., Rančić M.: *Plastične mase i osnove njihove obrade rezanjem*, Zbornik radova, JUPITER, Mašinski fakultet Beograd, Cavtat, 1989.
- [2] Rančić M., Ljevar A.: *Obrada plastičnih masa rezanjem i hrapavost obrađene površine*, Zbornik radova, JUPITER, Mašinski fakultet Beograd, Cavtat, 1989.
- [3] Mošorinski P., Mulić V., Rančić M.: *Temperature u zoni rezanja pri obradi na strugu zaptivača motora od plastične mase (PTFE)*, Zbornik radova, PIM, VTŠSS, Zrenjanin, 2012.
- [4] Mošorinski P., Mulić V., Rančić M.: *Merenje specifičnog otpora rezanja pri obradi na strugu zaptivača kompresora od plastične mase*, PIM, VTŠSS, Zrenjanin, 2013.
- [5] Milikić D.: *Tehnologija obrade rezanjem*, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1999.
- [6] Stanković P.: *Mašinska obrada*, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1971.

Mošorinski, P., Mulić, V., Rančić, M.

PARAMETERS OF THE MAIN CUTTING RESISTANCE IN PROCESSING OF PLASTICS ON THE LATHE

Abstract: This paper presents an experimental procedure and the method for calculating the parameters of the main cutting resistance in the processing of the main cutting resistance in the processing of plastics on the lathe. For one particular type of plastics (PTFE) are determined the value of the specific cutting resistance Ck_1 , and the constants X_1 and Y_1 . This sizes figuring in the formula for calculating the value main cutting resistance F_1 .

Key words: plastics, processing cutting on the lathe, main cutting resistance, parameters



Petronijević, J., Petrović, M., Babić, B., Miljković, Z.¹⁾

PRIMENA MULTIAGENTNIH SISTEMA I TEORIJE ROJEVA U OPTIMIZACIJI FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA²⁾

Rezime

Sistemi zasnovani na agentima primenju se za razvoj društvenih, bioloških i tehničkih sistema. U domenu tehničkih sistema, svoju primenu nalaze i u rešavanju problema optimizacije savremenih tehnoloških sistema. U radu je predstavljena razvijena multiagentna metodologija za optimalno projektovanje tehnoloških procesa obrade dela. Predložena multiagentna arhitektura se sastoji od četiri agenta: agent za delove, agent za mašine, agent za transport i agent za optimizaciju. Nakon generisanja optimalnih tehnoloških procesa primenom biološki inspirisanog algoritma na bazi inteligencije roja čestica, u AnyLogic softverskom paketu je izvršena simulacija primenom razvijenih agenata. Eksperimentalni rezultati pokazuju opravdanost primene predložene metodologije u simuliranom modelu tehnološkog okruženja.

Ključne reči: multiagentna metodologija, teorija rojeva, optimizacija, AnyLogic

1. UVOD

Kompetitivno tržište i promene u zahtevima kupaca samo su jedni od pokretača organizacionih promena u proizvodnji. Tradicionalno centralizovano planiranje i upravljanje proizvodnim procesima nije dovoljno fleksibilno, što uslovljava intenzivan razvoj različitih sistema koji bi mogli da odgovore na trenutne promene u okruženju. Multiagentni sistemi, kroz svoj individualni i decentralizovani pristup, primenu nalaze u inženjerskom projektovanju, planiranju procesa, planiranju, terminiranju i upravljanju proizvodnjom, dijagnostici procesa, organizaciji i integraciji preduzeća, umreženoj proizvodnji i upravljanju životnim ciklusom proizvoda [1-3].

Rad ima za cilj da se kroz implementaciju multiagentnih sistema u simuliranom okruženju prikaže njihova primena u oblasti optimizacije i upravljanju proizvodnim procesima. Sadržaj rada je organizovan u četiri poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja, u drugom poglavlju se definišu multiagentni sistemi sa posebnim akcentom na svakog od razvijenih agenata: agenta za delove, agenta za mašine, agenta za transport i agenta za optimizaciju. U okviru agenta za optimizaciju definisana je i uvedena teorija rojeva. Treće poglavlje obuhvata prikaz eksperimentalnih rezultata kroz dve faze. U prvoj fazi, u okviru agenta za optimizaciju, primenjena je teorija rojeva sa ciljem generisanja optimalnog tehnološkog postupka na osnovu dva kriterijuma: kriterijum minimalnog ukupnog proizvodnog vremena i kriterijum minimalnih ukupnih troškova. U drugoj fazi, generisani tehnološki postupak implementiran je u simulaciono okruženje AnyLogic softverskog paketa na osnovu agenta za delove, agenta za mašine i agenta za transport. Na kraju rada dat je zaključak sa osnovnim rezultatima istraživanja i naznačenim pravcima budućih istraživanja.

¹⁾ **Jelena Petronijević**, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-264, e-mail: jpetronijevic@mas.bg.ac.rs,

Milica Petrović, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-264, e-mail: mmpetrovic@mas.bg.ac.rs,

Dr Bojan Babić, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-274, e-mail: bbabic@mas.bg.ac.rs,

Dr Zoran Miljković, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-468, e-mail: zmiljkovic@mas.bg.ac.rs.

²⁾ 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, 2011-2015.

2. MULTIAGENTNI SISTEMI

Agent se može definisati kao kompjuterski sistem sposoban za autonomno delovanje radi ispunjenja zadatih ciljeva u okruženju u kom je smešten. Svaki agent poseduje samo delimične informacije o okruženju u kom se nalazi. Znanja o okruženju dva agenta mogu biti različita. Shodno tome, sistemi bazirani na agentima predstavljaju mrežu agenta koji međusobnom saradnjom bivaju sposobni da rešavaju probleme izvan mogućnosti rešavanja individualnog agenta. Odluke i akcije agenata u multiagentnim sistemima su rezultat međusobne interakcije i predstavljaju uslovljeno ponašanje koje ne može biti izvedeno na osnovu ponašanja pojedinačnih komponenti sistema. U svakoj zajednici, pa i u onoj multiagentnoj, individua mora koordinisati svoje akcije sa ostalim pojedincima. Donošenje odluke agenta zavisi od akcija drugih agenata. Ostvarenje koordinisanog rada moguće je isključivo na osnovu postojanja određenog vida komunikacije između agenata. Multiagentni sistem, iako predstavlja decentralizovan sistem, karakteriše i određeni skup pravila definisanih radi ostvarenja zajedničkih ciljeva [1-3].

U radu je razmatran problem terminiranja i upravljanja proizvodnjom. Terminiranje proizvodnje ostvareno je upotrebom agenta za optimizaciju i implementirane metode roja čestica. Upravljanje proizvodnjom obuhvatalo je niži nivo upravljanja koji uključuje kontrolu proizvodnih resursa radi ostvarenja proizvodnih planova kroz agenta za delove, agenta za mašine i agenta za transport. Na taj način izvršena je prvo funkcionalna, a zatim i fizička dekompozicija sistema. Razvijeni multiagentni sistem poseduje sve karakteristike sistema na bazi agenata. Interakcija agenata prikazana je na slici 1.



Slika 1. Interakcija agenata

2.1 Agent za optimizaciju

Matematički model agenta za optimizaciju tehnoloških procesa

Optimizacija tehnoloških procesa vrši se na osnovu dva kriterijuma: kriterijum minimalnog ukupnog proizvodnog vremena i kriterijum minimalnih ukupnih troškova. Proizvodno vreme (PT) je jedan od najčešće

korišćenih kriterijuma pri optimizaciji fleksibilnih tehnoloških procesa i predstavlja zbir vremena obrade i vremena transporta.

- Glavno vreme obrade (TW) je predstavljeno jednačinom (1):

$$TW = \sum_{i=1}^n TWI(i, j, k) \quad (1)$$

gde je n ukupan broj operacija tehnološkog procesa, a $TWI(i, j, k)$ vreme tajanja operacije i na alternativnoj mašini j korišćenjem alternativnog alata k .

- Vreme transporta (TT) predstavljeno je jednačinom (2):

$$TT = \sum_{i=1}^{n-1} TTI((i, j_1), (i+1, j_2)) \quad (2)$$

gde je $TTI(i, j_1), (i+1, j_2)$ vreme transporta između alternativnih mašina j_1 i j_2 .

Ukupno proizvodno vreme (PT) dobija se prema jednačini (3):

$$PT = TW + TT \quad (3)$$

Funkcija cilja, koja se koristi za odabir tehnološkog procesa sa minimalnim proizvodnim vremenom PT , je predstavljena jednačinom (4):

$$f_1 = \max\left(\frac{1}{PT}\right) \quad (4)$$

Proizvodni troškovi su drugi kriterijum korišćen pri optimizaciji tehnoloških procesa i obuhvataju dve kategorije troškova: troškove mašina i troškove promene mašine.

- Troškovi mašina (MC) se određuju prema jednačini (5):

$$MC = \sum_{i=1}^n MCI_i \quad (5)$$

gde je n ukupan broj operacija, a MCI_i indeks troškova mašine i .

- Troškovi promene mašine (MCC) se određuju prema jednačini (6):

$$MCC = MCCI \times \sum_{i=1}^n \Omega(M_{i+1} - M_i) \quad (6)$$

gde je $MCCI$ indeks troškova promene mašine.

Ukupni troškovi (TC) se dobijaju shodno jednačini (7):

$$TC = MC + MCC \quad (7)$$

Funkcija cilja, koja se koristi za odabir tehnološkog procesa sa minimalnim ukupnim troškovima TC , je predstavljena jednačinom (8):

$$f_2 = \max\left(\frac{1}{TC}\right) \quad (8)$$

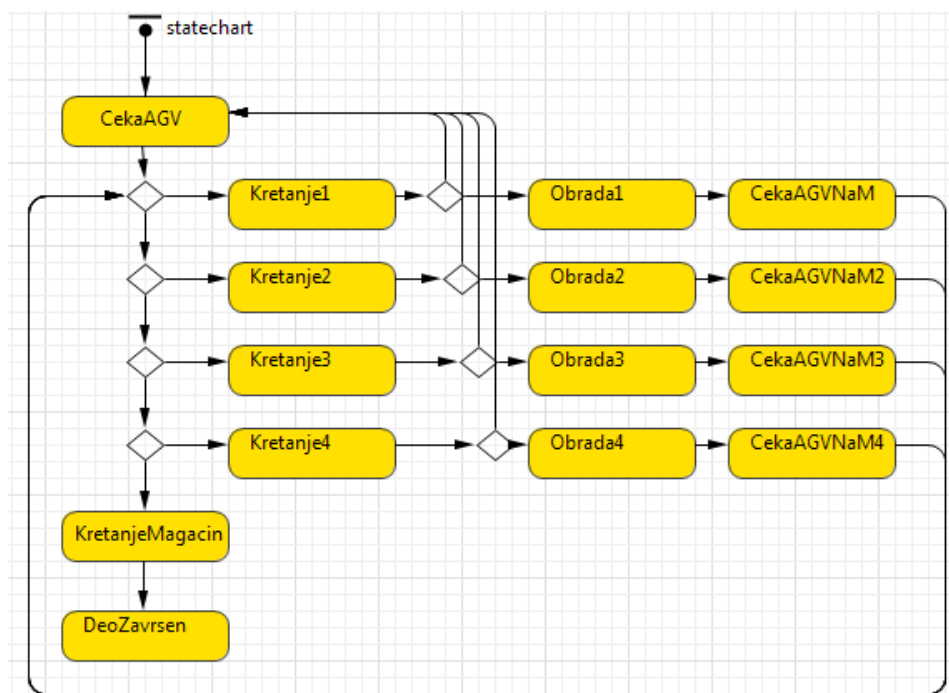
Optimizacija tehnoloških procesa primenom teorije rojeva

Metod optimizacije rojem čestica (engl. *particle swarm optimization* - PSO) pripada grupi biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije [4]. Osnovna ideja ove metode inspirisana je kolektivnom inteligencijom jedinki jata (na primer jata ptica, ili riba) u potrazi za hranom. Analogno sa tim, svaka jedinka PSO algoritma se kreće kroz prostor mogućih rešenja u potrazi za globalnim optimalnim tehnološkim procesom. Tokom potrage za optimalnim rešenjem, svaka jedinka menja svoju brzinu i svoj položaj na način na koji je to prikazano pseudokodom koji sledi, tabela 1.

Tabela 1. Pseudokod algoritma baziranog na inteligenciji roja
Početak
Korak 1. Inicijalizacija parametara W, C_1, C_2 ;
Korak 2. Inicijalizacija položaja i brzina za jedinke roja; $V_{id}^{t+1} = W \cdot V_{id}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id}^t - X_{id}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd}^t - X_{id}^t),$ $X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1}$ Određivanje funkcije cilja za jedinke roja (jednačina (8), ili jednačina (4)); Inicijalizacija najboljeg lokalnog položaja svake jedinke P_{id}^t i globalnog najboljeg položaja svih jedinki P_{gd}^t ; Ponovi generacija = generacija + 1; izračunati brzinu i položaj svih jedinki; odrediti funkciju cilja za svaku jedinku; odrediti globalni i lokalni najbolji položaj jedinki; ažurirati globalni i lokalni najbolji položaj jedinki; Sve dok se ne dostigne maksimalan broj generacija.
Korak 3. Rezultati optimizacije - optimalni tehnološki proces obrade dela
Kraj

2.2 Agent za delove

Agent za delove prati deo od priprema, preko obratka do gotovog dela. Kroz dijagram stanja vrši se, korišćenjem dobijenog tehnološkog postupka, odabir operacija na osnovu trenutnog stanja dela. Mogućnost izvođenja određene operacije definisana je dostupnošću agenta za mašine. Ukoliko je u datom trenutku mašina alatka zauzeta obrada se neće izvesti i deo će biti transportovan do međuskladišta odgovarajuće mašine alatke. Trenutno stanje ažurira se nakon izvršene obrade. U okviru



Slika 2. Agent za delove

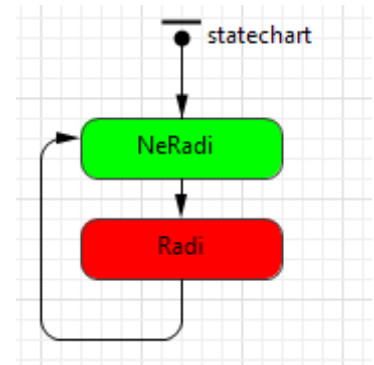
dijagrama stanja, definiše se i komunikacija agenta za delove sa agentom za transport i agentom za mašine. Agent za delove vrši direktnu komunikaciju sa agentom za transport slanjem poruka za potrebom za transport i to u dva slučaja: kada se deo transportuje sa mašine i kada se deo transportuje iz magacina priprema ili nekog od međuskladišta. Transport sa mašine predstavlja poziv prvog prioriteta i obavlja se uvek pre poziva za transport iz nekog od skladišta. Cilj ovog pravila bilo je obezbeđenje što veće iskorišćenosti mašina alatke. Pomoću direktne komunikacije sa agentom za mašine vrši se promena stanja mašine alatke od slobodne do zauzete u zavisnosti od toga da li je nakon završene obrade deo napustio mašinu alatku korišćenjem agenta za transport ili je dolaskom dela, uz prethodnu dostupnost mašine, obrada započeta. Dijagram stanja agenta za delove prikazan je na slici 2.

2.3 Agent za mašine

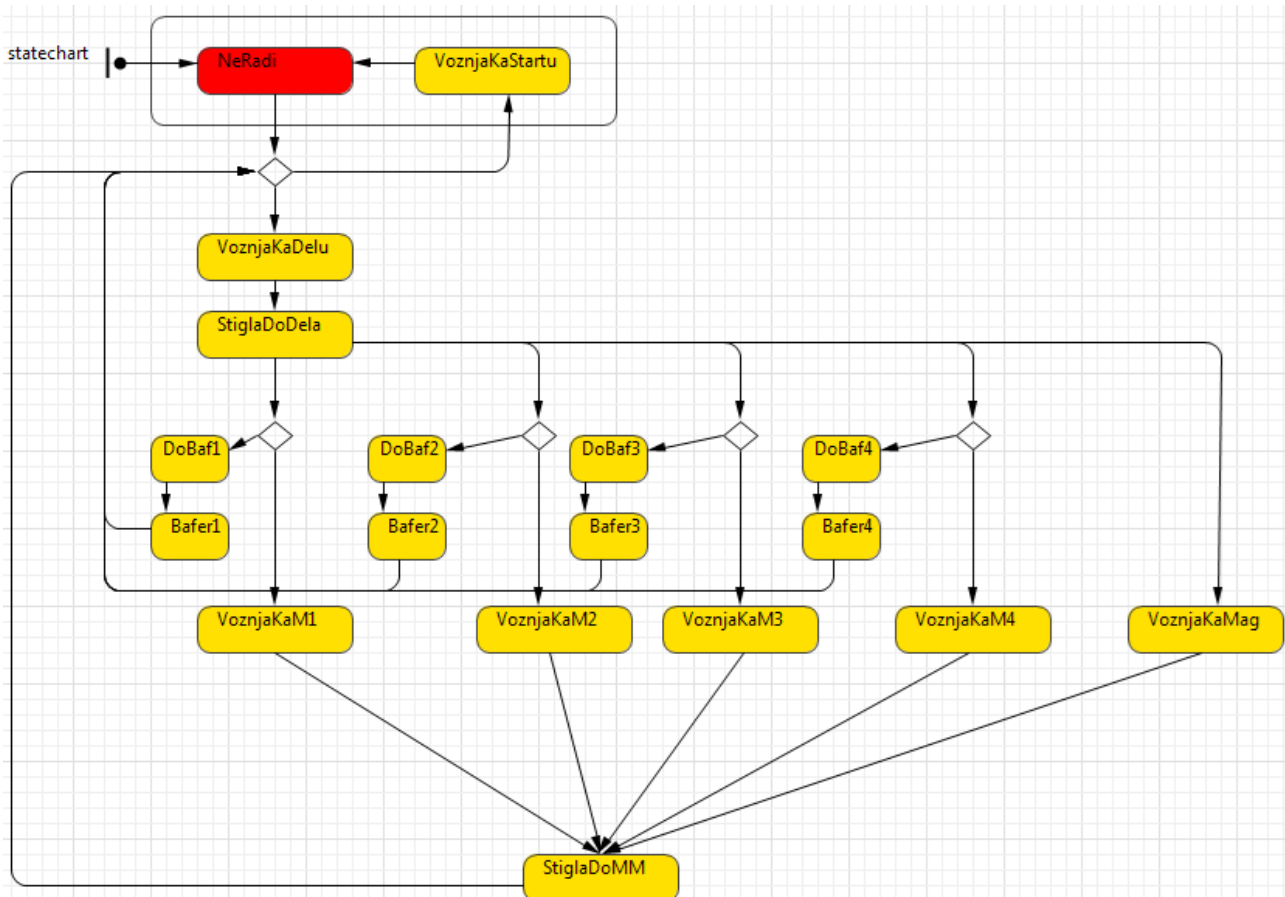
Agent za mašine se može naći u dva stanja. U stanju „*NeRadi*“ mašina alatka je dostupna i spremna da prihvati novi deo. U stanju „*Radi*“ mašina alatka vrši obradu ili je nakon izvršene obrade deo još uvek na mašini usled čekanja agenta za transport. Prelaz iz jednog stanja u drugo vrši se na osnovu direktne komunikacije sa agentom za delove. Dijagram stanja agenta za mašine prikazan je na slici 3.

2.4 Agent za transport

Agent za transport prevozi deo između mašina alatke i skladišta. Pozivi za transport proveravaju se pri generisanju svakog novog poziva u slučaju kada je agent za transport slobodan ili po završetku transporta u slučaju kada je agent aktivan. Prihvata se poziv onog dela koji je prvi uputio isti. Pravilo prioriteta definisano je tako da pozivi delova koji se nalaze na mašini imaju prednost u odnosu na pozive delova iz skladišta. Na taj način, agent za transport uvek će prvo izvršiti transport između dve mašine alatke i mašine alatke i skladišta gotovih delova. Nakon dolaska agenta za transport do dela koji je zahtevao transport odluka o određenoj kretanju izvodi se koordinacijom sa agentom za delove i agentom za mašine. Na osnovu trenutnog stanja dela određuje se mašina alatka na kojoj se vrši naredna operacija, da bi se proverom stanja agenta za mašine utvrdila dostupnost tog agenta. U slučaju da je mašina alatka slobodna vrši se transport do nje, dok se u slučaju zauzetosti deo dostavlja u odgovarajuće međuskladište. U oba slučaja, nakon ostvarene destinacije, agent za transport postaje dostupan za nove pozive i vrši proveru istih. Dijagram stanja agenta za transport prikazan je na slici 4.



Slika 3. Agent za mašine



Slika 4. Agent za transport

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Generisanje optimalnih tehnoloških procesa

U cilju verifikacije predloženog koncepta, korišćeni su „benchmark“ delovi različitih tipova i nivoa fleksibilnosti (fleksibilnost procesa, fleksibilnost mašina, fleksibilnost redosleda operacija). Podaci o alternativnim mašinama za svaku operaciju i vremenima svake operacije na alternativnim mašinama usvojeni iz [5], uz sledeću modifikaciju: svaki link u mreži alternativnih tehnoloških procesa je OR link. Delovi se obrađuju na 15 mašina alatki, dok je broj operacija od 8 do 22. Vreme transporta delova između mašina alatki prikazano je u tabeli 2, a spisak mašina alatki sa troškovima dat je u tabeli 3. Cilj pri optimizaciji fleksibilnih tehnoloških procesa je minimizacija funkcije cilja $f_1(i,t)$, koja je data jednačinom (4), i $f_2(i,t)$, koja je data jednačinom (8). Uporedni rezultati samostalnog GA, samostalnog SA, hibridnog GA-SA i PSO algoritma prikazani su u tabeli 4 za funkciju cilja f_1 , i u tabeli 5 za funkciju cilja f_2 .

Tabela 2. Vreme transporta između mašina alatki

mašine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	4	8	10	12	5	6	14	13	18	6	5	9	11	7
2	4	0	3	7	11	5	4	6	10	13	12	8	2	2	9
3	8	3	0	5	7	9	8	4	6	10	12	7	4	6	9
4	10	7	5	0	4	14	12	6	5	6	7	8	2	3	14
5	12	11	7	4	0	18	12	10	6	4	4	9	5	5	8
6	5	5	9	14	18	0	6	8	12	15	3	10	2	7	4
7	6	4	8	12	12	6	0	3	7	10	4	5	6	7	8
8	14	6	4	6	10	8	3	0	4	8	12	9	6	4	3
9	13	10	6	5	6	12	7	4	0	4	5	10	9	8	7
10	18	13	10	6	4	15	10	8	4	0	2	5	8	9	4
11	6	12	12	7	4	3	4	12	5	2	0	6	7	7	7
12	5	8	7	8	9	10	5	9	10	5	6	0	3	4	12
13	9	2	4	2	5	2	6	6	9	8	7	3	0	10	11
14	11	2	6	3	5	7	7	4	8	9	7	4	10	0	16
15	7	9	9	14	8	4	8	3	7	4	7	12	11	16	0

Табела 3. Podaci o troškovima

mašine	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
troškovi	70	30	15	40	85	10	25	60	20	35	16	24	30	65	45

indeks troškova promene: MCCI = 200;

Tabela 4. Rezultati optimizacije fleksibilnih tehnoloških procesa - f_1

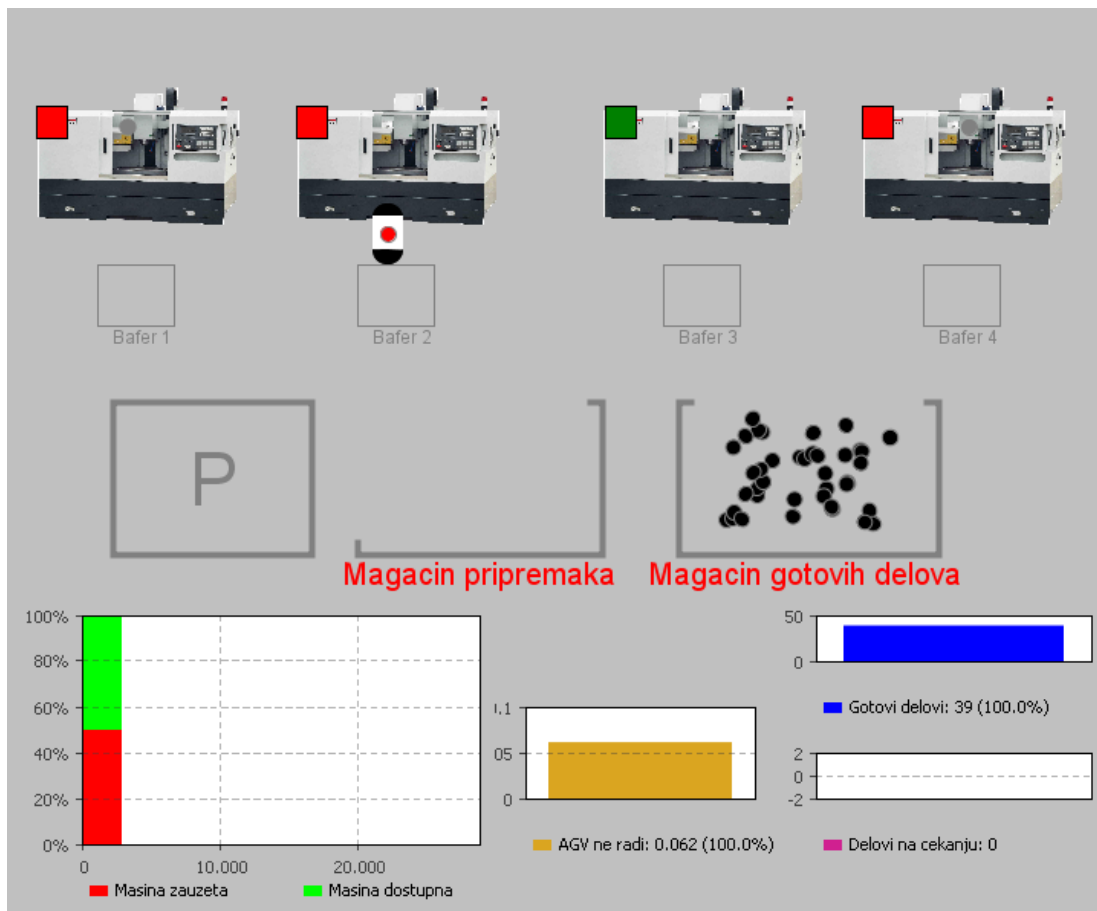
deo	Najbolji rezultat				Srednji najbolji rezultat				Najlošiji rezultat			
	GA	SA	GA-SA	PSO	GA	SA	GA-SA	PSO	GA	SA	GA-SA	PSO
1	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0047	0.0047	0.0048	0.0043	0.0040	0.0046	0.0047
2	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0091	0.0090	0.0091	0.0091	0.0078	0.0045	0.0085	0.0088
3	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0118	0.0113	0.0120	0.0125	0.0077	0.0059	0.0089	0.0094
4	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	0.0109	0.0032	0.0112	0.0118
5	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083	0.0082	0.0077	0.0081	0.0082	0.0062	0.0036	0.0073	0.0075
6	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0102	0.0103	0.0103	0.0087	0.0063	0.0096	0.0096
7	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0092	0.0093	0.0093	0.0069	0.0039	0.0087	0.0087
8	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0083	0.0043	0.0089	0.0094
9	0.0115	0.0115	0.0115	0.0115	0.0112	0.0106	0.0111	0.0114	0.0087	0.0075	0.0099	0.0102
10	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164	0.0163	0.0163	0.0164	0.0164	0.0132	0.0047	0.0141	0.0164
11	0.0227	0.0227	0.0227	0.0227	0.0224	0.0214	0.0226	0.0226	0.0182	0.0057	0.0185	0.0200
12	0.0101	0.0101	0.0101	0.0101	0.0101	0.0099	0.0101	0.0101	0.0088	0.0070	0.0093	0.0095
13	0.0154	0.0154	0.0154	0.0154	0.0154	0.0153	0.0154	0.0154	0.0132	0.0053	0.0137	0.0147
14	0.0189	0.0189	0.0189	0.0189	0.0188	0.0186	0.0189	0.0189	0.0125	0.0068	0.0164	0.0147
15	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0094	0.0098	0.0098	0.0083	0.0080	0.0088	0.0090
16	0.0185	0.0185	0.0185	0.0185	0.0182	0.0160	0.0183	0.0184	0.0111	0.0044	0.0137	0.0137
17	0.0179	0.0179	0.0179	0.0179	0.0177	0.0167	0.0177	0.0177	0.0139	0.0088	0.0154	0.0141
18	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0.0095	0.0083	0.0062	0.0088	0.0092

Tabela 5. Rezultati optimizacije fleksibilnih tehnoloških procesa - f_2

deo	Najbolji rezultat				Srednji najbolji rezultat				Najlošiji rezultat			
	GA	SA	GA-SA	PSO	GA	SA	GA-SA	PSO	GA	SA	GA-SA	PSO
1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0008	0.0008	0.0008	0.0001
2	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0008	0.0011	0.0010	0.0017
3	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0034	0.0044	0.0061	0.0100	0.0007	0.0009	0.0009	0.0019
4	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0021	0.0022	0.0022	0.0022	0.0004	0.0005	0.0005	0.0022
5	0.0018	0.0019	0.0019	0.0019	0.0014	0.0015	0.0018	0.0018	0.0006	0.0007	0.0007	0.0013
6	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0021	0.0024	0.0025	0.0025	0.0001	0.0009	0.0011	0.0017
7	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0005	0.0004	0.0005	0.0014
8	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0021	0.0022	0.0022	0.0022	0.0005	0.0018	0.0010	0.0022
9	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040	0.0029	0.0035	0.0039	0.0040	0.0008	0.0018	0.0013	0.0025
10	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044	0.0043	0.0044	0.0044	0.0044	0.0007	0.0008	0.0008	0.0044
11	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0116	0.0241	0.0247	0.0250	0.0009	0.0010	0.0032	0.0042
12	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0019	0.0020	0.0020	0.0020	0.0009	0.0011	0.0010	0.0019
13	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0040	0.0040	0.0041	0.0041	0.0008	0.0008	0.0006	0.0041
14	0.0034	0.0034	0.0034	0.0034	0.0029	0.0033	0.0034	0.0034	0.0008	0.0013	0.0010	0.0032
15	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027	0.0025	0.0027	0.0027	0.0027	0.0010	0.0019	0.0011	0.0025
16	0.0039	0.0039	0.0039	0.0039	0.0029	0.0037	0.0039	0.0039	0.0009	0.0011	0.0005	0.0024
17	0.0040	0.0040	0.0040	0.0040	0.0036	0.0039	0.0040	0.0040	0.0008	0.0013	0.0009	0.0040
18	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0009	0.0012	0.0013	0.0020

3.2 Simulacija na bazi agenata u AnyLogic softverskom paketu

Nakon generisanja optimalnih tehnoloških procesa primenom biološki inspirisanog algoritma na bazi inteligencije roja čestica, u AnyLogic softverskom paketu [6,7] je izvršena simulacija primenom razvijenih agenata, slika 5.



Slika 5. Simulacija u AnyLogic softverskom paketu

Simulacija je izvršena za godišnje serije od 100.000 i 200.000 delova u posmatranom periodu od jednog radnog dana (8 časova). Shodno generisanom tehnološkom postupku korišćen je jedan agent za transport. Broj proizvedenih delova za seriju od 100.000 delova na dnevnom nivou iznosi prosečno 387. Broj delova na čekanju na kraju radnog dana ne prelazi jedan što dokazuje da je za predstavljenu veličinu serije primenjena metoda adekvatna. Prosečna iskorišćenost mašina alatki je 50% i uslovljena je kako samim vremenima obrade, tako i učestalošću dolazaka delova na obradu i agentom za transport. Agent za transport ima veliki stepen iskorišćenosti i u proseku iznosi 90,8%. Za seriju od 200.000 delova broj proizvedenih delova se kreće u opsegu od 322 do 335 delova na dnevnom nivou što nije zadovoljavajuće za zadatu seriju. Broj delova na čekanju iznosi između 479 i 493 dela. Iskorišćenost agenta za transport iznosi u proseku 99%. Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da je za seriju od 200.000 delova potrebno razmotriti uvođenje još jednog sredstva za unutrašnji transport.

4. ZAKLJUČAK

Eksperimentalni rezultati pokazuju opravdanost primene multiagentnih sistema i teorije rojeva u procesima optimizacije fleksibilnih tehnoloških sistema. Teorijom roja generisan je tehnološki postupak koji je implementiran u simulirano tehnološko okruženje sistemom na bazi agenata. U radu je izvršena funkcionalna i fizička dekompozicija problema terminiranja i upravljanja proizvodnjom. Upotrebom multiagentne metodologije za generisani tehnološki postupak izvršena je analiza njegove primene pri različitim uslovima, kao što je veličina serije. Buduće istraživanje osloniće se na razvoj simuliranog okruženja za proizvodnju delova sa alternativnim tehnološkim postupcima i interakciju sa okruženjem.

5. LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Monostori, L., Váncza, J., Kumara, S. R.: *Agent-based systems for manufacturing*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 55(2), 697-720, 2006.
- [3] Leitão, P.: *Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(7), 979-991, 2009.
- [4] Kennedy, J., Eberhart, R.C.: *Particle swarm optimization*, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network, Perth, Australia, 1942-1948, 1995.
- [5] Kim, Y.K.: A set of data for the integration of process planning and job shop scheduling. <http://syslab.chonnam.ac.kr/links/data-pp&s.doc>, 2003.
- [6] Barbosa, J., Leitão, P.: *Simulation of multi-agent manufacturing systems using agent-based modelling platforms*, Industrial Informatics (INDIN), 9th IEEE International Conference, 477-482, IEEE, Caparica, Lisbon, july, 2011.
- [7] <http://www.anylogic.com/>, oktobar, 2014.

Petronijević, J., Petrović, M., Babić, B., Miljković, Z.

APPLICATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM FOR FLEXIBLE PROCESS PLANNING

Abstract: Agent based systems have been used for the development of social, biological, and technical systems. In the domain of technical systems, they are widely applied in optimization problems of modern manufacturing systems. This paper presents multi-agent methodology for optimal process planning. The proposed multi-agent architecture consists of four intelligent agents: job/part agent, machine agent, transport agent, and optimization agent. After generation of optimal process plans, agent based simulation was performed using AnyLogic software. Use of applied method has been justified by experimental results in simulated model of manufacturing environment.

Key words: multi-agent methodology, particle swarm optimization, optimization, AnyLogic



Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z.¹⁾

OPTIMIZACIJA FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PRIMENOM ALGORITMA BAZIRANOG NA INTELIGENCIJI ROJA I TEORIJI HAOSA²⁾

Rezime

U radu je prikazan pristup za optimizaciju fleksibilnih tehnoloških procesa obrade dela primenom algoritma baziranog na inteligenciji roja (PSO algoritam) i teoriji haosa. Pored metoda predstavljanja tehnoloških procesa pomoću AND/OR mreža, u radu je predložen matematički model za minimizaciju ukupnog proizvodnog vremena i minimizaciju ukupnih troškova, kao i princip kodiranja/dekodiranja parametara tehnoloških procesa u jedinke modifikovanog PSO algoritma. Takođe, u cilju prevazilaženja nedostataka vezanih za brzu konvergenciju u ranim fazama optimizacije, predložena je implementacija haotičnih mapa u modifikovani PSO algoritam. Predloženi pristup je eksperimentalno verifikovan na primeru dobijanja optimalnih tehnoloških procesa realnog dela.

Ključne reči: fleksibilni tehnološki procesi, inteligencija roja, teorija haosa, optimizacija

1. UVOD

Projektovanje tehnoloških procesa primenom računara (engl. CAPP – *Computer Aided Process Planning*) predstavlja jednu od najaktuelnijih oblasti istraživanja u okviru koncepta računarski integrisanih tehnoloških sistema (engl. CIM – *Computer Integrated Manufacturing*). Glavne aktivnosti pri projektovanju tehnoloških procesa podrazumevaju određivanje redosleda operacija obrade dela, izbor mašina alatki, alata, pomoćnih pribora, određivanje režima obrade, kao i izračunavanje vremena obrade i ukupnih troškova. S obzirom na alternativna rešenja za proizvodne resurse (mašine alatke, alati, pomoćni pribori) za svaku od operacija, kao i varijantnost tehnoloških operacija, projektovanje optimalnih tehnoloških procesa podrazumeva pronalaženje optimalnog redosleda tehnoloških operacija shodno alternativnim rešenjima i varijantnosti. Kako ovaj optimizacioni problem pripada klasi nedeterminističkih polinomnih problema tzv. *NP-hard* optimizacionih problema (engl. *non deterministic polynomial optimization problems*), to se vreme potrebno za njegovo rešavanje eksponencijalno povećava sa povećanjem broja operacija, broja alternativnih mašina alatki, alata i pomoćnih pribora. Konvencionalne neheurističke metode nisu u stanju da efikasno reše ovaj tip kombinatornog problema pa zato ovakvi problemi „traže“ inteligentne optimizacione algoritme, kao što su genetički algoritmi [1], genetičko programiranje [2], simulirano kaljenje [3], tabu pretrage [4], teorije rojeva (mravlje kolonije [5], roj čestica [6]) i drugi hibridni algoritmi, na primer [3]. Iako je algoritam optimizacije inteligencijom roja čestica (engl. PSO – *particle swarm optimization*) čest izbor u rešavanju optimizacionih problema, istraživanja u ovoj oblasti ukazuju da algoritam može konvergira u ranim fazama optimizacije kada su kompleksni optimizacioni problemi u pitanju. Iz tog razloga se u ovom radu razmatra primena teorije haosa (engl. *chaos theory*), konkretno haotičnih mapa (engl. *chaotic maps*) u cilju proširenja prostora mogućih rešenja i sprečavanja konvergencije algoritma u ranim fazama optimizacije.

¹⁾ Milica Petrović, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-264, e-mail: mmpetrovic@mas.bg.ac.rs,

dr Marko Mitić, istraživač saradnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-414, e-mail: mmitic@mas.bg.ac.rs,

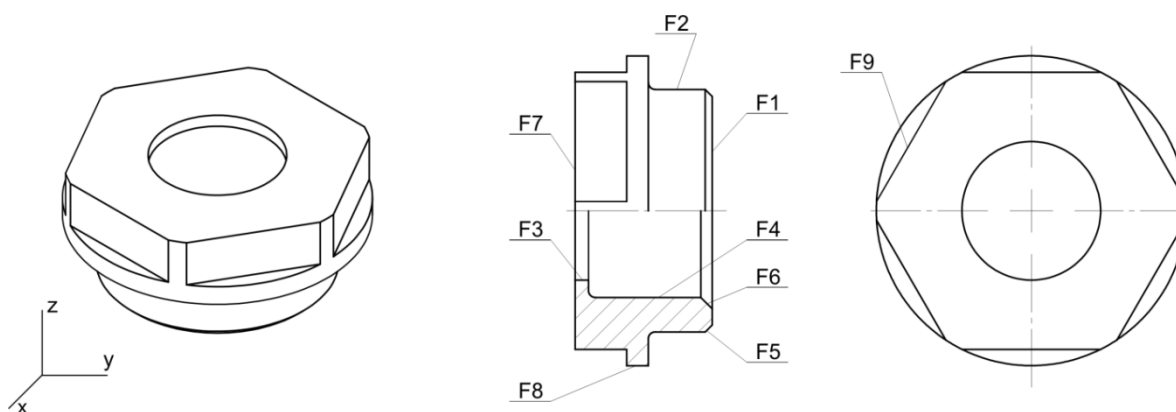
dr Najdan Vuković, naučni saradnik, Inovacioni centar, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 011/3302-414, e-mail: nvukovic@mas.bg.ac.rs,

dr Zoran Miljković, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35, 011/3302-468, e-mail: zmiljkovic@mas.bg.ac.rs.

²⁾ 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, 2011-2015.

2. FLEKSIBILNOST I REPREZENTACIJA TEHNOLOŠKIH PROCESA

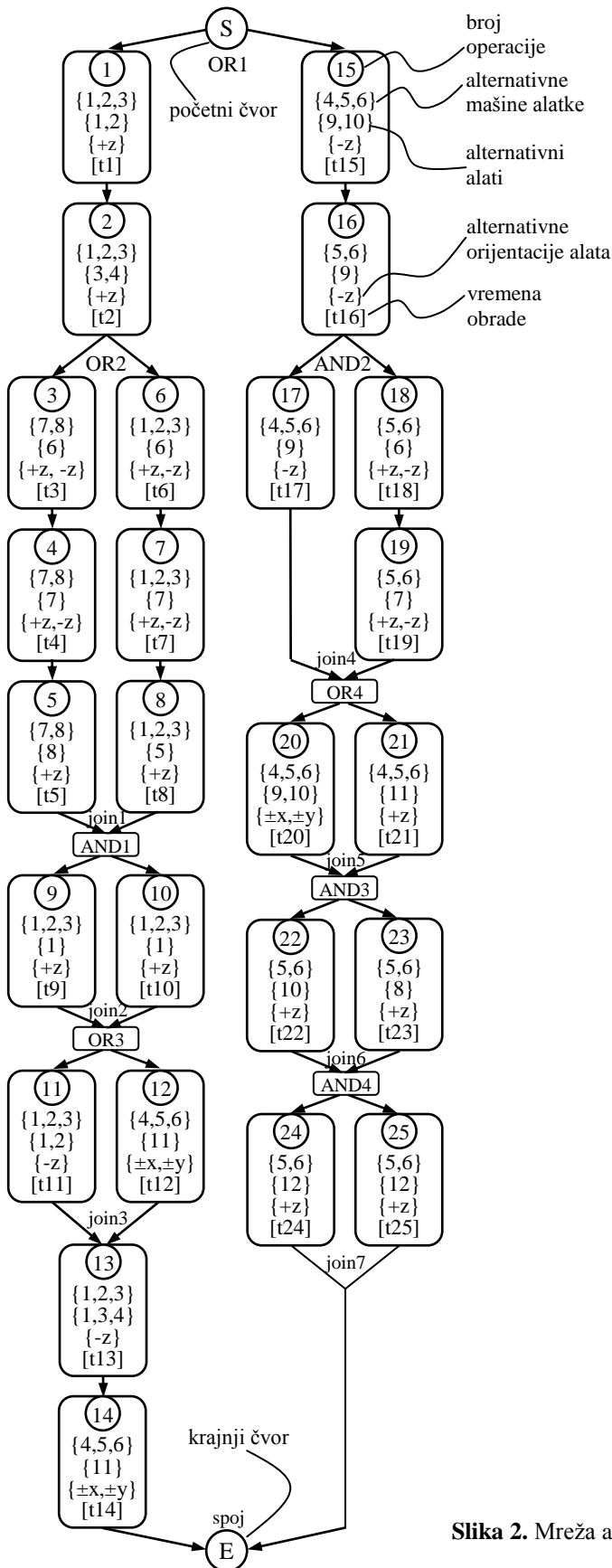
Uvođenje pojma fleksibilnosti u projektovanje tehnoloških procesa proizilazi iz potrebe da se odgovori zahtevima i prilagodi sve češćim promenama u tehnološkim okruženjima. U ovom radu je razmatrano sledećih pet tipova fleksibilnosti: (1) fleksibilnost redosleda operacija, (2) fleksibilnost procesa, (3) fleksibilnost mašina (4) fleksibilnost alata i (5) fleksibilnost orijentacije alata. Fleksibilnost redosleda operacija predstavlja mogućnost zamene redosleda operacija pri optimizaciji tehnoloških procesa. Fleksibilnost procesa se odnosi na mogućnost obrade istog dela na različite načine, koristeći alternativne tehnološke procese. Fleksibilnost mašina podrazumeva mogućnost izvođenja jedne operacije na više alternativnih mašina alatki, pri čemu su vreme trajanja operacije i troškovi za svaku od mašina različiti. Fleksibilnost alata i fleksibilnost orijentacije alata obezbeđuju mogućnost izvođenja iste operacije korišćenjem različitih alternativnih alata i orijentacija alata. U cilju dodatnog pojašnjenja pomenutih tipova fleksibilnosti, predložen je reprezentativan deo prikazan na slici 1, a alternativne operacije, mašine alatke, alati i orijentacije alata dati u tabeli 1.



Slika 1. Primer reprezentativnog dela sa 9 tehnoloških formi

Tabela 1. Tehnička specifikacija dela				
Tehnološka forma	Alternativne operacije	Alternativne mašine alatke	Alternativni alati	Alternativne orijentacije alata
F1	struganje (operacija 1) glodanje (operacija 20) glodanje (operacija 21)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T9, T10 T11	+z +x, -x +y, -y +z
F2	struganje (operacija 2) glodanje (operacija 22)	M1, M2, M3 M5, M6	T3, T4 T10	+z +z
F3	bušenje (operacija 3) proširivanje (operacija 4)	M7, M8 M7, M8	T6 T7	+z, -z +z, -z
F3	bušenje (operacija 6) proširivanje (operacija 7)	M1, M2, M3 M1, M2, M3	T6 T7	+z, -z +z, -z
F3	bušenje (operacija 18) proširivanje (operacija 19)	M5, M6 M5, M6	T6 T7	+z, -z +z, -z
F4	proširivanje (operacija 5) struganje (operacija 8) proširivanje (operacija 23)	M7, M8 M1, M2, M3 M5, M6	T8 T5 T8	+z +z +z
F5	struganje (operacija 9) glodanje (operacija 24)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z
F6	struganje (operacija 10) glodanje (operacija 25)	M1, M2, M3 M5, M6	T1 T12	+z +z
F7	struganje (operacija 11) glodanje (operacija 12) glodanje (operacija 15)	M1, M2, M3 M4, M5, M6 M4, M5, M6	T1, T2 T11 T9, T10	-z +x, -x +y, -y -z
F8	struganje (operacija 13) glodanje (operacija 16)	M1, M2, M3 M5, M6	T1, T3, T4 T9	-z -z
F9	glodanje (operacija 14) glodanje (operacija 17)	M4, M5, M6 M4, M5, M6	T11 T9	+x, -x +y, -y -z

Za potrebe reprezentacije tehnoloških procesa odabran je metod predstavljanja pomoću AND/OR mreža, slika 2, koji je detaljno razmatran u radovima [2,3]. Uzimajući u obzir karakteristike AND i OR konektora, jedan od mogućih alternativnih tehnoloških procesa obrade dela sa slike 1 tj. redoseda operacija je sledeći {15 16 19 18 21 23 22 24 25}.



t1 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t2 = [1.2, 1.0, 1.9, 1.5, 2.0, 1.6]
t3 = [5.5, 3.8]
t4 = [54.8, 38.1]
t5 = [34.3, 13.7]
t6 = [3.3, 4.8, 3.3]
t7 = [13.4, 26.6, 30.2]
t8 = [1.1, 1.5, 1.8]
t9 = [0.6, 0.7, 0.8]
t10 = [0.7, 0.8, 0.9]
t11 = [2.3, 3.3, 4.6, 6.5, 3.8, 5.5]
t12 = [5.7, 4.2, 2.8]
t13 = [0.5, 0.7, 0.4, 1.0, 1.4, 0.8, 0.8, 1.1, 0.7]
t14 = [10.8, 9.7, 7.4]
t15 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.8, 2.5]
t16 = [4.6, 7.2]
t17 = [4.3, 3.5, 6.8]
t18 = [3.3, 3.4]
t19 = [10.7, 24.1]
t20 = [2.7, 2.8, 2.9, 2.4, 2.9, 2.4]
t21 = [5.7, 4.2, 2.8]
t22 = [3.1, 3.2]
t23 = [30.2, 13.4]
t24 = [0.4, 0.5]
t25 = [0.5, 0.6]

Slika 2. Mreža alternativnih tehnoloških procesa sa vremenima obrade za svaku operaciju

3. MATEMATIČKI MODEL ZA OPTIMIZACIJU TEHNOLOŠKIH PROCESA

U ovom radu se razmatraju dva kriterijuma optimizacije tehnoloških procesa: minimizacija ukupnog proizvodnog vremena i minimizacija ukupnih troškova. Proizvodno vreme (PT) je jedan od najčešće korišćenih kriterijuma pri optimizaciji fleksibilnih tehnoloških procesa i predstavlja zbir vremena obrade, vremena transporta, i pomoćnih vremena neophodnih za izmenu alata i pomoćnih pribora (pogledati jednačine (1)-(6)).

- Glavno vreme obrade (TW) je predstavljeno jednačinom (1):

$$TW = \sum_{i=1}^n TWI(i, j, k) \quad (1)$$

gde je n ukupan broj operacija tehnološkog procesa, $TWI(i, j, k)$ vreme tajanja operacije i na alternativnoj mašini j korišćenjem alternativnog alata k .

- Vreme transporta (TT) predstavljeno je jednačinom (2):

$$TT = \sum_{i=1}^{n-1} TTI((i, j_1), (i+1, j_2)) \quad (2)$$

gde je $TTI(i, j_1), (i+1, j_2)$ vreme transporta između alternativnih mašina j_1 i j_2 .

- Vreme izmene alata (TCT) prikazano je jednačinom (3):

$$TCT = TCTI \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2(\Omega_1(M_i - M_{i+1}) - \Omega_1(T_i - T_{i+1})) \quad (3)$$

$$\Omega_1(X - Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } X \neq Y \\ 0 & \text{if } X = Y \end{cases}, \quad \Omega_2(X - Y) = \begin{cases} 0 & \text{if } X = Y = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

gde je T_i alat korišćen za operaciju i , a $TCTI_i$ vremenski indeks izmene alata.

- Vreme promene orijentacije alata (SCT) određuje se prema jednačini (5):

$$SCT = SCTI \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_2(\Omega_1(M_i - M_{i+1}) - \Omega_1(TAD_i - TAD_{i+1})) \quad (5)$$

gde je TAD_i orijentacija alata za operaciju i , a $SCTI_i$ vremenski indeks promene orijentacije alata.

Konačno, ukupno proizvodno vreme (PT) dobija se prema jednačini (6):

$$PT = TW + TT + TCT + SCT \quad (6)$$

Proizvodni troškovi su drugi kriterijum korišćen pri optimizaciji tehnoloških procesa i obuhvataju (i) troškove mašina, (ii) troškove alata, (iii) troškove promene mašine, (iv) troškove promene orijentacije alata, i (v) troškove izmene alata (pogledati jednačine (7)-(13)).

- Troškovi mašina (MC) se određuju prema jednačini (7):

$$MC = \sum_{i=1}^n MCI_i \quad (7)$$

gde je n ukupan broj operacija, a MCI_i indeks troškova mašine i .

- Troškovi alata (TC) se određuju prema jednačini (8):

$$TC = \sum_{i=1}^n TCI_i \quad (8)$$

gde je TCI_i indeks troškova alata i .

- Troškovi promene mašine (MCC) se određuju prema jednačini (9):

$$MCC = MCCI \times \sum_{i=1}^n \Omega(M_{i+1} - M_i) \quad (9)$$

gde je $MCCI$ indeks troškova promene mašine.

- Troškovi promene alata (TCC) se određuju prema jednačini (10):

Shodno prethodnom poglavlju, matrice dimenzije $3 \times n$ su predložene za određivanje brzine (jednačina (17)) i položaja jedinke (jednačina (18)) modifikovanog PSO algoritma.

$$V_{id}^{t+1} = [V_{id_m}^{t+1}; V_{id_t}^{t+1}; V_{id_tad}^{t+1}] \quad (17)$$

$$X_{id}^{t+1} = [X_{id_m}^{t+1}; X_{id_t}^{t+1}; X_{id_tad}^{t+1}] \quad (18)$$

Brzine $V_{id_m}^{t+1}$, $V_{id_t}^{t+1}$ i $V_{id_tad}^{t+1}$, kao i položaji $X_{id_m}^{t+1}$, $X_{id_t}^{t+1}$ i $X_{id_tad}^{t+1}$ jedinke i se definišu na sledeći način:

$$V_{id_m}^{t+1} = W \cdot V_{id_m}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id_m}^t - X_{id_m}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd_m}^t - X_{id_m}^t) \quad (19)$$

$$X_{id_m}^{t+1} = X_{id_m}^t + V_{id_m}^{t+1} \quad (20)$$

$$V_{id_t}^{t+1} = W \cdot V_{id_t}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id_t}^t - X_{id_t}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd_t}^t - X_{id_t}^t) \quad (21)$$

$$X_{id_t}^{t+1} = X_{id_t}^t + V_{id_t}^{t+1} \quad (22)$$

$$V_{id_tad}^{t+1} = W \cdot V_{id_tad}^t + C_1 \cdot rand() \cdot (P_{id_tad}^t - X_{id_tad}^t) + C_2 \cdot Rand() \cdot (P_{gd_tad}^t - X_{id_tad}^t) \quad (23)$$

$$X_{id_tad}^{t+1} = X_{id_tad}^t + V_{id_tad}^{t+1} \quad (24)$$

gde su $V_{id_m}^t$ i $V_{id_m}^{t+1}$ brzine za string mašina, $V_{id_t}^t$ i $V_{id_t}^{t+1}$ su brzine za string alata, a $V_{id_tad}^t$ i $V_{id_tad}^{t+1}$ su brzine za string orijentacije alata, u generacijama t i $t+1$; $X_{id_m}^t$ i $X_{id_m}^{t+1}$ predstavljaju položaje za string mašina, $X_{id_t}^t$ i $X_{id_t}^{t+1}$ predstavljaju položaje za string alata, $X_{id_tad}^t$ i $X_{id_tad}^{t+1}$ položaje za string orijentacija alata, u generacijama t i $t+1$; $P_{id_m}^t$ i $P_{gd_m}^t$ su lokalni i globalni najbolji položaj za string mašina, $P_{id_t}^t$ i $P_{gd_t}^t$ su lokalni i globalni najbolji položaj za string alata, a $P_{id_tad}^t$ i $P_{gd_tad}^t$ su lokalni i globalni najbolji položaj za string orijentacije alata, u generaciji t .

4.3 Modifikovani algoritam optimizacije rojem čestica baziran na teoriji haosa

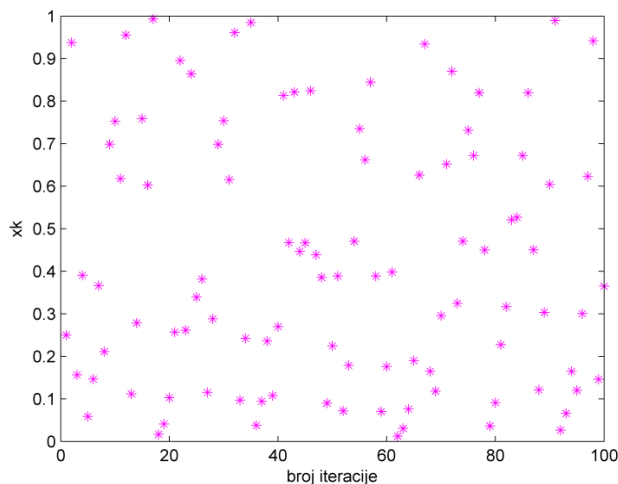
Istraživanje i razvoj u oblasti teorije rojeva ukazuju da, u odnosu na ostale metaheurističke algoritme, PSO algoritam poseduje mnoge prednosti, kao što su jednostavan matematički model, relativno jednostavna mogućnost implementacije, ne zahteva računanje prvog izvoda funkcije, ali i poteškoće u primeni na diskretne optimizacione probleme zbog kontinualne prirode samog algoritma i nedostatke vezane za konvergenciju u ranim fazama optimizacije ka lokalnom optimalnom rešenju. Iz tog razloga, optimizacija rojem čestica i teorija haosa su integrisani u cilju prevazilaženja nedostataka PSO algoritma vezanih za brzu konvergenciju algoritma. U tom smislu, „ugrađivanje“ haosa tj. haotičnih mapa u PSO algoritam u ovom radu se koristi za generisanje parametra inercije W , kao i slučajnih brojeva $rand()$ i $Rand()$ u jednačinama (19), (21) i (23) modifikovanog PSO algoritma. Na taj način, stohastičkim generisnjem alternativnih resursa se postiže dobijanje većeg prostora alternativnih rešenja u svakoj iteraciji i mogućnost izbegavanja „zarobljavanja“ algoritma u lokalnom optimumu.

U literaturi [7] su prikazani matematički modeli sledećih jednodimenzionih, neinvertibilnih haotičnih mapa: *Chebyshev*, *Circle*, *Gaus/mouse*, *Intermittency*, *Iterative*, *Logistic*, *Picewise*, *Sine*, *Singer*, *Sinusoidal* i *Tent* mapa.

Nakon serije preliminarnih eksperimenata, za genereisanje slučajnih brojeva je odabrana *Logistic* mapa, predstavljena jednačinom (25) i slikom 4:

$$x_{k+1} = ax_k(1-x_k), \quad a = 4 \quad (25)$$

gde je x_k k -ti haotični broj koji se koristi umesto W , $rand()$ i $Rand()$, a k broj iteracije.



Slika. 4 Primer *Logistic* haotične mapa za 100 iteracija

5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U cilju verifikacije predloženog algoritma, korišćen je deo sa slike 1, koji ima 9 tehnoloških formi i 25 operacija. Deo se obrađuje na 8 mašina alatki, pomoću 12 alternativnih alata. Vreme transporta dela između mašina alatki prikazano je u tabeli 2, a spisak mašina alatki i alata sa odgovarajućim troškovima dat je u tabeli 3. Prilikom izvođenja eksperimenta, smatra se da su sve mašine alatke i svi alati dostupni. Cilj pri optimizaciji fleksibilnih tehnoloških procesa je minimizacija ukupnog proizvodnog vremena (PT), jednačina (6), i ukupnih troškova (TC), jednačina (13). Parametri modifikovanog PSO algoritama su postavljeni na sledeći način: veličina populacije je 80, maksimalan broj generacija je 200, parametar inercije W se menja shodno usvojenoj *Logistic* mapi (jednačina (25)), 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. Uporedni eksperimentalni rezultati optimalnih tehnoloških procesa dobijenih primenom modifikovanog i haotičnog PSO algoritma dati su u tabelama 4 i 5 za kriterijum minimalnog proizvodnog vremena, i tabelama 6 i 7 za kriterijum minimalnih troškova.

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

Mašine			Alati		
Br.	Tip	MCI	Br.	Tip	TCI
M1	CNC strug	30	T1	stugarski nož 1	10
M2	Univerzalni strug	10	T2	stugarski nož 2	10
M3	Produkcioni strug	30	T3	stugarski nož 3	10
M4	Univerzalna glodalica	40	T4	stugarski nož 4	10
M5	CNC troosna vertikalna glodalica	100	T5	stugarski nož 5	15
M6	CNC troosna vertikalna glodalica	60	T6	burgija	5
M7	Bušilica	10	T7	proširivač 1	15
M8	Koordinatna bušilica	15	T8	proširivač 2	20
Troškovi i vremenski indeksi MCCI = 160; SCI = 100; TCCI = 20; TCTI = 60; SCTI = 50;			T9	glodalo 1	30
			T10	glodalo 2	12
			T11	glodalo 3	30
			T12	glodalo 4	15

operacija	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
mašina	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
alat	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
orijentacija alata	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z
$TW=64.4; TT=0; TCT=300; SCT=100; TP=464.4;$										
Broj promena mašina: 0			Broj promena alata: 5				Broj promena orijentacija alata: 2			

operacija	15	16	17	18	19	20	22	23	25	24
mašina	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
alat	9	9	9	6	7	10	10	8	12	12
orijentacija alata	-z	-z	-z	-z	-z	+x	+z	+z	+z	+z
$TW=61.6; TT=0; TCT=300; SCT=100; TP=461.6;$										
Broj promena mašina: 0			Broj promena alata: 5				Broj promena orijentacija alata: 2			

Tabela 6. Optimalan tehnološki proces za reprezentativni deo dobijen primenom modifikovanog PSO algoritma i kriterijuma minimalnih troškova										
operacija	1	2	6	7	8	9	10	11	13	14
mašina	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
alat	2	3	6	7	5	1	1	1	1	11
orijentacija alata	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	+x
$MC=310; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TC=915;$										
Broj promena mašina: 1			Broj promena alata: 6				Broj promena orijentacija alata: 2			

Tabela 7. Optimalan tehnološki proces za reprezentativni deo dobijen primenom haotičnog PSO algoritma i kriterijuma je minimalnih troškova										
operacija	1	2	6	7	8	10	9	11	13	14
mašina	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6
alat	1	4	6	7	5	1	1	1	1	11
orijentacija alata	+z	+z	+z	+z	+z	+z	+z	-z	-z	-y
$MC=150; TC=125; MCC=160; TCC=120; SCC=200; TC=755;$										
Broj promena mašina: 1			Broj promena alata: 6				Broj promena orijentacija alata: 2			

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan pristup u optimizaciji fleksibilnih tehnoloških procesa primenom algoritma baziranog na inteligenciji roja (PSO) i teoriji haosa. Za odabrani reprezentativni deo, prikazan je metod predstavljanja tehnoloških procesa pomoću AND/OR mreža, predstavljen je matematički model za minimizaciju ukupnog proizvodnog vremena i minimizaciju ukupnih troškova i dat princip kodiranja i dekodiranja jedinki modifikovanog PSO algoritma. U cilju prevazilaženja nedostataka vezanih za konvergenciju u ranim fazama optimizacije, haotične mape su implementirane u jednačine PSO algoritma. Eksperimentalni rezultati, dobijeni premenom modifikovanog i haotičnog PSO algoritma, pokazuju da se optimalni tehnološki procesi sa manjim proizvodnim vremenom i manjim troškovima dobijaju primenom haotičnog PSO algoritma.

7. LITERATURA

- [1] Reddy, S.V.B., Shunmugam, M.S., Narendran, T.T.: *Operation sequencing in CAPP using genetic algorithms*, International Journal of Production Research, 37(5), 1063-1074, 1999.
- [2] Li, X.Y., Shao, X.Y., Gao, L.: *Optimization of flexible process planning by genetic programming*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38(1-2), 143-153, 2008.
- [3] Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B.: *Optimization of Operation Sequencing in CAPP Using Hybrid Genetic Algorithm and Simulated Annealing Approach*, Proceedings of the 11th International Scientific Conference MMA 2012-Advanced Production Technologies, Novi Sad, Serbia, 285-288, 2012.
- [4] Li, W.D., Ong, S.K., Nee, A.Y.C.: *Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach*, International Journal of Production Research, 42(10), 1955-1985, 2004.
- [5] Krishna, A.G., Rao, K.M.: *Optimisation of operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29(1-2), 159-164, 2006.
- [6] Kennedy, J., Eberhart, R.C.: *Particle swarm optimization*, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network, Perth, Australia, 1942-1948, 1995.
- [7] Gandomi, A. H., Yun, G. J., Yang, X. S., Talatahari, S.: *Chaos-enhanced accelerated particle swarm optimization*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 18(2), 327-340, 2013.

Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z.

OPTIMIZATION OF FLEXIBLE PROCESS PLANNING BASED ON PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM AND CHAOS THEORY

Abstract: This paper presents an approach for optimizing flexible process plans based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm and chaos theory. Besides representing process plans in the form of AND/OR network, mathematical model for the minimization of the total production time and cost was presented, as well as particle encoding/decoding scheme for flexible process planning. Also, we proposed implementation of chaotic maps in modified PSO algorithm in order to prevent algorithm from converging prematurely. Experimental verification of the proposed algorithm was done through the optimal process planning for real part.

Key words: flexible process planning, particle swarm intelligence, chaos theory, optimization

Sredanović, B.¹⁾, Globočki-Lakić, G.²⁾, Kramar, D.³⁾, Kopač, J.⁴⁾

MODELIRANJE OTPORA REZANJA PRI STRUGANJU ČELIKA C45E PRIMJENOM HPJAM TEHNIKE HLAĐENJA I PODMAZIVANJA⁵⁾

Rezime

Rezime. Znanje o otporima rezanja ima važnu ulogu u upravljanju procesom obrade jer su direktno povezani sa procesom habanja alata, pojavom vibracija, tačnošću dimenzija, itd. Obrada struganjem sa upotrebom HPJAM-a (High Pressure Jet Assisted Machining) je hibridni metod obrade, pri kojoj se mlaz sredstva za hlađenje i pomazivanje pod veoma visokim pritiskom usmjerava u zonu kontakta između strugotine i alata. Pored niza prednosti, HPJAM rezultuje i smanjenjem otpora rezanja zbog efikasnog podmazivanja i efekta lomljenja strugotine. U radu je prikazano modeliranje otpora rezanja pri struganju poboljšanog čelika C45E pri upotrebi HPJAM-a, pri većim brzinama rezanja i koracima u cilju postizanja visoke produktivnosti.

Ključne reči: modeliranje, otpori rezanja, struganje, HPJAM

1. UVOD

Otpori rezanja su bitni izlazni parametri procesa obrade rezanjem [1]. Predviđanje vrijednosti otpora rezanja ima primjenu u projektovanju mašina alatki i upravljanju procesom obrade, jer su direktno povezani sa pojavom vibracija, tačnošću obrade, habanjem alata, itd. Funkcije za predikciju vrednosti otpora rezanja su nezaobilazne funkcije u tehno-ekonomskoj optimizaciji [2].



Slika 1. Sistem Coroturn HP švedskog proizvođača alata SANDVIK

Na vrijednosti otpora rezanja utiču karakteristike materijala obratka, vrijednost parametara obrade, materijal i geometrija alata, te način dovođenja i vrsta sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHP). Uticaj SHP-a na proces obrade struganjem se manifestuje kroz smanjenje trenja, otpora rezanja, smanjenje temperature rezanja i habanja alata [3]. Ovi efekti omogućavaju proširenje okvira tehnoloških parametara a time i produktivnosti obrade. Korišćenje mlaza SHP-a visokog pritiska pri obradi struganjem (HPJAM), pri pritiscima većim od 50 MPa, pored efekta pomazivanja i hlađenja, rezultuje i efektom lomljenja i odvođenja strugotine [4, 5]. Zbog pomenutog efekta povećava se efikasnost obrade, a HPJAM se sa pravom ubraja u hibridne postupke obrade. Proizvođači alata razvijaju HPJAM sisteme koji koriste pritiske do 20 MPa s

¹⁾ mr Branislav Sredanović, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, (sredanovic@gmail.com)

²⁾ prof. dr Gordana Globočki Lakić, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, (gordana.globocki@gmail.com)

³⁾ doc. dr Davorin Kramar, Univerzitet u Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, (davorin.kramar@fs.uni-lj.si)

⁴⁾ prof. dr Janez Kopač, Univerzitet u Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, (janez.kopac@fs.uni-lj.si)

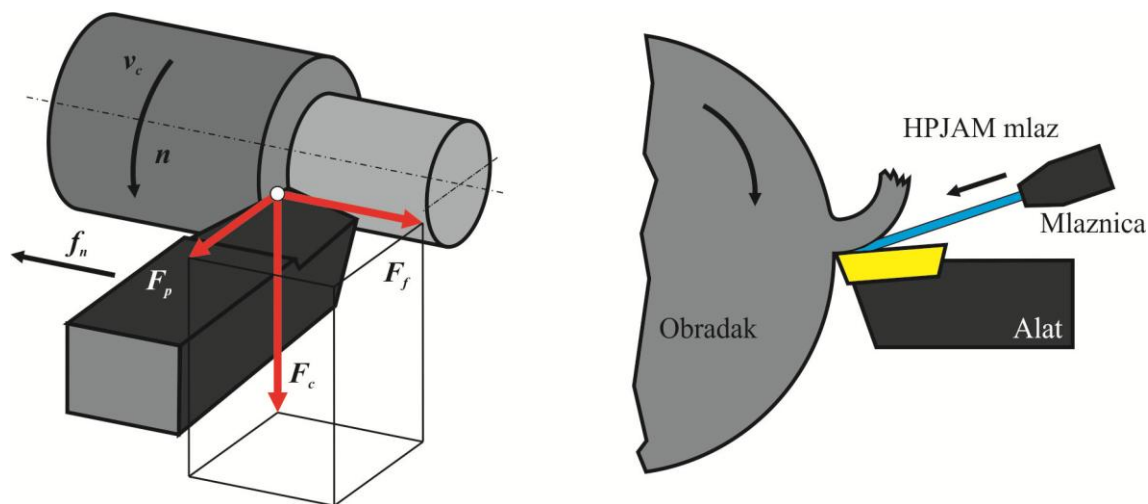
⁵⁾ U okviru rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovedu na bilateralnom projektu BiH-SLO, broj: [19/6-020/961-25/11](#)

ciljem povećanja postojanosti alata i produktivnosti (Slika 1), a u zadnje vrijeme u ponudi se pojavljuju i alati koji omogućavaju korišćenje pritisaka i do 35 MPa.

U ovom radu prezentovano je eksperimentalno mjerenje i modeliranje otpora rezanja pri struganju poboljšanog čelika C45E uz korišćenje HPJAM tehnike doziranja sredstva za hlađenja i pomazivanja. U odnosu na dosadašnja dostupna istraživanja, ovo istraživanje je provedeno pri korišćenju većih vrijednosti brzine rezanja i posmaka radi analize produktivnosti i efikasnosti obrade.

2. MODELIRANJE OTPORA REZANJA

Kao osnova za modeliranje otpora rezanja pri spoljašnjem uzdužnom struganju, koristi se model kod kojeg se rezultanta otpora rezanja razlaže na tri međusobno upravne komponente, i to na: glavni otpor rezanja (F_c), otpor pomoćnom kretanju (F_f) i otpor prodiranju (F_p). Za sve tri komponente moguće je razviti funkcije kojima se opisuje njihovo ponašanje u zavisnosti od najuticajnih parametara. Najveći uticaj na otpore rezanja imaju tehnološki parametri obrade: dubina rezanja (a_p), korak (f_n) i brzina rezanja (v_c), te način doziranja sredstva za hlađenje i podmazivanje.



Slika 2. Obrada struganjem sa korišćenjem HPJAM tehnike

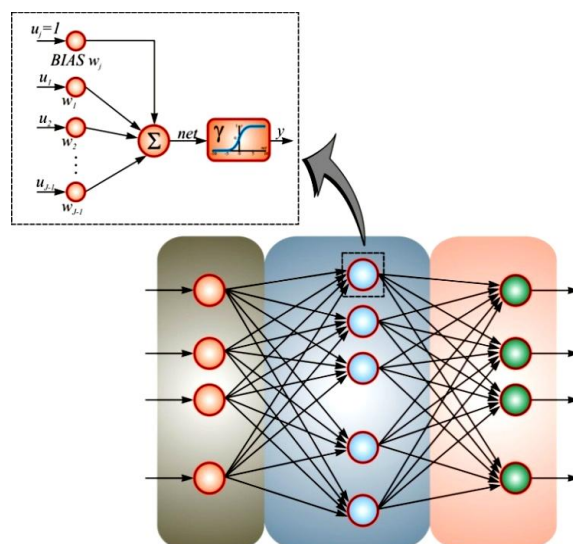
U tehnici se koristi nekoliko pristupa modeliranju otpora rezanja koji su bazirani na analitičkim, empirijskim i numeričkim metodama. Kao modeli za predviđanje vrijednosti otpora rezanja na osnovu eksperimentalnih merenja, izdvaja se regresiona analiza, modeli bazirani na veštačkim neuronskim mrežama, modeli bazirani na adaptivnim neuro-fazi sistemima za zaključivanje, itd. U ovom radu su korišćene i poredene dve tehnike modeliranja: modeliranje na bazi regresione analize i modeliranje korišćenjem veštačkih neuronskih mreža [6, 7].

Regresiona analiza se zasniva na provođenju višefaktorskog eksperimenta, pri čemu se kombinuju različite vrijednosti ulaznih parametara, koje se mijenjaju na više nivoa. U slučaju modeliranja otpora rezanja bazirano na naprijed pomenutim najuticajnim parametrima, kao polazni korak dobija se regresiona funkcija zavisnosti otpora rezanja od tehnoloških parametara i uslova obrade, u sljedećem obliku:

$$F_i = C_i \cdot a_p^{x_i} \cdot f_n^{y_i} \cdot v_c^{z_i} \cdot k_i \quad (1)$$

gdje su: F_i - i -ta komponenta rezultujućeg otpora rezanja; C_i - konstanta i -te komponente otpora rezanja; x_i , y_i i z_i - eksponenti uticaja tehnoloških parametara na vrednost i -te komponente otpora rezanja; k_i - koeficijent uticaja načina hlađenja i pomazivanja na i -tu komponentu.

Vještačke neuronske mreže (VNM) su nastale kao rezultat sinteze nekoliko veoma različitih pravaca istraživanja: obrade signala, neurobiologije i fizike, te stoga predstavljaju tipičan primjer interdisciplinarnosti oblasti. S jedne strane, to je pokušaj da se razumije rad ljudskog mozga, a sa druge da se to stečeno znanje primjeni u obradi složenih informacija. U opštem slučaju, neuronska mreža ima tri osnovne komponente: neurone, topologiju mreže i algoritam učenja (Slika 3), čijim se podešavanjem dobija konačni model. Za potrebe modeliranja pomoću vještačkih neuronskih mreža iskorišćen je modul *Neural Toolbox* u softverskom paketu *MATLAB*.



Slika 3. Opšta struktura vještačke neuronske mreže [6]

3. POSTAVKA I REALIZACIJA EKSPERIMENTA

Mjerenje komponenata otpora rezanja je izvršeno pomoću mjernog lanca “KISTLER”, koji omogućava mjerenje sila u tri različita pravca. Za grafički prikaz i obradu izmjerenih signala na računaru korišćen je programski paket *LabVIEW*, u kojem je razvijen poseban programski okvir.

Materijal korišćen za eksperimentalna mjerenja je ugljenični čelik za poboljšanje C45E (Č.1531, AISI 1045, EN 1.1191), čelik koji se koristi za izradu alata i odgovornih dijelova na mašinama i uređajima. Zatezna čvrstoća odabranog čelika je $\sigma = 820 \text{ N/mm}^2$, dok je tvrdoća 45 HRc. Kao pripremak za eksperiment korišćena je hladno valjana šipka prečnika 120 mm i dužine 300 mm.



Slika 4. Postavka eksperimenta: mlaznica i inicijalni mlaz (lijevo), mašina (sredina) i mjerni lanac (desno)

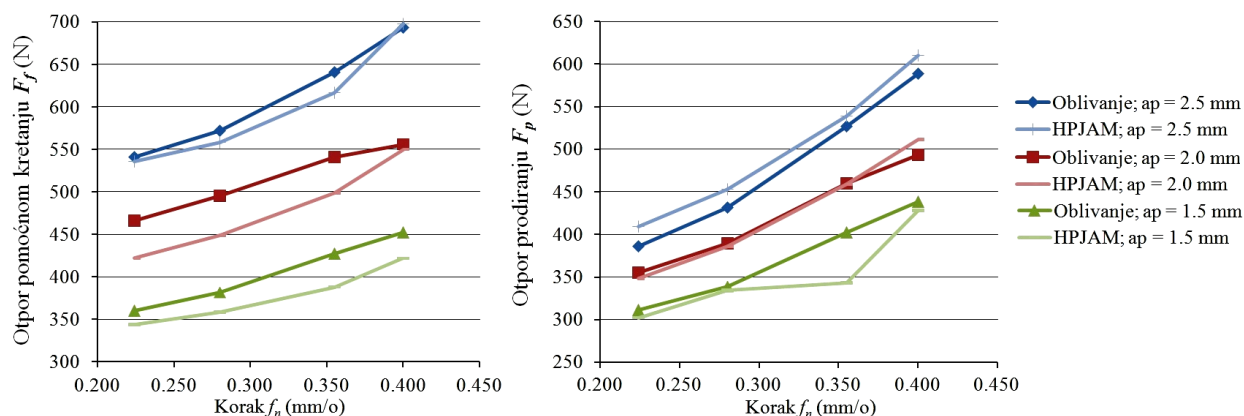
Korišćena je karbidna pločica kvadratnog oblika SNMG 1204 08 NMX - Sumitomo AC 900G, pričvršćena na nosač PSDN N 2525 M12. Ovim izborom se težilo izboru alata sa nižom cijenom koštanja. Pločica ne posjeduje geometriju za lomljenje strugotine, radi obezbjeđenja laminarnog mlaza pri HPJAM. Grudni ugao alata je bio 10° , ledni ugao je iznosio 0° , radijus vrha alata 0.8 mm, a napadni ugao 45° .

Eksperimenti su izvedeni na univerzalnom strugu VDF BOEHRINGER, opremljen pumpom visokog pritiska (Slika 4). Kao tehnike hlađenja i pomazivanja korišćene su: standardna (oblivanje odozgo) i HPJAM tehnika. Tehnološki parametri su varirani na tri nivoa, i to: dubina obrade a_p (mm): 1.5, 2.0, 2.5; korak f_n (mm/o): 0.224, 0.28, 0.355, 0.400; te brzina obrade v_c (m/min): 210, 310, 400.

Korišćen je pritisak mlaza od 50 MPa što predstavlja prag ka nekonvencionalnim pritiscima u HPJAM-u. Protok SHP-a je bio 2.0 l/min, što je standardni protok pri konvencionalnom postupku hlađenja i podmazivanja oblivanjem. Safirna mlaznica za HPJAM je bila postavljena na rastojanju od 30 mm u odnosu na rezu ivicu alata. Mlaz visokog pritiska je usmjeren pod uglom od 90° u odnosu na rezu ivicu alata, i pod uglom 30° u odnosu na grudnu površinu alata. Korišćen je prečnik mlaznice od 0.4 mm.

4. REZULTATI I ANALIZA

Na slici 5. je prikazana zavisnost otpora pomoćnom kretanju i otpora prodiranju u zavisnosti od promjene koraka, dubine rezanja i tehnike podmazivanja. Na osnovu analize izmjerenih otpora rezanja zaključeno je se, pri korišćenju HPJAM-a, značajno smanjuje vrijednost otpora prodiranja i otpora pomoćnom kretanju. Na osnovu teorijskih postavki, navedeno smanjenje obično upućuje na manji intezitet habanja alata.

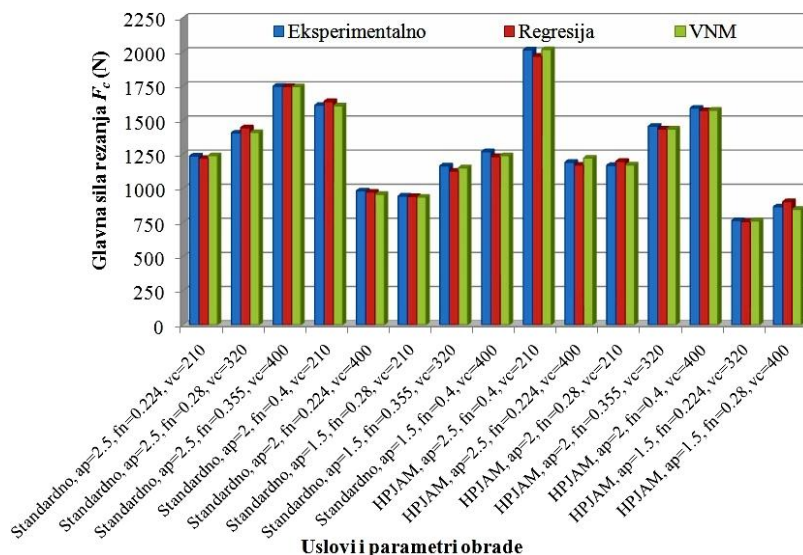


Slika 5. Zavisnost otpora pomoćnom kretanju i otpora prodiranja od promjene koraka ($v_c = 400$ m/min)

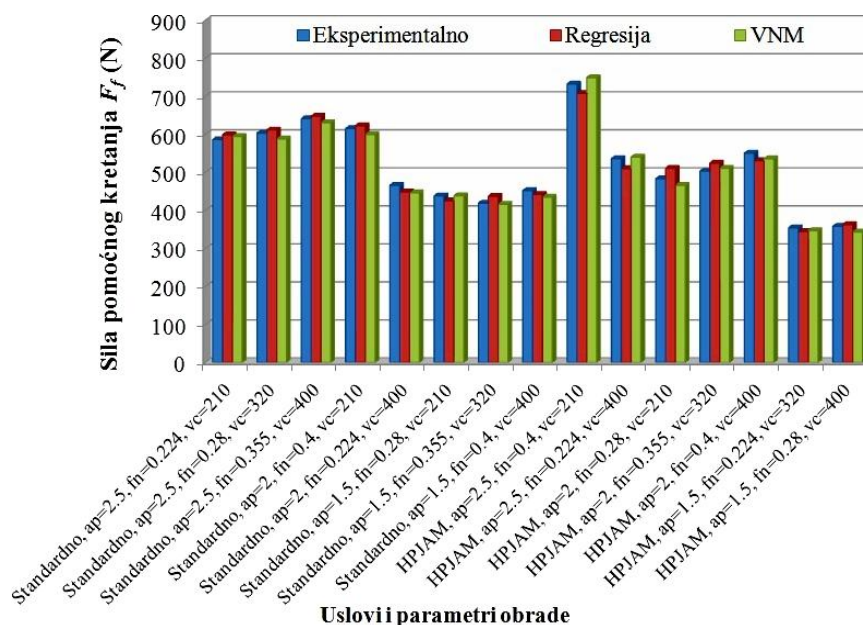
Korišćenjem regresione analize izvršeno je modeliranje ponašanja otpora rezanja. Razvijene regresione funkcije su date u Tabeli 1, u kojoj su dati uticaji tehnike hlađenja i podmazivanja preko koeficijenta k_i . Razvijeni regresioni modeli imaju grešku manju od 3%, što upućuje na visoku tačnost modela.

Regresiona funkcija	Koeficijent korelacije	Srednja relativna greška	Koeficijent uticaja podmazivanja k_i	
			Oblivanje	HPJAM
$F_c = 2307 \cdot a_p^{0.883} \cdot f_n^{0.839} \cdot v_c^{-0.036} \cdot k_1$	0.99	1.78 %	1	0.98
$F_f = 1015 \cdot a_p^{0.837} \cdot f_n^{0.367} \cdot v_c^{-0.140} \cdot k_2$	0.93	2.67 %	1	0.89
$F_p = 792 \cdot a_p^{0.577} \cdot f_n^{0.626} \cdot v_c^{-0.048} \cdot k_3$	0.93	2.74 %	1	0.93

Uporedni prikaz eksperimentalnih i izlaznih vrijednosti iz modela dobijenih na korišćenjem regresije odnosno vještačkih neuronskih mreža, prikazani su na slici 6, 7 i 8. Na osnovu datih grafikona, može se zaključiti da se vrijednosti izlaza iz modela u velikoj mjeri podudaraju sa eksperimentalnim vrijednostima.

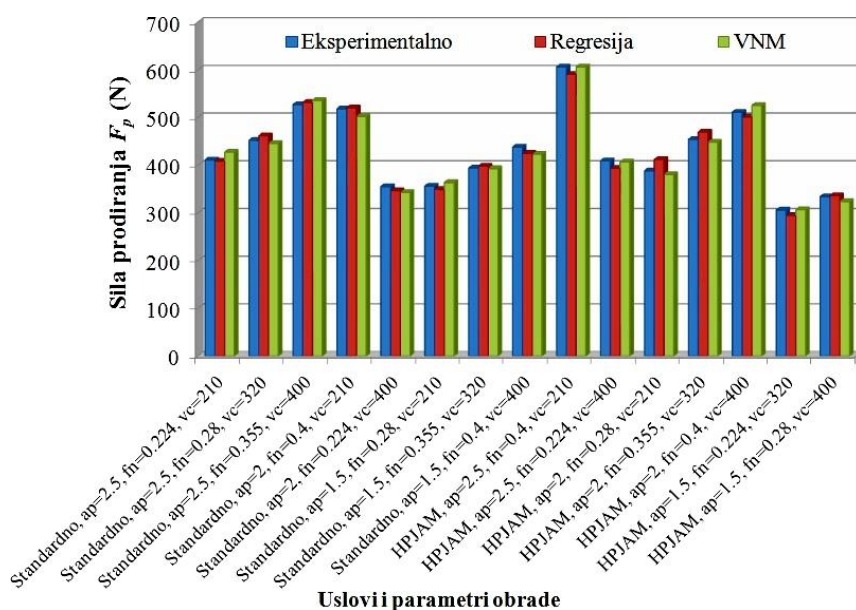


Slika 6. Poređenje izlaznih vrijednosti modela i eksperimentalnih vrijednosti glavnog otpora rezanja



Slika 7. Poređenje izlaznih vrijednosti modela i eksperimentalnih vrijednosti otpora pomoćnom kretanju

Modeliranje neuronskim mreža provedeno je korišćenjem dvoslojnih neuronskih mreža. Za aktivacionu funkciju u skrivenom sloju odabrana je bipolarna sigmoidalna, a u izlaznom sloju linearna aktivaciona funkcija. Maksimalni broj koraka učenja iznosi 500. Korišten je *Levenberg-Marquardt*ov algoritam, pri čemu je početna vrijednost Marquardtovog parametra $\mu_M = 0.001$, dok je faktor njegovog smanjenja 0.1, a faktor povećanja 10. Učenje neuronske mreže se zaustavlja ako vrijednost Marquardtovog parametra naraste iznad granične vrijednosti postavljene na 1010. Granični nivo tačnosti učenja postavljen je pomoću normalizovanog korijena srednje kvadratne greške $NRMSE = 0.05$. Kao najpovoljnija kombinacija, koja daje najmanje vrijednosti za normalizovani korijen srednjeg kvadratnog odstupanja i relativnu grešku, te najveću vrijednost koeficijenta korelacije, odabrana je struktura sa šest neurona u skrivenom sloju.



Slika 8. Poređenje izlaznih vrijednosti modela i eksperimentalnih vrijednosti otpora prodiranju

Analizom rezultata može se doći do zaključka da se sa korišćenjem HPJAM tehnike pri struganju može ostvariti određen procenat uštede (oko 10%) sa obzirom na energetske bilans obrade, što navedenoj tehnici daje prednost pri upotrebi u visokoproduktivnim procesima. Srednje relativne greške za komponente otpora rezanja F_c , F_f i F_p , kod modela baziranog na VNM iznose 1.01%, 2.24% i 1.71% respektivno, dok kod modela zasnovanog na regresionoj analizi iznose 1.78%, 2.67% i 2.74% respektivno.

5. ZAKLJUČAK

Modeliranje procesa obrade rezanjem ima važnu ulogu u procesu praćenja, predikcije i optimalnog upravljanja procesom obrade rezanjem. Modeliranje i simulacija omogućavaju predviđanje uticaja različitih parametara i uslova obrade na proces obrade rezanjem.

U ovom radu je, na osnovu eksperimentalnih mjerenja, utvrđena korelativna zavisnost otpora rezanja od parametara i uslova obrade. Korišćenjem dobijenih podataka, izvršeno je modeliranje primjenom regresione analize i vještačkih neuronskih mreža. Pokazano je da modeli zasnovani na VNM daju tačnije rezultate u odnosu na modele zasnovane na regresionoj analizi. Rezultati testiranja modela na bazi vještačkih neuronskih mreža pokazuju da se razvijeni modeli mogu koristiti u cilju modeliranja sila rezanja, iako skupovi za učenje, validaciju i testiranje sadrže relativno mali broj kombinacija ulaznih i izlaznih vrijednosti. Treba napomenuti da je implementacija modela zasnovanih na VNM u softverima za razvoj i programiranje aplikacija dosta složenija od implementacije modela zasnovanih na regresionoj analizi, a često zahtijeva i realizaciju velikog broja eksperimentalnih mjerenja.

Proučavanje otpora rezanja, predstavljeno u ovom radu, je dio sveobuhvatnog istraživanja obradivosti teškoobradivih materijala radi uspostavljanja šire i univerzalnije definicije obradivosti [8]. U okviru istraživanja posebna pažnja je posvećena proučavanju hibridnih postupaka obrade rezanjem, kao što je HPJAM. Cilj daljeg istraživanja je razvoj specijalnih baza podataka i baza znanja zasnovanih na modelima vještačkih neuronskih mreža, koje će omogućiti praćenje procesa obrade kroz monitoring otpora rezanja.

6. LITERATURA

- [1] Grzesik, W.: *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*, Elsevier B.V., Oxford, 2008.
- [2] Kopač, J.: *Cutting forces and their influence on the economics of machining*, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48(3), pages 121-132, 2002.
- [3] Sredanovic, B., Globocki, L. G, Cica, Dj., Kramar, D.: *Influence of Different Cooling and Lubrication Techniques on Material Machinability in Machining*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol. 59(12), pages 748-754, 2013.
- [4] Kramar, D., Krajnik, P., Kopac J.: *Capability of high pressure cooling in the turning of surface hardened piston rods*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pages 212 - 218, 2010.
- [5] Sharma, V. S., Dhiman, S., Sehgal, R. and Sharma, S. K.: *Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 19(4), pages 473-483, 2008.
- [6] Čiča, Đ., Sredanović, B., Globočki-Lakić, G., Kramar, D.: *Modeling of the cutting forces in turning process using various methods of cooling and lubricating: an artificial intelligence approach*, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2013, pages 1-18, 2013.
- [7] Sredanovic, B., Globocki, L. G, Cica, Dj., Borojevic, S. and Golubovic, B. V.: *Modeling of cutting forces with artificial neural networks*, Proceedings of 4th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN 2011, pages 123-132, Thessaloniki, Oktober 2011.
- [8] Globocki, L. G., Sredanovic, B., Nedic, B., Cica, Dj. and Catic, D.: *Development of mathematical model of universal material machinability*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 17(4), pages 501-511, 2011.

Sredanović, B., Globočki-Lakić, G., Kramar, D., Kopač, J.

CUTTING FORCE MODELLING IN TURNING OF STEEL C45E USING HPJAM

Abstract: Knowledge about cutting forces plays an important role in the cutting process managing, because they are directly connected with the tool wear, the appearance of vibrations, dimensions accuracy, etc. High pressure Jet Assisted Machining (HPJAM) in turning is a hybrid machining method in which a high pressure jet of cooling and lubrication fluid is directed to the contact zone between chip and cutting tool. Besides a number of advantages, HPJAM provides a reduction of cutting forces due to efficient lubrication and chip forming. This paper presents the analysis and modeling of cutting forces during turning of C45E steel with using of HPJAM, at higher cutting speeds and higher feed rates in order to achieve high productivity.

Key words: cutting forces, turning, HPJAM, modeling

Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B.¹⁾VERIFIKACIJA POSTPROCESORSKOG RAČUNA JEDNE KONCEPCIJE STONE
REKONFIGURABILNE PETOOSNE MAŠINE ALATKE²⁾*Rezime*

U radu su pokazane koncepcije stone rekonfigurabilne petoosne mašine alatke, strukture WCBVXYZT. Predstavljen je formalizam postprocesorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT. Verifikacija virtuelnog prototipa jedne koncepcije stone petoosne mašine je izvršena simulacijom obrade na virtuelnoj mašini u CAD/CAM okruženju. Sam formalizam postprocesorskog računa je verifikovan poređenjem dobijenih rezultata u Matlabu sa rezultatima konfigurisanog postprocesora u CAM okruženju i eksperimentom obrade na raspoloživoj mašini.

Ključne reči: CAD/CAM, petoosna mašina alatka, postprocesor

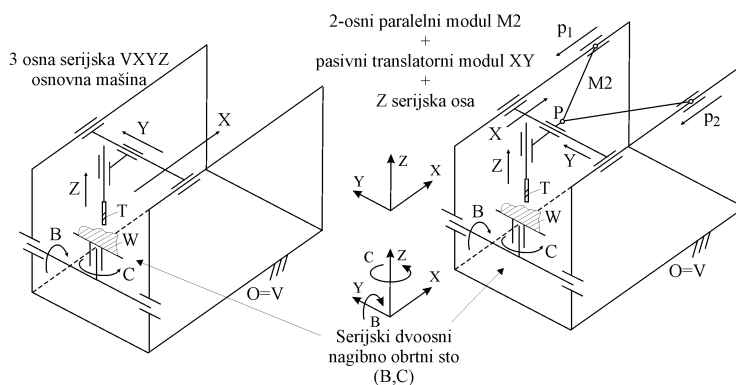
1. UVOD

Istraživanja rekonfigurabilnih i petoosnih mašina alatki su intenzivna i imaju dosta kompletiranih rezultata [1-5]. Predmet ovog rada je razvoj jedne rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke sa serijskom i sa hibridnom kinematikom. Pod koncepcijom rekonfigurabilne mašine alatke ovde se podrazumeva sistem sastavnih elemenata pomoću kojeg se može konfigurisati više mašina. Svaka od tih mašina je sa novom kinematičkom strukturom. U prethodnim radovima [6-8] detaljno je razmatran sistem sastavnih elemenata pomoću kojeg se može konfigurisati više različitih mašina, od kojih neke troosne i/ili četvorosone. U ovom radu se razmatraju samo petoosne konfiguracije i to sa serijskom i hibridnom kinematikom [7,8]. Programiranje petoosnih mašina alatki i dobijanje korektnog postprocesora je osnovni predmet analize. Pripremljen je adekvatan model mašine radi opisa formalizma postprocesorskog računa [5], kao i priprema postprocesora pomoću konfiguratora postprocesora u CAD/CAM Creo okruženju. Verifikacija postprocesora je ostvarena na virtuelnom prototipu u CAD/CAM okruženju i eksperimentalno na jednoj raspoloživoj troosnoj mašini, sa dodatim dvoosnim priborom [8].

Za stonu rekonfigurabilnu petoosnu mašinu, čija je osnovna koncepcija opisana u poglavlju 2, u poglavlju 3 je pokazan postprocesorski račun za kompletnu petoosnu mašinu. Prikazana je i provera postprocesorskog računa u Matlab okruženju. Verifikacija postprocesorskog računa i konfigurisanog postprocesora za mašinu urađeni su na primeru obrade nepravilne trostrane piramide na raspoloživoj mašini, što je pokazano u poglavlju 4.

**2. KONCEPCIJE STONE PETOOSNE
MAŠINE ALATKE**

Za ovaj rad je izabrana koncepcija mašine pokazane na Sl.1. Osnovna mašina je

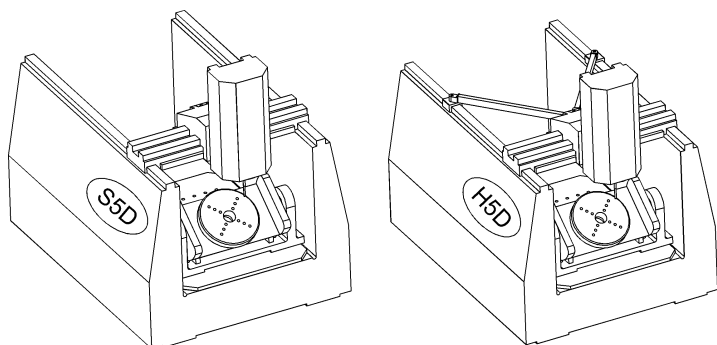


Slika 1. Koncepcijski model mašine

¹⁾ doc dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Miloš Glavonjić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mglavonjic@mas.bg.ac.rs), doc dr Branko Kokotović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu TR035022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

troosna stona portalna glodalica strukture VXYZ. Dodavanjem dvoosnog nagibno obrtnog stola (B,C) ispred osnovne mašine, ova mašina postaje petoosna (S5D), strukture WCBVXYZT. Fiksiranjem ose $B=0^\circ$ ili $B=90^\circ$, uz zadržavanje ose C, mašina postaje četveroosna na kojoj je moguća i obrada struganjem. Četvrta moguća koncepcija podrazumeva osnovnu mašinu sa hibridnom kinematikom i to: dvoosni paralelni modul M2, koji ostvaruje pomernje tačke P u ravni (X,Y) preko pasivnog translatorskog modula (X,Y), 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). Predmet ovog rada su petoosne mašine S5D i H5D, pokazane na Sl. 2.



Slika 2. Plan uzoraka stonih petoosnih mašina alatki

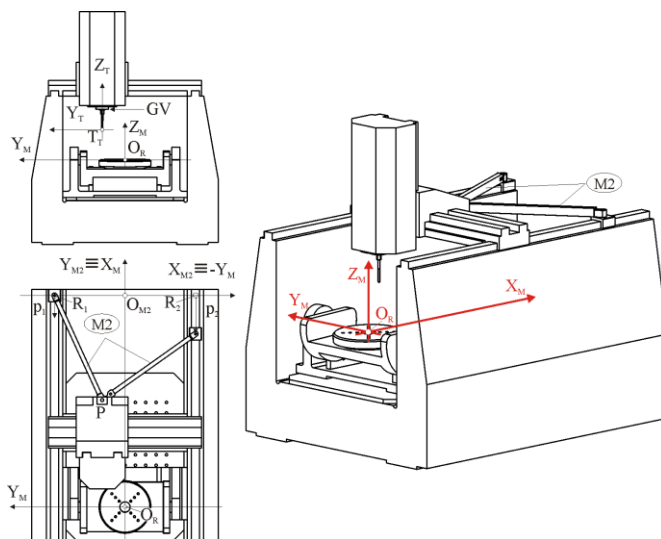
- Zbog osnovne troosne portalne mašine dvoosni sto je postavljen poprečno, pa je za ove mašine osnovna strukturna formula WCBVXYZT.

Plan uzoraka stonih petoosnih mašina alatki, sa Sl. 2, ima ova svojstva:

- Uzajamno su ekvivalentne, jer se konfigurišu iz iste grupe modula i po istom programu gradnje, odnosno, po zajedničkom konfiguratoru.
- Za slučajeve obrada kraćih delova i korišćenjem obrtnih stolova dobra je mašina H5D: nisu potrebni dugi hodovi nosača alata, dok brzine pomoćnih kretanja alata treba da budu dovoljne da mogu da prate obrtanja stolova i to u paru i pojedinačno.

3. FORMALIZAM POSTPROCESORSKOG RAČUNA ZA PETOOSNE MAŠINE STRUKTURE WCBVXYZT

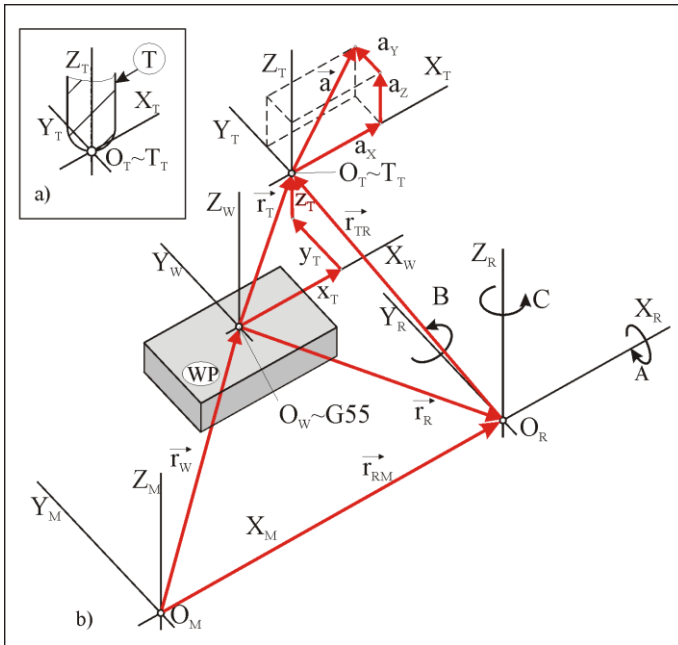
Programiranje mašina sa serijskom kinematikom strukture WCBVXYZT u nekom CAD/CAM okruženju je rutinsko, kada se pripremi dobar postprocesor. Zbog toga nije potrebno ponavljati postprocesorski račun, koji se sprovodi u takvim postprocesorima, nego ga treba formalizovati i koristiti za naknadnu formalnu proveru programa (G kôdova) koje treba izvršavati na mašinama. Razlog: ako se koristi mašina H5D, onda se u sistemu za upravljanje sprovodi naknadni postprocesorski račun za njenu hibridnu kinematiku, da bi se interpretirani G kod, koji je pravljen za mašinu tipa WCBVXYZT, mogao izvršavati i na mašinama S5D i H5D. Zbog toga rekonfigurisanje hardvera sa Sl. 2 treba da bude praćeno i rekonfigurisanjem softvera (sistema za upravljanje), da bi se imao pravi rekonfigurabilni petoosni obradni sistem, ilustrovan na Sl. 2. U nastavku sledi prikaz formalizma postprocesorskog računa za petoosne mašine sa Sl. 2 i opis provera ispravnosti tog računa.



Slika 3. Koncepcija rekonfigurabilne stonice petoosne mašine alatke tipa H5D, sa strukturom WCBVXYZT

Potrebno je pripremiti model za ovaj račun [7,8]. Na Sl. 3 pokazana je osnovna priprema, u kojoj su prikazani osnovni koordinatni sistem mašine (O_R), alata (T_T) i podsistema sa paralelnom kinematikom (O_{M2}).

U ovom odeljku se opisuje postprocesorski račun za podsistem sa serijskom kinematikom, u osnovnom sistemu O_R . Kinematički model je dat na Sl. 4, zajedno sa važnijim oznakama. U ovom modelu je dodat koordinatni sistem mašine (O_M), u kojem je osnovni sistem, O_R , postavljen u centar obrtanja stolova. Koordinatni sistem programa je O_W , vezan za obradak (WP). Posmatra se slučaj u kojem je sistem programa paralelan sa sistemima mašine, pa je za nultu tačku (na primer, G55, Sl.4), potrebna samo translacija da bi mašina radila po interpretiranom programu i pripremom sa tako postavljenim priborom i pripremkom na stolu. Sistem obratka (O_W) se ne poklapa sa osnovnim sistemom mašine, što je opisano vektorom \vec{r}_R i to u sistemu O_W , u kojem važi i dobijeni program obrade. Sistem alata (T) ima početak u O_T .



Slika 4. Prvi kinematički model rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D [8]

Programiranjem ovakve petoosne mašine u CAD/CAM sistemu formira se putanja alata u odnosu na obradak i upisuje u CLF (*Cutter Location File*), kao šestorka podataka: tri za vektor položaja vrha alata u sistemu programa (\vec{r}_T u O_W) i tri za orijentaciju ose alata (\vec{a} u O_W), za svaku pozu mašine na putanji, opisanu kao naredba

GOTO/ \vec{r}_T , \vec{a} , odnosno

GOTO/ $x_T, y_T, z_T, a_x, a_y, a_z$, koja je svojstvena dobro poznatom APT formatu.

Koordinatni sistemi u ovom računu su: koordinatni sistem mašine $O_M(X_M, Y_M, Z_M)$, osnovni koordinatni sistem mašine $O_R(X_R, Y_R, Z_R)$, koordinatni sistem obratka $O_W(X_W, Y_W, Z_W)$ i koordinatni sistem alata $O_T(X_T, Y_T, Z_T)$. Koordinate korišćenih vektora za orijentaciju alata (\vec{a}_0, \vec{a}) i vektora ($\vec{r}_{T0}, \vec{r}_T, \vec{r}_R, \vec{p}, \vec{x}$) su:

$$\vec{a}_0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \vec{a} = \begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \vec{r}_{T0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \vec{r}_T = \begin{Bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \vec{r}_R = \begin{Bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \vec{p} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{Bmatrix}; \quad \vec{x} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{Bmatrix}.$$

Ostalo: $\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}^T$ je neki dati vektor, T je alat, W, ili WP je obradak.

Sledi postprocesorski račun, koji se može ovako opisati, za svaku od tih poza posebno: iz svoje referentne pozicije mašina obrtanjem stolova usmerava programirani ort ose alata \vec{a} na \vec{a}_0 , kakav mašina jedino i ima, a onda translatorskim osama navodi vrh alata (T_T) na njegovu zaokrenutu programiranu poziciju zbog već sprovedenih obrtanja stolova. Stolovi se obrću za $-C$, pa za $-B$. Neka je sa $Tr(\vec{v})$ označena translacija za vektor \vec{v} , a sa $Rot(\vec{o}, \varphi)$ obrtanje za ugao φ oko orta \vec{o} , u pozitivnom smeru, gde je \vec{o} ort \vec{i} osa $X_M \sim X_R$ mašine, ili ort \vec{j} osa $Y_M \sim Y_R$, ili ort \vec{k} osa $Z_M \sim Z_R$. Na H5D su ose obrtanja stolova paralelne sa osama Z i Y u koordinatnim sistemima ove mašine. Ugao obrtanja ima negativni predznak ako se obrće obradak (sa stolom). Po standardu je obrtanje oko orta \vec{i} ugao A, oko orta \vec{j} ugao B i oko orta \vec{k} ugao C. Ovako opisana obrtanja stolova, pa translacije alata, mogu se formalizovati kao direktna geometrija mašine, pomoću sledeće dve jednačine, respektivno:

$$Tr(\vec{r}_R) \cdot Rot(\vec{k}, -C) \cdot Rot(\vec{j}, -B) \cdot Tr(\vec{p}) \cdot \vec{a}_0 = \vec{a} \quad (1.1) \quad \text{i} \quad Tr(\vec{r}_R) \cdot Rot(\vec{k}, -C) \cdot Rot(\vec{j}, -B) \cdot Tr(\vec{p}) \cdot \vec{r}_{T0} = \vec{r}_T \quad (1.2) \quad (1)$$

Izgled matrice translacije $Tr(\vec{v})$ za neki vektor \vec{v} i matrice rotacija oko osa koordinatnih sistema mašine imaju uobičajeni oblik [3,8], svojstven homogenim koordinatama i to:

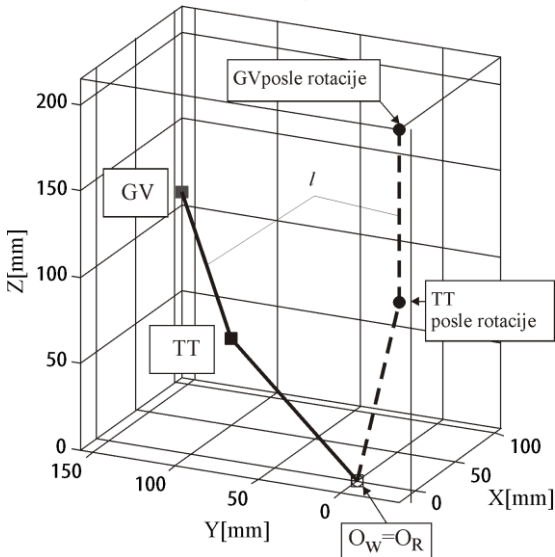
$$[T_r(\vec{v})] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 1 & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Rot(k, -C) = \begin{bmatrix} cC & sC & 0 & 0 \\ -sC & cC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Rot(j, -B) = \begin{bmatrix} cB & 0 & -sB & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ sB & 0 & cB & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

U jednačini (1) je \vec{p} potrebno kretanje alata u odnosu na obradak u sistemu O_R mašine, dok se stvarna potrebna kretanja osa mašine, koja se unose u program, mogu opisati vektorom $\vec{g} = \{X \ Y \ Z \ 1\}^T$. Drugo rešenje je par uglova obrtnih osa. U ovom slučaju su to uglovi C i B. Rešenja jednačina (1) traže se odvojeno. Tako se dobija rešenje za inverzni geometrijski problem, koje se ugrađuje u postprocesor.

Međutim, u ovom slučaju se taj formalizam koristi za proveru upravo interpretiranog G koda u sistemu otvorene arhitekture, konfigurisanom za posmatranu mašinu, jednu od onih sa Sl. 2. Sa uvedenim smenama sC za $\sin(C)$, cC za $\cos(C)$, sB za $\sin(B)$, cB za $\cos(B)$, posle odvojenog rešavanja obe jednačine (1) mogu se kompaktno napisati rešenja inverznog geometrijskog problema. Prvi deo rešenja se odnosi na potrebne uglove orijentacije B i C , dok se drugi deo rešenja odnosi na pozicije translatorskih osa mašine (X, Y, Z) .

$B = \arccos(a_z)$, gde je $B \in (0, \pi \wedge B \neq 0)$	(2)
$C = a \tan 2\left(\frac{a_y/sB}{-a_x/sB}\right)$, gde je $C \in [-\pi, \pi]$.	(3)
$X = x_R + p_x$	$p_x = (x_T - x_R) \cdot cB \cdot cC - (y_T - y_R) \cdot cB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot sB$
$Y = y_R + p_y$	$p_y = (x_T - x_R) \cdot sC + (y_T - y_R) \cdot cC$
$Z = z_R + p_z$	$p_z = -(x_T - x_R) \cdot sB \cdot cC + (y_T - y_R) \cdot sB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot cB$

Prva i druga provera za mašinu WCBVXYZT.
Dužina alata je 100mm.



Slika 5. Provera računa po prvom kinematičkom modelu rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D

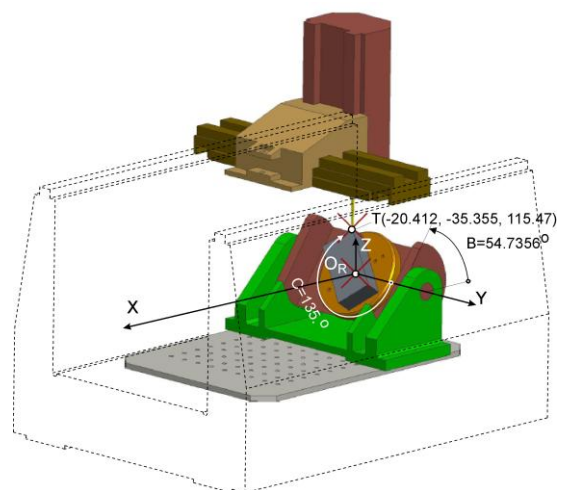
Poklapanje X, Y, Z sa p_x, p_y, p_z , respektivno, posledica je poklopljenih koordinatnih sistema O_W i O_R .

Postprocesorski račun u sistemu za upravljanje se sprovodi u dva dela. U prvom se vrši provera prikazana na Sl. 5: da se programirani ort ose alata (\vec{a}_T) rotacijama za C , pa za B iz (2) i (3) zaista poklapa sa \vec{a}_0 i da translatorske ose mašine treba da budu u pozicijama $[X \ Y \ Z \ 1]^T$, propisanim jednakostima (4). Ta provera se vrši i kinematički pomoću virtualne mašine, Sl.6. Provera je urađena i na virtualnom prototipu mašine, u CAD/CAM okruženju, zauzimanjem pozicija po izračunatim koordinatama X, Y, Z, B i C , pri čemu alat prema obratku zauzima korektnu pozu, kao što se može videti na Sl.6.

U drugom delu se izračunavaju potrebne pozicije pogonskih osa p_1 i p_2 mašine M_2 sa paralelnom kinematikom, što nije predmet ovog rada i detaljno je pokazano u [8]. To je drugi kinematički model mašine tipa H5D. Po njemu je nađeno rešenje inverzne i direktne

Provera računa. Provera postprocesorskog računa je pokazana na Sl. 5. GV (glavno vreteno) je oznaka za centar nosača alata. Rastojanje od GV do TT je dužina alata, ovde $l=100$ mm. Ovde se razmatra slučaj kada je $\vec{r}_R = \vec{0}$, odnosno kada je O_W postavljeno tačno u O_R . Punom linijom je prikazana programirana poza mašine u sistemu $O_R = O_W$, na osnovu podataka iz programa, u sistemu O_W . Isprekidanom linijom je nacrtana poza mašine posle izvršavanja kretanja po rešenjima (2)-(4), za specijalni slučaj: $\vec{r}_R = [0, 0, 0]^T$, $\vec{r}_T = [50, 100, 50, 1]^T$ i $\vec{a}_T = [3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 1]^T$. Pozicija alata se nalazi u temenu kvadra definisanog vektorom \vec{r}_T , dok je orijentacija definisana vektorom \vec{a}_T . Posle proračuna prema jednačinama (2) do (4) u Matlabu, dobijeni rezultati su:

Rotacije obrtnih stolova radi zauzimanja zadate orijentacije su: $B = 54.7356^\circ$, $C = 135.0000^\circ$, dok su potrebna translatorska pomeranja alata radi dostizanja zadate pozicije $X = -20.4124$, $Y = -35.3553$, $Z = 115.4701$, odnosno $p_x = -20.4124$, $p_y = -35.3553$, $p_z = 115.4701$.



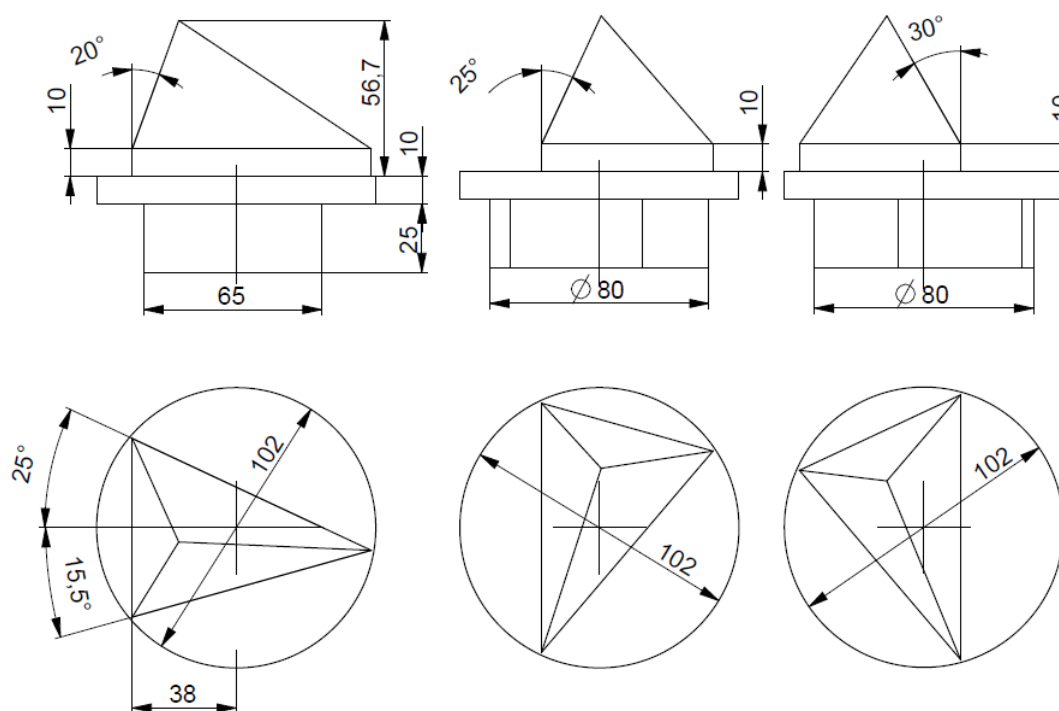
Slika 6. Provera postprocesorskog računa na CAD virtualnom prototipu za mašinu S5D

geometrije podsistema sa paralelnom kinematikom i to rešenje je uspešno implementirano u interpretirani G kod, da bi se u njemu izvršile korekcije, koje su posledica kinematike mašine. Posle toga su već moguća planiranja putanje alata, pa interpolacije u realnom vremenu, itd.

4. VERIFIKACIJA POSTPROCESORSKOG RAČUNA OBRADOM TROSTRANE PIRAMIDE

Prve probe postprocesorskog računa su vršene na pravilnoj četvorostranoj piramida koja je za osnovu imala kvadrat [8]. U ovom radu je izabran probni deo oblika nepravilne trostrane piramide, koja je pokazana na Sl.7 i koristi se za verifikaciju postprocesorskog računa u višeosnoj obradi. Program za obradu se priprema za sve tri nagnute strane piramide pod uglovima od 20° , 25° i 30° . Predobrada za kompletan deo ostvaruje se troosnom obradom, a završna obrada svake od strana piramida 3+2 obradom.

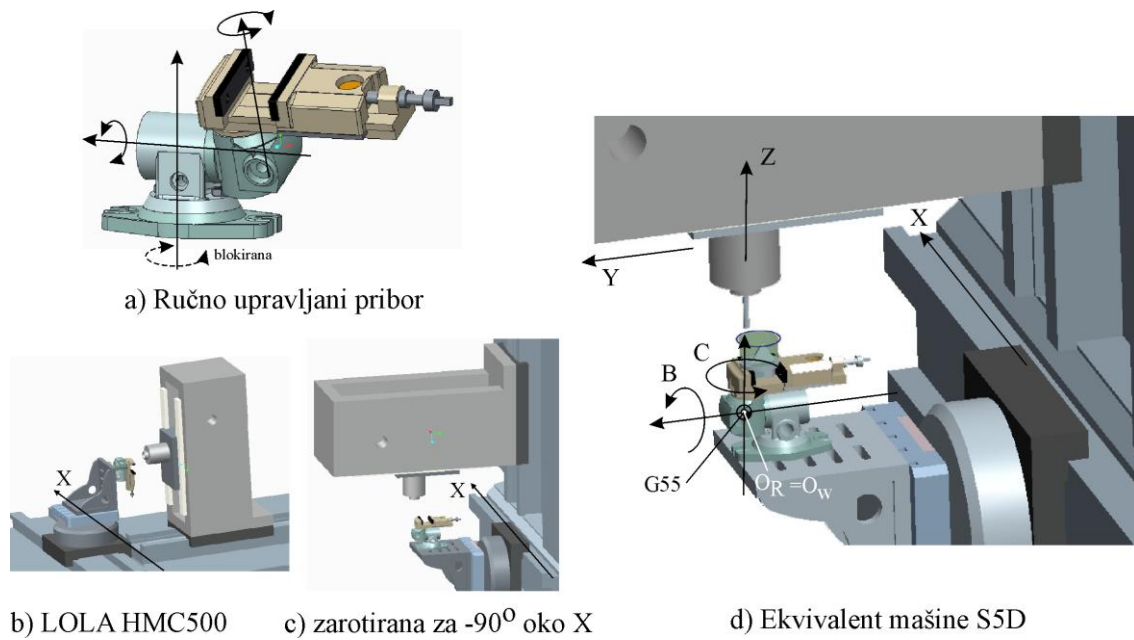
Pri obradi probnog dela sa Sl.7, oblika trostrane piramide, pozicije stolova, ose B i C su konstantne tokom završne obrade svake od strana trostrane piramide. Delovi programa za te pozicije izvršavani su odvojeno, u režimu troosne obrade, na horizontalnom obradnom centru LOLA HMC500, sa dodate dve ručno upravljane obrtne ose, Sl.8. Pozicioniranje po dve ručno upravljane obrtne ose ostvaruje se pomoću pribora, na kome je prva osa blokirana (Sl.8a), dok su preostale dve iskorišćene da se njima ostvaruju ose orijentacije obratka B i C. Ako se izabrana mašina (Sl.8b), posmatra kao da je zarotirana za -90° oko ose X (Sl.8c), koncepcijski se dobija mašina koja odgovara mašini S5D (Sl.8d). To je ovde iskorišćeno za proveru konfigurisanog postprocesora za vertikalnu petoosnu mašinu strukture WXYZBCT.



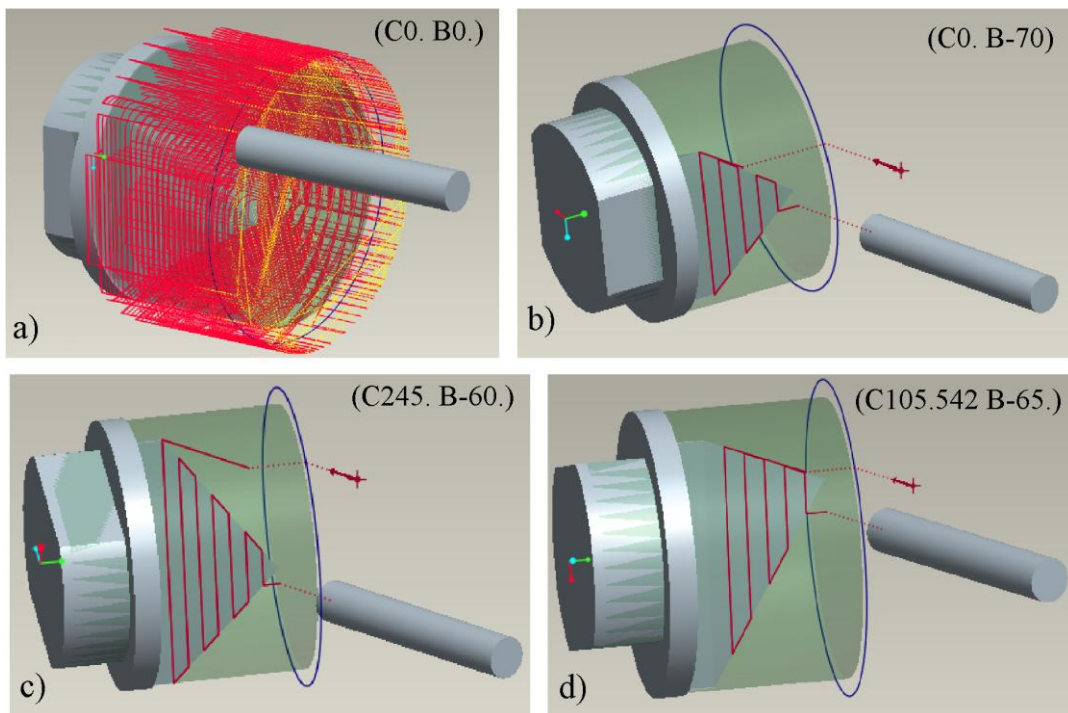
Slika 7. Probni deo oblika trostrane piramide za verifikaciju postprocesorskog računa

Program za obradu je pripremljen primenom CAD/CAM sistema i generisanjem G koda pomoću konfigurisanog postprocesora. Pošto je reč o trostranoj piramidi, orijentacija alata se ostvaruje pomoću tri odvojena nagnjanja obratka za uglove B i C, koji su dobijeni u G kodu, posle postprocesiranja putanje alata na osnovu CLF-a.

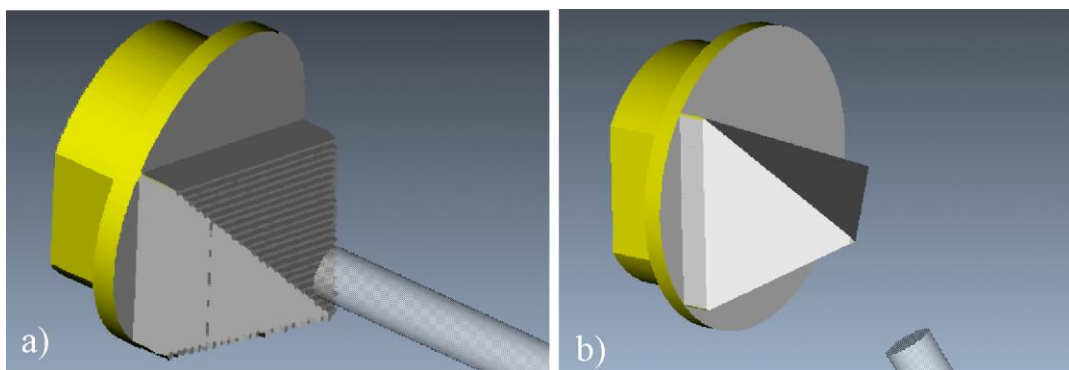
Nulta tačka za obradu je G55 i nalazi se u preseku obrtnih osa B i C, slika 8d [4]. Razmatran je slučaj kada se poklapaju osnovni koordinatni sistem mašine O_R i koordinatni sistem obratka O_W . Prvo je pripremljen program za stepenastu troosnu predobradu, kada je orijentacija stolova $B=0$ i $C=0$. Primer generisane putanje alata za predobradu pokazan je na Sl.9a, dok je simulacija uklanjanja materijala za istu obradu pokazana na Sl.10a. Posle predobrade, sledi obrada svake od tri strane piramide, za koje su generisane putanje alata prikazane na slikama Sl.9b,c i d, a simulacija kompletno obrađene piramide pokazana je na Sl.10b.



Slika 8. LOLA HMC500 sa postavljenim priborom za orijentaciju obratka

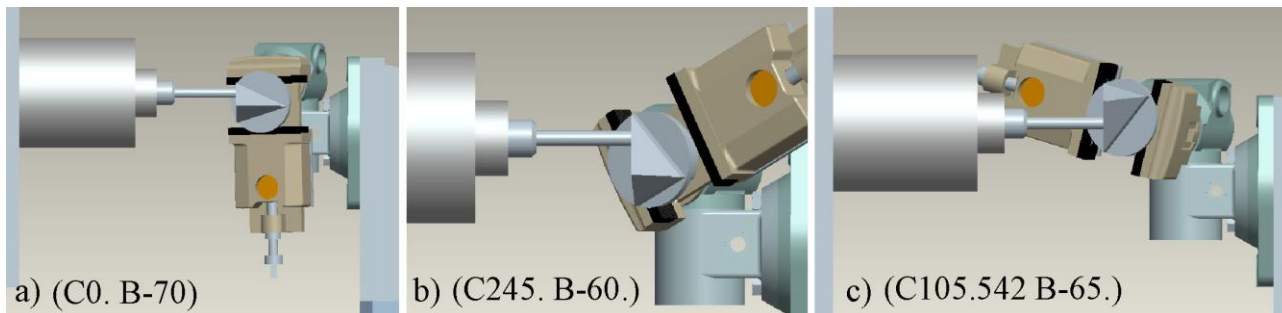


Slika 9. Simulacija putanje alata

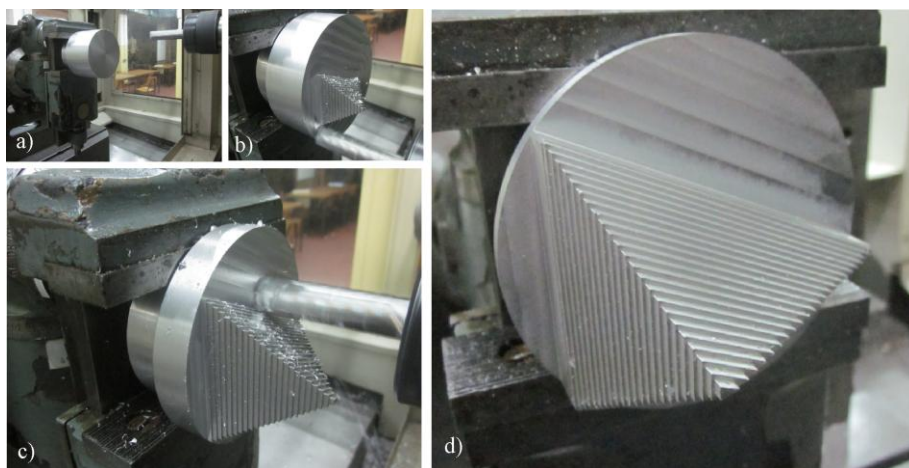


Slika 10. Simulacija uklanjanja materijala

Po završenoj predobradi zazima se orijentacija alata naginjanjem stolova za odgovarajuće uglove B i C. Za obradu prve strane piramide zauzima se (C0. B-70.), kao što je pokazano na Sl.11a. Posle završene obrade svake od strana piramide izvršenje programa obrade se zaustavlja sa M0 i zauzima nova orijentacija alata u odnosu na obradak naginjanjem pribora za odgovarajuće uglove B i C. Za obradu druge strane piramide zauzima se (C245. B-60.), Sl.11b i za obradu treće strane piramide zauzima se (C105.542 B-65.), Sl.11c, čime su pokazane zamrznute 3 poze iz postprocesora, koje je trebalo proveriti pre obrade u CAD/CAM okruženju.



Slika 11. Provera tri poze iz postprocesorskog računa na primeru obrade trostrane piramide



Slika 12. Troosna predobrada trostrane piramide na mašini LOLA HMC500, B=0 i C=0

Sama obrada piramide na mašini LOLAHMC500 pokazana je na slikama Sl.12 i 13. Na početku je izvršena troosna stepenasta predobrada cilindričnog priprema, kao što je pokazano na Sl.12, sa ostavljanjem dodatka za završnu obradu. Na kraju predobrade dobijena je stepenasta površina trostrane piramide. Završnom obradom se skidaju ovi dodaci i dobija završno obrađena trostrana piramida.

Obrada prve strane piramide, sa naginjanjem samo B ose za -70, dok je osa C=0, pokazana je na Sl.13a i b. Obrada poslednje strane piramide, sa zauzetim orijentacijama C=105.5 B=- 65, pokazana je na Sl.13c i d. Na ovaj način je primenom raspoložive mašine, troosnog obradnog centra i pomoćnog pribora za pozicioniranje po dve ručno upravljane obrtne ose verifikovan postprocesorski račun pojedinačnim proverama i obradom dela za tri programirane orijentacije.

9. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane dve koncepcije stone petoosne mašine alatke kao i formalizam postprocesorskog računa za mašine tipa WCBVXYZT, sa proverom računa na virtuelnom prototipu i



Slika 13. Završna obrada trostrane piramide na mašini LOLA HMC500

eksperimentom obrade na raspoloživoj troosnoj mašini, sa dodatim dvoosnim priborom za naginganja obratka.

Primena ove mašine 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. U sklopu daljih istraživanja razmatraće se i realizacija virtuelne petoosne mašine integrisane u sistem upravljanja i u sistem programiranja.

10. 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] 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.
- [7] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Koncepcije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki*, Infoteh 2014, Zbornik radova, str. 857-863, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Jahorina, 2014.
- [8] Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B.: *Jedna stona rekonfigurabilna mašina alatka sa hibridnom kinematikom* , TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo (u pripremi za štampu)

Zivanovic, S., Glavonjic, M., Kokotovic, B.

VERIFICATION OF POSTPROCESSING FOR ONE CONCEPT OF DESKTOP RECONFIGURABLE 5-AXIS MACHINE TOOL

Abstract: *This paper presents conceptions of desktop reconfigurable five axis machine tools with WCBVXYZT structure. The formalism for post processing of a 5- axis machine with WCBVXYZT configuration is presented. The verification of virtual prototype of a concept of desktop 5- axis machine tool is carried out using simulation of machining on virtual machine in CAD/CAM environment. Postprocessing formalism is verified by comparison of results obtained in Matlab with the results of configured postprocessor in CAM environment, as well as with the machining experiments conducted on the available machine.*

Key words: *CAD/CAM, 5-axis machine tool, postprocessor*



Sovilj-Nikic, I., Legutko S., Sovilj-Nikic, S., Chwalczuk, T. ¹⁾

KONTROLA KVALITETA PREVLAKA MODELSKIH ALATA ZA OBRADU OZUBLJENJA ²⁾

Rezime

Usavršavanje alata za obradu rezanjem je jedan od ključnih prioritarnih zadataka privrede. Savremena proizvodnja ne može se zamisliti bez upotrebe kvalitetnih alata za obradu rezanjem, jer su oni neophodni za ekonomičnu proizvodnju. Evolucija metoda za nanošenje prevlaka omogućila je i evoluciju poboljšanih alata za obradu rezanjem. U mnogim preduzećima kontrola kvaliteta prevlaka izvodi se vizuelnim pregledom ili proverom tvrdoće prevlake. S obzirom na česte smetnje u tehnologiji nanošenja prevlaka, a koje dovode do lošeg spajanja prevlake sa osnovnim materijalom, nameće se neophodnost za uvođenjem odgovarajućih metoda kontrole kvaliteta prevlake. U radu su dati rezultati merenja triboloških karakteristika prevlaka na modelskim alatima za obradu ozubljenja i njihova analiza.

Ključne reči: Alati za obradu ozubljenja, tribologija, prevlake, kvalitet, karakterizacija prevlaka

1. UVOD

U industrijskoj proizvodnji su sve veći zahtevi u pogledu povećanja produktivnosti i kvaliteta obrađene površine. Sve češće se obrađuju teško obradivi i kompleksni materijali, kao što su razne legure nikla i titana, kompoziti, legure aluminijuma i magnezijuma, itd. Poseban problem je obrada kaljenih čelika s tvrdoćom i do 65 HRC. Iz ekoloških, zdravstvenih i ekonomskih razloga je sve zanimljivija obrada bez upotrebe sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHP). Kod obrada sa velikim brzinama rezanja i obradama na suvo, kao i obradi specijalnih legura dolazi do ekstremno visokih opterećenja alata za obradu rezanjem.

Povećanje efikasnosti obrade metala rezanjem jeste jedan od osnovnih smerova razvoja savremenog mašinstva. Uspešno rešavanje postavljenih ciljeva povezano je sa istraživanjem uslova rada alata za obradu rezanjem kao jednog od najznačajnijih učesnika u procesu obrade metala rezanjem, a takođe i sa istraživanjem fizičkih pojava koje čine proces obrade rezanjem. Prethodno dozvoljava postavljanje neophodne osnove za projektovanje i konstruisanje reznog dela alata i povećanje njegove otpornosti na habanje, kao i povećanje čvrstoće pronalaženjem optimalnih prevlaka. To su sve razlozi za intenzivan razvoj ne samo novih alatnih materijala, već i postupaka zaštite površina alata [1]. Idealan materijal alata za obradu rezanjem bi morao biti dovoljno žilav i tvrd, da bi podneo udarce i velike otpore pri rezanju, dok se pri visokim temperaturama ne bi smeo plastično deformisati.

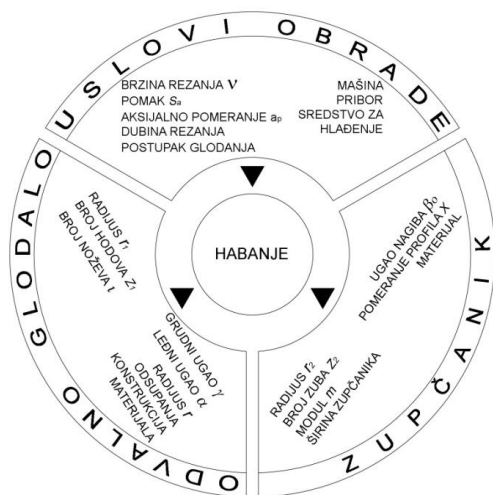
Odvalno glodanje, kao jedan od najsloženijih procesa obrade rezanjem, nalazi najširu primenu pri obradi ozubljenja cilindričnih zupčanika zahvaljujući visokoj proizvodnosti procesa. Komplikovane kinematske i geometrijske veze između odvalnog glodala i obratka stvaraju niz teškoća i problema, koji sprečavaju optimalno korišćenje alata i mašine. Zbog komplikovanosti procesa, visoke vrednosti zupčanika, a naročito alata istraživanja podloga za optimizaciju procesa odvalnog glodanja zahtevaju znatna finansijska sredstva i značajne napore istraživača. Za istraživanja procesa odvalnog glodanja ozubljenja uspešno se koriste modelski jednozubi alati. Usavršavanja odvalnog glodanja ozubljenja zupčanika može se ostvariti preko povećanja proizvodnosti i povećanja kvaliteta ozubljenja [2].

¹⁾ PhD student Ivan Sovilj-Nikić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (diomed17@yahoo.com), prof. dr Stanislaw Legutko, Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology, Poland (legutko@sol.put.poznan.pl), dr Sandra Sovilj-Nikić, Iritel (sandrasn@eunet.rs), PhD student Tadeusz Chwalczuk, Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology, Poland, (chwalczuk.tadeusz@gmail.com)

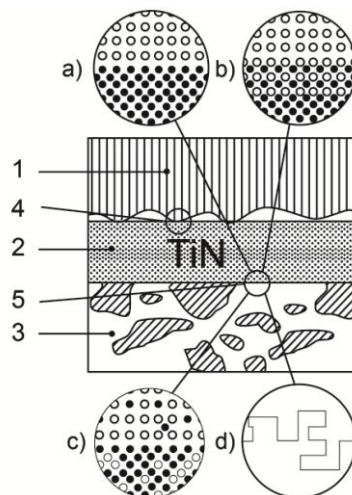
²⁾ Rad predstavlja prikaz dela istraživanja realizovanih u okviru projekta TR – 35015 finansiranog od strane, Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, takođe ova istraživanja su poistekla iz saradnje u okviru CEEPUS projekta CIII-RO-0058-05-1213 podržanog od Sekretarijata za nauku i tehnološki razvoj AP Vojvodine

2. POBOLJŠANJE OSOBINA ODVALNIH GLODALA

Razvoj novih i poboljšanja postojećih materijala za izradu odvalnih glodala sa ciljem minimizacije ukupnih troškova proizvodne operacije i zadržavanja istog kvaliteta obrade dobija izuzetan značaj s obzirom na današnju privrednu situaciju. Stalno rastući zahtevi koji se postavljaju pred odvalna glodala traže neprekidno razvijanje i nalaženje novih metoda za izradu kombinovanih materijala. Na tom polju u zadnjih deset godina postignut je značajan napredak. Razvijen je veliki broj metoda presvlačenja sa tvrdim materijalima u cilju zaštite od habanja, jer na njega utiče veliki broj parametara (slika 1. [2]).



Slika 1. Veličine koje utiču na habanje pri obradi ozubljenja zupčanika odvalnim glodanjem



Slika 2. Šema tribološkog sistema: 1- obradak, 2- tvrda prevlaka, 3- osnova, 4- tribološki kontakt (mazivo), 5- adhezijski spoj između prevlake i osnove: a) oštra granica, b) spojena granica, c) difuziona granica, d) mehanička granica

Značajna pažnja poklanja se jačanju alata nanošenjem postojeće prevlake na njegove radne površine. Široka primena alata sa prevlakama uslovljena je njegovom visokom efikasnošću, zahvaljujući nanošenju prevlake čvrstoća alata povećava se 2-5 puta. Do sada nije ustanovljena korelacija između čvrstoće alata i svojstava prevlake, pa ostaju otvorena pitanja optimizacije svojstava kompleksa prevlake i alatne osnove. Pojavljuju se takođe teškoće industrijske primene progresivne tehnologije površinskog ojačavanja i racionalne primene ojačanog alata.

Tendencija razvoja alatnih materijala i tehnologije njihovog površinskog ojačavanja uslovljeni su potrebom usmerenom ka poboljšanju fizičko-mehaničkih svojstava alatnih materijala, među kojima se čvrstoća, termostabilnost, otpornost, krtoš odavno i opravdano smatraju važnim, dok se druga svojstva neosnovano smatraju manje bitnim. Zanemarivanje važnosti pojedinih svojstava alatnog materijala jeste jedan od osnovnih razloga nerazumevanja glavnih funkcija postojeće prevlake na alatu. Postoji više od sto različitih metoda površinskog oslojavanja metala i legura pomoću kojih je u određenom stepenu moguće povećati efikasnost alata. Tehnologija površinskog oslojavanja usavršava se ubrzanim ritmom čemu u velikoj meri doprinosi razvoj teoretskih pojmova iz oblasti površinske otpornosti materijala.

Adhezija je definisana kao stanje, u kojem se dve površine drže zajedno usled hemijskih ili mehaničkih veza, a četiri tipa granica između osnove i prevlake prikazani su na slici 2 [3]. Suprotno od kohezije, gde se dešava povezivanje u jednom materijalu, adhezija predstavlja vezu između dva materijala. Iako je adhezija jedan od najznačajnijih parametara sistema osnova/tanki sloj, još uvek je slabo poznata.

3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA KVALITETA PREVLAKA

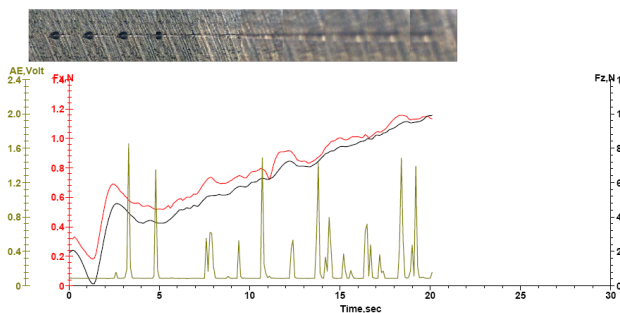
Osobine tvrdih prevlaka mogu se razmatrati na tri nivoa: osobine na mikro nivou, osobine na makro nivou i mehaničke osobine. Parametri postojeće prevlake koji utiču na njene osobine dati su u [1]. Sa tribološkog aspekta ključne su sledeće osobine prevlaka: debljina, mikrostruktura, hrapavost, hemijska inertnost, tvrdoća, tvrdoća pri povišenim temperaturama, adhezija, unutrašnji naponi, žilavost, itd. Prethodno navedene osobine određuju se na osnovu vrlo poznatih testova [4]. Većina eksperimentalnih rezultata koje daju ovi testovi su

manje ili više kvalitativni i uglavnom nude uporedne informacije koje se odnose na superiornost jednog sistema u odnosu na drugi pod istim uslovima. Osobine koje su dobijene ovim testovima odnose se ili na geometrijske parametre ili tehnološke parametre

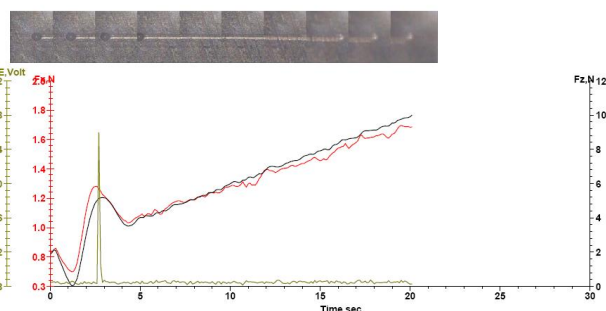
Mikroskopski gledano adhezija je jačina hemijske veze između atoma osnove i prevlake i ona se obično ocenjuje pomoću testa grebanja. Neposredno merenje jačine tih veza je zahtevno i za industrijsku upotrebu neodgovarajuće. Mehaničke metode su od primarnog značaja. Analizira se pri kakvim uslovima se dešava određeno značajno oštećenje sloja (često kao ljuštenje) i rezultati se upoređuju sa već poznatim vrednostima za referentne slojeve. Rezultati merenja u normalnom udaru mogu značajno da se razlikuju od onoga pri smicanju. Za merenje adhezija tvrdih prevlaka najviše se primenjuje test grebanjem i test sa otiskom. Za adheziju tvrdih prevlaka, gde je nekoliko mikrometara debeo sloj velike tvrdoće na srednje tvrdoj osnovi, može se primeniti test grebanjem poznat takođe pod imenom *Scratch test*.

Test se izvodi u dva koraka. Prvo sa dijamantskim vrhom standardnog oblika (tip Rockwell , poluprečnik vrha 0,2 mm) grebe se po površini prevlake, a nakon toga se ocenjuju nastala oštećenja. Postoje dva načina merenja. U prvom načinu vrši se merenje pri konstantnom opterećenju, gde se mora napraviti više grebanja, svako naredno mora imati veće opterećenje. Drugi način merenja vrši se tako što se na istoj fazi grebanja opterećenje linearno povećava od 0 [N] do željenog maksimalnog opterećenja, a kritično opterećenje se nalazi pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM), akustične emisije ili trodimenzionalnim zapisom sile odgovarajućim sensorima [5, 6 ,7, 8, 9,10]. Adhezija prevlake sa osnovnim materijalom izuzetno zavisi od tehnologije prethodne pripreme površine uzorka [1,3,4]. To je jedno od najvažnijih pitanja tehnologije postojanih prevlaka, a koje zahteva posebnu analizu.

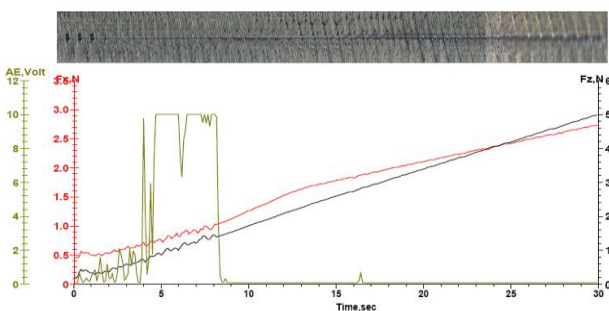
U okviru ovog istraživanja izvršeno je merenje adhezione tvrdoće. Kontrola kvaliteta prevlaka izvršena je na Tribotesteru CETR-UMT 2 firme proizvođača *Bucker*. CETR-UMT 2 se može koristiti za: test grebanja sa stalnim opterećenjem za merenje tvrdoće i adhezije i promenljivim opterećenjem za merenje praktične adhezije, za merenje električnog otpora kontakta (STR), za merenje električnog površinskog otpora (ESR), akustičnu emisiju (AE), profilisanje dubine grebanja , optičku mikroskopiju i AFM za slikanje, 3D-optičku mikroskopiju (interferometriju). Kontrola kvaliteta prevlaka u ovim eksperimentalnim istraživanjima izvršena je na modelskim alatima za obradu ozubljenja modula tri i pet kao uzorcima koji su izrađeni od osnovnog materijala HS6-5-2-5. Na modulu tri naneta je TiN-1 i keramička prevlaka, a na modulu pet TiN-2 i keramička prevlaka. Na slikama 3, 4. 5 i 6 dat je samo deo *scratch* testova za modul pet pri odgovarajućim



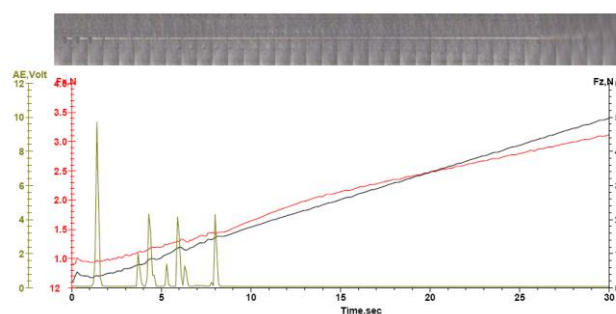
Slika 3. Scratch test modelskog alata za obradu ozubljenja presvučenog TiN-2 modula 5 u slučaju da sila opterećenja varira od 2-10N



Slika 4. Scratch test modelskog alata za obradu ozubljenja presvučenog keramikom modula 5 u slučaju da sila opterećenja varira od 2-10N



Slika 6. Scratch test modelskog alata za obradu ozubljenja presvučenog TiN-2 modula 5 u slučaju da



Slika 6. Scratch test modelskog alata za obradu ozubljenja presvučenog keramikom modula 5 u

normalnim opterećenjima i odgovarajućim tragom grebanja koji se nalazi respektivno iznad svakog dijagrama. Na navedenim slikama u ovom radu na apscisi je dato vreme grebanja, dok su na ordinatama date respektivno akustična emisija (AE), tangencijalna sila (F_x), normalno opterećenje (F_z). Scratch test je izuzetno široko korišćen postupak ispitivanja prevlaka. Pomoću CETR-UMT 2 mogu se uraditi napredni testovi grebanja za ocenjivanje adhezionih svojstva prevlaka. Takođe ovaj sistem može da obavlja sve obuhvatnu ocenu prevlake automatskim slikanjem i profilisanjem ogrebanog zareza

Ekspirimenti pokazuju da se optimalne debljine prevlake nalaze u intervalu od četiri do četiri i po mikrometra. Pri manjim debljinama prevlaka ne obezbeđuje dovoljan stepen postojanosti, a pri velikim debljinama pogoršava se adhezija prevlake i povećava se verovatnoća njenog loma.

4. ZAKLJUČAK

Površine alata za obradu ozubljenja zupčanika korisno je podvrgnuti površinskom ojačavanju. Kontrola kvaliteta prevlaka sa tribološkog aspekta i sa aspekta otpornosti na razaranje je neophodna u procesu njihovog nanošenja na kontaktne površine alata, a takođe i u procesu ulazne kontrole. Dobijeni rezultati pokazuju da su nanešene prevlake na uzorcima približno iste debljine. Postojanost prevlake zavisi od postupka pripreme površine osnovnog materijala, postupka nanošenja prevlake i vrste prevlake, a što pokazuju i dobijeni rezultati prikazani na dijagramima ispitivanja.

5. LITERATURA

- [1] Panjan, P., Čekada, M.: *Zaštita orodij s trdimi PVD-prevlekami*, Institut Jožef Štefan, Ljubljana, 2005
- [2] Sovilj-Nikić, I., et al: *Application of genetic algorithm in analysis of influence of gear hob geometric parameters on the tool life*, 3th ICMEN, pp.145-154, Kallithea of Chalkidiki, EEDM, Solun, Oktobar, 2008
- [3] Sovilj, B., et al.: *The efect of specific relationship between material and coatings on tribological and protective features of product*, Metalurgija, 51, pp. 21-24,2012
- [4] Bouzakis, K. D. , Vidakis, N., *Moderne PVD prevlake-trenutno stanje u oblasti, inovacije i buduće tendencije*,Tribologija u industriji, 10, pp.97-118,1998
- [5] Sekler, J., et al, *The sratch test: different critical load determination techniques*, Surface and coatings technology, 36, pp.519-529, 1988
- [6] Kral, E., et al.: *Hardness of thin film media: Scratch experiments and FEM simulations*, ASME journal of tribology, 118, pp. 1-11, 1996
- [7] Ivković, B.: *Scratch test-mera kvaliteta triboloških i zaštitnih prevlaka*, Tribologija u industriji, 12, pp.5-9,2002
- [8] Gonczy, S., Randall, N.: *An ASTM Standard for quantitative scratch adhesion testing of thin, hard ceramic coatings*, Internatinal Journal of applied ceramic technology, 2 , pp. 422-428, 2005
- [9] Gitis, N., et al.: *Advaced methods of coating adhesion testing*, Journal of testing and evaluation, 20, pp. 1-5, 2002
- [10] ASTM Standard C 1624 (05)– *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch testing*, ASTM, West Conshohocken PA-USA, 2005

Sovilj-Nikic, I., Legutko S., Sovilj-Nikic, S., Chwalcuk, T.

QUALITY CONTROL OF COATINGS ON MODEL TOOLS FOR TEETH MACHINING

Abstract: *The improvement of cutting tools is one of the key priorities of the economy. Modern production cannot be imagined without the use of high-quality cutting tools, because they are necessary for efficient production. The evolution of methods for coating enabled the evolution of improved cutting tools. In many companies, control of coating quality is carried out by visual inspection or by checking the hardness of the coating. Taking the frequent difficulties in coating technology into consideration, which may lead to bad affixture of coating with the basic material, there is a necessity for the introduction of appropriate methods of control of coatings quality. This paper presents the results of measurements of tribological characteristics of coatings on model tools for teeth machining as well as their analysis.*

Key words: *tools for teeth machining, tribology, coatings, quality, coatings characterization*

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



41. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2014.

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

Janjić, G., Mrkić Bosančić, M., Tanasić, Z., Kosec, B. PRIMJENA AHP METODE U IZGRADNJI SISTEMA ZA PRAĆENJE EFEKTIVNOSTI ORGANIZACIJE	4.1
Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N., Belović, D. INOVACIJE KAO KLJUČNI FAKTOR PRIVREDNOG RASTA I RAZVOJA SRBIJE.....	4.7
Marković, V., JAKOVLJEVIĆ, Ž. SEGMENTACIJA JEDNE KLASJE POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA	4.13
Tanasić, Z., Janjić, G., Borbek, M., Soković, M. NOVI MODELI ORGANIZACIJE I ISO/CD 9001:2015.....	4.23





Janjić, G., Mrkić Bosančić, M., Tanasić, Z., Kosec, B.¹⁾

PRIMJENA AHP METODE U IZGRADNJI SISTEMA ZA PRAĆENJE EFEKTIVNOSTI ORGANIZACIJE

Rezime

Sve više organizacija prihvata strategijski koncept upravljanja u cilju bržeg odgovora na česte promjene okruženja. U tom smjeru mijenjali su se i standardizovani sistemi upravljanja dajući sve veći značaj analizi okruženja i same organizacije, strategijskomom planiranju, te razumjevanju potreba i očekivanja svih zainteresovanih strana. Strategijski koncept upravljanja od organizacija traži, pored efikasnosti koja je bila cilj tradicionalnog koncepta, da bude efektivna usmjeravajući sve svoje napore ka realizaciji postavljenih ciljeva. Za organizaciju je veoma bitno da u okviru svojih procesa identifikuje relevantna mjerila putem kojih će pratiti realizaciju postavljene strategije. Neadekvatan izbor mjerila, kao osnovni problem neuspjeha primjene strategijskog koncepta upravljanja u poslovnim sistemima mogao bi se u većoj mjeri umanjiti ili otkloniti u potpunosti primjenom metoda višekriterijskog odlučivanja.

Ključne reči: Strategijski koncept upravljanja, AHP metoda, BSC metoda

1. UVOD

Do osamdesetih godina 20. vijeka upravljanje poslovnim sistemom i mjerenje uspješnosti poslovanja zasnivalo se na tradicionalnoj metodi mjerenja i analize finansijskih parametara. Ovo je bilo u skladu sa filozofijom upravljanja tog vremena u kojem se konkurencija savladavala obimom proizvodnje kroz ponudu jeftinih i standardizovanih proizvoda i usluga, a finansijske mjere su pružale standarde uspjeha. Zbog promjena uslova poslovanja koje su krajem prošlog vijeka izazvale pojava i razvoj informatičke tehnologije, globalizacija i hiperkonkurencija, došlo je do zamjene koncepta konvencionalnog upravljanja konceptom strategijskog upravljanja. U pitanju je jedan nov način razmišljanja pri donošenju odluka usmjeren na budućnost organizacije i na efektivnu implementaciju donesenih odluka. Primjena novog koncepta upravljanja dovodi do promjene fokusa sa procesa i funkcija na strategiju koja ima za cilj stvaranje vrijednosti na osnovu visoko personalizovanog proizvoda. U tom smjeru mijenjali su se i standardizovani sistemi upravljanja dajući sve veći aspekt analizi okruženja i same organizacije, strateškom planiranju, te razumjevanju potreba i očekivanja svih zainteresovanih strana.

Organizacije više nisu u mogućnosti da ostvare konkurentsku prednost samo angažovanjem i upotrebom materijalnih resursa jer doba informacija i znanja zahtijeva nove sposobnosti i stručnosti za postizanje konkurentskog uspjeha. Mogućnosti organizacije da što bolje upravlja svojim nematerijalnim resursima postale su ključne za kreiranje i održavanje konkurentске prednosti. Jedna od bitnijih izmjena u odnosu na tradicionalni koncept je i praćenje performansi na bazi nefinansijskih mjerila koja su više okrenuta budućnosti organizacije. Za organizaciju je veoma bitno da u okviru svojih procesa identifikuje relevantna mjerila putem kojih će pratiti realizaciju postavljene strategije, što nije nimalo lak zadatak.

Koncept strateškog upravljanja, koji je već dao značajne rezultate u poslovnim sektoru, posljednjih desetak godina pronalazi svoje mjesto i u državnoj upravi. Adekvatna primjena navedenog koncepta upravljanja može doprinijeti značajnom unapređenju nivoa pružanja usluga, efikasnosti i delotvornosti državnih službenika te većoj transparentnosti i fiskalnoj disciplini javnih finansija.

¹⁾ Doc. dr Goran Janjić, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (goran.janjic@unibl.rs), Mr Maja Mrkić Bosančić, Ministarstvo industrije, energetike i rudarstva Republike Srpske (maja_mb@hotmail.com), doc. dr Zorana Tanasić, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (zorana.tanasic@unibl.rs), prof. dr Borut Kosec, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (borut.kosec@omm.ntf.uni-lj.si).

2. STRUKTURA MEĐUNARODNIH STANDARDA SISTEMA UPRAVLJANJA

ISO/IEC² Direktive definišu osnovne procedure koje treba slijediti u razvoju međunarodnih standarda, a objavljene su u dva dijela [1]:

- Dio 1: Procedure za tehničke poslove,
- Dio 2: Pravila za strukturu i izradu Međunarodnih standarda.

ISO/IEC Zajednički tehnički komitet (Centar za edukaciju) objavio je 2012. godine dodatak za Dio 1 pod nazivom Konsolidovani ISO dodatak (*Consolidated ISO Supplement*), koji sadrži procedure koje nisu uobičajene za sve ISO/IEC regulative. Navedene procedure treba da slijede ISO i IEC u obavljanju svojih tehničkih poslova (prvenstveno razvoja i održavanja međunarodnih standarda kroz aktivnosti tehničkih komiteta i njihovih pratećih tijela). Ovaj osnovni dokument uveo je u ISO praksu izdavanje dodataka (Supplement) i Aneksa (Annex). Aneks SL u okviru Konsolidovanog ISO dodatka daje prijedloge vezane za izradu standarda sistema upravljanja kroz identifikaciju njihove strukture (Tabela 1) i principa za njihov razvoj.

1	Obim
2	Normativne reference
3	Termini i definicije
4	Kontekst organizacije
5	Liderstvo
6	Planiranje
7	Podrška
8	Operacije
9	Evaluacija performansi
10	Poboljšanja

Iz strukture standarda sistema upravljanja datog u Aneksu SL za proces strateškog upravljanja vezana su sljedeća poglavlja: 4. Kontekst organizacije, 6. Planiranje i 9. Evaluacija performansi. Kontekst organizacije obuhvata zahtjeve za analizom internog i eksternog okruženja organizacije i identifikacijom potreba i očekivanja svih zainteresovanih strana kao osnovom za izradu strategije organizacije. Poglavlje 6. daje zahtjeve za definisanje strategije (identifikaciju strateških ciljeva i mjera za njihovu realizaciju) i njeno prevođenje u sistem konkretnih mjerila čija se realizacija sistematski prati i mjeri na osnovu zahtjeva datih u Poglavlju 9. Evaluacija performansi.

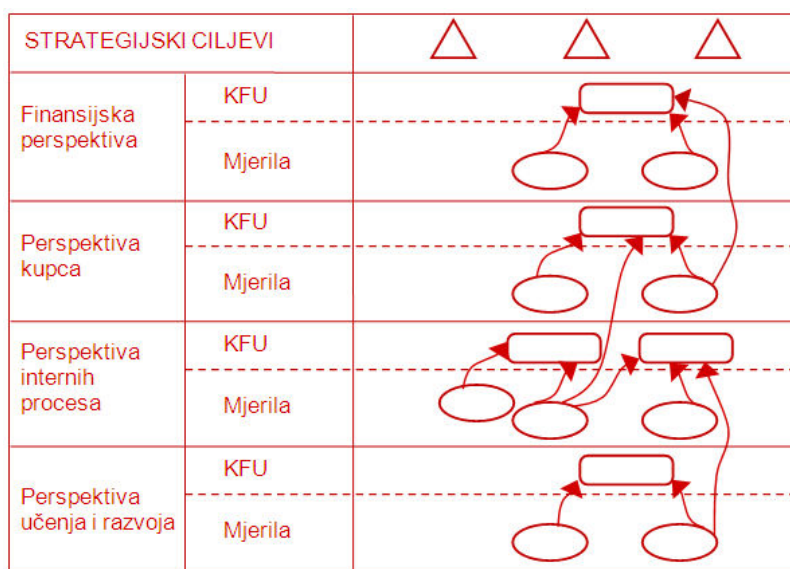
3. METODE ZA MJERENJE USPJEŠNOSTI POSLOVANJA

Kao odgovor na prilagođavanje novim uslovima poslovanja i potrebe praćenja nefinansijskih mjerila razvilo se i više različitih metoda mjerenja uspješnosti poslovanja kao što su: Balanced Scorecard, Six sigma, EFQM (European Foundation for Quality Management) model izvrsnosti, EVA (Economic Value Add), Malcolm Baldrige Award Criteria i dr. Za izgradnju sistema mjerila za praćenje efektivnosti organizacije u okviru ovog istraživanja korištena je Balanced Scorecard (BSC) metoda.

Balanced Scorecard obezbjeđuje da se vizija i strategija prevedu u sistem konkretnih ciljeva i mjerila čija se realizacija sistematski prati i mjeri. Treba napomenuti da BSC nije samo slučajna zbirka mjerila postavljenih u uravnotežene perspektive, nego je prije svega dio sistema strateškog upravljanja koji omogućuje transformaciju vizije i strategije u mjerljive kvantitativne i kvalitativne ciljeve uz uključivanje finansijskih i nefinansijskih mjerila. Na osnovu izvršene strateške analize, utvrđene vizije i misije, organizacija treba da identifikuje u okviru svih odabranih perspektiva kritične faktore uspjeha (KFU) i mjerne karakteristike (mjerila, performanse). Kritični faktori uspjeha ili generatori performansi su oni faktori, koji ako su ispunjeni omogućuju preduzeću da ostvari postavljene strateške ciljeve. Pri izboru perspektiva najčešće se koristi "Koncept Kaplana i Nortona" koji preporučuje korišćenje perspektive kupca, unutrašnjih procesa, učenja i razvoja i finansijske perspektive [2]. Ipak svako preduzeće mora poći od svoje specifične situacije u izboru potrebnih perspektiva što su preporučili i sami autori datog koncepta.

² ISO – Međunarodna organizacija za standardizaciju, IEC – Međunarodna elektrotehnička komisija

Za sve faktore uspjeha unutar datih perspektiva organizacija treba definisati barem jednu mjernu karakteristiku (mjerilo) koja se može izraziti numeričkom vrijednošću – varijablom ili opisno – atributom. Konkretno, mjerila možemo opisati kao standarde koje je moguće kvantifikovati i koje koristimo kako bismo ocijenili učinak u odnosu na očekivane rezultate. Za svaku mjernu karakteristiku daje se opis i frekvencija mjerenja, mjerno sredstvo, ciljne vrijednosti (granice) koje treba da posluže za upoređivanje sa izmjerenom vrijednošću. Kritični faktor uspjeha je ostvaren kada se sve njegove karakteristike nalaze u postavljenim granicama. Nakon izbora kritičnih faktora uspjeha i mjerila u svim perspektivama treba otkriti sve njihove međusobne veze unutar pojedinih perspektiva, a takođe i veze između faktora uspjeha i mjerila koji se nalaze u različitim perspektivama. Ove veze se predstavljaju strateškom mapom koja predstavlja grafički prikaz svega onoga što preduzeće mora uraditi u svakoj postavljenoj perspektivi da bi provelo svoju strategiju (Slika 1).



Slika 1. Stratejska mapa

Uspostavljeni uravnoteženi sistem mjerila se sa viših nivoa dekomponuje na niže nivoe organizacionih jedinica. Preko identifikovanih mjerila se konstantno prati ostvarivanje postavljenih ciljeva, a time i efektivnost samog preduzeća, koje je uspješno samo ako ostvaruje svoje ciljeve u svim perspektivama istovremeno.

4. PRIMJENA AHP U IZBORU MJERILA

Korišćenjem metoda višekriterijskog odlučivanja u izradi strateške mape BSC, obezbjedio bi se sistematičan i nepristrasan proces izbora mjerila. Ovim radom se predlaže primjena metode analitičkog hijerarhijskog procesa – AHP (Analytic Hierarchy Process) zbog njenog lakog razumijevanja i jednostavne primjene u rješavanju navedenog problema. Za dati problem može se koristiti i metoda ANP (Analytic Network Process) koja koristi kompleksnije proračune, a čiji je AHP samo poseban slučaj.

Metodu analitički hijerarhijski proces (Analytic Hierarchy Process – AHP) razvio je Tomas Sati (Thomas Saaty) početkom sedamdesetih godina dvadesetog vijeka. Ova metoda daje mogućnost da se problem raščlani u hijerarhiju potproblema koji se mogu jednostavnije shvatiti i subjektivno procijeniti. Subjektivne procjene se prevode u numeričke vrijednosti i zatim obrađuju u cilju rangiranja svake alternative na numeričkoj skali. Metodologija AHP je objašnjena kroz sljedeće korake [3]:

Korak 1. Problem se raščlanjuje u hijerarhiju sa osnovnim ciljem na vrhu i kriterijima, potkriterijima (po potrebi) i alternativama na nižim nivoima hijerarhije.

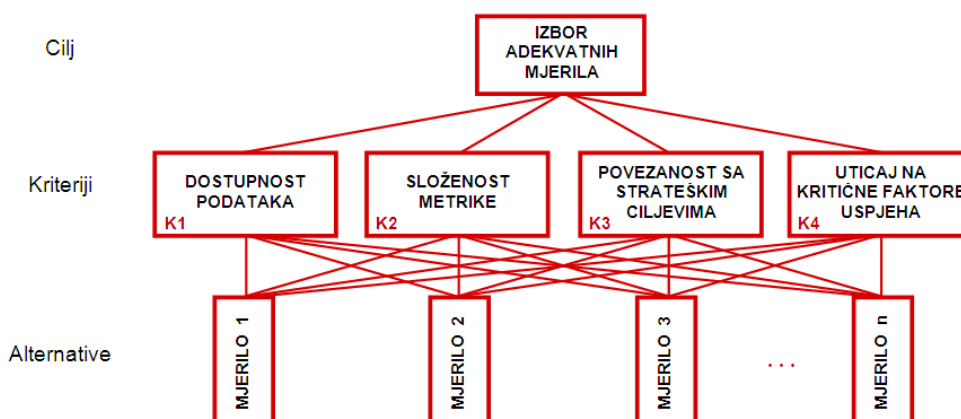
Korak 2. Donosioci odluke izražavaju svoj sud o dominantnosti u vidu vrijednosti sa *Satijeve skale relativne važnosti* kroz poređenje parova elemenata na svakom nivou hijerarhijske strukture u odnosu na njihov doprinos elementima neposredno višeg nivoa koji predstavljaju kriterije za poređenje.

Korak 3. Na osnovu matematičkog modela izračunavaju se lokalni prioriteti (težine) svakog kriterija/potkriterija u modelu, a zatim se određuje redoslijed važnosti (učesća) alternativa u okviru svakog posmatranog kriterija. Učešće svake alternative množi se sa težinom posmatranog kriterija/potkriterija a

potom se dobijene vrijednosti sabere za svaku alternativu posebno. Dobijene vrijednosti predstavljaju težine (prioritete) posmatranih alternativa u modelu.

Korak 4. Provođenje interaktivne analize osjetljivosti kojom se analizira uticaj promjene ulaznih podataka na izlazne rezultate.

Pri izradi AHP modela za izbor mjerila svim perspektivama je dat jednak značaj, tako da one nisu imale nikakvog direktnog uticaja na izbor mjerila, čime je ispoštovan i kriterij uravnoteženosti perspektiva. Prije izbora alternativa menadžerski tim treba definisati kriterije za izbor i skup mjerila (alternativa) u svakoj perspektivi od kojih će se u procesu odlučivanja putem AHP metode sintetizovati konačna lista mjerila. Na Slici 2. prikazan je AHP model, razvijen za podršku procesu donošenja odluke o izboru najrelevantnijih mjerila u okviru svake od postavljenih perspektiva posebno [4].



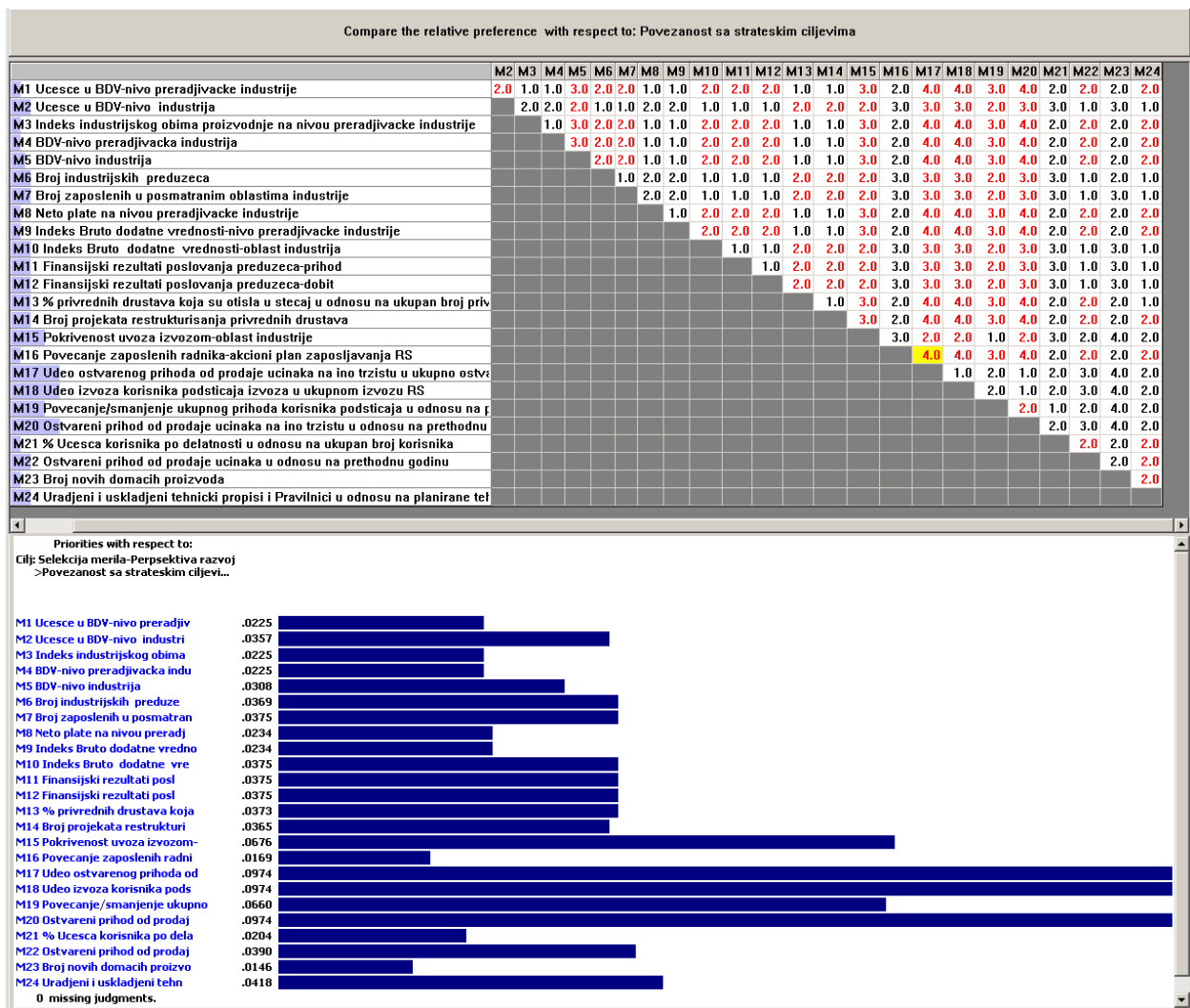
Slika 2. AHP model za izbor mjerila u perspektivama

Za izbor alternativa (koje u ovom slučaju predstavljaju mjerila) uzeta su sljedeća četiri kriterija:

- *Dostupnost podataka (K1)*. Odnosi se na mogućnost prikupljanja podataka i količinu resursa koji će se za to morati utrošiti. Prilikom odabira mjerila treba uvijek imati u vidu da troškovi prikupljanja podataka budu manji od koristi koje se pomoću njih treba da postignu.
- *Složenost metrike (K2)*. Kod ovog kriterija posmatra se komplikovanost i razrađenost postojeće metrike, postojanje standarda za mjerenje i mogućnost poređenja mjerila sa drugim organizacijama.
- *Povezanost sa strateškim ciljevima (K3)*. Analizira se koliki uticaj odabrano mjerilo ima na realizaciju strateških ciljeva. Odabir mjerila koja nemaju uticaja na ostvarivanje strategije organizacije dovode do nejasnoća, problema u komunikaciji i trošenja dragocjenih resursa u nastojanju da se postignu ciljne vrijednosti mjerila koje ne utiču na postizanje strateških ciljeva.
- *Uticaj na kritične faktore uspjeha (K4)*. Pri poređenju mjerila i dodjeljivanja značaja mjerilima posmatra se broj kritičnih faktora uspjeha na koje mjerilo djeluje u okviru svih perspektiva na strateškoj mapi i intenzitet (značaj) uticaja pojedinog mjerila na postizanje kritičnih faktora uspjeha.

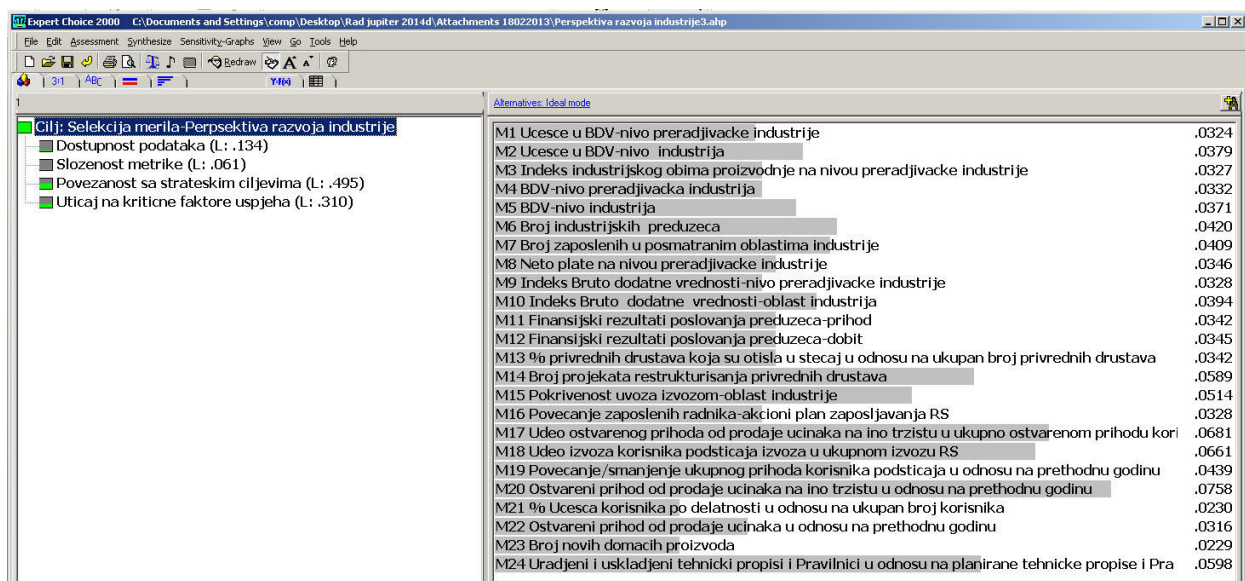
Implementacija razvijenog AHP modela izvršena je u Resoru za industriju Ministarstva industrije, energetike i rudarstva Republike Srpske čija je osnovna djelatnost kreiranje i provođenje strategija i programa ekonomskih politika iz oblasti industrije i praćenje njihovog sprovođenja u cilju obezbjeđivanja uslova za industrijski razvoj i konkurentnost. Pri tome je kao podrška u Izboru mjerila korišćen softverski paket *Expert Choice* koji u potpunosti podržava AHP metodu.

Prvo korak je rangiranje kriterija prema njihovom pojedinačnom uticaju na ostvarenje cilja – izbora adekvatnih mjerila. Rangiranje je vršeno poređenjem svih mogućih parova kriterija u skladu sa Satijevom skalom relativne važnosti, čije su vrijednosti zatim unesene u matricu poređenja prioriteta. Na osnovu matrice poređenja prioriteta kriterija i matematičkog modela AHP metode proračunati su lokalni prioriteti (težine) svakog kriterija u modelu koji će vrijediti za sve perspektive. Zatim su u svakoj od četiri perspektive, po istoj metodologiji, proračunate važnosti (učesće) alternativa – mjerila u okviru svakog posmatranog kriterija. Na Slici 3. data je matrica poređenja prioriteta i važnost mjerila u odnosu na kriterij K3 – Povezanost sa strateškim ciljevima u Perspektivi razvoja industrije.



Slika 3. Važnost mjerila u odnosu na kriterij K3 u Perspektivi razvoja industrije

U okviru perspektiva množi se učešće svakog mjerila u odnosu na pojedini kriterij sa težinom posmatranog kriterija i potom se dobijene vrijednosti sabere za svako mjerilo posebno. Vrijednosti koje se dobiju predstavljaju važnost posmatranih mjerila u datim perspektivama i služe kao osnovni parametar za izbor mjerila (Slika 4. i Slika 5.)



Slika 4. Proračunati prioriteta mjerila u Perspektivi razvoja industrije

<p>Cilj: Selekcija mjerila-Perspektiva korisnika</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dostupnost podataka (L: .134) ■ Jednostavnost proračunavanja (L: .061) ■ Povezanost sa strateskim ciljevima (L: .495) ■ Uticaj na kritične faktore uspjeha (L: .310) 	M33 Povećanje dobijenih podsticajnih sredstava u odnosu na prethodnu godinu .1941 M34 Anкета-zadovoljstvo lokalnom zajednicom .0566 M35 Opravdane reklamacije korisnika u odnosu na ukupan broj reklamacija .0935 M36 Prosečna neto plata u industriji .0857 M37 Istraživanje potreba tržišta (potrebe i zahtevi preduzeća, organizacija i institucija) .1579 M38 Rast zaposlenosti usljed podsticaja za zaposljavanje .1471 M39 Rast zaposlenosti u posmatranim oblastima industrije u odnosu na prethodnu godinu .1146 M40 Rast zaposlenosti u prerađivačkoj industriji u odnosu na prethodnu godinu .0752 M41 Rast zaposlenosti usljed podsticaja za restrukturisanje .0752
<p>Cilj: Selekcija mjerila-Perspektiva internih procesa</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dostupnost podataka (L: .134) ■ Jednostavnost proračunavanja (L: .061) ■ Povezanost sa strateskim ciljevima (L: .495) ■ Uticaj na kritične faktore uspjeha (L: .310) 	M25 Realizacija planiranih mjera i aktivnosti .1836 M26 Prihvaceni prijedlozi za poboljšanje od strane zaposlenih u odnosu na ukupan broj prijedlozi .0658 M27 Realizacija projekata po osnovu kojih su odobrene subvencije za podsticaj izvoza .2238 M28 Realizacija sredstava pomoci privrednim subjektima za pokretanje stecajnog postupka .0773 M29 Realizacija projekata po osnovu kojih su odobrene subvencije za restrukturisanje privred .1004 M30 Realizacija projekata po osnovu kojih su odobrene subvencije za zaposljavanje .1291 M31 Dobijeni odgovori i misljenja u odnosu na broj razmjenjenih akata .1151 M32 Zajednički projekti u odnosu na ukupan broj projekata resora .1049
<p>Cilj: Selekcija mjerila-Perspektiva internog razvoja</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dostupnost podataka (L: .134) ■ Jednostavnost proračunavanja (L: .061) ■ Povezanost sa strateskim ciljevima (L: .495) ■ Uticaj na kritične faktore uspjeha (L: .310) 	M42 Nabavljena tehnička oprema u odnosu na planiranu nabavku opreme .0866 M43 Broj sati na obukama (po zaposlenom) u odnosu na ukupan broj održanih obuka .1147 M44 LD po zaposlenom .1211 M45 Prosečna ocjena zaposlenih u Resoru industrije .1798 M46 Odsutnost sa posla u odnosu na broj radnih dana .2724 M47 Popunjena radna mjesta od planiranog broja (po trenutnoj sistematizaciji) .2254

Slika 5. Proračunati prioriteta mjerila u perspektivama korisnika, internih procesa i internog razvoja

Na osnovu liste prioriteta dobijenih primjenom AHP metode izvršena je selekcija predloženih merila po perspektivama. U Perspektivi razvoja industrije odbačena su mjerila M1, M3, M4, M9, M11, M12, M13, M16, M21, M23, u Perspektivi korisnika mjerilo M34, u Perspektivi internih procesa odbačena su merila M26 i M28 i u perspektivi internog razvoja mjerilo M42.

9. ZAKLJUČAK

Neadekvatan izbor mjerila, kao osnovni problem neuspjeha primjene strategijskog koncepta upravljanja, može se u većoj mjeri umanjiti primjenom metoda višekriterijskog odlučivanja koje obezbjeđuju sistematičan i nepristrasan proces izbora mjerila. Pri ovome treba naglasiti da ne postoje utvrđena pravila koja propisuju ukupan broj mjerila na strateškoj mapi ili u pojedinim perspektivama, nego organizacije same moraju da donesu odluku o izboru najvažnijih mjerila kojima će adekvatno moći opisati svoju strategiju.

10. LITERATURA

- [1] ISO/IEC Directives, <http://www.iso.org/directives>, septembar, 2014.
- [2] Kaplan, R., Norton, D.: *Upravnoteženi sistem kazalnikov: The Balanced Scorecard*, Gospodarski Vestnik, Ljubljana, 2000.
- [3] Bhushan, N., Rai, K.: *Strategic Decision Making - Applying the Analytic Hierarchy Process*, Springer-Verlag, London, 2004.
- [4] Janjić, G., Tanasić, Z., Benea, M.: *Improvement of the System of Business Success Measurement in a Company Using Multicriteria Decision-Making Method*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tome X, Fascicule 1, 159–165, Hunedoara, 2012.

Janjić, G., Mrkić Bosančić, M., Tanasić, Z., Borut, K.

THE APPLICATION OF AHP METHOD IN THE DEVELOPMENT OF AN ORGANIZATION'S EFFECTIVENESS MONITORING SYSTEM

Abstract: More and more organizations are accepting the strategic concept of management with an aim to respond faster to frequent changes in surroundings. To that end, standardized management systems changed giving greater importance to the analysis of surroundings and the very organization, strategic planning, and understanding the needs and expectations of all stakeholders. Besides being efficient, which was the goal of the traditional concept, strategic management concept requires from an organization to be effective by directing all of its efforts to the realization of strategic goals. It is very important for an organization to identify relevant measures within its processes, with which it will monitor the implementation of the set strategy. Inadequate selection of measures, as the main problem of the failure of application of strategic management concept in business systems, could be decreased in greater amount or completely eliminated with the application of the method of multiple criteria decision making.

Key words: Strategic concept of management, AHP method, BSC method



Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N., D. Belović¹

INOVACIJE KAO KLJUČNI FAKTOR PRIVREDNOG RASTA I RAZVOJA SRBIJE

Rezime

Dinamičan preduzetnički sektor, naročito preduzeća orijentisana ka razvoju i difuziji inovacija, prepoznat je kao ključni faktor privrednog rasta i razvoja. Ovaj sektor se sve više oslanja na istraživačko-razvojne aktivnosti i komercijalizaciju njihovih rezultata. Uspostavljanje pravnih, regulatornih i institucionalnih uslova za razvoj proizvodnog preduzetništva zasnovanog na inovacijama je uslov za privredni oporavak Srbije.

Ključne reči: inovacije, konkurentnost, privredni rast i razvoj.

1. UVOD

U kompleksnom i dinamičnom savremenom poslovnom okruženju inovativnost i inovacije postaju ključni faktor tržišne konkurentnosti i dinamičnog rasta mikro, malih i srednjih preduzeća, velikih poslovnih sistema i ekonomije uopšte.

Generalno, inovacije predstavljaju uspešno uvođenje na tržište novog ili unapređenog proizvoda, procesa ili usluge. Ovakvu definiciju inovacija potrebno je dopuniti s obzirom da se pod inovacijama podrazumevaju i inkrementalne, male promene koje mogu značajno da povećaju produktivnost i unaprede kvalitet proizvoda, a često su izvor strukturnih promena i ekonomskog rasta.

Prema Organizaciji za ekonomsku saradnju i razvoj (*Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD*) i Oslo priručniku za merenje inovacija definisana su četiri osnovna tipa inovacija:

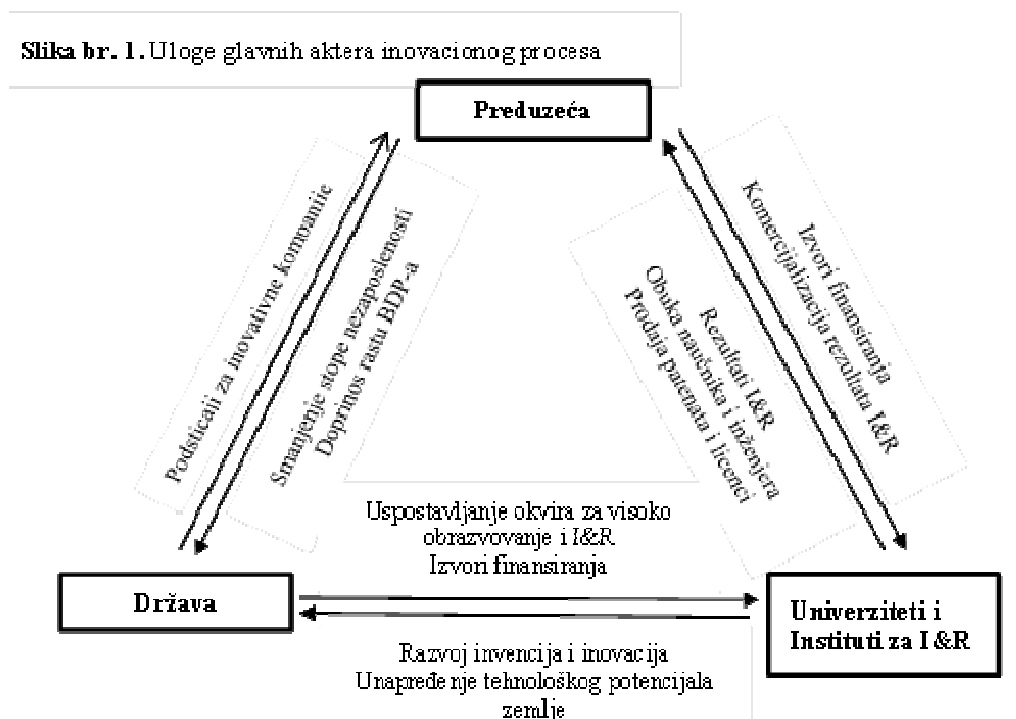
1. **Inovacije proizvoda** – uvođenje novog ili značajno poboljšanog proizvoda ili usluge u odnosu na njihove karakteristike ili namenu (npr. značajna poboljšanja tehničkih specifikacija, komponenti, materijala, softvera i drugih funkcionalnih karakteristika).
2. **Inovacije procesa** – uvođenje nove proizvodne tehnologije koja ubrzava proces proizvodnje i/ili povećava preciznost i kvalitet proizvodnje i/ili značajno smanjuje njene troškove.
3. **Inovacije u marketingu** – uvođenje novih marketinških metoda koji uključuju značajne promene u dizajnu proizvoda i pakovanju, plasmanu i promociji proizvoda ili cenama, a sve u cilju boljeg zadovoljenja potreba kupaca, otvaranja novih tržišta, boljeg pozicioniranja na postojećim tržištima itd.
4. **Inovacije u organizaciji** – uvođenje novih organizacionih metoda u poslovanju preduzeća, organizaciji radnog mesta ili spoljnim odnosima u cilju ostvarenja boljih poslovnih performansi (npr. smanjenje administrativnih troškova ili troškova transakcija, rasta produktivnosti rada itd.).

Pored navedena četiri tipa inovacija u literaturi se često ističe i značaj **inovacija u oblasti upravljanja** koje stvaraju promene u funkcionisanju poslovnog sistema i imaju za rezultat rast

¹ Asistent MSc Sonja Josipović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (sjosipovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Slobodan Pokrajac, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (spokrajac@mas.bg.ac.rs), prof. dr Nikola Dondur, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ndondur@mas.bg.ac.rs), Mr Duško Belović, Investment Project, Beograd, (ipginvestment@gmail.com).

produktivnosti i unapređenje kvaliteta proizvoda, usluga i procesa rada. Iako govorimo o različitim tipovima inovacija, oni u praksi nisu međusobno isključivi i obično su usko povezani.

Inovacioni proces prolazi kroz više faza, počev od fundamentalnih ili baznih naučnih istraživanja i zaključno sa pojavom unapređenih i novih proizvoda i procesa na tržištu. U ovom procesu uključeni su brojni akteri koji omogućavaju dovođenje invencije do nivoa komercijalizacije. Na slici br. 1 prikazane su uloge glavnih aktera inovacionog procesa.²



Izvor: United Nations Economic Commission for Europe (2012) „Fostering Innovative Entrepreneurship: CHALLENGES AND POLICY OPTIONS“, UNITED NATIONS New York and Geneva, Pp. 9.

Glavni pokretači komercijalizacije istraživačko-razvojnih aktivnosti i rezultata su [8]:

1. **Obim istraživačko-razvojnih aktivnosti** od koga zavisi stepen komercijalizacije invencija i inovacija na tržištu. Broj univerziteta i istraživačkih instituta u zemlji, broj i kvalifikovanost istraživača (u državnim istraživačkim institutima i privatnom sektoru), obim investicija za istraživanje i razvoj iz javnih i privatnih izvora i njihova efikasnost (objavljeni naučni radovi i njihova citiranost), povezanost istraživačkih instituta sa privredom su samo neki od faktora koji utiču na obim istraživačko-razvojnih aktivnosti u zemlji.
2. **Raspoloživi ljudski resursi** za načno-istraživački rad. Dostupnost visoko kvalifikovanih kadrova zavisi pre svega od kvaliteta obrazovnog sistema (posebno visokog obrazovanja), investicija države u obrazovanje i broja upisanih na visokoškolske ustanove.
3. **Regulatorni i institucionalni ambijent** pogodan za razvoj i širenje inovacija, što podrazumeva: transparentnost i odgovornost u javnoj potrošnji i investicijama, zaštita imovinskih prava (uključujući prava intelektualne imovine), nezavisno sudstvo, pojednostavljene procedure za registraciju i poslovanje preduzeća, transparentnost poreske uprave i razumne poreske stope, povoljni izvori finansiranja dostupni preduzećima bez obzira na njihovu veličinu, povoljna investiciona klima³ za priliv stranih investicija itd.
4. **Uspostavljanje jakih veza između privrede, nauke i istraživanja.** Ove veze se obezbeđuju kroz javne, privatne i javno-privatne organizacije koje podržavaju preduzetničke inicijative

² Da bi se jedan deo invencija ostvario u vidu nekih inovacija, potrebno je da postoje pre svega preduzetnici kao potencijalni inovatori.

³ Za povoljnu investicionu klimu potrebno je obezbediti ekonomsku i političku stabilnost (sigurnost ulaganja), povoljan zakonski okvir i nizak nivo korupcije u zemlji.

kroz komercijalizaciju njihovih invencija, povezujući ih sa tržištem i obezbeđenjem povoljnih izvora finansiranja za njih.

5. **Otvorenost prema stranim tehnologijama i prekograničnoj saradnji u oblasti inovacija.** Istraživačko-razvojna aktivnost se sve više odvija preko nacionalnih granica, tako da sposobnost usvajanja i prilagođavanja inostranim tehnologijama postaje značajan pokretač razvoja inovacija, posebno za zemlje u razvoju. Učešćem na međunarodnim istraživačko-razvojnim mrežama i transferom inostrane tehnologije, zemlje u razvoju mogu da „zavire“ u znanje akumulirano u inostranstvu i tako ubrzaju proces kreiranja inovacija i unaprede njihov kvalitet.
6. **Sposobnost korišćenja informacionih i komunikacionih tehnologija** i njihova implementacija u aktivnosti proizvodnog procesa kako bi se kreiralo pogodnije poslovno okruženje za razvoj preduzetništva.

2. MODELI PROCESA INOVACIJA

Put od ideje do njene primene i komercijalizacije veoma je dug, težak i skup i podrazumeva postojanje brojnih sistemskih, organizacionih, finansijskih, a pre svega kadrovskih pretpostavki. Od pedesetih godina dvadesetog veka razvijeni su brojni modeli procesa inovacija, pri čemu svaki ima za cilj da objasni i/ili usmeri inovacioni proces unutar industrijskih kompanija. Razvijene modele možemo svrstati u sledećih pet generacija:

1. Prva generacija modela inovacija: model „*Technology push*“

Prvi modeli inovacija, tzv. modeli „*Technology push*“ (modeli guranja tehnologije), su jednostavni linearni modeli koji tretiraju inovacije kao kontinualan proces koji se odvija u neupadljivim fazama. Prema ovim modelima naučno otkriće prethodi i „gura“ tehnološke inovacije preko primenjenog istraživanja, inženjeringa, proizvodnje i marketinga. Ovakvi modeli su razvijeni kako bi se u kompanijama i vladama opravdali dodatni troškovi istraživanja i razvoja, s obzirom na to da se smatralo da će dovesti do većih inovacija i, zauzvrat, intenzivnijeg ekonomskog rasta. Državne politike koje su se odnosile na inovacije insistirale su na postojanju dodatnih intervencija kako bi se povećao obim istraživačko-razvojnih aktivnosti (npr. davanje subvencija i povoljnih kredita za istraživanje i razvoj).

2. Druga generacija modela inovacija: model „*Market pull*“

Druga generacija modela inovacija, tzv. modeli „*Market (demand) pull*“ (privlačenje potreba) bili su takođe linearni modeli. Oni naglašavaju ulogu tržišta i istraživanja tržišta u cilju identifikacije i odgovora na potrebe potencijalnih kupaca, kao i usmeravanja istraživačko-razvojnih aktivnosti ka njihovim potrebama. Kod ovih modela, tržište je glavni izvor ideja za istraživanje i razvoj, a uloga istraživanja i razvoja je da izađe u susret potrebama tržišta.

Prve dve generacije modela procesa inovacija posmatraju kao niz diskretnih aktivnosti koje slede jedna za drugom, pri čemu je svaka aktivnost ili faza izdvojena jedna od druge. Međutim, primeri u praksi pokazuju da je takva sekvencijalna priroda retko validna, a od faze do faze postoji dosta povratnih informacija, kao i uzajamna zavisnost među njima.

3. Treća generacija modela inovacija: „*Interaktivni model*“

Prema rezultatima brojnih istraživanja navedeni linearni modeli (*technology push* and *market pull*) su ekstremni i atipični primeri stvaranja inovacija u oblasti industrije. Za razliku od njih Interaktivni model posmatra inovacioni proces kao jedan logičan, sekvencijalan, ali ne obavezno i kontinualan proces, koji se može podeliti na niz odvojenih, ali interaktivnih i međusobno zavisnih faza. Takođe, inovacioni proces se posmatra i kao složena mreža komunikacionih puteva unutar i van industrijskog preduzeća, koja povezuje preduzeće sa širom naučnom i tehnološkom zajednicom i tržištem.

4. Četvrta generacija modela inovacija: „*Simultani model*“

Četvrta generacija modela inovacija podrazumeva da se sa modela koji se sastoje od jasno izdvojenih, sekvencijalnih faza, prelazi na novi simultani model, koji odražava sve veća preklapanja i pojavu paralelnih aktivnosti između faza inovacionog procesa. Ovakav model inovacija omogućava ne samo bolju integrisanost organizacije (ostvarenje razvoja novog proizvoda i/ili procesa putem simultanog rada različitih funkcionalnih oblasti preduzeća), već i njenu spoljnu integrisanost sa aktivnostima koje se odvijaju u drugim preduzećima (uključujući dobavljače, kupce, univerzitete, vladine agencije itd.). Takođe, može se smatrati da ovaj model ruši stare, tradicionalne barijere između razvoja proizvoda i razvoja procesa.

5. Peta generacija modela inovacija: „*Integrirani i umreženi model*“

Peta generacija modela inovacija stavlja akcenat na učenje koje se odvija unutar i između kompanija, iz čega sledi da je inovacija generalno i fundamentalno proces distribuiranog umrežavanja. Ova generacija

modela takođe se oslanja na korišćenje informaciono komunikacionih tehnologija, a sve u cilju povećanja brzine i efikasnosti razvoja novih proizvoda. Osnovna razlika između četvrte i pete generacija modela, prema Rotvelu, bila je upotreba elektronskog pribora koji funkcioniše u realnom vremenu, i to u cilju ubrzanja i automatizacije procesa inovacije u okviru kompanije. U novije vreme, neke verzije poslovnog procesa reinženjeringa takođe naglašavaju primenu sistema informacionih tehnologija u korporativnim strategijama i inovacijama.

Predstavljeni modeli procesa inovacija pretpostavljaju preduzeća koja imaju status lidera (ili ka tome teže) i koja spadaju u grupu velikih (imaju izdvojeno odeljenje za istraživanje i razvoj), pre nego mala i srednja preduzeća koja imaju manje formalne procese (bez zvaničnog odeljenja za istraživanje i razvoj). Takođe, većina modela se bavi aktivnostima usredsređenim na istraživanje i razvoj, pri čemu se inovacija definiše u strogom smislu kao proizvod ili proces koji je nov u svetu ili na tržištu. Ovakvi modeli nisu adekvatni, barem ne u predstavljenoj formi, za primenu u većini preduzeća u zemljama u razvoju. U modelima „sustizanja“ koji su karakteristični za poslovanje preduzeća u zemljama u razvoju ključni faktor konkurentnosti su inovacije koje se odvijaju na osnovu sitnih, inkrementalnih unapređenja postojećih procesa i/ili proizvoda i/ili usluga, i to usvajanjem tehnologije iz inostranstva.

Potrebno je napraviti razliku između inovacionih modela zemalja u razvoju i industrijski razvijenih zemalja, imajući u vidu inovacione resurse kojima ove dve grupe zemalja raspolažu. Prema Kimu [5] potrebno je inovacione modele karakteristične za industrijski razvijene zemlje preraditi (modifikovati) kako bi se kreirali inovacioni modeli koje bi uspešno primenjivala preduzeća u zemljama u razvoju. Kim je razvio inovacioni model namenjen zemljama u razvoju koji čine tri faze: kupovina inostrane tehnologije, usvajanje i unapređenje. U ranoj fazi industrijskog razvoja, preduzeća kupuju tehnologiju od industrijski razvijenih zemalja, u drugoj fazi razvijaju se proizvodi i procesi, dok se u poslednjoj (trećoj) fazi rezultati istraživačko-razvojnih aktivnosti koriste za kreiranje novih proizvodnih linija. Iz navedenog možemo zaključiti da se faze inovacionog procesa karakteristične za industrijski razvijene zemlje „preokreću“ tako da inovacioni proces u zemljama u razvoju kreće od zrelih ka ranijim fazama.

Prema Kimovom modelu u ranoj fluidnoj fazi stopa inovacije procesa je visoka, dok je stopa inovacije proizvoda niska. Za razliku od industrijski razvijenih zemalja⁴, preduzeća u zemljama u razvoju mogu da unaprede svoju produktivnost usvajanjem postojećih tehnologija.⁵ Nepredvidivi faktori, poput uticaja državne politike i društveno-ekonomskog orkruženja, od ključnog su značaja za razvoj i širenje inovacija u zemljama u razvoju.

Kim i Li su napravili prikaze napretka inovacija u preduzećima u Koreji, gde se vidi da je inovacija proizvoda najvažnija za sustizanje kod proizvodnje u malim serijama (npr. veliki proizvođači u brodarskoj industriji i proizvođači mašina), dok je kod proizvodnje u velikim serijama i masovne proizvodnje (npr. elektronski aparati i proizvodnja automobila) bitna mešavina inovacija procesa i sposobnosti razvijanja novih proizvoda. [5]

3. ANALIZA INOVACIONOG POTENCIJALA SRBIJE

Svetski ekonomski forum (*World Economic Forum - WEF*) definiše nacionalnu konkurentnost kao skup institucija, politika i faktora koji određuju nivo produktivnosti zemlje. Sa jedne strane nivo produktivnosti određuje nivo ekonomskog napredka koji može da obezbedi privreda jedne zemlje, a sa druge strane stopu prinosa na investirana sredstva u privredu (kao osnovog pokazatelja stope privrednog prosperiteta). [2]

Indeks globalne konkurentnosti (*Global Competitiveness Index - GCI*) Svetskog ekonomskog foruma daje sveobuhvatan pogled na kritične faktore dostizanja produktivnosti i konkurentnosti nacionalne privrede. Indeks čini preko 90 varijabli⁶ koje su organizovane u 12 stubova konkurentnosti⁷, od kojih svaki stub

⁴ Kod industrijski razvijenih zemalja stopa inovacije proizvoda je visoka u ranoj fazi, dok je stopa procesa inovacija niska. U fazi tranzicije, dominantan dizajn biraju kupci na tržištu, a dobavljači počinju da se vezuju za specifične tehnološke procese. U trećoj fazi, konkurencija se u velikoj meri bazira na dodatnim poboljšanjima procesa, i to u meri kako dizajn proizvoda „sazreva“.

⁵ Za preduzeća u industrijski razvijenim zemljama izvori konkurentnosti su proizvodnja novih i različitih proizvoda koristeći sofisticirane proizvodne procese i inovativnost.

⁶ Koje se pojedinačno vrednuju na skali od 1 do 7 (1 – najlošija ocena, 7 – najbolja ocena).

⁷ Institucije, Infrastruktura, Makroekonomska stabilnost, Zdravlje i osnovno obrazovanje, Visoko obrazovanje i obuka, Efikasnost tržišta roba, Efikasnost tržišta rada, Razvoj finansijskog tržišta, Tehnološka pripremljenost, Veličina tržišta, Sofisticiranost poslovanja i Inovacije.

reprezentuje jedno polje kao važnu determinantu konkurentnosti. Srbija je, prema posljednjem izveštaju Svetskog ekonomskog foruma za period 2014-2015. godina, na 94 mestu po konkurentnosti u svetu⁸, što je skok za sedam mesta u odnosu na 2013. godinu. Prema ovom izveštaju Indeks globalne konkurentnosti Srbije iznosi 3,9 što je u poređenju sa 2013. godinom rast od 0,10. Posmatrano prema pojedinačnim indikatorima u odnosu na 2012. godinu Srbija je nazadovala u infrastrukturi, makroekonomskom okruženju, efikasnosti tržišta rada, razvoju finansijskih tržišta i sofisticiranosti poslovanja. Takođe, ključni faktori komercijalizacije istraživačko-razvojnih aktivnosti imaju veoma niske ocene: transparentnost javne politike (3,6), kvalitet obrazovnog sistema (3,8), kapacitet inovacija (3,0), kvalitet naučno-istraživačkih institucija (3,7), saradnja univerziteta i privrede u istraživanjima (3,2), raspoloživost naučnika i inženjera (3,9), ulaganja u istraživanje i razvoj (2,5), zaštita intelektualne imovine (2,3). U pogledu nivoa tehnološke opremljenosti napredak je ostvaren u domenu razvoja mreža za obezbeđivanje usluga mobilne telefonije i Interneta, dok su slabi rezultati ostvareni na poljima dostupnosti novih tehnologija (106 pozicija), obima stranih direktnih investicija i transfera tehnologije (108 pozicija) i nivoa apsorpcije novih tehnologija od strane preduzeća (127 pozicija).

Iako se po kriterijumu veličine BDP-a po glavi stanovnika Srbija (5.907 USD) trenutno nalazi u drugoj fazi ekonomskog razvoja (*efikasnošću vođena ekonomija*⁹), loš rang indikatora koji su karakteristični za prvu fazu razvoja ukazuje da je ona još uvek faktorima vođena ekonomija. Na primer, prema kvalitetu makroekonomske politike Srbija se nalazi na 129. mestu (2012. godina 115), prema kriterijumu institucija na 122 mestu (2012. godina 130), a prema stanju i razvijenosti infrastrukture na 77. mestu (2012. godina 77).

Prema poslednjem izveštaju Svetske organizacije za intelektualno vlasništvo (*World Intellectual Property Organization – WIPO*) Srbija se po vrednosti globalnog indeksa inovacija (GII¹⁰) nalazi na 67. mestu u svetu od 143 posmatrane zemlje (pad za 13 mesta u odnosu na Izveštaj iz 2013. godine). Prema ovom Izveštaju globalni lider u inovacijama je Švajcarska, na drugom mestu je Velika Britanija, dok se na trećem mestu nalazi Švedska. Ako posmatramo zemlje u našem okruženju najbolje je rangirana Slovenija (28. mesto), a zatim slede Mađarska (35. mesto) i Hrvatska (37. mesto).

Srbija se najbolje rangira na području Znanja i tehnologije i prema ovom kriterijumu se nalazi na 44. mestu. Slede kategorije Infrastruktura (53. mesto) i Ljudski kapital i istraživanje (42. mesto), dok je najslabije plasirana u kategoriji Sofisticiranost tržišta (134. mesto), koja obuhvata kreditiranje, ulaganja i trgovinu.

Polazeći od navedenih saznanja, s jedne strane, i imajući u vidu izraženu ekonomsku i finansijsku krizu našeg društva, treba reći da Vlada može i mora da deluje kao snažan *katalizator* većih preduzetničkih akcija, a ne samo da bude direktni preduzetnički akter. Sada je neodložan trenutak da se povećaju investicije u oblasti koje se najbrže razvijaju, kao što su nauka i obrazovanje, ali i da se otklanjaju teškoće i podstiču nove forme investiranja, posebno domaće štednje i tako smanji zavisnost od inostranih ulagača koji, neretko, traže nerealno povoljne uslove. Oni su uvek dobrodošli, pre svega kao vlasnici napredne tehnologije i osvojenog tržišta, ali dugoročno neće biti dobro ako nas percipiraju samo kao izvor jeftine radne snage i vladinih beneficija. Aktuelna kriza stvara višestruke šanse da se preduzmu odlučne akcije i u oblasti inovacija tako što država može dodatno podsticati svaki inovacioni napor i razvoj novih proizvoda i procesa.

U tom smislu od posebnog značaja za aktiviranje domaćeg inovacionog potencijala predstavlja promovisanje inovativnog preduzetništva. Inovativno preduzetništvo postaje ugaoni kamen ekonomskog rasta u razvijenom svetu. Preduzetničko obrazovanje i istraživanje se vide kao važna sredstva za negovanje

⁸ Srbija se nalazi na 94 poziciji od ukupno 144 zemlje sveta i nalazi se ispod zemalja u okruženja (Bugarska – 54, Rumunija – 59, Crna Gora – 67, Makedonija – 63, Slovenija - 70, Hrvatska - 77, Bosna i Hercegovina – 87, Albanija - 95 itd.).

⁹ U drugoj fazi razvoja izvori konkurentnosti bi trebalo da se pomeraju ka stubovima kao što su: Visoko obrazovanje i obuka, Efikasnost tržišta roba, Efikasnost tržišta rada, Razvoj finansijskog tržišta, Tehnološka pripremljenost i Veličina tržišta.

¹⁰ GII ima za cilj da oceni posmatrane zemlje u pogledu inovativnosti i ukaže na prepreke koje otežavaju uspešno stvaranje i korišćenje inovacija u preduzećima i privredi u celini. Osnovni principi na kojima je zasnovan su:

1. Postoji razlika između Inovacionih ulaza i inovacionih izlaza prilikom merenja inovacija u ekonomiji. Inovacioni ulazi predstavljaju faktore koji doprinose stvaranju inovacija dok Inovacioni izlazi pokazuju rezultate inovativnosti unutar ekonomije.

2. GII posmatra pet ulaznih faktora: Institucije, Ljudski kapital i istraživanje, Infrastruktura, Sofisticiranost tržišta i Sofisticiranost poslovanja.

3. GII prikazuje dva izlazna faktora koji čine rezultate inovativnosti ekonomija: Znanje i tehnologija i Kreativni autput.

svake preduzetničke kulture, a posebno kada je reč o inovativnosti. Inovativni preduzetnici stvaraju ideje a imaju ambiciju da ih ugrađuju u brzorastuća preduzeća.

Stoga, jačanje inovativnog preduzetništva je kritički važno za našu ne samo ekonomsku budućnost.

4. ZAKLJUČAK

U poslednjih nekoliko decenija, u fokusu ekonomskih istraživanja su inovacije kao ključni faktor dugoročnog ekonomskog rasta i razvoja. Bez inovacija nije moguć ne samo uspon preduzeća i nacionalnih privreda, već je ugrožen i njihov elementarni opstanak. Srbija je još uvek faktorima vođena ekonomija u kojoj osnovni institucionalni i infrastrukturni zahtevi ne osiguravaju i ne obezbeđuju konkurentnost preduzeća i privrede.

Privredni rast i razvoj savremenih zemalja ne zavisi samo od raspoloživih proizvodnih faktora, već i od društvene organizacije i institucija koje regulišu privredne tokove i način upotrebe raspoloživih resursa. Tokom narednih decenija sposobnost inoviranja i uspešna komercijalizacija inovacija na tržištu biće ključni faktor globalne konkurentnosti zemalja.

Zbog toga, u svim zemljama, a u Srbiji naročito i posebno, biće potrebno izgraditi konzistentan **sistem i inovacionu politiku** na nivou društva u kojoj će centralnu poziciju dobiti svi talentovani i kreativni pojedinci koji imaju ideje i vizije novih rešenja u svim oblastima društvene prakse, posebno privredne i naročito, kada je reč o našoj sredini, proizvodne. Novi proizvodi, novi procesi (tehnologije) i nove usluge (servisi) treba da postanu okosnica *nove ekonomske realnosti* zasnovane na višem nivou kvaliteta i konkurentnosti, a to je imperativ opstanka u uslovima ubrzane globalizacije i rastuće međunarodne konkurencije..

Literatura

- [1] Schwab, K.: *The Global Competitiveness Report 2014-2015*, World Economic Forum, 2013.
- [2] Schwab, K.: *The Global Competitiveness Report 2013-2014*, World Economic Forum, 2013.
- [3] Schwab, K.: *The Global Competitiveness Report 2012-2013*, World Economic Forum, 2012.
- [4] Schwab, K.: *The Global Competitiveness Report 2011-2012*, World Economic Forum, 2011.
- [5] Hobday, M.: Firm-level Innovation Models: Perspectives on Research in Developed and Developing Countries (), Technology Analysis & Strategic Management, Vol. 17, No. 2, 121-146, 2005.
- [6] Dutta, S., Lanvin, B., Wunscvincent, S.: *The Global Innovation Index 2014*.
- [7] Dutta, S., Lanvin, B., Wunscvincent, S.: *The Global Innovation Index 2013*.
- [8] United Nations Economic Commission for Europe: *Fostering Innovative Entrepreneurship: CHALLENGES AND POLICY OPTIONS*, UNITED NATIONS New York and Geneva, 2012.
- [9] Ács, Z.J., Naudé, W.: *Entrepreneurship, Stages of Development, and Industrialization*, UNU-WIDER, Working Paper No. 2011/80, November, 2011.

Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N., Duško Belović

INNOVATIVE AS A KEY FACTOR OF ECONOMIC GROWTH AND DEVELOPMENT OF SERBIA

Abstract: Dynamic entrepreneurial sector, especially firms oriented towards development and diffusion of innovations, is recognized as a key factor of economic growth and development. This sector is more and more relied on research and development activities and their commercial results. Settlement of legal, regulatory and institutional rules for development of entrepreneurship based on innovations is a prerequisite for economic recovery of Serbia.

Key words: innovation, competitiveness, economic growth and development



Marković, V., Jakovljević, Ž.¹⁾

SEGMENTACIJA JEDNE KLASSE POVRŠI DRUGOG REDA IZ STRUKTUIRANOG OBLAKA TAČAKA²⁾

Rezime

U radu se predlaže metod za segmentaciju jedne klase površi drugog reda (kvadratika) iz struktuiranog oblaka tačaka. Metod je zasnovan na segmentaciji elipsi iz skeniranih linija direktnom regresijom metodom najmanjih kvadrata. Segmentacijom elipsi u oba pravca struktuiranog oblaka mogu se efikasno izdvojiti G1 (i više) kontinualni regioni koji odgovaraju određenim površima drugog reda. Predloženi metod je pre svega namenjen segmentaciji eliptičkih cilindara i elipsoida čije posebne slučajeve predstavljaju cilindar i sfera, a u zavisnosti od načina skeniranja može se upotrebiti i za segmentaciju drugih kvadratika (na primer konusa). Pored toga, u radu se pokazuje da metod daje dobre rezultate i u segmentaciji površi višeg reda u odnosu na kvadrrike – na primer eliptičkih torusa.

Predloženi metod je eksperimentalno verifikovan na većem broju sintetizovanih oblaka tačaka kao i na primeru skeniranog dela iz realnog sveta.

Ključne reči: reverzno inženjerstvo, struktuirani oblak tačaka, segmentacija skeniranih linija, segmentacija površi

1. UVOD

U savremenoj industrijskoj praksi, tehnike reverznog inženjerstva geometrijskih modela sve više nalaze primenu. Pored njihove tradicionalne upotrebe u projektovanju proizvoda, ove tehnike se sve češće koriste i u upravljanju proizvodnim procesima. Tipični primeri su 3D navigacija mobilnih robota, automatizacija procesa zavarivanja, automatsko podešavanje priprema itd. Implementacija tehnika reverznog inženjerstva geometrijskih modela se, u opštem slučaju, može podeliti na četiri faze [1]: 1) skeniranje (merenje) određenog objekta, 2) pretprocesiranje podataka dobijenih skeniranjem, 3) prepoznavanje geometrijskih primitiva i 4) upotreba dobijenih rezultata u cilju, pre svega, formiranja kompjuterskih modela skeniranog objekta. Upotrebom savremenih 3D skenera, koji se odlikuju visokom rezolucijom i tačnošću, mogu se dobiti gusti oblaci tačaka koji sadrže i više nego dovoljno informacija o površinama objekata koji se skeniraju [2]. Standardna procedura procesiranja ovako dobijenih oblaka se sastoji u generisanju 3D trougaonih mreža. Algoritmi, koji se koriste u ove svrhe [1], su danas standardno implementirani u najvećem broju CAD softverskih paketa. Ovako dobijene 3D mreže trouglova se koriste za kreiranje kompjuterskih reprezentacija skeniranih površina objekta. Međutim, iako estetski odgovarajućih oblika, 3D trougaone mreže ne sadrže sve potrebne informacije o obliku i strukturi skeniranih površina, a pre svega o geometrijskim primitivima od kojih se površine sastoje. S druge strane, poznavanje geometrijskih primitiva može biti od izuzetnog značaja pri ponovnoj izradi dela. Ovaj problem je još više izražen pri kreiranju sistema upravljanja na osnovu informacija dobijenih 3D skeniranjem objekata.

Prepoznavanje geometrijskih primitiva iz oblaka tačaka podrazumeva [1]: 1) segmentaciju oblaka tačaka na oblasti koje se mogu opisati određenim geometrijskim primitivima, i 2) prepoznavanje gradivnih geometrijskih primitiva i estimaciju njihovih parametara. Po pravilu ovaj proces se u savremenim CAD paketima vrši interaktivno pri čemu korisnik prepoznaje geometrijske primitive u oblaku i označava određen

¹⁾ M.Sc Veljko Marković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (markovicveljko@yahoo.com), doc. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR 35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Ovom prilikom autori se zahvaljuju i kompaniji Topomatika, Zagreb koja je omogućila skeniranje delova.

broj tačaka na njima. Nakon definisanja geometrijskog primitiva i inicijalnih tačaka na njemu, softver može izvršiti estimaciju parametara. Međutim, efikasni algoritmi za automatsko prepoznavanje geometrijskih primitiva koji su od esencijalnog značaja za sisteme upravljanja su još uvek u razvoju i nisu dostigli potrebni nivo za praktičnu primenu, a pogotovu ne u realnom vremenu.

Jedan od najizazovnijih problema postupka prepoznavanja struktura skeniranih površina je svakako segmentacija oblaka tačaka. Segmentacija podrazumeva uočavanje i izdvajanje iz oblaka, grupa tačaka koje reprezentuju delove površina koji se po svojim geometrijskim osobinama izdvajaju od ostatka skenirane površine. Nakon izvršene segmentacije oblaka moglo bi se pristupiti različitim tehnikama rekonstrukcije površine [3, 4]. Ovim tehnikama bi se na osnovu segmentiranih oblasti tačaka dobile matematičke i kompjuterske reprezentacije površine odnosno njenih izdvojenih delova.

Većina objekata u mašinstvu poseduje površine koje se mahom sastoje iz delova ravni, iz delova površi drugog reda - tzv. kvadraka (cilindar, sfera, konus, elipsoid, hiperboloid...) i torusa. U fokusu ovog rada je segmentacija kvadraka koje su u skeniranim linijama u okviru struktuiranog oblaka tačaka reprezentuju kao eliptični segmenti. U ove kvadrike spadaju cilindar i sfera koji se svrstavaju u klasu tzv. prirodnih kvadraka kao i eliptički cilindar i elipsoid koji se svrstavaju u opšte kvadrike i ređe se sreću u praksi. Pored navedenih kvadraka, u zavisnosti od načina skeniranja i druge kvadrike (npr. konus) mogu biti predstavljene eliptičnim segmentima u skeniranim linijama. Treba napomenuti da cilindar i sfera predstavljaju samo posebne slučajeve eliptičkog cilindra i elipsoida.

Pre nego što se napravi pregled postojećih tehnika za segmentaciju kvadraka potrebno je naglasiti da je segmentacija kvadraka između kojih je prelaz oštar odnosno G0 kontinualan manje zahtevna pošto su granice između segmenta lako uočljive. S druge strane, ukoliko je prelaz gladak npr. G1 kontinualan, segmentacija postaje teža i dobija potpuno novu dimenziju.

Prema [5] tehnike segmentacije kvadraka iz oblaka tačaka se mogu podeliti na: 1) tehnike zasnovane na detektovanju ivica i 2) tehnike zasnovane na regionima. Pri korišćenju tehnika zasnovanih na detekciji ivica, nakon prve faze, u kojoj se pronadu tačke oblaka koje reprezentuju ivice, moguće je doći do odvojenih segmenata oblaka koji su oivičeni izdvojenim ivicama. Ovi metodi su pogodni za segmentaciju površina koje poseduju G0 kontinualne prelaze koje je lako uočiti, dok za slučajeve G1 kontinualnosti ne daju dobre rezultate (veoma je teško uočiti same ivice). Treba napomenuti da veliki broj delova u mašinstvu, pored oštih ivica poseduje i površine koje se sastoje od G1 kontinualnih segmenata.

Tehnike segmentacije zasnovane na regionima se uglavnom oslanjaju na princip tzv. rasta (širenja) regiona. U [6, 7, 8] se mogu naći algoritmi zasnovani na rastu regiona koji počinju izborom jedne polazne karakteristične tačke od koje se region širi (dodaju se tačke u okolini polazne) na osnovu nekog geometrijskog kriterijuma. Ovi kriterijumi mogu biti različiti. Uglavnom se za upoređivanje okolnih tačaka sa polaznom koriste parametri diferencijalne geometrije (normale u tačkama). Izbor polazne tačke je uglavnom manuelni, dok automatski izbor jedne ovakve tačke može biti veoma komplikovan. Treba naglasiti da uspeh ovakvih algoritama najviše zavisi od dobrog izbora polazne tačke. Takođe, kod određenih autora [9] polazna osnova za širenje regiona može biti i grupa tačaka, a ne samo jedna tačka.

U ovom radu se predlaže tehnika za segmentaciju jedne klase kvadraka (eliptički cilindar i elipsoid) koje mogu imati G1 ili višu kontinualnost. Metod je zasnovan na segmentaciji eliptičnih regiona iz skeniranih linija i podrazumeva rad sa struktuiranim oblakom tačaka. Segmentacija eliptičnih regiona iz skeniranih linija se vrši korišćenjem metoda zasnovanog na rastu regiona koja implementira direktnu regresiju elipse metodom najmanjih kvadrata i ne zavisi od izbora semena [10]. Ekstrapolacijom prepoznavanja eliptičnih regiona na dve dimenzije dolazi se do metoda za segmentaciju kvadraka koji su predmet ovog rada.

Nastavak ovog rada ima sledeću strukturu po poglavljima. Drugo poglavlje se odnosi na metod za segmentaciju eliptičnih regiona iz skeniranih linija koja je u osnovi metoda za segmentaciju predmetne klase kvadraka. U trećem poglavlju se predstavlja sam metod za segmentaciju predmetne klase kvadraka i ilustruje njegova primenljivost na sintetisanim oblacima tačaka. Implementacija predloženog metoda na primeru iz realnog sveta je prikazana u poglavlju 4, dok se u završnom, petom poglavlju daju zaključne napomene.

2. SEGMENTACIJA ELIPTIČNIH REGIONA IZ SKENIRANIH LINIJA

Segmentacija eliptičnih regiona iz skeniranih linija koja se koristi u ovom radu [10] je zasnovana na direktnoj regresiji elipse metodom najmanjih kvadrata [5].

Jednačinu elipse u implicitnom obliku možemo predstaviti pomoću opšte jednačine konusnih preseka:

$$a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y + a_6 = 0 \quad (1)$$

s tim što za elipsu mora biti zadovoljen dopunski uslov:

$$a_2^2 - 4a_1a_3 < 0 \quad (2)$$

Ukoliko parametre a_i , $i=1,\dots,6$ predstavimo kao $A=[a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]^T$, a promenljive uvrstimo u vektor $\mathbf{x}=[x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$, onda jednačina (1) dobija formu:

$$A^T \mathbf{x} = 0 \quad (3)$$

Na osnovu predhodno navedenog, 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 , $i=1,\dots,6$ možemo svesti na problem minimizacije:

$$\min_A \|DA\|^2 \quad (4)$$

gde je sa D obeležena matrica oblika:

$$D = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & x_Ny_N & y_N^2 & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da bi proces minimizacije (4) učinili efikasnijim Fitzgibbon et al. u [5] vrše normalizaciju uvodeći uslov:

$$4a_1a_3 - a_2^2 = 1 \quad (6)$$

koji se u matricnoj formi može predstaviti kao:

$$A^T C A = 1 \quad (7)$$

gde je C matrica dimenzije 6×6 sa $C(1, 3)=C(3, 1)=2$, $C(2, 2)=-1$ i $C(i, j)=0$, u suprotnom.

Uzimajući u obzir navedeno, postavljeni problem minimizacije se može 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 [11], a λ predstavlja uvedeni Lagranžov množilac.

Fitzgibbon et al. u [5] su pokazali 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).

Primenom direktne regresije elipse metodom najmanjih kvadrata može se kreirati metod segmentacije eliptičnih regiona iz skeniranih linija. Ovaj metod će kasnije biti osnova za metod prepoznavanja kvadraka iz oblaka tačaka. Segmentacija eliptičnih regiona iz skeniranih linija je zasnovana na činjenici da je, ukoliko se radi o proceni parametara elipse iz skupa tačaka koje tačno pripadaju elipsi, informaciona matrica S singularna [11]. Ukoliko skup tačaka aproksimativno predstavlja neku elipsu, kao što je slučaj sa npr. tačkama koje su dobijene skeniranjem neke eliptične konture matrica S je bliska singularnoj. U tom slučaju će biti ispunjena dva uslova: 1) recipročni uslovni broj matrice S će biti blizak nuli; 2) sopstvene vrednosti

matrice $S^{-1}C$ mogu biti bliske nuli ili čak manje od nule [3].

Metod segmentacije zasnovana na uslovu singularnosti informacione matrice se može svrstati u one čija je osnova ranije pomenuti princip rasta regiona. Naime, skenirane tačke se obrađuju jedna po jedna, počev od prve u nizu. U svakoj iteraciji se računaju vrednosti matrice D i time lako dobijaju i vrednosti matrice S čije se osobine u tom trenutku proveravaju. Ukoliko se desi da vrednost recipročnog uslovnog broja matrice ili sopstvene vrednosti budu u određenoj poziciji (više, odnosno niže) u odnosu na unapred zadate vrednosti pragova za segmentaciju, može se reći da se matrica S udaljava od singularnosti, odnosno da tekuća tačka konture ne pripada skupu do tada obrađenih tačaka koje aproksimiraju određenu elipsu. Ta tačka skenirane konture se označava kao prelaz između dva eliptična regiona i proglašava se prvom tačkom naredne konture. Postupak segmentacije se ponavlja iz početka, i tako redom dok se ne obrade sve tačke skenirane linije. Pseudo kod za jednu iteraciju opisanog metoda segmentacije skenirane linije je dat na slici 1. Pragovi za vrednosti recipročnog uslovnog broja i sopstvenih vrednosti se mogu podešavati u zavisnosti od nivoa šuma u signalu koji predstavlja konturu.

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)>prag_1
    prelaz=i; break
  else
    [svek, svr]=eig(inv(S)*C)
    sv=abs(svr(find(svr>0)))
    if sv<prag_2
      prelaz=i; break; end; end
end;

```

IZLAZ: prelaz - detektovani prelaz između segmenata

Slika 1. Proces segmentacije eliptičnih regiona

ULAZ: x, y – koordinate tačaka konture

prelaz – vektor pozicija tačaka prelaza

```

k=1; j=prelaz(2);
for i=1:length(prelaz)
  x1=x(k : prelaz(i)); y1=y(k : prelaz(i));
  proceniti a1
  izračunati procenjene y1_e
  x2=x(prelaz(i) : j); y2=y(prelaz(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))>prag_seg
    kon_prelaz(k)=prelaz(i);
  end;
  k=prelaz(i);
  if i<length(prelaz)-1
    j=prelaz(i+2);
  else
    j=length(x);
  end; end;

```

IZLAZ: kon_prelaz - konačne pozicije tačaka prelaza nakon grupisanja

Slika 2. Proces grupisanja eliptičnih segmenata

Primenu predstavljenih algoritama ćemo pokazati na primeru segmentacije jedne sintetizovane konture. Kontura je prikazana na slici 3 i sastoji od tri eliptična $G1$ kontinualna segmenta. Treba napomenuti da tačke konture nisu ekvidistantne. Parametri segmenata konture kao i pozicije tačaka prelaza su dati u tabeli 1. Primena algoritma segmentacije nad ovom konturom za slučaj bez šuma daje dobre rezultate, odnosno identifikuje upravo potrebne tačke prelaza sintetizovane konture. Da bismo proverili performanse ovako postavljenog metoda kontaminirali smo sintetizovanu konturu belim Gausovim šumom određenog nivoa. Međutim, tokom testiranja segmentacije konture sa prisustvom šuma primećeno je da je algoritam podložan kreiranju većeg broja segmenata na konturi. Naime, pored potrebnih tačaka prelaza izdvaja se i veći broj tačaka između njih. Ova pojava je više ili manje izražena u zavisnosti od samog nivoa šuma i podešavanja vrednosti pragova za segmentaciju.

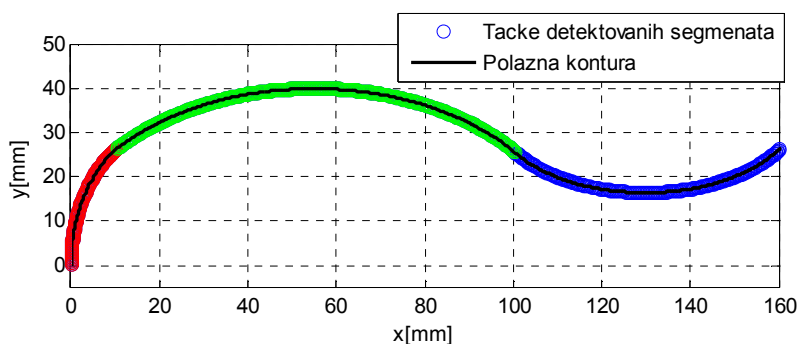
Da bi se odredile stvarne pozicije prelaza pristupa se dodatnom koraku grupisanja detektovanih segmenata. Osnova za grupisanje je činjenica da je u prisustvu šuma moguće odrediti koeficijente jednačina elipse koju tačke aproksimiraju. Ovi koeficijenti su, zajedno sa uvedenim novim pragom za grupisanje, iskorišćeni za postupak spajanja detektovanih segmenata koji pripadaju istoj elipsi i dobijanje konačnih segmenata na konturi. Pseudo kod za uvedeni proces grupisanja je prikazan na slici 2.

Nakon primene uvedenog postupka pri segmentaciji kontura sa slike 3 kontaminiranih šumom nivoa 100 i 120dB dobijamo rezultate koji su prikazani u tabeli 2. Posmatranjem ove tabele može se uočiti da dobijene pozicije prelaza neznatno odstupaju od idealnih. Maksimalno odstupanje se može uočiti kod prvog prelaza u

slučaju šuma nivoa 100dB i iznosi 13 uzoraka. Ukoliko ovaj rezultat pogledamo kroz prizmu odstupanja u milimetrima po x-osi, ono iznosi 0.4mm. Takođe, na slici 3 je dat grafički prikaz segmentirane konture.

Tabela 1. Parametri i pozicije prelaza segmenata sintetizovane konture			
Br. seg.	Koeficijenti $a_i \times 10^2, i = 1, \dots, 6$	Redni broj tačke u konturi	
		Početak segmenta	Kraj segmenta
1	[0.250 0 0.118 -10.000 0 0.001]	1	617
2	[0.028 -0.002 0.062 -3.137 0.127 -13.725]	618	1599
3	[0.082 0 0.381 -21.224 -26.806 1751.41]	1560	2785

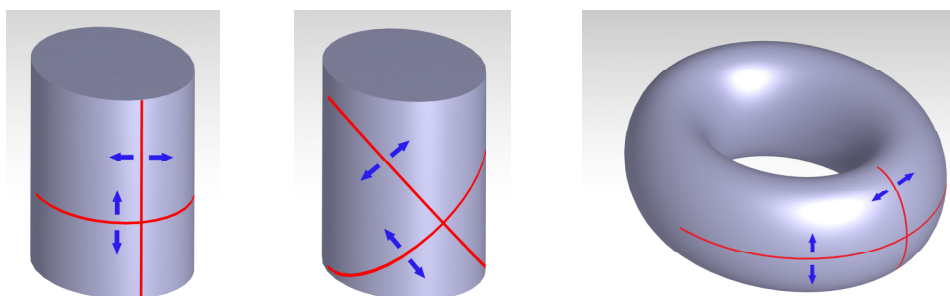
Tabela 2. Rezultati segmentacije - identifikovane pozicije prelaza				
Br. seg.	Redni broj tačke u konturi			
	Slučaj sa šumom nivoa 120dB		Slučaj sa šumom nivoa 100dB	
	Početak segmenta	Kraj segmenta	Početak segmenta	Kraj segmenta
1	1	617	1	604
2	618	1601	605	1601
3	1602	2785	1602	2785



Slika 3. Segmentirana kontura koja se satoji od tri eliptična dela

3. SEGMENTACIJA ELIPTIČKIH CILINDARA I ELIPSOIDA IZ STRUKTURIRANIH OBLAKA TAČAKA

Ekstrapolacijom metoda za segmentaciju eliptičnih regiona iz skeniranih linija na dve dimenzije, moguće je kreirati algoritam za segmentaciju delova površi koje pripadaju eliptičkom cilindru ili elipsoidu iz strukturiranog oblaka tačaka. Naime, u strukturiranom oblaku tačaka dobijenom skeniranjem elipsoida će svaka skenirana linija biti u obliku elipse. S druge strane, pri skeniranju eliptičkog cilindra moguće su dve situacije u zavisnosti od načina skeniranja: 1) da skenirane linije u jednom pravcu predstavljaju duži, a u drugom elipse (slika 4.a.), ili 2) da skenirane linije u oba pravca predstavljaju elipse (slika 4.b.). Naravno, postoje i druge površi koje mogu u skeniranim linijama biti reprezentovane elipsama u oba pravca – tipičan primer je opšti eliptički torus (slika 4.c.).

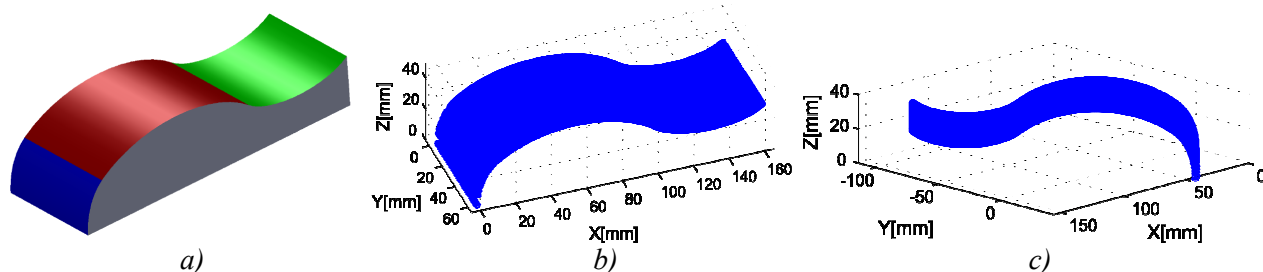


Slika 4. a) Skeniranje cilindra duž ose i upravno na nju; b) skeniranje cilindra u pravcima pod uglom u odnosu na osu; c) skeniranje eliptičkog torusa

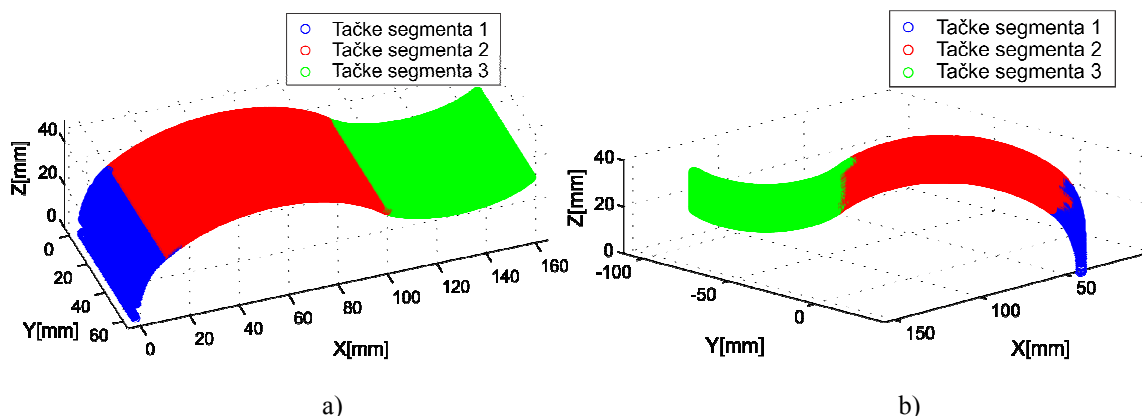
Strukturirani oblak tačaka se sastoji iz dva niza ukrštenih skeniranih linija. Na svaku od ovih linija se

može primeniti opisan metod segmentacije eliptičnih regiona i to u pravcu jedne, a zatim i druge ose oblaka. Primenom metoda na sve linije duž jedne ose oblaka dobija se segmentacija skenirane površine u jednom pravcu, odnosno oblak tačaka se u posmatranom pravcu segmentira na određeni broj regiona. Ako se zatim oblak posmatra i duž druge ose i segmentacija ponovi nad skeniranim linijama u tom pravcu skenirana površ se segmentira i duž druge ose. Ukrštanjem rezultata segmentacije po obe ose oblaka, odnosno traženjem preseka izdvojenih skupova tačaka po jednoj sa onim po drugoj osi dobijaju se konačni segmenti koji aproksimiraju regione od kojih se površina sastoji.

Za ilustraciju navedenog algoritma sintetisani su oblaci tačaka nad površinom koja je dobijena ekstrudiranjem profila prikazanog na slici 3 duž prave linije (slika 5.a.). Površina je kreirana u CAD softveru a oblak tačaka je generisan korišćenjem modifikovanog z bafer algoritma²⁾ [12] i prikaza površine u obliku mreže trouglova (konkretno u .stl formatu). Pravac posmatranja je određen vertikalno duž z-ose odnosno vektorom $-k$. U ekvidistantnom rasteru po x i y osi (usvojena je distanca između zraka od 0.5mm) su povučene prave paralelne sa z osom i određene su tačke njihovih prodora kroz trouglove reprezentovane u baricentričnim koordinatama. Dobijene tačke prodora predstavljaju sintetizovani oblak tačaka. Kako bi se razmotrili različiti načini skeniranja (slike 4.a. i 4.b.) kreirana su dva oblaka tačaka - slike 5.b. i 5.c. U oblaku tačaka prikazanom na slici 5.b. simulirano je skeniranje duž i upravno na osu cilindra, a u oblaku tačaka prikazanom na slici 5.c. skeniranje po linijama pod uglom od 45° u odnosu na osu. Radi približavanja realnoj situaciji oblacima je dodan šum nivoa 120dB. Potrebno je naglasiti da su sve površine G1 kontinualne.



Slika 5. Površina koja se sastoji od delova eliptičnih cilindara: a) 3D model; b) oblak tačaka dobijen podužnim skeniranjem objekta; c) oblak tačaka dobijen skeniranjem pod uglom



Slika 6. Grafički prikazi rezultata segmentacije površine koja se sastoji od delova eliptičnih cilindara: a) oblak tačaka sa slike 5.b.; b) oblak tačaka sa slike 5.c.

Rezultati segmentacije oblaka sa slika 5.b. i 5.c. su grafički prikazani na slikama 6.a. i 6.b, respektivno, a vrednosti parametara eliptičkih cilindara koje su procenjene metodom najmanjih kvadrata su date u tabeli 3. Oblak tačaka sa slike 5.b. je generisan tako da su duž y ose kreirani pravolinijski segmenti. Pošto jednačina (1) za $a_1=a_2=a_3=0$ predstavlja jednačinu prave, algoritam je detektovao da u konturi nema prelaza, odnosno da je u svakoj skeniranoj liniji u pravcu y ose prisutan samo po jedan segment.

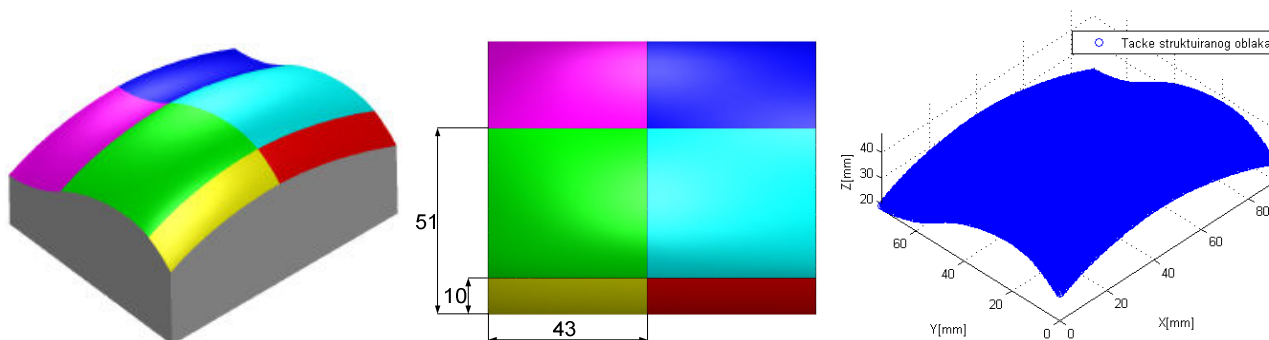
Poređenjem procenjenih vrednosti parametara za površ sa slike 6.a. datih u tabeli 3 i parametara sintetizovanih eliptičnih segmenata datih u tabeli 1 može se zaključiti da je segmentacija dala odlične rezultate za segmente 2 i 3 (odstupanje je manje od 1%). Odstupanje procenjenih parametara za segment 1 je nešto veće što je posledica značajno manjeg broja odbiraka sa segmenta 1. Za slučaj površine prikazane na

²⁾ Z bafer je algoritam koji se u kompjuterskoj grafici koristi za detekciju vidljivih elemenata posmatranih kompjuterskih objekta u odnosu na pravac posmatranja.

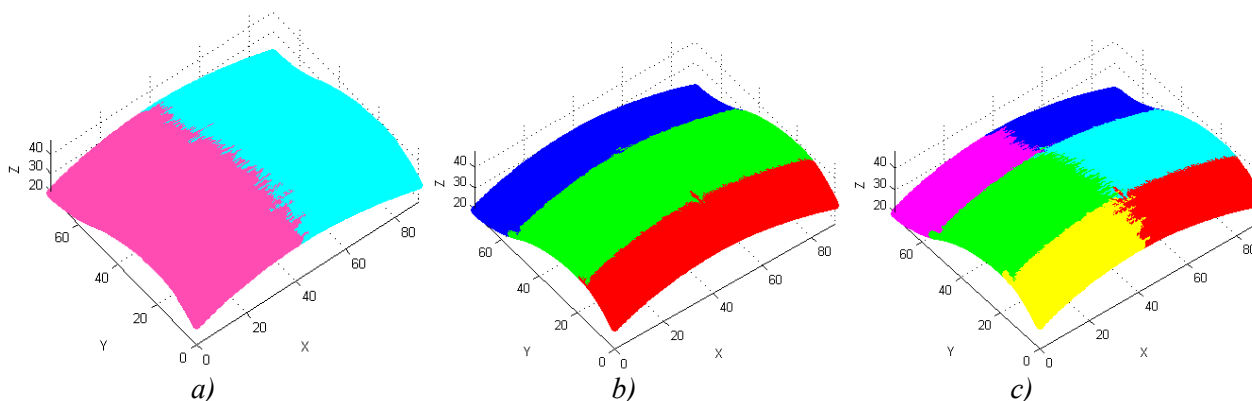
slici 6.b. procenjene vrednosti parametara su u skladu sa pravcem skeniranja. Naime, može se uočiti: 1) da su vrednosti parametara a_1 i a_2 približno jednake što odgovara pravcu skeniranja od 45° , 2) da su procenjene vrednosti parametara a_1 i a_2 za oblak sa slike 6.b. oko dva puta manje u odnosu na vrednosti a_1 i a_2 za oblak sa slike 6.a. što je takođe u skladu sa pravcem skeniranja - $(\sin(45^\circ))^2=1/2$; 3) da su pri tom procenjene vrednosti parametara a_3 za oba oblaka gotovo jednake. I u slučaju oblaka tačaka sa slike 6.b. procenjene vrednosti parametara za segment 1 imaju nešto veće odstupanje u odnosu na parametre za segmente 2 i 3.

Tabela 3. Procenjene vrednosti parametara segmentiranih eliptičkih cilindara		
Oblak tačaka	Jednačina kvadrike: $a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x + a_8y + a_9z + a_{10} = 0$ Koeficijenti $[a_i \times 10^2]$, $i=1, \dots, 10$	
slika 6.a.	Segment 1	[0.250 0.000 0.101 -0.029 0.018 -0.128 -3.529 -0.238 -1.151 8.4705]
	Segment 2	[0.028 -0.000 0.062 -0.000 -0.000 -0.002 -3.137 0.000 0.126 -13.702]
	Segment 3	[0.082 0.000 0.381 -0.000 0.000 0.000 -21.227 -0.000 -26.856 1752.27]
slika 6.b.	Segment 1	[0.154 0.189 0.118 -0.341 0.150 -0.122 -2.615 2.285 -1.292 8.440]
	Segment 2	[0.014 0.014 0.062 -0.029 0.001 -0.002 -2.276 2.295 0.219 -15.208]
	Segment 3	[0.042 0.042 0.381 -0.085 -0.000 0.002 -15.658 15.641 -27.441 1821.02]

Kao što je već napomenuto, predložen metod za segmentaciju oblaka tačaka se može primeniti i za segmentaciju drugih površi, na primer eliptičkih torusa. Za ilustraciju ovakve segmentacije je sintetizovan struktuiran oblak objekta čija se gornja površina sastoji iz šest segmenata koji predstavljaju delove opštih eliptičkih torusa. Površina je kreirana provlačenjem profila koji se sastoji od tri eliptična regiona po putanji koja sadrži dva eliptična regiona. Promena geometrije objekta je izražena po sve tri ose prostora i treba naglasiti da je ostvarena G1 kontinualnost površine. 3D model objekta zajedno sa pozicijama prelaza između njegovih površina, kao i sintetizovani oblak tačaka njegove površine (kontaminiran šumom nivoa 120dB) prikazani su na slici 7. Na slici 8 je dat grafički prikaz rezultata segmentacije primenom predloženog metoda, po obe ose pojedinačno, kao i konačna segmentacija na šest grupa tačaka odnosno na šest izdvojenih delova od kojih se površina sastoji. Sve skenirane linije po jednoj osi su procesirane identičnim pragovima za segmentaciju i grupisanje, a u cilju održanja visokog nivoa automatizma samog procesa segmentacije.

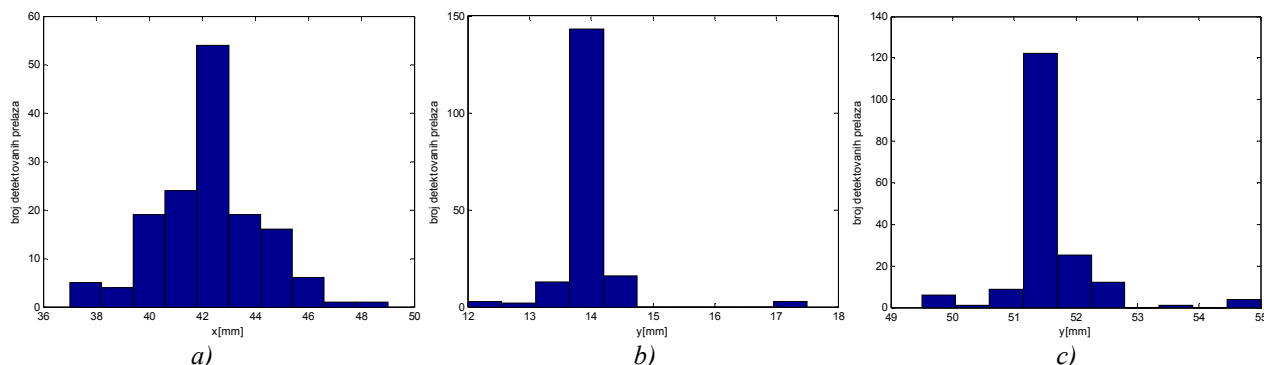


Slika 7. Površina sastavljena od delova eliptičnih torusa: 3D model i sintetizovani oblak tačaka



Slika 8. Grafički prikazi rezultata segmentacije površine sastavljene od delova eliptičnih torusa: a) segmentacija duž x-ose; b) segmentacija duž y-ose; c) konačan rezultat segmentacije

Poređenjem slika 7 i 8 može se uočiti da detektovane tačke prelaza svake skenirane linije delimično odstupaju od idealnog prelaza. Ovo odstupanje nastaje kao posledica prisustva šuma. Histogrami rezultata segmentacije za svaki prelaz pojedinačno su prikazani na slici 9.

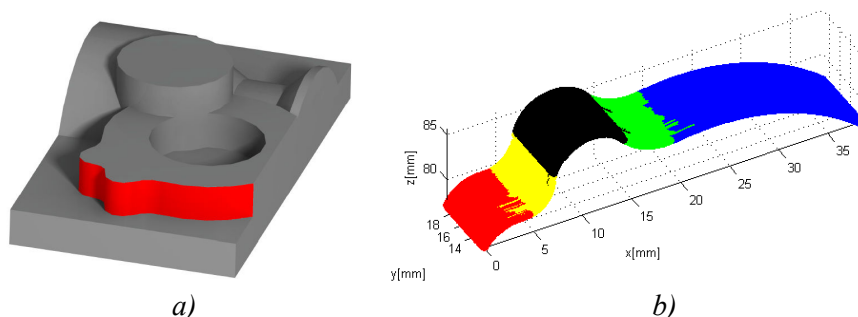


Slika 9. Histogrami detektovanih prelaza na slici 8: a) između segmenata 1 i 2 po x-osi; b) između segmenata 1 i 2 po y-osi; c) između segmenata 2 i 3 po y-osi

Dakle, primenom predloženog metoda su adekvatno segmentirani i delovi opštih eliptičkih torusa. Daljom procenom parametara segmentiranih površi lako se može doći do zaključka o kojoj površi se radi – za razliku od elipsoida i eliptičkog konusa, torus je površ četvrtog reda. Na sličan način se može izvršiti i klasifikacija ostalih segmentiranih površi ukoliko postoje u oblaku.

4. SEGMENTACIJA CILINDARA IZ SKENIRANOG OBLAKA TAČAKA

U cilju dalje verifikacije predstavljenog algoritma segmentacije izvršena je segmentacija realnog oblaka tačaka koji reprezentuje jednu specifičnu površinu objekta prikazanog na slici 9.a. Objekat prikazan na slici 9.a. predstavlja tipičan test deo koji se koristi u mnogim studijama koje se odnose na segmentaciju oblaka tačaka u reverznom inženjerstvu [5]. Deo je obrađen na troosnom obradnom centru i sadrži veći broj površi drugog reda uključujući i ravne površi. Skeniranje objekta je izvršeno ATOS Compact Scan 3D skenerom visoke rezolucije [13]. Prilikom skeniranja je kreirana mreža trouglova na osnovu koje je na već opisan način generisan struktuiran oblak tačaka.

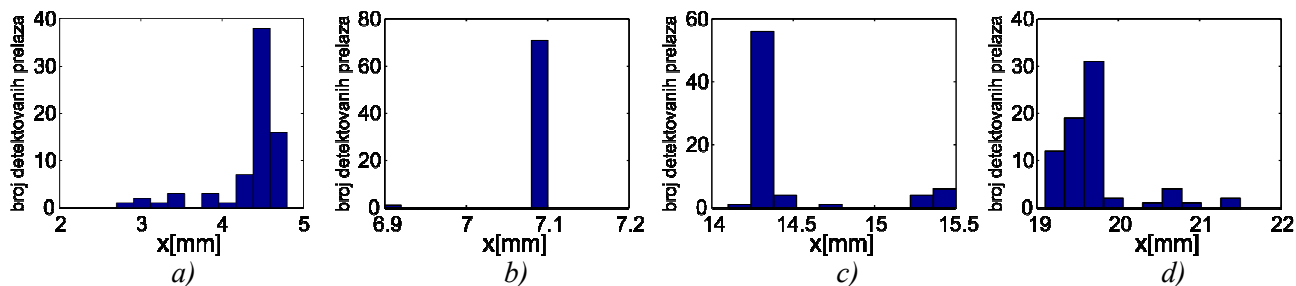


Slika 10. Rezultati segmentacije realnog oblaka tačaka: a) skenirani objekat i njegova izdvojena površina; b) segmentacija oblaka tačaka

Tabela 4. Procenjene vrednosti parametara segmentiranih cilindara - koeficijenti [$a_i \times 10^2$], $i=1, \dots, 9$	
Jednačina cilindra: $a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x + a_8y + a_9z + 1 = 0$	
Segment 1	[0.003 0.000 0.017 0.000 0.000 -0.016 1.271 -0.013 -2.572]
Segment 2	[0.015 0.000 0.014 0.000 0.000 0.013 -1.105 -0.006 -2.340]
Segment 3	[0.015 0.000 0.015 0.000 0.000 0.002 -0.504 0.006 -2.396]
Segment 4	[0.000 0.000 0.013 0.000 0.000 0.009 -0.687 -0.047 -2.292]
Segment 5	[0.000 0.000 0.012 0.000 0.000 0.007 -0.589 -0.028 -2.195]

U okviru ovog rada je razmatrana površina dela označena crvenom bojom na slici 10.a. Ova površina je odabrana jer se sastoji iz niza G1 kontinualnih cilindričnih površi. Rezultati segmentacije dobijeni primenom metoda koji se predlaže u ovom radu su grafički predstavljeni na slici 10.b. Vrednosti parametara

segmentiranih površina koje su procenjene metodom najmanjih kvadrata su prikazane u tabeli 4. Procenjene vrednosti parametara ukazuju na to da se radi o profilima koji su ekstrudirani duž y ose jer su vrednosti parametara a_2 , a_4 , a_5 i a_8 bliske nuli. Slika 11 prikazuje histograme raspodele detektovanih tačaka prelaza između pojedinih segmenata.



Slika 11. Histogrami detektovanih prelaza na slici 9.b.: a) između segmenata 1 i 2; b) između segmenata 2 i 3; c) između segmenata 3 i 4; a) između segmenata 4 i 5

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen metod za segmentaciju kvadraka koje su u struktuiranom oblaku tačaka reprezentovane eliptičnim segmentima. Metod je pre svega namenjen segmentaciji eliptičkih cilindara i elipsoida, a u zavisnosti od načina skeniranja može se koristiti i za segmentaciju drugih kvadraka kao i za segmentaciju površi višeg reda. Ograničenje je da površi moraju biti reprezentovane eliptičnim segmentima u skeniranim linijama struktuiranog oblaka. Kao što je u primeru koji se odnosi na segmentaciju delova eliptičkih cilindara pokazano, ovaj metod se može upotrebiti i za segmentaciju ravnih površi iz oblaka tačaka, ali su za ovu klasu problema na raspolaganju efikasniji algoritmi.

Metod je zasnovan na segmentaciji elipsi iz skeniranih linija u oba pravca struktuiranog oblaka tačaka. Sama segmentacija eliptičnih regiona iz skeniranih linija se vrši procenom karakteristika informacione matrice pri direktnoj regresiji elipsi metodom najmanjih kvadrata. Algoritam spada u klasu algoritama sa rastom regiona i može se primeniti za segmentaciju površi i G1 i više kontinualnosti.

Algoritam je eksperimentalno verifikovan za slučajeve sintetizovanih G1 kontinualnih površi koje se sastoje od delova eliptičkih cilindara i eliptičkih torusa. Tokom istraživanja, algoritam je proveren i za G1 kontinualne površi koje se sastoje od delova elipsoida i pokazao je slične rezultate kao u studijama prezentovanim u ovom radu. Međutim, zbog ograničenja u dužini rada, ovi rezultati će biti prezentovani drugom prilikom. Pored verifikacije na sintetizovanim oblacima tačaka, metod je pokazao dobre rezultate i u segmentaciji cilindričnih površi na skeniranom realnom delu.

Dalja istraživanja će se odnositi na segmentaciju površi koje su u struktuiranom oblaku tačaka reprezentovane drugim konusnim preseccima – hiperbolom pre svega, ali i na segmentaciju površi višeg reda.

6. LITERATURA

- [1] Varady, T., Martin, R., R., Cox, J.: *Reverse engineering of geometric models – an introduction*, CAD, 29, p.p. 255-268, 1997.
- [2] Savio, E., De Chiffre, L., Schmitt, R.: *Metrology of freeform shaped parts*, Annals of the CIRP, 56/2, p.p.810-834, 2007.
- [3] Halir, R., Flusser, J.: *Numerically stable direct least squares fitting of ellipses*, 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, WSCG, p.p.125-132, 1998.
- [4] Fitzgibbon, A., Pilu, M., Fisher, B.: *Direct Least Square Fitting of Ellipses*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21/5, p.p.476-480, 1999.
- [5] Petitjean, S.: *A Survey of Methods for Recovering Quadrics in Triangle Meshes*, ACM Computing Surveys, 34/2, p.p.211-262, 2002.
- [6] Hou-Chuan, L., Yi-Hong, C., Jiing-Yih, L.: *Development of feature segmentation algorithms for quadratic surfaces*, Advances in Engineering Software, 40/10, p.p.1011–1022, 2009.
- [7] Rabbani, T., van den Heuvel, F., A., Vosselman, G.: *Segmentation of point clouds using smoothness constraint*, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', p.p.248-253,

Dresden, Septembar 2006.

- [8] Vančo, M., Hamann, B.: *Surface Reconstruction from Unorganized Point Data with Quadrics*, Computer Graphics forum, 27/6, p.p.1593–1606, 2008.
- [9] Vieira M., Shimada, K.: *Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing*, Computer Aided Geometric Design, 22/8, p.p.771-792, 2005.
- [10] Jakovljević, Ž., Marković, V., Miladinović, M.: *Recognition of elliptical segments in scanned lines*, Etikum, str. 19-22, FTN, Novi Sad, jun 2014.
- [11] Stanić, J., Metod inženjerskih merenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [12] E. Catmull, “A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces,” Ph.D. Dissertation, Dept. Comput. Sci., Univ. of Utah, Salt Lake City, UT, 1974.
- [13] 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

SEGMENTATION OF ONE CLASS OF QUADRIC SURFACES FROM STRUCTURED POINT CLOUDS

Abstract: *This paper presents a method for segmentation of a class of quadric surfaces from structured 3D point cloud. In the essence of the proposed method is the segmentation of elliptical regions from scanned lines using direct least squares regression. Segmentation of elliptical regions from both directions of structured point cloud can be used for effective segmentation of G1 continuous (or with higher continuity) regions which represent certain quadric surfaces. The primary goal of the proposed method is segmentation of elliptic cylinders and ellipsoids whose special cases represent cylinder and sphere, and depending on the scanning procedure can be used for segmentation of other quadric surfaces (e.g., cones). Besides, we have shown that the method can be implemented for segmentation of the higher order surfaces – e.g., elliptic tori.*

Proposed method is experimentally verified using a number of synthesized point clouds, as well as using an example of real-world scanned part.

Key words: *reverse engineering, structured 3D point cloud, segmentation of scanned lines, segmentation of surfaces*



Tanasić, Z., Janjić, G. Bobrek, M.¹, Soković M.²

NOVI MODELI ORGANIZACIJE I ISO/CD 9001:2015

Rezime

Permanentne promjene u okruženju u kojima funkcionišu organizacije i trendovi XXI vijeka nameću potrebu za novim modelima organizacionih sistema. Ove promjene dovele su i do promjena uticajnih faktora i zahtjeva na osnovu kojih se dizajniraju organizacije.

Pojavom sistema menadžmenta aktuelizovan je sistemski pristup i procesni model u poslovnim sistemima. Oni daju novu dimenziju holističko-sistemskom konceptu, odnosno dimenziju kvaliteta cjeline. Organizacije zavise od okruženja, kulture i operativnog konteksta i primorane su da se brzo mijenjaju i prilagođavaju. Novi način poslovanja nameće potrebu za dizajniranjem organizacije a to podrazumijeva proces stvaranja organizacije sa dimenzijama inženjerstva.

Ključne riječi: modeli organizacije, kontekst organizacije, ISO 9001

1. UVOD

Aktuelan proces globalizacije svjetskog tržišta i kompleksnost poslovnog okruženja su savremeni uslovi poslovanja kojima se sve više organizacija ne može prilagoditi. Ovaj problem je prisutan kako u tržišno razvijenim ekonomijama, tako i u tranzicionim ekonomijama. Dvadeset prvi vijek pred menadžere organizacija postavlja zahtjev za pravilno razumijevanje procesa promjena i primjene adekvatnih znanja i tehnika sa ciljem stalnog povećanja efikasnosti i efektivnosti organizacije. Kriza savremenih organizacija je kriza svijesti savremenog čovjeka u nedostatku sagledavanja cjeline, kako na nivou pojedinca tako i na području stvaranja poslovnih sistema.

U radu se želi ukazati na veliku prisutnost funkcionalne organizacione strukture u preduzećima ali i na to da se sa promjenom modela organizacione strukture može poboljšati način poslovanja. Naime, željeno tržišno pozicioniranje preduzeća danas kao imperativ postavlja kreiranje organizacione strukture koja će uspješno odgovarati na izazove sa kojima se preduzeće suočava i da u odsustvu adekvatne organizacione strukture nije moguće stratejski upravljati preduzećem.

Osnovna vrijednost prelaska sa klasične na procesno orijentisanu organizaciju zasniva se na odbacivanju tradicionalne, krute forme hijerarhije, strukture i prelazak na procese, jer procesi stvaraju vrijednost ne samo za organizaciju već i za kupce/korisnike.

2. TRADICIONALNI VS SAVREMENI MODELI ORGANIZACIJE

Početak XXI vijeka može se nazvati periodom brzih promjena i visoke tehnologije, periodom u kome znanje i informacije postaju ključni resursi za uspjeh u poslovanju. Dinamičnost i promjenljivost zamjenjuju statičnost i stabilnost, zatvorenost organizacija ustupa mjesto otvorenosti i organizacijama bez granica, a rizik i nesigurnost javljaju se kao zamjena za sigurnost u poslovanju. Za nove izazove neophodno je pronaći adekvatne odgovore. Da li su novi oblici organizacije, koji su nastali kao rezultat prilagođavanja organizacije na nove trendove, rješenje za nastale probleme.

Teoretičari i istraživači predlažu organizacije koje će biti fleksibilnije prema zahtjevima okruženja i njihovih stejkholdera. Nalazimo se na prekretnici, da li da ostavimo stvari kakve jesu i čekamo da vidimo šta će se desiti, ili da se osposobimo novim znanjima, vještinama i tehnologijom i krenemo u *budućnost*.

¹ Doc. dr Zorana Tanasić, doc. dr Goran Janjić, prof. dr Miroslav Bobrek, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, (zorana.tanasic@unibl.rs, goran.janjic@unibl.rs, miroslav.bobrek@unibl.rs)

² Prof. dr Mirko Soković, Univerza v Ljubljani, Fakultet za strojništvo, (mirko.sokovic@fs.uni-lj.si)

2.1 Faktori uspjeha

Permanentne promjene u okruženju u kojima funkcionišu organizacije i trendovi XXI vijeka nameću potrebu za redizajnom organizacionih sistema. Ove promjene dovele su do promjena uticajnih faktora i zahtjeva na osnovu kojih se dizajniraju organizacije. Uticajni faktori koji su bili ključni u toku XIX i XX vijeka danas su neodgovarajući ili čak predstavljaju smetnje organizacionom rastu i razvoju. U prilog tome, u tabeli 1 navedene su neke od ključnih razlika između tradicionalnih i savremenih faktora uspjeha u organizacijama.

TRADICIONALNI FAKTORI USPJEHA	SAVREMENI FAKTORI USPJEHA
veličina	brzina
procedure	fleksibilnost
specijalizacija	integracija
kontrola	povjerenje
kapital, resursi	vrijeme, znanje
primjena novih sredstava	stvaranje novih vrijednosti
tradicionalni poslovi	inovacije
odgovornost vlasniku	društvena odgovornost

Prisutnost novih trendova u savremenim organizacijama kao i dizajnerski pristup u organizaciji i menadžmentu otvaraju put ka preciznijem definisanju mnogih pojmova koji se u teoriji često zajedno koriste, iako je njihovo značenje različito [1]. Primjena savremenih metoda i odgovarajućih informacionih sistema za stratešku analizu, identifikaciju procesa i ključnih performansi u cilju mjerenja efikasnosti i efektivnosti poslovnih sistema upotpunjuje proces dizajna organizacionih sistema. Ove vrijednosti utiču na formiranje organizacione kulture i stvaraju mogućnost promjene odnosa zaposlenih prema vrijednosti organizacije i njenih stejkholdera.

2.2 Savremeni modeli organizacije

Modeli su metaforički prikaz organizacije koji su najčešće usmjereni na ograničen broj ključnih elemenata, njihove međusobne veze i karakteristike. Izraditi model koji je najadekvatniji za određenu situaciju ili kombinovati više modela sa ciljem da se razvije jedinstven model je zadatak naučnog menadžmenta. Istraživanje i razvoj novih modela organizacije kao i primjena postojećih pomaže menadžerima, ekspertima, konsultantima i svim poslovnim ljudima koji žele koristiti savremene alate i tehnike u kreiranju organizacionih sistema.

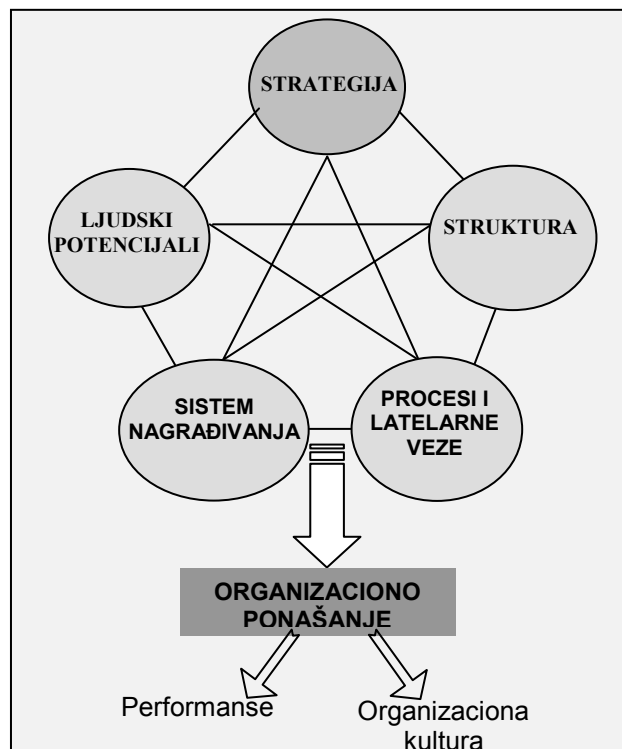
Model jedne organizacije može se definisati kao:

- okvir koji predstavlja šablon za postizanje ciljeva,
- predstavljanje skupa komponenata procesa, sistema ili tematskog polja, uopšteno razvijenog radi razumijevanja, analize, unapređenja, i/ili zamjene procesa,
- prezentacija informacija, aktivnosti, odnosa i ograničenja organizacije.

Međutim, modeli dizajna organizacije najčešće su nepoznanica i nisu dio menadžerskih (liderskih) *kompleta* alata i tehnika. Prisutni modeli dizajna organizacije koji se primjenjuju u poslovnom svijetu su razvile konsultantske firme kao što je *McKinsey*, ili pojedinci kao što je Jay Galbraith, Marvin Weisboard, David Nadler, Warner Burke i George Litwin (*Burke-Litwin model*) [2, 3].

Modeli predstavljaju različite perspektive organizacionih sistema, na isti način kao što astronom koji se nalazi na različitim planetama predstavlja različite perspektive univerzuma [4]. Nijedna perspektiva organizacionih sistema nije *ispravna*, a ona koja ima smisla zavisi od okruženja, kulture i konteksta [2].

Jedan od modela koji treba posebno spomenuti jeste *model zvijezde* (eng. *The Star Model*) čiji je tvorac Jay R. Galbraith poznati guru organizacionog dizajna koji u modelu organizacione arhitekture naglašava holistički pogled na organizaciju. Model zvijezde je revidiran više puta od strane Galbraitha i njegovih sljedbenika, praćenjem novih naučnih dostignuća i praktičnih saznanja (Galbraith, 1973, 1977, 1994, 2002, 2005, 2008; Galbraith, Downey i Kates, 2002; Kates i Galbraith, 2007 i dr.). Model se prilagođavao novim poslovnim uslovima i sve dinamičnijem okruženju i smatra se vodećim teorijskim modelom u području dizajna organizacionih modela, Slika 1.



Slika 1. Galbraith-ov model zvijezde

Model zvijezde definiše u organizaciji pet ključnih komponenti:

- *strategija* – utvrđuju se ciljevi i vrijednosti;
- *organizaciona struktura* – moć i autoritet, tokovi informacija i organizacione uloge;
- *ljudski potencijal* – izbor i zapošljavanje, povratne informacije o načinu razmišljanja, vještine zaposlenih, rotacija posla, učenje i razvoj i unapređenje;
- *sistem nagrađivanja* – utiče na motivaciju zaposlenih i teži uskladiti njihove ciljeve sa ciljevima organizacije;
- *procesi i lateralne veze* – radni i poslovni procesi, tok informacija, lateralni integrativni mehanizmi i dr.

Osnovna ideja ovog modela u procesu dizajniranja organizacije je usklađenost navedenih komponenti, s tim da svaka komponenta treba da podrži odabranu strategiju i ostvari sklad sa ostalim komponentama. Dizajniranjem pet ključnih elemenata organizacionog sistema utvrđuju se sposobnosti koje organizacija treba da posjeduje i razvija, pri čemu svaka komponenta modela ima neograničen broj mogućnosti. Definisanjem strategije sužava se izbor i dobija skup komplementarnih mogućnosti koje podržavaju strategiju (Kates-Galbraith, 2007, 4-5).

Organizaciona kultura kao važan dio organizacije, nije eksplicitno navedena u modelu. Autori su smatrali da lider/menadžer ne može neposredno dizajnirati kulturu. Organizaciona kultura se sastoji od zajedničkih vrijednosti, mišljenja i normi ponašanja koje su nastale tokom vremena i kojih se zaposleni treba da pridržavaju. Ona je rezultat kumulativnih odluka o dizajnu koje su donesene u prošlosti, kao i ponašanja menadžmenta koje proizilaze iz tih odluka (Kates-Galbraith, 2007). Pri tom organizaciona kultura predstavlja ključne kontingentne uslove za uspješno provođenje definisane strategije, ali i posljedicu ponašanja zaposlenih. Jačanjem sklada između strukture, procesa, nagrada i ljudskih potencijala u praksi kroz organizaciono ponašanje stvaraju se bolje mogućnosti organizacija za postizanje definisanih ciljeva. Isto tako važna komponenta, za sposobnost organizacije da se prilagodi promjenama u okruženju, je mogućnost promjene: konfiguracije resursa, ključnih procesa i mentalnih modela, koji doprinose uspjehu organizacije i koji će uticati na njene planove u budućnost. U stabilnom okruženju postignut sklad doprinosi efikasnost, a u dinamičnom okruženju taj postignut sklad može da predstavlja prepreku. Organizacija treba da uravnoteži navedene komponente u modelu, ali mora biti i fleksibilna kako bi prepoznala i reagovala na prilike i prijetnje iz okruženja.

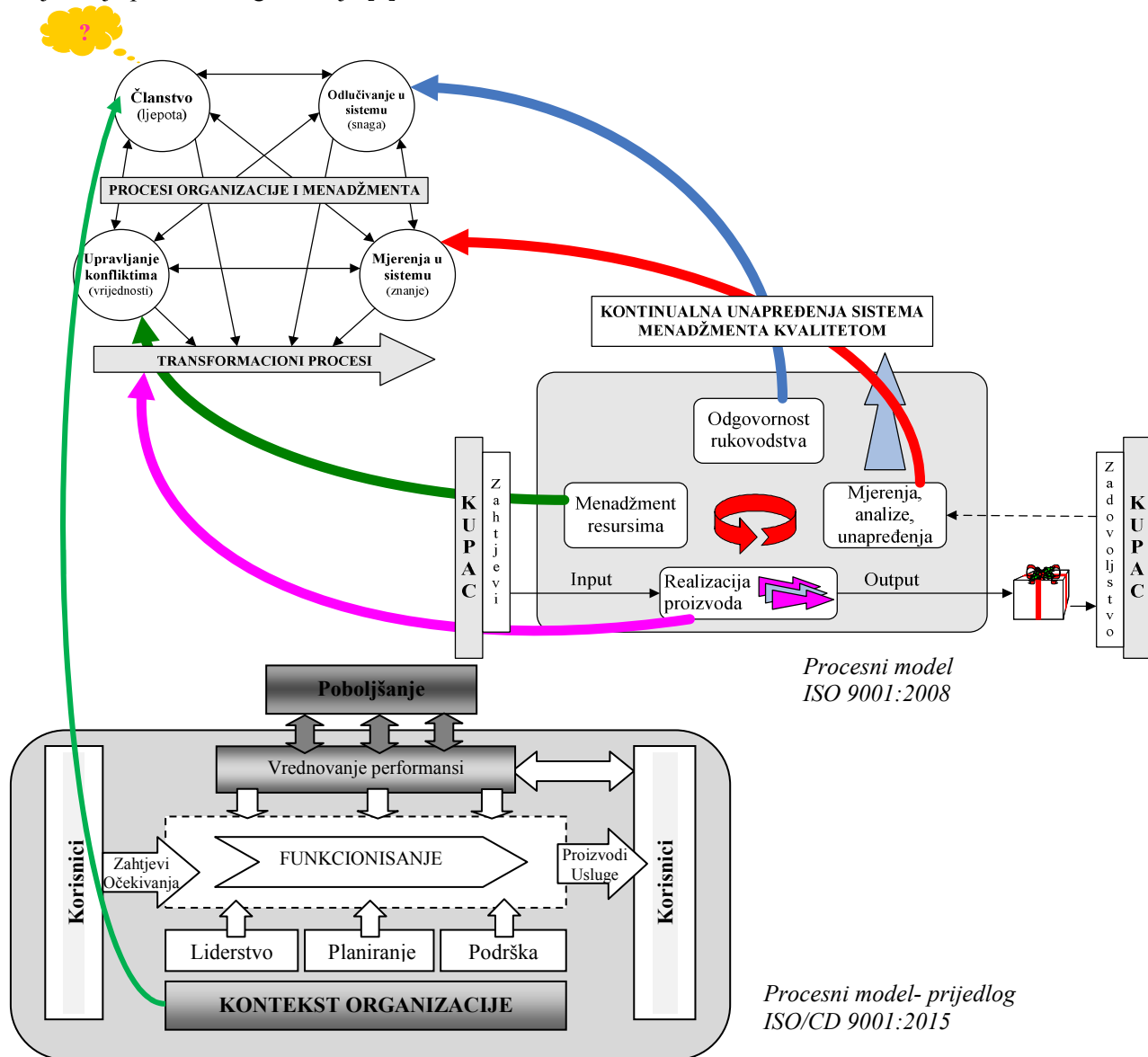
3. ISO CD 9001:2015

Promjene koje se dešavaju, u društvu i organizacijama, nametnule su potrebu za novim revizijama standarda sistema menadžmenta. Promjenjeno je i samo shvatanje kvaliteta kao kvalitet organizacije, jer se kvalitet proizvoda i usluga može poboljšati samo sa razvojem kvaliteta cjelokupnog poslovanja. Značaj standarda serije ISO 9000 možda je najbolje izraženo riječima bivšeg predsjednika ISO organizacije,

Eberhard Mollmann-a: *Serija standarda ISO 9000 predstavlja međunarodni konsenzus dobrog rukovođenja preduzećima, koji obezbjeđuje da je preduzeće uvijek sposobno da kupcima dobavlja proizvode ili usluge koji ispunjavaju njihove zahtjeve za kvalitet. U današnjem poslovnom svijetu, gdje globalizacija tržišta nudi kupcima dosada najveću mogućnost za izbor dobavljača, preduzeća koja nisu sposobna uvijek i iznova ispunjavati zahtjeve svojih kupaca, nemaju mogućnost da prežive.*

Principi sistema menadžmenta kvalitetom predstavljaju sveobuhvatno i temeljno pravilo ili opredjeljenje za vođenje i upravljanje organizacijom, sa unapređenjem performansi fokusiranih na razumjevanje potreba i očekivanja kupaca i ostalih stajkholdera. Revizija standarda ISO 9001 uvodi nove tačke a odnose se na kontekst organizacije i upravljanje procesima pri čemu se daju eksplicitni zahtjevi za primjenu procesnog pristupa. Organizacije treba da identifikuju eksplicitno interna i eksterna pitanja koja mogu uticati na njihovu sposobnost upravljanja sistemom menadžmenta odnosno da isporuče svoje željene rezultate. Takođe, one moraju da razumiju potrebe i očekivanja svih zainteresovanih strana (pojedinaца i organizacija koji mogu da utiču ili su „pogođeni“ odlukama i aktivnostima organizacije).

Slika 2 prikazuje snažnu korelaciju između teoretskog modela (sistemske mišljenje) i procesnog modela koji preporučuje standard menadžmenta ISO 9000:2008 i novi prijedlog procesnog modela koji bi pratio strukturu standarda ISO 9000:2015. Uzme li se u obzir ranija konstatacija da standardni model procesa proizilazi iz teoretskog koncepta upravljačkih (kibernetičkih) sistema dolazi se do nedvosmislene potvrde da je sistemski pristup i sistemsko mišljenje osnovni alat za projektovanje procesnog modela, a time i dizajniranja procesne organizacije [4].



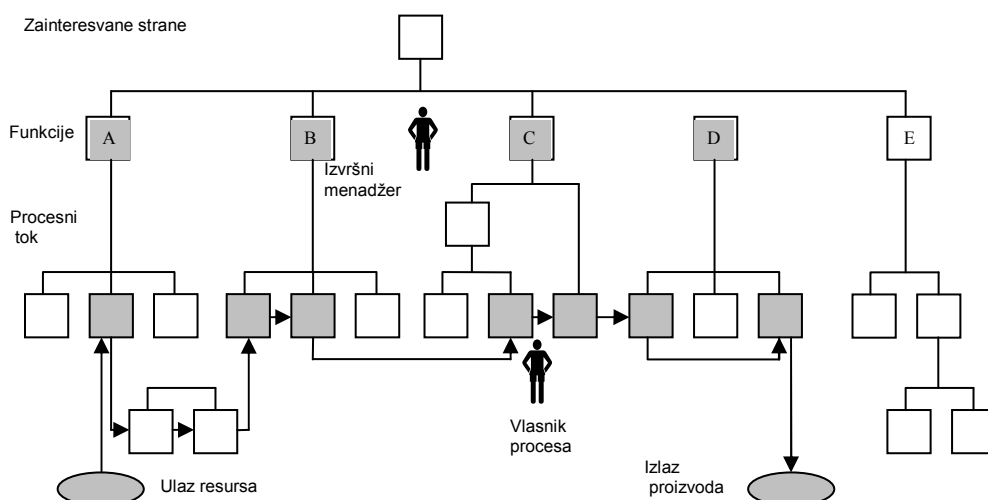
Slika 2. Relacije standardnog i teoretskog procesnog modela (ISO 9001:2008 i ISO DC 9001:2015)

U sistemskom mišljenju definisane su dimenzije sistema koje su uočene u procesnom modelu, koji čini osnovu sistema menadžmenta:

- *Odlučivanje u sistemu* (snaga/moć) – **Odgovornost rukovodstva/liderstvo** u procesu dizajniranja organizacije je aktivnost strateškog liderstva koje definiše polazne osnove procesne organizacije i strateško djelovanje.
- *Mjerenje u sistemu* (znanje) – **Mjerenje, analize i unapređenje performansi/vrednovanje performansi** organizacije je veoma važna aktivnost u razvoju i održivosti organizacije, jer ono što se ne mjeri, ne može se kontrolisati niti upravljati, a samim tim ni unaprijediti.
- *Upravljanje konfliktima* (vrijednost) – **Menadžment resursima/ liderstvo, planiranje i podrška** organizacije određen je sistemima u organizaciji (nagrađivanje zaposlenih, obuka, upravljanje konfliktima i sl.) što je temelj dobre organizacione kulture, koja se definiše kao sistem pretpostavki, vjerovanja, vrijednosti i normi ponašanja jedne organizacije.
- *Članstvo* (ljepota – *Morate voljeti ono što radite odnosno morate uzimati i davati.*) – U procesnom modelu **članstvo (?- ISO 9001:2008)/ kontekst organizacije** u procesu dizajniranja organizacije je *članstvo* u zajednici, a ne institucija, u kojoj će vladati tolerancija i povjerenje, drugim riječima treba stvarati kontekst dobre organizacione kulture u svim aspektima poslovanja, a na prvom mjestu biti društveno odgovoran. Osnovni cilj organizacionih promjena je postići što veću efikasnost, konkurentnost, fleksibilnost i održivost organizacije kao društvenog sistema.

Moć je osnovna pokretačka energija potrebna da se strategijska vizija prevedu u stvarnost³, znanje je neophodno za razvoj i održivost organizacije, vrijednost je temelj, organizacije dok izraz *ljepota* predstavlja društveno odgovornu organizaciju posmatranu kao socio-tehnički sistem. U današnjem svijetu, svijetu globalizacije, sve je veći interes za poslovne organizacije koje su društveno aktivne, što daje veću osjetljivost za društvo u cjelini, odnosno za članstvo (ljepotu) jedne organizacije. Misija svake društveno odgovorne organizacije jeste, da uzme u obzir svoj cjelokupni uticaja na društvenu zajednicu u kojoj posluje, što vodi prema LCM i LCE konceptima prilikom donošenja poslovnih odluka (razvoj proizvoda i organizacije). Ovaj pristup ističe ravnopravno članstvo organizacije sa društvenom zajednicom, a ne samo privredni subjekt koji se procjenjuje isključivo na osnovu ostvarenog profita.

Serijom standarda ISO 9000:2000 (ISO 9001 i ISO 9004), je posebno naglašena važnost procesnog pristupa u poslovanju. Primjenom informaciono-komunikacionih tehnologija na nivou procesa i njihovih interakcija ostvaruje se velika mogućnost prilagođavanja novim uslovima poslovanja. Na nivou svakog procesa jednoznačno se definišu odgovornosti čime se stiče efekat *privatne svojine* nad procesom, a što poboljšava kvalitet i brigu o resursima i zainteresovanost za ispunjenje definisanih ciljeva. Tradicionalni model organizovanja transformiše se u horizontalni oblik moderne organizacione strukture sa mogućnošću upravljanja i praćenja efikasnosti na nivou cijele organizacije (Slika 3) [1].



Slika 3. Projektovanje procesno orijentisane organizacione strukture

³ Britanski filozof Rasel, rekao je: *...moć je fundamentalni koncept društvenih nauka, na isti način kao što je energija fundamentalni koncept u fizici.*

4. ZAKLJUČAK

Savremeno poslovanje značajno se razlikuje u odnosu na tradicionalnu filozofiju poslovanja. Prvo, zaposleni su bolje informisani, bolje obrazovani i manje skloni obavljanju posla zbog same realizacije procesa rada. Dobri rezultate više nisu dovoljni, postalo je važnije na koji način su ti rezultati ostvareni. Drugo, promjenila se priroda posla: fizički rad zamjenjen je intelektualnim radom temeljenim na informacijama i znanju, direktna kontrola postala je nemoguća pri čemu uslužni sektor preuzima dominaciju nad proizvodnim. Treća razlika u poslovanju odnosi se na sve brže promjene koje zahtijevaju da se odluke donose na nivou obavljanja posla tj. nastanka problema, jer konkurencija uništava organizacije koje misle da imaju mogućnost donošenja odluka kroz duboku hijerarhiju

Tradicionalni organizacioni modeli zasnovani na funkcionalnoj organizacionoj strukturi sa visoko izraženom centralizacijom i dubokom hijerarhijom. Današnji uslovi poslovanja i brze razmjene znanja odnosno brz prenos velikih podataka zahtijevaju organizacione modele okrenute ka korisniku. Brze promjene uslova na tržištu zahtijevaju i veliki stepen adaptivnosti poslovnih sistema. To je preduslov da savremeni poslovni sistemi prihvate organizacione strukture visoke fleksibilnosti vođene zahtjevima i očekivanjima korisnika.

Organizacija budućnosti je organizacija gdje menadžeri neće imati *svoj kvadrat* u organizacionoj šemi već dio procesne mape. Ljudi koji sprovode promjene i podižu efikasnost poslovnih procesima postaju lideri savremenog poslovanja. Procesna organizacija (horizontalna) postala je stvarnost u organizacijama (npr. Xerox, AT&T, divizija Kodak i dr.) i pokazuje se veoma uspješna u današnjim uslovima poslovanja.

5. LITERATURA

- [1] Bobrek, M., Tanasić, Z., Travar, M.: *Procesna organizacija*, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2007.
- [2] Stanford N.: *Guide to Organisation Design – Creating high-performing and adaptable enterprises*, FSC, London, 2007.
- [3] Galbraith J. R.: *Designing Organizations: An Executive Guide to Strategy, Structure and Process*, Jossey-Bass Publishers, San Francisco, 2002.
- [4] Gharajedaghi, J.: *System thinking – Managing Chaos and Complexity*, Butterworth-Heinemann, Boston, Oxford, 2006.
- [5] Janjić, G., Tanasić, Z., i dr.: *Uticaj stakeholdera u savremenoj organizaciji sa aspektom na isporučioce*, JUPITER 2010., 25-27, Beograd, Mašinski fakultet, Beograd, novembar, 2010.
- [6] Štefan, I.: *Modern Theory of Organization*, University of Ljubljana, 2013.
- [7] ISO 9001:2008: *Quality management systems — Requirements*.
- [8] ISO CD 9001:2015: *Quality management systems — Requirements*

Crazy times call for crazy organizations.

Tom Peters

Organizations are forced to change faster and more radically than ever.

John P. Kotter

Tanasić, Z., Janjić, Bobrek, M., Soković, M.

NEW ORGANIZATIONAL MODELS AND ISO CD 9001:2015

Abstract: *Permanent changes in the environment in which organizations operate and trends in the 21st century impose the need for new models of organizational systems. These changes have led to the changes in influencing factors and the requirements central to the design of organizations.*

With the advent of the management system, a systematic approach and a process model in business systems have become relevant. They give a new dimension to the holistic-systemic concept, or dimensions of the whole. Organizations depend on the environment, culture and operational context and are forced to change and adapt rapidly. A new way of doing business imposes the need to design organizations and that implies the process of creating an organization with the dimensions of engineering.

Key words: *models of organization, context of the organization, ISO 9001*

39. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

39th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



19. simpozijum

MENADŽMENT KVALITETOM

Beograd, oktobar 2014.

MENADŽMENT KVALITETOM QUALITY

Majstorović, V., Mačuzić, J., Šibalića, T., Stojadinović, S. Cyber-Physical Manufacturing –Advances toward New Industrial Paradigm	5.1
Bulatović, M., Đurović, D. MODEL MJERENJA IZVRSNOSTI PROCESA ODRŽAVANJA PROCJENOM PERFORMANSI	5.8
Stanojević, N., Vasić, M., Stanojević, D. SISTEM ZA UPRAVLJANJE ENERGIJOM, KAO MERA ENERGETSKE EFIKASNOSTI.....	5.14
Stojadinović, S., Majstorović, V., Durakbasa M., . АУТОМАТСКО ПЛАНИРАЊЕ ПУТАЊЕ МЕРНОГ СЕНЗОРА ПРИ ИНСПЕКЦИЈИ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ.....	5.19





Majstorović, D. Vidosav¹⁾, Mačužić, Jelena¹⁾, Šibalija V. Tatjana²⁾, Stojadinović, M. Slavenko¹⁾

CYBER-PHYSICAL MANUFACTURING – ADVANCES TOWARD NEW INDUSTRIAL PARADIGM³⁾

Summary

Cyber-Physical Systems (CPS) are systems of collaborating computational entities which are in intensive connection with the surrounding physical world and its on-going processes, providing and using, at the same time, data-accessing and data-processing services available on the internet. Cyber-Physical Manufacturing (CPM), relying on the newest and foreseeable further developments of computer science, information and communication technologies, on the one hand, and of manufacturing science and technology, on the other hand, may lead to the 4th Industrial Revolution, frequently noted as Industry 4.0.

CPM consist of autonomous and cooperative elements and sub-systems that are getting into connection with each other in situation-dependent ways, on and across all levels of production, from processes through machines up to production and logistics networks. Modeling their operations and forecasting their emergent behavior raise a series of basic and application-oriented research tasks, including also the control of any level of these systems. The fundamental issue is to explore the relations of autonomy, cooperation, optimization and responsiveness. Integration of analytical and simulation-based approaches can be projected to become more significant than ever. One must face the challenges of operating sensor networks, handling big bulks of data, as well as the questions of information retrieval, representation, and interpretation, with special emphasis on security aspects. Novel modes of man-machine communication are to be realized in the course of establishing CPM.

The main goals of the paper are to discuss the approaches and milestones pointing towards the realization of Cyber-Physical Manufacturing, as well as to highlight some future R&D opportunities. Also in paper will be show our research model for integrated quality and metrology subject based on CPM approach.

Key words: Manufacturing, ICT, Modeling, Simulation, Quality.

1. INTRODUCTION

From the 1st January 2014, the EU has adopted for the scientific and technological program Horizon 2020 (The Framework Programme for Research and Innovation), participating and where our country [21]. Key organizations also take part in the research, development, promotion and transfer of technological research in the industry are: (i) *Manufuture* EU (European Technology Platform (ETP) for Future Manufacturing Technologies: *ManuFuture* [1], (ii) EFRA (European Factories of the Future Research Association), The *Manufuture* Initiative: Factories of the Future (FoF) [2], (iii) World Manufacturing Forum (WMF) [3], and (iv) FoF PPP (Public - Private Partnership) launced 2008 [2].

In our country in this area is especially active Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade [4], within which operates the National Technology Platform – *Manufuture* SR. Every two years, within International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", since 2009. year, was held Conference "Serbian *Manufuture* Conference", which discusses the scientific and expert aspects *Developing and implement 'new manufacturing' in Serbian's industry*. 2013. year was held the third Conference, next will be held on 3rd June 2015. year. During the three conference was held, at which, among others, participated: Prof. Dr. F. Jovane (*Manufuture* "father"), Dr. J. Caldiera, Prof. Dr. L. Monostori, Dr.

¹⁾University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, vidosav.majstorovic@sbb.rs

²⁾Metropolitan University, Faculty of Information Technology, Belgrade, Serbia

³⁾ This paper is part of research in Project which support Ministry of Education, Science and Technology, Republic of Serbia - TR 35022.

L. Jalba, Prof. Dr. D. Morzitis, and others discussed the following topics [1-4] : (i) Global *Manufacture* Platform – 2020 / 2030, (ii) Next Generation Manufacturing 2030, (iii) Perspectives of the Digital Factory in the FoF-ICT Research Programme, (iv) FoF PPP – Strategic multi-annual Roadmap, (v) FoF ICT in Horizon 2020 - Perspectives of EU Research and Development in ICT for Manufacturing, and (vi) Factories of the Future towards Horizon 2020 - imagine FoF 2020, etc. Our activities within these programs (FP7, Eureka, CEPUS, *Manufacture*, IMS, Horizon 2020, as well as scientific organizations and their programs / projects: CIRP, IFAC, IFIP, IMEKO i IMS), have also been various aspects, such as [5-20] : (i) MP HLG / NRMP Meetings: Brussels, since 2004, (ii) *Manufacture* Conference: Wroclaw, 2011, Vilnius 2013, Bologna 2014, (iii) Serbian's *Manufacture* Conference: Belgrade, 2009, 2011, 2013, (iv) *Manufacture* Village Meetings: Bucharest/Belgrade, since 2009, (v) World Manufacturing Forum: Como, 2011; Stuttgart, 2012; Milano 2014, (vi) Global Manufacturing Forum: Tampere, 2011, 2012, 2013, 2014, (vii) IFAC Conference: Budapest, 2012, (viii) FoF SIG: Rome 2011, Budapest 2012, Zurich 2013, Milano 2014, (ix) IFIP Conference: Como 2010; Stavanger 2011; Rodos 2012; PenState 2013; Ajaccio 2014, (x) CIRP January Meetings: Paris, since 2004, (xi) CIRP GA Meetings: Budapest 2011; Hong Kong 2012; Copenhagen 2013; Nantes 2014, (xii) IMEKO Conference: Cracow 2013, (xiii) PROLAMAT Conference: Dresden, 2013, (xiv) ICMaS Conference: Bucharest, 2013, 2014, (xv) CIRP DET Conference: Stuttgart, 2014, and (xvi) Intelligent Manufacturing Systems: Geneva, since 2011.

On all these Conferences / Scientific meetings, we had the scientific presentations that are related to our research results in the framework of these programs, and the topics: Digital Manufacturing, Taguchi method, Six Sigma, Intelligent Manufacturing, Advanced Quality and Metrology, etc [5-20,24].

The current scientific research program of the EU – Horizon 2020, an integral part of the development strategy of the EU for this period, he started with the implementation of January 1, 2014 and a budget of about 80 b €. Its structure includes the following entities [21] : (i) excellent science (€ 27.880 b); (ii) industrial leadership (€ 20.280 b); and (iii) societal challenges (€ 35.848 b). This program should be achieve the following aims [21] : (i) that the current share of Manufacturing in GDP EU, which amounts to 16%, to 2020 increase on 20%, (ii) that R&D even more activities are key drivers of growth and development of the EU industry and the economy, (iii) that 80% innovation will be applied in the industry, and (iv) that each new job in the manufacturing, will be generates two jobs in the service. When we consider these facts from the perspective of our country, we can conclude that they are not comparable, due to the extremely poor state of our industry, which has been completely destroyed, and as comparative examples there are only a single factories (Metalac, Sloboda, IVA 28, ...), whereas some industrial branches do not exist (manufacture of machine tools and others). However, regardless of the way the state of our industry, we through our research we follow the EU research program, the same applies to Horizon 2020 [25].

Main research areas defined by this program are [21] : (i) Information and Communication Technology (ICT), (ii) Nanotechnologies, (iii) Advanced materials, (iv) Biotechnologies, (v) Advanced manufacturing and processing, (vi) Space, (vii) Access to risk finance, (viii) Inovation in SMEs, (ix) Health, demographic change and wellbeing, (x) Food security, (xi) Secure, clean and efficient energy, (xii) Smart, green integrated transport, (xiii) Climate action, resource efficiency and raw materials, and (xiv) Inclusive, innovative and secure societies.

Developed and implement "new manufacturing" as a base for Cyber-Physical Manufacturing Systems (CPMSs), will be to evolve along three paths, figure 1 [2] : (i) *On – demand manufacturing*: Fast change demand from internet based customers requires mass-customized products. The increasing trend to last-minute purchases and online deals requires from European manufactures to be able to deliver products rapidly and on-demand to customers. This will only be achievable through flexible automation and effective collaboration between suppliers and customers; (ii) *Optimal (and sustainable) manufacturing*: Producing products with superior quality, environmental consciousness, high security and durability, competitively priced. Envisaging product lifecycle management for optimal and interoperable product design, including value added after-sales services and take-back models; and (iii) *Human - centric manufacturing*: Moving away from a production-centric towards a human-centric activity with great emphasis on generating core value for humans and better integration with life, e.g. production and cites. Future factories have to be more accommodating towards the needs of the European workforce and facilitate real-time manufacturing based on machine data and simulation.

Continuously integrated product design, factory and process planning as well as factory operation and maintenance: (i) modeling, simulation, optimization and visualization of products, factories and processes, (ii) Networking and distribution of data, models, tools and computer resources with the support of grid technologies. We have next benefits: reduction of time, lowering of costs and increase of throughput and quality.

2. CYBER-PHYSICAL SYSTEMS (CPSs) AND CYBER-PHYSICAL MANUFACTURING SYSTEMS (CPMSs)

Cyber-physical systems (CPSs) are enabling technologies which bring the virtual and physical worlds together to create a truly networked world in which intelligent objects communicate and interact with each other [25]. Together with the internet and the data and services available online, embedded systems join to form cyber-physical systems. CPSs also are a paradigm from existing business and market models, as revolutionary new applications, service providers and value chains become possible [22, 23, 25].

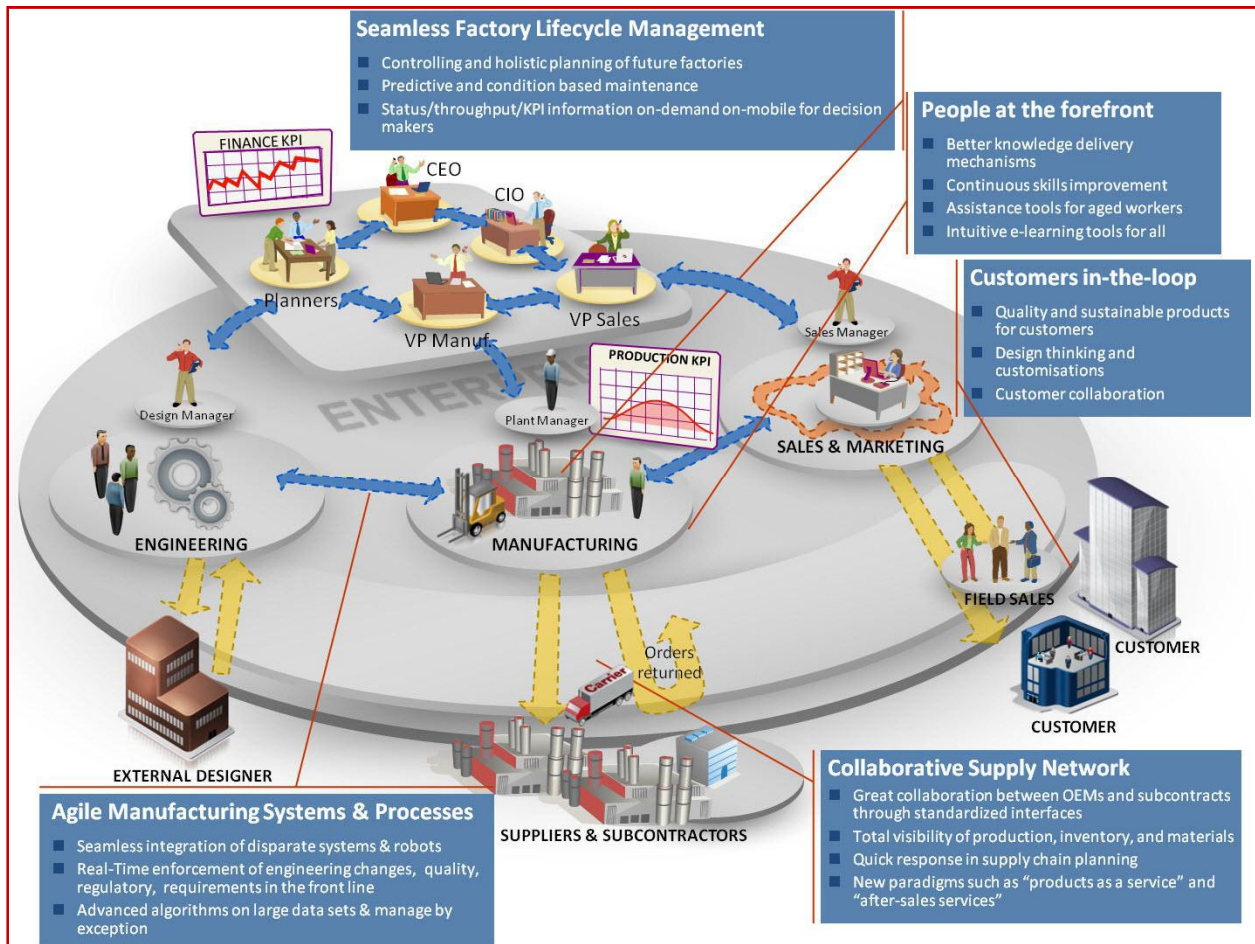


Figure 1. A Manufacturing 2020 enterprise – advanced model [2]

The merging of the virtual and the physical worlds through CPSs and the resulting fusion of manufacturing processes and business processes are leading the way to a new industrial age best defined by the INDUSTRIE 4.0 project’s “smart factory” concept, Figure 2 [25].

The deployment of CPSs in manufacturing systems gives birth to the “smart factory”. Smart factory products, resources and processes are characterized by CPSs; providing significant real-time quality, time, resource, and cost advantages in comparison with classic manufacturing systems [25]. The smart factory is designed according to sustainable and service-oriented business practices.

These insist upon adaptability, flexibility, self-adaptability and learning characteristics, fault tolerance, and risk management.

High levels of automation come as standard in the smart factory: this being made possible by a flexible network of CPSs - based manufacturing systems which, to a large extent, automatically supervise manufacturing processes. Flexible manufacturing systems which are able to respond in almost real-time conditions allow in-house manufacturing processes to be radically optimized [25]. Manufacturing advantages are not limited solely to one-off manufacturing conditions, but can also be optimized according to a global network of adaptive and self-organizing manufacturing units belonging to more than one operator.

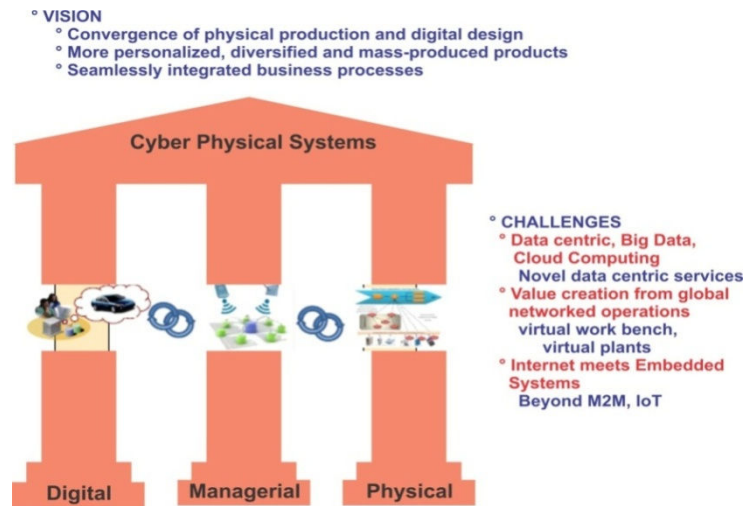


Figure 2. CPSs – Basic facts [25]

Smart factory manufacture brings with it numerous advantages over conventional manufacture, as example [22, 23,25] : (i) CPS - optimized manufacturing processes: smart factory “units” are able to determine and identify their field(s) of activity, configuration options and manufacture conditions as well as communicate independently and wirelessly with other units; (ii) Optimized individual customer product manufacturing via intelligent compilation of ideal production system which factors account product properties, costs, logistics, security, reliability, time, and sustainability considerations; (iii) Resource efficient production; and (iv) Tailored adjustments to the human workforce so that the machine adapts to the human work cycle.

This approach as a manufacturing revolution in terms of both innovation and cost and time savings and the creation of a “bottom-up” manufacturing value creation model whose networking capacity creates new and more market opportunities.

3. OUR RESEARCH IN THE FIELD OF CPMSs AND CYBER-PHISICAL QUALITY MODEL (CPQM)

The digital manufacturing concept could address majority of the mentioned challenges, and it focuses on the improved automation and digitisation of the planning, design, manufacturing, inspection, management, and other activities in production system in a wider context. The digital model of a product could be used to simulate and analyse the manufacturing processes, production planning scenarios, as well as machining/tool path, inspection and resource utilisation scenarios. For a manufacturing system with typical machining operations, factory-wide knowledge integration requires an integrated CAD-CAPP-CAM-CNC-CAI and integration with other production-related information systems such as enterprise resource planning (ERP), manufacturing execution system (MES), advanced planning and scheduling (APS), etc. A standard for the exchange of product data model (STEP), along with a STEP compliant numerical control (STEP-NC), has been developed to enable integration and exchange of design and manufacturing numerical data. STEP is based on feature technology, and it provides a neutral and interoperable format of product data, independent of any system and suitable for transfer, processing and communication among different systems. Feature technology provides us to associate not only geometric and topological information, but also form features and tolerances that could be used in CAD-CAPP-CAM-CNC-CAI chain [5, 6].

Digital quality represents virtual simulation of digital inspection in digital company, based on a global model of interoperable products (GMIP). GMIP represents the integration CAD-CAM-CAI models in the digital environment. The essence of of this research is solved the concept of metrology integration into GIMP for the CMM inspection planning, based on Cyber-Physical Quality Model (CPQM) [24].

Feature-based technology and STEP standard could be considered as a main integrator in terms of linking the engineering and manufacturing domain within various CAx systems. To specify the part data representation for a specific application, STEP (ISO 10303) uses Application Protocols (AP) [26].

Beside STEP APs, the following standards and interfaces are important for CAI. A vendor-independent Dimensional Measuring Interface Standard (DMIS) provides the bidirectional communication of inspection data between systems and inspection equipment, and is frequently used with CMMs. It is intermediate format between a CAD system and a CMM’s native proprietary language. Dimensional Markup Language (DML) translates the measurement data from CMMs into a standardised file that could be used for data analysis and

reporting. I++ DME-Interface provides communications protocol, syntax and semantics for command and response across the interface, providing a low level inspection instructions for driving CMMs [26, 27], figure 3.

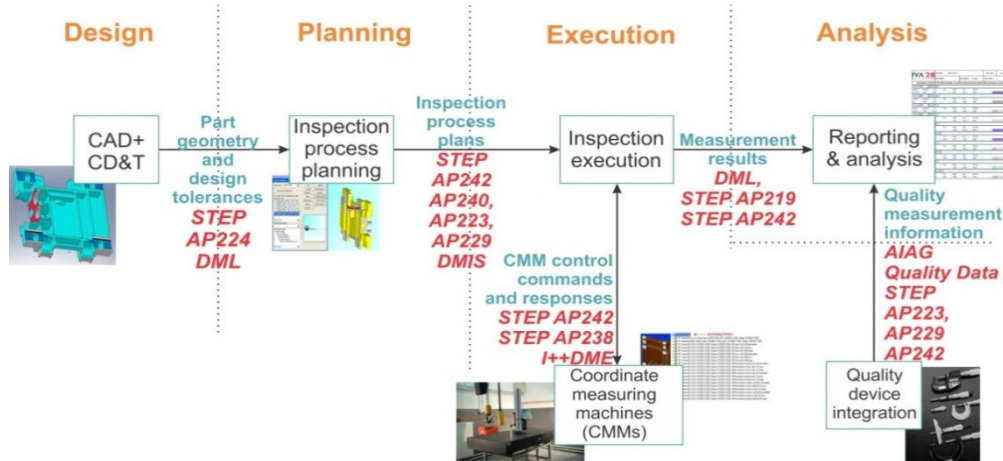


Figure 3. CMM interoperability model (adopted [27])

CPMS consists of autonomous cooperative elements and subsystem (subsystem quality, including in what the research related), which are connected to each other with a situation dependent on way, at all levels of manufacturing: of processes on the machine to production and logistics network. Modeling of their work as well as predicting their behavior is part of the basic and applied research tasks, thereby assuming control of any level of the system.

The basic question is to explore the relationships and models of autonomy, collaboration, and optimize the response of the systems, to the horizontal, as well as to vertical, control, monitoring, decision and learning. Integration of analytical and simulation-based approach becomes more important for engineers than ever before.

Global model of interoperable products (GMIP) represents data integration at the level of CPMS, respectively on level PLM, if looked upon CPMS as a network systems of product life cycles. Cyber-Physical Quality Model (CPQM) done the integration of a global interoperable data for the quality level CPS and products in the digital environment, on platform of knowledge-oriented approach. This concept is a basic framework on which the research is done in our Laboratory, figure 4.

Based on model of digital platform for SMEs (IVA 28), as a starting base for SPMSs developing, the machined parts are then inspected on CMM (“DEA Global Performance” 3D CMM) [5]. Renishaw probe head PH10MQ is used to allow for five axes measuring operations. Based on the STEP model of a part, software PC DIMS 4.3 is used for the development of an inspection program and specification of all related issues. First, the orientation of a part in CMM working space is defined (figure 4- right), and then the scanning probe and stylus holder are selected (figure 4-left).

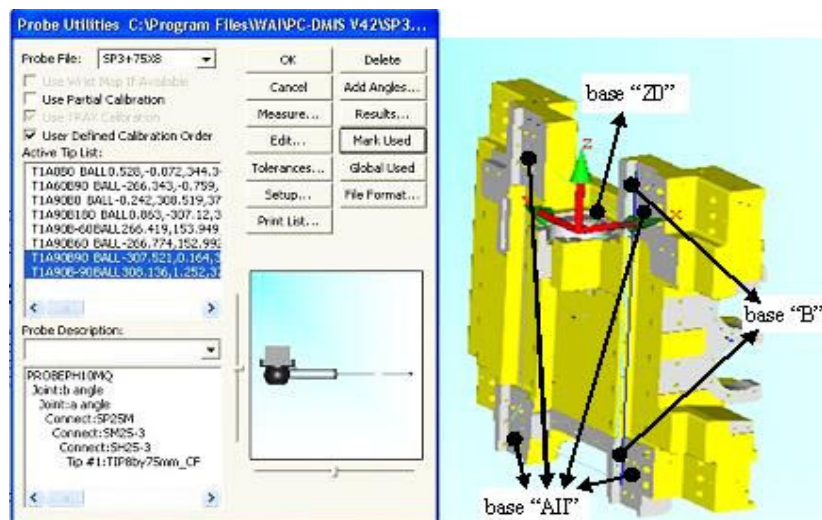


Figure 4. The scanning probe selection– left and the part orientation on CMM - right.

The measuring operations developed by PC DIMS are transferred to the control system that specifies the movement of drive system of a machine or probe head. For the observed part (Set B) the measuring process in CMM is conducted in one operation.

The inspection program is developed as follows. After the start-up instructions, it is necessary to align CMM coordinate system with the part coordinate system. For this purpose, the plane "AII", line "B" and plane "Z0" are defined as bases for the orientation of x, y and z axes of a part (figure 4 – right). Then, the measurement of base plane flatness and base line straightness is performed. After the specification of a part coordinate system, the measurement of functional dimensions could be performed according to the functional requirements. In this case (for Set B), first the parallelism of two planes and several perpendicularities are inspected. Finally, the functional requirements of a part are measured: flatness of two planes and straightness of one line. Based on these settings, the automatic measurement program is run to perform the specified measuring operations, followed by the generation of a measuring report (based on DML). It is important to mention that the required flatness is 0.02 μm and the required straightness is 0.01 μm that indicate extremely high accuracy demands.

4. CONCLUSIONS

In the above presented of SPMSs for quality as a CAI model in IVA-28, it is important to consider the newly developed AP242 that is designed to improve the interoperability in STEP, support model-based GD&T and allows for CMM programming based on the inspection features. AP242 enables 3D product manufacturing information (PMI) with semantic representation and 3D model-based design and data sharing on service-oriented architecture (SOA). The adoption of AP242 will further enhance interoperability among different information systems and data exchange along the supply chain. This could be of paramount importance for SMEs, since it could allow usage of lower cost software based on standard interfaces which should lead to a cost reduction [27]. On the other hand this concept (CPQM), will be integrated in CPMSs model in our future researches.

5. REFERENCE

- [1] www.manufuture.org (accessed July 2014).
- [2] www.efra.eu (accessed July 2014).
- [3] www.wmf.org (accessed July 2014).
- [4] www.mas.bg.ac.rs (accessed July 2014).
- [5] Majstorovic, V., Sibalija, T., Ercevic, B., Ercevic, M. (2013): *CAPP model for prismatic parts in digital manufacturing. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Digital Product and Process Development Systems, Springer, Vol.411/2013, p. 190-204.
- [6] Majstorović V. (2012) *Towards a Digital Factory - Research in the World and our Country*, *Journal of Applied Engineering Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 161-165, 2012.
- [7] Sibalija, T., Majstorovic, V., *An integrated simulated annealing-based method for robust multiresponse process optimisation* (Article), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, April 2012, Volume 59, Issue 9-12, pp 1227-1244, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-011-3572-3>.
- [8] Sibalija, T., Majstorovic, V., *An integrated approach to optimise parameter design of multi-response processes based on Taguchi method and artificial intelligence* (Article), *Journal of Intelligent Manufacturing* October 2012, Volume 23, Issue 5, pp 1511-1528, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-010-0451-y>.
- [9] Majstorovic, V., Sibalija, T., *Application of the Advanced Quality Improvement Techniques: Case Study*, *International Monograph - Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management*, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Volume 384, 2012, pp 181-189, www.ifip.org.
- [10] Majstorovic Vidosav D, Trajanovic Miroslav D, Vitkovic Nikola, Stojkovic Milos S, *Reverse engineering of human bones by using method of anatomical features*, *CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY*, (2013), vol. 62 br. 1, str. 167-170, www.cirp.org.
- [11] Vidosav D. Majstorovic, Tatjana Sibalija, *Quality Improvement Using Taguchi's Model: – A Case Study from Serbia*, *Scientific Journal of RTU: Economics and Business*, Vol.24, 2013, pp.94-98. ISSN 14077337, doi: 10.7250/eb.2013.011, <https://ortus.rtu.lv/science/en/series/3>.

- [12] Majstorovic, V., *Manufacturing Innovation and Horizon 2020 – Developing and implement ‘new manufacturing’*, Introduction Plenary Presentation, 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANUFACTURING SYSTEMS - ICMaS 2013, Bucharest, Romania. Proceedings, pp. 12-18. <http://icmas.eu/>.
- [13] MANUFACTURING AND HORIZON 2020 - *What are important for Serbia? Plenary presentation - Review paper*, Prof. Dr. Vidosav D. Majstorovic, 35th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, Kraljevo, Serbia, Proceedings. www.mfkv.kg.ac.rs/ocs/index.php/spm/35ISPMS/schedConf/cfp
- [14] Vidosav MAJSTOROVIĆ, et al., *CAI MODEL AND DIGITAL FACTORY*, International Journal - Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 8, Issue 1, pp.25-28, 2013 ISSN 2067-9238, Romania, Bucharest. <http://icmas.eu/>.
- [15] Prof. Dr. Vidosav D. Majstorovic, *EDUCATION OF PRODUCTION ENGINEERS FOR DIGITAL MANUFACTURING*, 35th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, Kraljevo, Serbia. Proceedings. www.mfkv.kg.ac.rs/ocs/index.php/spm/35ISPMS/schedConf/cfp
- [16] Majstorovic V., Zivkovic S.: *Developed computer aided inspection method for free-form surfaces applied on aeronautical lift and control surfaces*, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, Cracow-Kielce, Poland, Proceedings, pp. 142 – 148. <http://www.imeko-tc14.org/>.
- [17] Majstorović, V., Sibalija, T. (2012) Knowledge-based system for Taguchi’s robust design model, Proceedings of the 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises – MITIP 2012, pp. 486-498, Budapest, October 2012. <http://www.mitip.org/>.
- [18] Majstorović, V., Sibalija, T., Markovic, V. (2012) *Analysis of the effects of quality management system on the business performances: case study on pharmaceutical industry in Serbia*, Proceedings of the International Conference on Advances in Production Management Systems – AMPS 2012, pp. 28-36, Rhodes, September 2012. www.apms-conference.org.
- [19] Majstorovic, V., Sibalija, T., *Intelligent system for engineering optimization based on Taguchi model*, SIG Meeting of European project “Virtual Factory Framework” (VFF) FP7, Budapest, april 2012., Proceedings, pp. 24-30.
- [20] Majstorovic, V., Sibalija, T., *Hybrid Knowledge-based Process Designer Model - PIP_12 – WMF 2012 - Scientific Forum and Proposers’ Day*, World Manufacturing Forum, Stuttgart, 2012.
- [21] <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/> (accessed July 2014).
- [22] <http://www.bmbf.de/en/19955.php> (accessed July 2014).
- [23] <http://www.plattform-i40.de/> (accessed July 2014).
- [24] Project TR 35022 – *Thema – subproject 6. Digital Quality Model in Digital Manufacturing (On Serbian Language)*, 2012 – 2015, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade.
- [25] *Industrie 4.0, Smart Manufacturing for the Future*, Berlin, 2014.
- [26] Katzenbach1, A., Handschuh, S., Vettermann, S. (2013) JT Format (ISO 14306) and AP 242 (ISO 10303): The Step to the Next Generation Collaborative Product Creation. IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, October, 2013.
- [27] <http://www.ap242.org/> (accessed July 2014)



Bulatović Miodrag¹, Đurović Dušan²

MODEL MJERENJA IZVRSNOSTI PROCESA ODRŽAVANJA PROCJENOM PERFORMANSI

Abstrakt

Poslovna izvrsnost podrazumijeva uređeni sistem koji se stalno unapređuje i daje dobre finansijske rezultate. Poslovna izvrsnost je sinonim za poslovne uspješnosti koji obuhvata sve elemente poslovnog sistema kao izvrsnost organizacije, izvrsnost proizvodnje, izvrsnost održavanja i drugo.

Izvrsnost održavanja predstavlja okvir za izazovan kritički osvrt na cjelovitost i produktivnost svakog poslovnog procesa ili projekta. Kroz izvrsnost održavanja, organizacija nastoji da osigura visoki kvalitet procesa koji podržava kontinuirani napredak u funkciji održavanja i usmjerava se na različita područja kao što su strategije, zaposleni, informacije, rad i ostali poslovni aspekti održavanja.

Ključne riječi: Poslovna izvrsnost, održavanje, izvrsnost održavanja.

1. MODELI IZVRSNOSTI PROCESA ODRŽAVANJA

Kriterijumi izvrsnosti održavanja, su smjernice za održavanje prakse održavanja. Korišćenjem tih kriterijuma preduzeće će moći da procijeni svoje mogućnosti upravljanja održavanjem putem samoocjenjivanja.

Nekoliko modela izvrsnosti održavanja, koji su povezani sa nagradama u oblasti kvaliteta, predstavljaju koristan okvir unutar koga se može poboljšati kvalitet i uspješnost [2], [3], [4]: Australijanski model izvrsnosti održavanja (2007), Sjeverno američki model izvrsnosti održavanja (2007), TPM model izvrsnosti je bio ukorijenjen kao kontinuirana metodologija poboljšanja u širokom rasponu industrije, Japanski model izvrsnosti (Shingo, 2007).

Nije moguće dati standardni recept za postizanje izvrsnosti održavanja, s obzirom na složenost pozicije održavanja u različitim organizacijama, ali je moguće objasniti neke zajedničke aspekte u različitim vrstama industrije.

Definicija ciljeva održavanja može se posmatrati prema max/min principu – maksimiziranje izlaza održavanja koje odgovara tehničkoj ispravnosti opreme – minimiziranje ulaza za održavanje sa aspekta broja zaposlenih, materijalnih sredstava i troškova uopšte.

Najvažnije je da su svi ulazni faktori u interakciji jedni sa drugima, s obzirom, da relativno male promjene u bilo kom ulaznom faktoru mogu značajno uticati na izlaz tj. radnu sposobnost opreme.

Put prema izvrsnosti u proizvodnji treba započeti s težnjom za postizanje svjetske klase održavanje odnosno izvrsnosti održavanja.

¹ Prof. dr Miodrag Bulatović, bulatovm@ac.me

² Mr Dušan Đurović, „Mehanizacija i programat“ – Nikšić, dusan-dj@t-com.me

2. ISTRAŽIVANJE IZVRSNOSTI PROCESA ODRŽAVANJA

Utvrđivanje izvrsnosti održavanja mjerenjem performansi održavanja zasniva se na mjerenju – procjeni učešća određenih performansi. Model se bazira na primjeru iz literature [2], pri čemu su korišćenje izabrane performanse i njihovo ponderisano učešće: 1. Upravljanje, 2. Zaposleni, 3. Planiranje i raspoređivanje, 4. Održavanje procesa i praksa (Tehnologija i tehnika održavanja), 5. Pouzdanost i poboljšanje, 6. Ostale poslovne karakteristike (rentabilnost, ekonomičnost i dr.).

U radu je, kao primjer, dat analitički pristup odabranih ponderisanih performansi 1,3,4 i 5 za odabrani objekat istraživanja (tabele 1-4). Ocjena su određivane brainstorming metodom, tj. učešćem kompetentnih lica iz organizacije i lica van organizacije (konsultanti i projektanti unapređenja sistema), koja prate poslovanje i razvoj organizacije dugi niz godina [5]. Svaka od ponderisanih performansi – kategorija ocjenjuje se od 1 do 5. Ukupni maksimalni ponder je 100, što predstavlja maksimalni tj. ukupni nivo izvrsnosti održavanja.

1. Upravljanje - sa ponderom od 16% u ukupnom zbiru izvrsnosti

Ova kategorija performansi obuhvata ulogu upravljanja održavanjem, sa vizijom razvoja, unutar određene organizacije na korporativnom i preduteničkom nivou (tabela 1).

Tabela 1. Model utvrđivanja izvrsnosti održavanja mjerenjem performansi održavanja - upravljanje

Pitanje	Srednja ocjena	Komentar
a. Plansko održavanje je dio poslovne filozofije (cilj i misije) organizacije?	4	Inženjering organizacije obuhvata planske (preventivne) programe održavanja, kao dio operativne filozofije
b. Organizacija ima pisana dokumenta kojima definiše ciljeve i procese koji doprinose realizaciji i usavršavanja održavanja u organizaciji?	4	Organizacija ima sertifikat sistema kvaliteta ISO 9001, kao i ISO14000 i OHSAS. Dokumenta se moraju stalno preispitivati i unapređivati.
c. Upravljački tim daje uputstva i smjernice za trajno funkcionalno poboljšanje održavanja?	3	Ovaj proces treba da se realizuje shodno procedurama koja uključuju preispitivanje od strane rukovodstva, što nije zaživjelo na potrebnom nivou
d. Izvještaji o izvršenju planiranih aktivnosti održavanja sa ključnim parametrima redovno se pregledaju od strane upravljačkog tima održavanja?	4	Izvršenje planske aktivnosti održavanja analiziraj se povremeno (nedeljno i mjesečno), uglavnom iz ugla raspoloživosti opreme, što nije dovoljno.
e. Referentna dokumenta iz oblasti održavanja, u organizaciji rutinski se poštuju?	4	Referentna dokumenta i procedure u oblasti održavanja raspoloživi su ali ih se strogo ne priržavaju.
<i>Zbir srednjih ocjena</i>	19	
<i>Maksimalni mogući zbir</i>	25	<i>Ostvarenje 19/25=76%</i>
<i>Učešće u ukupnom ponderu 16% x 0,76</i>	12,6%	

3. Planiranje i raspoređivanje u održavanju - sa ponderom od 13% u ukupnom zbiru izvrsnosti

Ova kategorija performansi pokazuje kako preduzeće razvija, implementira, kontroliše i poboljšava planiranje i raspoređivanje poslova održavanja za postizanje ciljeva organizacije (tabela 3).

Tabela 2. Model utvrđivanja izvrsnosti održavanja mjerenjem performansi održavanja - planiranje

Pitanje	Srednja ocjena	Komentar
a. Da li je koncept planiranja održavanja podržan od strane proizvodnje kao partnera?	4	Proizvodni timovi ne prihvataju uvijek koncept održavanja, što se ponekad održava na raspoloživost – gotovost opreme a to znači i proizvodne rezultate.
b. Da li se timski sprovodi planiranje i raspoređivanje poslova održavanja?	4	Periodični planovi održavanja rade se timski.
c. Da li su preventivno i prediktivno	4	U planovima osnov su preventivno i

održavanje osnov planiranja i raspoređivanja u održavanju?		prediktivno održavanje, mada se to ne odnosi u potpunosti i na realizaciju planova.
d. Da li prioritet u planiranju imaju materijalni (rezervni djelovi) i ljudski resursi (zaposleni), oprema održavanje (alati i pribori) i terminiranje aktivnosti?	3	Često nedefinisane kompetencije onemogućavaju dobro planiranje i raspoređivanje poslova održavanja.
e. Da li se primjenjuje monitoring izvršenja planova i raspoređivanja održavanja?	3	Monitoring (provjera) izvršenja planova se primjenjuje, na bazi čega se vrši ocjenjivanje, ali sistem monitoringa nije dovoljno razrađen.
f. Da li se vode zapisi o utvrđenom stanju, prilikom provjera u definisanim intervalima?	4	Proces održavanja je dokumentovan, kontroliše se u određenoj mjeri u definisanim intervalima.
g. Da li je rad sistema osiguran kada se pregledi i popravke ne obavljaju kako je planirano?	4	Samo u slučajevima kada postoje rezervni sistemi, što je u građevinarstvu čest slučaj, osim kod specijalne mehanizacije, nedostatak pregleda i planiranih popravki ne utiče u većoj mjeri.
k. Da li je rad svih sistema praćeni, kao i aktivnosti održavanja praćeni sa jednog mjesta (računarska podrška)?	2	Preduzeće nema kompjutersko praćenje stanja svih sistema, u građevinarstvu to je teško ostvarljivo.
i. Da li zapisi za preglede i popravke zadovoljavaju zahtjeve lokalnih propisa i tandarda (posuda pod tlakom, kotlovi, kompenzatore, itd.)?	4	Da, u najvećem broju slučajeva.
<i>Zbir srednjih ocjena</i>	32	
<i>Maksimalni mogući zbir</i>	40	<i>Ostvarenje 32/40=80%</i>
<i>Učešće u ukunom ponderu 13% x 0,80</i>	10,4%	

4. Održavanje procesa i praksa - sa ponderom od 18% u ukupnom zbiru izvrsnosti

Ova kategorija performansi pokazuje kako preduzeće uspostavlja metode održavanja, prati, analizira i poboljšava predviđanje, preventivu i reaktivne aktivnosti u ispunjavanju postavljenih ciljeva organizacije (tabela 4).

Tabela 3. Model utvrđivanja izvrsnosti održavanja mjerenjem performansi održavanja – održavanja procesa

Pitanje	Srednja ocjena	Komentar
a. Da li su periodični pregledi opreme u skladu sa preporukama proizvođača i u skladu sa preporučenim standardima i državnim propisima?	5	Periodični preventivni pregledi obavljaju se u skladu sa preporukama proizvođača i u skladu sa preporučenim standardima i državnim propisima.
b. Da li su uspostavljeni preventivni inspekcijski pregledi i da li se izvršavaju na vrijeme?	4	Preventivni pregledi i intervencije su planirani ali se manjim dijelom ne izvršavaju zbog neažurnosti izvršilaca.
c. Da li se inspekcijski pregledi sprovode tačno kako je preporučeno i u odgovarajućim intervalima?	3	Zbog proizvodnih ograničenja neki zadaci održavanja moraju biti odgođeni. U nekim slučajevima izvršioci ne sprovode disciplinovano preporuke za preventivne – inspekcijske preglede.
d. Da li se uočena odstupanja prilikom preventivnih pregleda mogu uvijek otkloniti prije vraćanja opreme u rad?	4	Gdje popravke nisu ograničene proizvodnim zahtjevima, u najvećem broju slučajeva uočene nepravilnosti u radu opreme mogu se otkloniti
e. Da li je plan podmazivanja dostupan kako bi se osiguralo podmazivanje na rutinski i pravilan način?	5	Preventivnim programom održavanja obuhvaćeno je podmazivanje opreme. Plan podmazivanja je dostupan izvršiocima i omogujava rutinski i pravilan način izvršenja.
f. Da li je definisana kritična oprema (na osnovu uticaja na sigurnost proizvodnje, kvaliteta, zaštite životne sredine, troškova eksploatacije) u cilju prioriteta prediktivnog	5	Sva oprema je obuhvaćena planom i programom preventivnog održavanja, pri čemu je vođeno računa o navedenim elementima.

održavanja?		
g. Da li su utvrđeni i objavljeni signali za alarmantno stanje parametara sistema koji se održavaju?	5	U okviru plana i programa preventivnih pregleda jasno su definisane granice dozvoljenih stanja parametar na osnovu kojih se obavljaju odgovarajuće intervencije.
h. Da li su zapisi o stanju opreme formalizovani i da li se analiza trendova na osnovu zapisa koristi za donošenje odluka o aktivnostima održavanja?	4	Zapisi su formalizovani ali se istorija podataka o stanju opreme na osnovu njih još uvijek ne koristi u zadovoljavajućoj mjeri.
i. Da li su procedure preventog održavanja (pregledi i intervencije, podmazivanje) tako uređeni da omoguavaju nesmetano izvođenje preventivnih aktivnosti?	5	Da.
j. Da li je oprema za održavanje lako dostupna za korišćenje u svakom momentu kada je to potrebno?	4	Oprema održavanja se nalazi u radionicama i magacinima alat i pribora, odakle je dostupna za korišćenje. Trebovanje i vraćanje opreme održavanja nije uvijek u skladu sa procedurom.
<i>Zbir srednjih ocjena</i>	44	
<i>Maksimalni mogući zbir</i>	50	<i>Ostvarenje 44/50=88%</i>
<i>Učešće u ukunom ponderu 18% x 0,88</i>	15,48%	

5. Pouzdanost i poboljšanje - sa maksimalnim ponderom od 20% u ukupnom zbiru izvrsnosti

Ova kategorija performansi pokazuje kako preduzeće uspostavlja i održava fokus na potrebe poslovanja, posebno na poboljšanje procesa pouzdanosti, čime se povećava iskorišćenje opreme, pouzdanost procesa i osiguravanje kvaliteta (tabela 5).

Tabela 4. Model utvrđivanja izvrsnosti održavanja mjerenjem performansi održavanja - pouzdanost

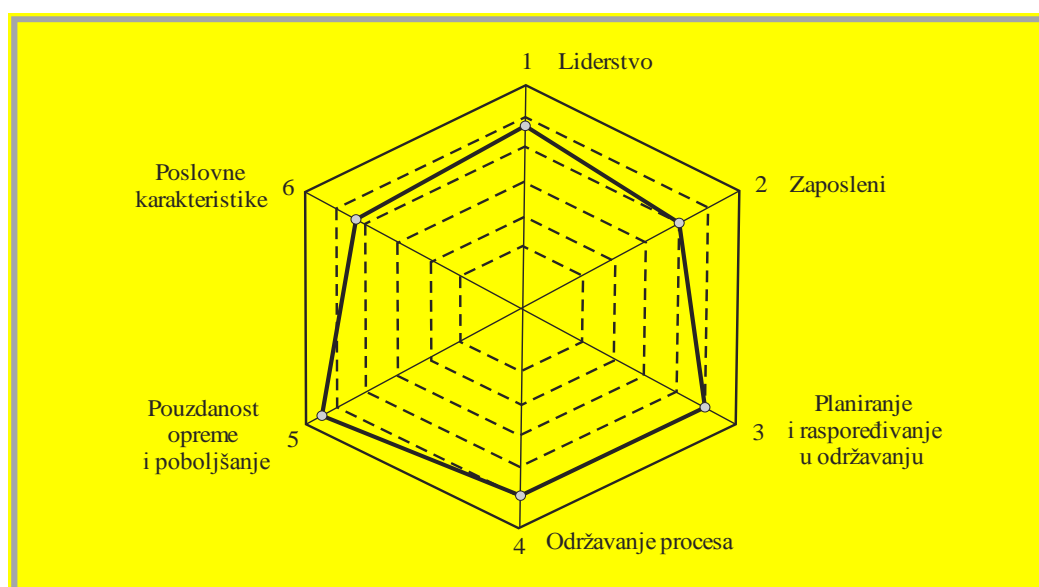
Pitanje	Srednja ocjena	Komentar
a. Da li se zapisi održavanja povremeno revidiraju kako bi se poboljšalo preventivno održavanje u skladu sa planiranim aktivnostima?	5	Da, posebno u slučajevima izmene performansi opreme, izmjene opreme ili nove opreme.
b. Da li dugoročni planovi obezbjeđuju pouzdanost opreme u njihovom životnom vijeku?	4	Da, osim u sličjevima nove opreme za koju treba prilagoditi postojeće ili uraditi nove planove.
c. Da li sistem održavanja za obradu problema uključuje identifikaciju i kvalifikaciju problema, uzroke problema, dugoročne korektivne aktivnosti i praćenje njihove efikasnosti, čime bi se osigurao uspjeh?	4	U najvećem broju slučajeva korektivnim aktivnostima otklanjaju se slaba mjesta na opremi.
d. Da li se detaljno identifikuju mjere za produženje rada, kao i praćenje njihove efikasnosti?	5	Produženje rada održavanja na opremi često je izuzetno bitno za izvršavanje ciljeva, tako da se o ovakvim aktivnostima vodi posebno računa.
e. Da li se vodi istorija podataka o promjenama performansi opreme, frekvenciji otkaza, načinu oštećenja, srednje vrijeme do otkaza, srednje vrijeme trajanja opravke i dr?	4	Ovakvi podaci veoma su bitni za procese unapređenja održavanja tj. njegovu izvrsnost ali i opreme i vode se u najvećem broju slučajeva.
<i>Zbir srednjih ocjena</i>	22	
<i>Maksimalni mogući zbir</i>	25	<i>Ostvarenje 22/25=88%</i>
<i>Učešće u ukunom ponderu 20% x 0,88</i>	17,6%	

U tabeli 5 data je zbirna tabela rezultata svih pondera 1,2,3,4,5 i 6.

Tabela 5. Zbirna tabela rezultata izvrsnosti održavanja

		Maksimalno	Ostvareno	%	Ponder %	Ostv.pon.%	Srednja maksimalna vrijednost	Srednja ostvarna vrijednost	Rang
1	2	3	4	5=4/3	6	7=4x5	8	9=8x5	10
1		25	19	76	16	12,6	5	3,8	IV
2		35	21	60	20	12	5	3	VI
3		40	32	80	13	10,4	5	4	III
4		50	44	88	18	15,48	5	4,4	I-II
5		25	22	88	20	17,6	5	4,4	I-II
6		20	13	65	13	8,45	5	3,25	V
	Ukupno	195	151	77	100	76,53	5	3,871	

Grafički prikaz rezultata izvrsnosti održavanja u datom primjeru (slika 1.)



Slika 1. Rezultati ocjene izvrsnosti održavanja

Izvrsnost održavanja mjerena preko performansi iznosi 3,871 što je u odnosu na maksimalnih 5 iznosi 77,42%.

3.ZAKLJUČAK

Može se zaključiti da najviše ocjene imaju karakteristike 1,3,4 i 5, a najmanje 2, što ukazuje na potrebu za unapređenjem odlučivanja, motivacije i svijesti zaposlenih.

Analizom svakog elementa performansi može se utvrditi uzrok manje vrijednosti performanse. a s tim i način poboljšanja.

Ovaj rezultata ukazuje na viši nivo izvrsnosti održavanja datog objekta istraživanja, što je veoma zadovoljavajuće.

LITERATURA

- [1] Arsovski Z., Arsovski S., Milanović I., Novi pristup razvoju i implementaciji informacionih sistema za unapređenje održavanja, 5th International Conference DQM – 2002, s. 11-21.
- [2] Okhovat, M.A. et al. Development of world class manufacturing framework by using six-sigma, total productive maintenance and lean, Scientific Research and Essays Vol. 7(50), pp. 4230 -4241, 24 December, 2012
- [3] Dublin Institute of Technology, The Research and Implementation of Maintenance Excellence on Clean Utility Systems in the Pharmaceutical Industry, Pdraig Liggan, Dublin Institute of Technology, pliggan@amgen.com, 2008-01-01
- [4] Yang C., Development of an integrated model of a business excellence system, Total Quality Management, vol. 20, nos. 9-10, 2009, s. 931-944.
- [5] Đurović, D., Istraživanje poslovne izvrsnosti – separat istraživanja u okviru doktorske disertacije, 2014.

Bulatović Miodrag, Đurović Dušan

MODEL MEASUREMENTS OF EXCELLENCE MAINTENANCE PROCESS PERFORMANCE EVALUATION

Abstract: *Business excellence involves a regulated system that constantly improves and makes good financial results. Business excellence is synonymous with business success, which includes all the elements of the business system: the excellence of the organization, production excellence, excellence maintenance and more. The organization seeks to ensure, through the excellence of maintenance, high quality process that supports continuous improvement in order to maintain and focuses on various areas, such as strategy, employees, information, work, and other business aspects of maintenance.*

Keywords: *Business Excellence, maintenance, maintenance excellence.*



Stanojević, N., Vasić, M., Stanojević, D.¹

SISTEM ZA UPRAVLJANJE ENERGIJOM, KAO MERA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Rezime

Rad daje pregled osnovnih informacija o sistemu za upravljanje energijom – ISO 50001, kroz pregled osnovnih zahteva, korelaciju sa ostalim standardima koje je objavila ISO organizacija i koristima koje proističu iz njegove primene. Imajući u vidu da je ovo nov standard i da je njegova primena ograničena na svega 2 godine unazad, u radu je dat pregled iskustava nekih svetskih organizacija koje su među prvima uvele ovaj standard.

Ključne reči: Energetska efikasnost, Upravljanje energijom, ISO 50001

1. UVOD

Energetska efikasnost podrazumeva niz mera koje preduzimamo u cilju smanjenja potrošnje energije, a koje pri tome ne narušavaju uslove rada i života. Pojam energetska efikasnost ima dva moguća značenja, gde se jedno odnosi na tehničke uređaje, dok se drugo odnosi na određene mere i ponašanja. Za uređaje kažemo da su energetska efikasni ako imaju visok stepen korisnog dejstva tj. male gubitke prilikom transformacije jednog oblika energije u drugi [2].

Kada pomislimo na štednju, uglavnom su prve asocijacije odricanje, dok efikasna upotreba energije direktno vodi ka povećanju kvaliteta života, konkurentnosti privrede i energetske bezbednosti. Krajnji cilj je svesti potrošnju energije na minimum, a pri tome ne narušiti nivo komfora, već zadržati ili čak povećati nivo udobnosti. Rezultat povećane efikasnosti su značajne uštede u finansijskom smislu, uz i direktan uticaj na očuvanje životne sredine.

Energetska efikasne mere podrazumevaju ponašanje koje se primenjuje u cilju smanjenja potrošnje energije. Bez obzira da li je reč o tehničkim ili netehničkim merama ili o promenama u ponašanju, sve mere podrazumevaju isti ili čak viši stepen ostvarenog komfora i standarda. Jedna od mera je svakako i implementacija standarda ISO 50001:2011.

2. ISO 50001 – SISTEM ZA UPRAVLJANJE ENERGIJOM

ISO (International Organization for Standardization) je međunarodna organizacija za standardizaciju, u koju je učlanjeno oko 160 nacionalnih uprava za standardizaciju. Standardi sa prepoznatljivom skraćenicom ISO obuhvataju preko 18.600 poslovnih, državnih i društvenih standarda. Oni doprinose povećanju trgovine, širenju znanja i rasprostranju tehnoloških inovacija i pospešuju razmenu praktičnih dostignuća u dobrom upravljanju i ocenjivanju usaglašenosti. ISO standardi obezbeđuju rešenja i donose korist za skoro sve sektore aktivnosti, uključujući poljoprivredu, građevinarstvo, mašinstvo, proizvodnju, distribuciju, transport, medicinsku opremu, informacione i komunikacione tehnologije, čovekovu okolinu, energetiku, upravljanje kvalitetom, usaglašenost proizvoda i usluga.

ISO 50001 Sistem menadžmenta energijom (Energy Management System) je jedan od najnovijih standarda iz oblasti sistema menadžmenta. Nastao je kao odgovor na zahteve za očuvanje životne sredine, energetska efikasnost i održivi razvoj.

Standard ISO 50001 je kompatibilan sa svim standardima iz oblasti sistema menadžmenta koje je objavio ISO i može se primeniti u svim organizacijama bez obzira na veličinu i delatnost. Efikasno korišćenje energije pomaže svim ovim organizacijama da uštede novac i da čuvaju izvore energije, ali i da smanje štetni

¹⁾ Mr Nada Stanojević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (nstanojevic@mas.bg.ac.rs), Miloš Vasić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mvasic@mas.bg.ac.rs), Darko Stanojević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dstanojevic@mas.bg.ac.rs),

uticaj koji dovodi do klimatskih promena. ISO 50001, pomoću sistema upravljanja energijom (EnMS) usmerava organizacije (u svim sektorima delatnosti) da energiju koriste efikasnije.

ISO 50001 je zasnovan na modelu stalnog unapređivanja sistema upravljanja korišćenjem već dobro poznatih standarda ISO 9001 ili ISO 14001. Na taj način olakšano je organizacijama da integrišu upravljanje energijom u svoje opšte napore da unaprede upravljanje kvalitetom i životnom okolinom.

ISO 50001:2011 obezbeđuje organizacijama:

- Razvoj politike efikasnijeg korišćenja energije
- Određivanje ciljeva i zadataka da se ostvari ta politika
- Korišćenje podataka za bolje razumevanje i donošenje odluka o korišćenju energije
- Merenje rezultata
- Uvid u kvalitet ostvarivanja te politike
- Stalno unapređivanje upravljanja energijom

Kao i za druge ISO standarde sistema upravljanja, sertifikacija je moguća ali nije obavezna. Neke organizacije odlučuju da primene ovaj standard samo zbog koristi koju im on donosi, dok druge odlučuju da se sertifikuju da bi pokazale svojim poslovnim partnerima da primenjuju sistem upravljanja energijom.

U svakom slučaju, ISO 50001 zahteva da organizacija utvrdi za koje sve potrebe troši energiju, bez obzira na oblik i količinu i da potom utvrdi iz kojih izvora obezbeđuje utrošenu energiju, kao i da definiše mere za smanjenje potrošnje na prihvatljiv nivo. Kao i ISO 14001, ovaj standard ne definiše šta podrazumeva "prihvatljiv nivo", već to prepušta organizaciji. Međutim, očekuje se da kao minimum budu ispunjeni zahtevi zakona i propisa i da se kontinualno radi na poboljšanju.

Sistem upravljanja energijom dovodi do efektivnog upravljanja procesima, i povećava energetske efikasnosti, a doprinosi i mudrom korišćenju energije. Ne uključuje energetske ciljeve, već jednostavno obezbeđuje da organizacija ima odogovarajući i efektivan proces upravljanja kako bi ostvarila svoje energetske ciljeve.

Neke od koristi razvoja i implementacije ISO 50001 sistema za upravljanje energijom su:

- Smanjena upotreba energije
- Kontrola i smanjenje troškova energije
- Smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu
- Priprema za praćenje i izveštavanje o emisiji gasova staklene bašte
- Kredibilitet u javnosti o energetske svesnosti

Za razliku od ISO 14001, ISO 50001 izričito zahteva da organizacija utvrdi indikatore preko kojih će pratiti učinak na polju energetske efikasnosti, slično kao što ISO 9001 zahteva uspostavljanje sistema za praćenje i merenje efektivnosti procesa.

Preostali zahtevi ISO 50001 (Slika 1) su vrlo slični ostalim standardima iz oblasti sistema menadžmenta i kao minimum podrazumijevaju postojanje:

- politike i ciljeva i procedura za:
 - upravljanje dokumentacijom,
 - upravljanje zapisima,
 - interne provjere,
 - korektivne mjere,
 - preventivne mjere,
 - neusaglašenosti.

ISO 50001 omogućava da se sistematski postavi set ciljeva u vezi sa energijom i nudi pomoć u njihovom ostvarenju, čime se ostvaruju značajne uštede energije. Procenjeno je da standard ISO 50001, Sistemi upravljanja energijom - Zahtevi s uputstvom za upotrebu, može da ima pozitivan uticaj na oko 60% svetske potrošnje energije tako što će organizacijama iz javnog i privatnog sektora dati upravljačke strategije za povećanje energetske efikasnosti, smanjenje troškova, te poboljšanje energetske performansi.

Ušteda energije je sve bitniji faktor u privredi. Smanjenje troškova ima značajnu stratešku ulogu koja vodi ka povećanoj finansijskoj dobiti i konkurentskoj prednosti. Osim navedenog, ovaj standard nudi i dokaz

o društvenoj odgovornosti pre svega prema zaštiti okoline. Sistemi upravljanja pružaju konstantni napredak na područjima kvaliteta, zaštite životne sredine i bezbednosti i zdravlja na radu. Ovaj koncept je sad primenjen i na korišćenje energije.

Svrha ISO 50001 je da:

- uspostavi energetska politiku sa konkretnim ciljevima kako bi se poboljšala energetska efikasnost,
- postavi osnov za korišćenje energije, identifikuje kritična područja i razume elemente koji utiču na korišćenje energije,
- održava periodične prognoze u korištenju energije, dopuštajući vidljivost u planiranju investicija i poboljšanja,
- uzima u obzir potrošnju energije u procesu odlučivanja pri dizajniranju i nabavci opreme, materijala ili usluga.



Slika 1. Sedam osnovnih komponenti ISO 50001:2011 standarda

Precizno izraženi, zahtevi standarda su sledeći [1]:

- 4.1. Opšti zahtevi
- 4.2. Odgovornost rukovodstva
- 4.3. Energetska politika
- 4.4. Planiranje energijom
- 4.5. Primena i funkcionisanje
- 4.6. Proveravanje
- 4.7. Preispitivanje od strane rukovodstva

Samim tim, uočljivo je da se ISO 50001 vrlo lako može integrisati u postojeći sistem kvaliteta, bezbednosti i zdravlja na radu i/ili sistem zaštite životne sredine, za sve tipove organizacija koje žele pratiti i unaprediti energetska efikasnost.

Imajući u vidu da je ovo nov standard i da je njegova primena ograničena na svega 2 godine unazad, u nastavku je dat pregled iskustava nekih svetskih organizacija, koje su među prvima uvele ovaj standard.

3. ISKUSTVA SVETSKIH ORGANIZACIJA KOJE SU IMPLEMENTIRALE ISO 50001.

Delta Electronics, Dongguanu (Kina), vodeća organizacija za izradu rešenja za upravljanje elektro i termoenergijom, potvrdio je da je njegova fabrika u Dongguanu (Kina) sertifikovana prema standardu ISO 50001. Standard za upravljanje energijom je od temeljne važnosti za njen petogodišnji plan uštede energije, čiji cilj je smanjenje potrošnje energije za 50% u 2014. godini u odnosu na potrošnju iz 2009. godine.

Uz implementaciju ISO 50001, sistema za upravljanje energijom i s proizvodnim kapacitetom na istom nivou od januara do maja 2011. godine, smanjena je potrošnja energije za 10,51 milion kWh u odnosu na isti period u 2010. godini, što je ekvivalentno smanjenju emisije ugljen-dioksida od 10,2 hiljade tona i uštedi od

60.000 €. Sa druge strane i potrošnja električne energije je takođe smanjena za 37% u odnosu na 74,3 hiljade kWh iz 2009. godine. [3]

Schneider Electric, Pariz (Francuska) je organizacija za globalno upravljanje energijom. Sertifikat ISO 50001 dobila je za svoje sedište u Parizu, kao deo posvećenosti kompanije da stalno poboljšava upravljanje energijom u svojim zgradama, čime se smanjuje njihov uticaj na životnu sredinu i poboljšava udobnost korisnika.

Iskustvo Schneider Electric govori da standard ISO 50001 pruža okvir i alat kojim će se „izvući maksimum” energije u procesu stalnog poboljšavanja. Mnogi njihovi objekti širom svijeta već su uključeni u akcione planove za energetske efikasnosti, a standard pomaže da se u zgradama, kao što je Hive, upravlja energetskom efikasnošću na što bolji i precizniji način.

Okvir, uspostavljen sertifikatom EN ISO 50001, vodi do preciznijeg definisanja misije za upravljanje energijom. Kao kriterijum u odabiru dobavljača, on takođe pomaže da se uključe timovi za nabavku u primjenu energetske efikasnosti, prisiljava sve učesnike da pojasne korist od svake nezavisne aktivnosti vezane za energiju u preduzeću i vodi ka stalnom poboljšanju, što svake godine proverava treća strana.

ISO 50001 je jednostavno prilagođen i integrisan međunarodni standard, tako da se može implementirati u svim objektima širom svijeta. To jača vodeću poziciju kompanije u upravljanju energijom. Sama sertifikacija i njeno održavanje pokazuju angažman i politiku Schneider Electric: delovanje, a ne davanje praznih obećanja. [3]

AU Optronics Corp, Tajvan (Kina), koji može biti opisan kao drugi najveći proizvođač LCD TV panela na Tajvanu, objavio je da je njegova 8.5G TFT-LCD fabrika u Science Parku u centralnom Tajvanu uspešno sertifikovana u skladu s ISO 50001. Fabrika TV modula u Suzhou (Kina) te iste kompanije, takođe je implementirala novi standard za upravljanje energijom.

U ovoj kompaniji smatraju da je sertifikacija sistema za upravljanje energijom u centru pažnje u zemljama širom svijeta i da će ISO 50001 postati sledeći globalni model nakon ISO 9001 i ISO 14001, a dobijanje sertifikata postaće preduslov za međunarodnu konkurentnost kompanija.

AU Optronics Corp očekuje se da će implementacija ISO 50001 pomoći u postizanju 10% uštede energije u fabrici u prvoj godini, što znači uštedu od oko 55 miliona kWh električne energije, odnosno smanjenje emisije ugljen-dioksida za 35.000 tona. Kompanija planira da usvoji sistem za upravljanje energijom koji se zasniva na ISO 50001 u svim svojim fabrikama. [3]

Opština Bad Eisenkappel (Austrija) - Klimatske promjene, rastuća potrošnja energije u opštinskim zgradama i postrojenjima, povećanje cene energije, prevelika zavisnost od fosilnih goriva i neiskorišteni regionalni izvori energije bili su ti koji su primorali Bad Eisenkappel, najjužniju austrijsku opštinu, na implementaciju ISO 50001.

U prvoj godini nakon implementacije se očekuje da se potrošnja električne energije smanji za skoro 25%, s tim da će se glavna ušteda postići osavremenjavanjem fabrike za preradu otpadnih voda i smanjenjem potrošnje energije za 86.000 kWh, što je ekvivalentno iznosu od 16.000 eura. Ulična rasveta pretvoriće se u LED sijalice u kombinaciji sa senzorima za kretanje i PV-modulima (solarnim fotonaponskim modulima), za koje se procenjuje da će uštediti još 45.000 kWh. Osim toga, LED sijalice su instalirane u javne zgrade i lokalne škole kao i filteri za slavine, a poboljšanja su napravljena i na opštinskom sistemu ventilacije i snabdijevanja toplom vodom. [3]

Termoelektrana Dahanu u Indiji, koja je u vlasništvu Reliance Infrastructure Limited, najvećeg elektroprivrednog preduzeća iz privatnog sektora u zemlji, uspešno je sertifikovana u skladu sa ISO 50001 u januaru 2011. godine. Elektrana od 2 x 250 MW koja koristi ugalj, i nalazi se nekih 120 km od Mumbaija, radi od 1996. godine, a opisana je kao primer postrojenja firme Reliance u smislu očuvanja energije. Takođe je sertifikovana prema ISO 9001 i ISO 14001.

Među ranim koristima od primjene novog standarda sistema za upravljanje energijom, ističu pregled potrošnje energije kod glavne i pomoćne opreme te zgrada, zatim napredak u praćenju ukupne potrošnje energije, određivanja korištenja energije i ograničenja potrošnje za najznačajnije korisnike energije i primenu kontrole odstupanja prilikom proizvodnih procesa.

Osim ovih operativnih poboljšanja, elektrana je od marta 2010. godine obavila čitav niz ciljanih ulaganja od kojih se očekuje da, uz pomoć novog sistema za upravljanje energijom zasnovanog na ISO 50001, doprinesu godišnjoj uštedi od oko 1,2 miliona evra i to zahvaljujući boljoj energetskoj efikasnosti i upravljanju. [3]

4. KO U SRBIJI POSEDUJE SISTEM UPRAVLJANJA ENERGIJOM ISO 50001?

U Srbiji postoji tek nekoliko organizacija koje su uspešno ostvarile sertifikaciju Sistema menadžmenta energijom u skladu sa međunarodnim standardom ISO 50001, koji je u potpunosti integrisan sa postojećim sistemom menadžmenta, kvalitetom, zaštitom životne sredine, bezbednošću i zdravljem na radu, a među prvim sertifikovanim preduzećima su: JP „Transnafta“ Pančevo, „Energotehnika – Južna Bačka d.o.o.“ Novi Sad, „Elektrovat d.o.o.“ Čačak i Beograd.

Sve nam ovo govori da je usvajanje i implementacija ISO 50001 u porastu širom sveta i da u velikoj meri doprinosi poboljšanju energetske efikasnosti, koja sama po sebi predstavlja izvor energije budućnosti.

5. ZAKLJUČAK

Energetski menadžment je više od uštede novca -to je razumevanje procesa i energetske slike obrazaca, postavljanje realnih ciljeva i praćenje napretka, ali i zaštita prirodnih resursa uz usklađivanje sa raspoloživim alternativama. Posvećenost najboljoj praksi u oblasti energije je jedan od načina na koji organizacije mogu da zadovolje današnje zahteve za smanjenjem troškova i dugoročne ciljeve energetske efikasnosti.

Uspostavljeni sistem upravljanja energijom pomaže da se dokumentuje, razume i poboljša korišćenje energije. Ovaj standard služi kao model da se upravljanje energijom uzdigne na viši nivo kako kroz podizanje i očuvanje svesti zaposlenih, tako i kroz sprovođenje najbolje prakse, a sve u cilju stvaranja više vrednosti poslovanja u uslovima neophodne energetske efikasnosti.

6. LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 50001:2012, Sistemi menadžmenta energijom – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2012
- [2] <http://efikasnost.rs/energetska-efikasnost/definicija-energetske-efikasnosti>, septembar, 2014
- [3] http://www.iso.org/iso/home/news_index/news_archive/news.htm?refid=Ref1618, septembar, 2014

Stanojević, N., Vasić, M., Stanojević, D.

ENERGY MANAGEMENT SYSTEM, AS A MEASURE OF ENERGY EFFICIENCY

***Abstract:** The paper gives an overview of the basic system information for energy management - ISO 50001, through a review of the basic application, correlation with other standards published by the ISO organization and the benefits arising from its use. Bearing in mind that this is a new standard and its use is limited to only two years ago, the paper summarizes the experiences of some international organizations, which are among the first to introduce this standard.*

Key words: Energy Efficiency, Energy Management, ISO 50001



Стојадиновић, М. С.¹⁾, Мајсторовић, Д. В.¹⁾, Durakbasa, М. Numan²⁾

АУТОМАТСКО ПЛАНИРАЊЕ ПУТАЊЕ МЕРНОГ СЕНЗОРА ПРИ ИНСПЕКЦИЈИ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ

Резиме

У раду је представљен модел аутоматског генерисања путање мерног сензора нумерички управљане мерне машине (НУММ). Модел се састоји из анализе расподеле мерних тачака и анализе избегавања колизије између мерног сензора и призматичног дела. Геометријске информације потребне за планирање путање преузете су из интерних записа САД модела призматичног дела (IGES и STL), док се улазни подаци о толеранција уносе на основу већ креиране базе знања. Представљени метод је нов приступ аутоматској инспекцији чија предност се огледа у смањењу укупног времена мерења кроз смањење времена потребног за припрему мерења услед аутоматског генерисања путање мерног сензора и остављене могућности за њену оптимизацију.

Кључне речи: НУММ, мерни сензор, призматични делови, планирање путање

1. УВОД

НУММ су благо потиснуте за поједине класе метролошких задатака, међутим када је реч о инспекцији призматичних делова (ПДА) оне су незаобилазан фактор у индустрији. Аутоматско генерисање путање мерног сензора је императив за смањење укупног времена мерења на НУММ.

Анализом литературе из ове области, може се закључити да је се последње три деценије планирање инспекције на НУММ развијало кроз следеће прилазе: мануелни план, потом план генерисан САИ 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 додира 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 [7,8] се разматрају решења за избегавање колизије, а у [9,10] анализа приступачности мерног сензора. Планирање инспекције се може разматрати и кроз поделу на локални и глобални план инспекције [11].

Пример екстракције геометријских информација из САД модела и формирање улазних података дат је у [12].

Аутоматско планирање инспекције на НУММ представљено у [13] базирано је на В-репрезентацији солид модела у SAT формату. На излазу даје НУММ програм у DMIS формату.

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.

¹⁾ Славенко М. Стојадиновић, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-438 (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)

²⁾ Prof. Dr. Numan M. Durakbasa, Full professor, Vienna University of Technology, Institute for Production Engineering and Laser Technology (durakbasa@ift.tuwien.ac.at)

Други скуп су преостале тачке кроз које сензор прође при инспекцији једног геометријског примитива, такође се могу добити на основу геометријских информација. Трећи скуп тачака омогућава путању без колизије.

Рад се састоји из модела за аутоматско планирање путање сензора на НУММ и симулације путање засноване на њему. Главна идеја представљеног модела је генерисање путање мерног сензора на основу САД модела ПД и његових (задатих) толеранција. Модел се састоји из расподеле мерних тачака и принципа избегавања колизије.

2. МОДЕЛ АУТОМАТСКОГ ГЕНЕРИСАЊА ПУТАЊЕ МЕРНОГ СЕНЗОРА

Елементи модела аутоматског генерисања путање мерног сензора су метролошко препознавање мерног дела, локални и глобални план инспекције. Модул за метролошко препознавање је базирано на САД моделу ПДА у екстерном запису (IGES датотека) и дефинисању геометријских примитива преко параметара погодних за екстракцију из IGES датотеке [14]. Веза између толеранција и геометријски примитива је дефинисана метролошким примитивима [15,16]. Локални план инспекције представља расподелу мерних тачака по геометријским примитивима. Глобални план инспекције је план путање сензора и представљен је уз помоћ локалног плана и алгоритма за избегавања колизије. Шема модела аутоматског генерисања путање мерног сензора је дата на слици 1.



Слика 1. Планирање путање мерног сензора

- Раван (под б):

$$s_i = \frac{i}{N} \cdot a \quad (1)$$

$$t_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot b \quad (2)$$

где су: a [mm] - вредност ограничења равни по x - оси; b [mm] - вредност ограничења равни по y - оси.

- Круг (под в):

$$s_i = s'_i \cos(t'_i) \quad (3)$$

$$t_i = s'_i \sin(t'_i) \quad (4)$$

При чему је: $s'_i = R$, $t'_i = \frac{i}{N} \cdot 360^\circ$.

У оба претходна случаја важи да је $w_i = 0$.

- Полусфера (под г):

2.1 Расподела мерних тачака

Модел расподеле мерних тачака је базиран на *Hammersly* - овој секвенци [17], за израчунавање координата дуж две осе примитива: $s_i = \frac{i}{N}$ и $t_i = \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)}$

где је: $k = \log_2 N$ и као што је речено, N - жељени број тачака, $i = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$.

Модификовањем *Hammersly* - ове секвенце, у овом поглављу, изведена је расподела мерних тачака за основне геометријске примитиве који учествују у креирању толеранција ПДА. За дефинисање расподеле мерних тачака за један примитив користи се Декартов КС O_F, X_F, Y_F, Z_F и поларно-цилиндарски КС O'_F, X'_F, Y'_F, Z'_F . Координате у Декартовом КС су обележене са $P_i(s_i, t_i, w_i)$, а у поларно-цилиндарском КС $P_i(s'_i, t'_i, w'_i)$.

Обрасци за израчунавање координата тачака су следећи:

$$s_i = \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \cos \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (5)$$

$$t_i = \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \sin \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (6)$$

$$w_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \quad (7)$$

где је: R [mm] - полупречник полусфере.

– Цилиндар (под д):

$$s_i = R \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right) \quad (8)$$

$$t_i = R \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right) \quad (9)$$

$$w_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot h \quad (10)$$

где је: h [mm] - висина цилиндра.

– Купа (под ђ). У поларно-цилиндарским координатама:

$$s'_i = \left(1 - \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot R \quad (11)$$

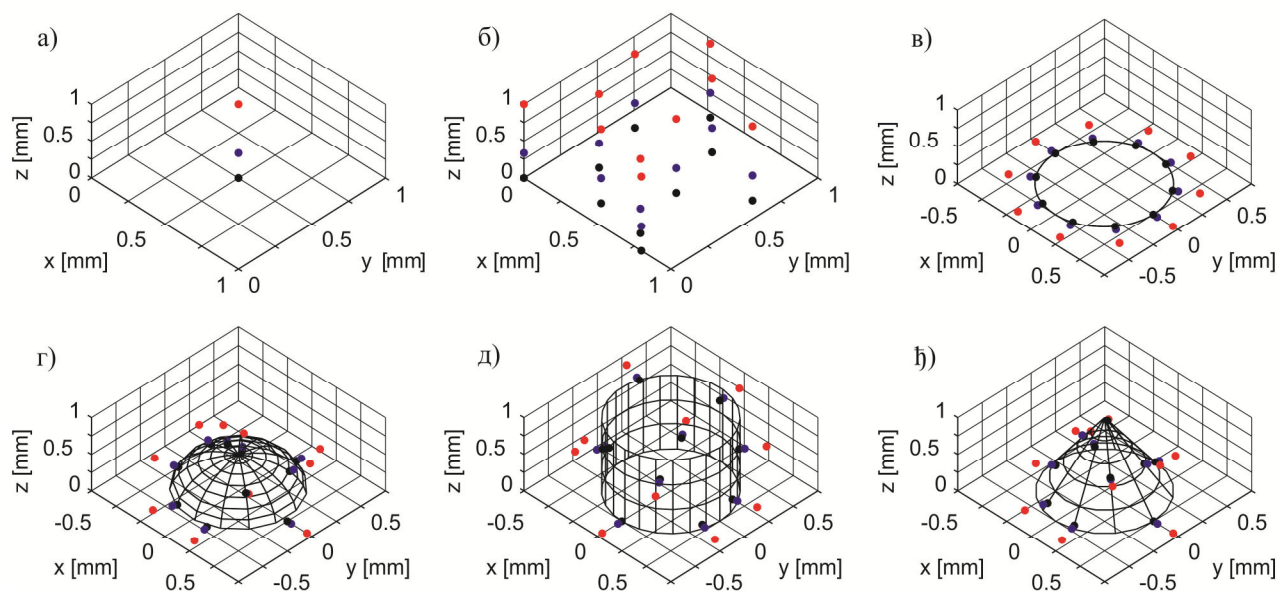
$$t'_i = \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \quad (12)$$

$$w'_i = (R - s'_i) \cdot \frac{h}{R} \quad (13)$$

где је: R [mm] - полупречник основе купе; h [mm] - висина купе.

У Декартовим координатама: $s_i = s'_i \cos(t'_i)$; $t_i = s'_i \sin(t'_i)$; $w_i = w'_i$.

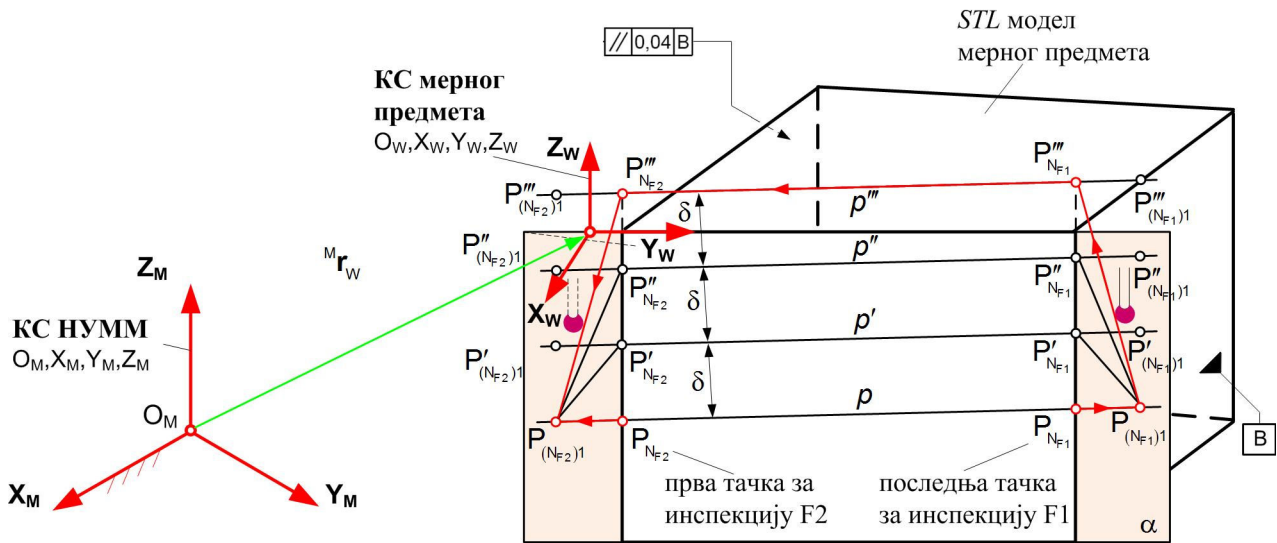
Координате мерних тачака на бази овог модела приказане су на слици 2.



Слика 2. Распореда мерних тачака: а) мерење у тачки; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; ђ) купа.

2.2 Избегавање колизије

На основу STL модела представљања геометрије ПДА, толеранција ПДА, координата последње тачке $P_{(N_{F1})l}$ за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке $P_{(N_{F2})l}$ за инспекцију наредног примитива, на слици 3 представљен је принцип избегавања колизије.



Слика 3. Принцип избегавања колизије

За сваки троугао из STL датотеке формира се једначина равни којој припада. Ако су темена троугла T_1, T_2, T_3 процедура формирања равни:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (14)$$

започиње формирањем вектора нормале као: $\vec{n} = \overline{T_1T_2} \times \overline{T_1T_3} = A\vec{i} + B\vec{j} + C\vec{k}$, из кога произилазе константе A, B и C . Константа D израчунава се уз помоћ скаларног производа: $D = -\vec{n} \cdot \vec{r}_1$, где је $\vec{r}_1 = \overline{OT_1}$. Затим следи формирање једначине праве p кроз две тачке $P_{(N_{F1})l}$ и $P_{(N_{F2})l}$ на основу векторског облика једначине праве:

$$\vec{M} = \vec{P} + t \cdot \vec{p} \quad (15)$$

где је: $\vec{p} = \overline{P_1P_2}$, $\vec{P} = \overline{OP_1}$. Пројектовањем једначине (15) на $Oxuz$ следи једначина праве p у параметарском облику:

$$x = x_0 + t \cdot p_x, \quad y = y_0 + t \cdot p_y, \quad z = z_0 + t \cdot p_z. \quad (16)$$

Уколико постоји пресек праве и равни то је тачка $P_j(x_j, y_j, z_j)$, где је j - број пресечних тачака. Њене координате се добијају решавањем система једначина коју образују (14) и (16).

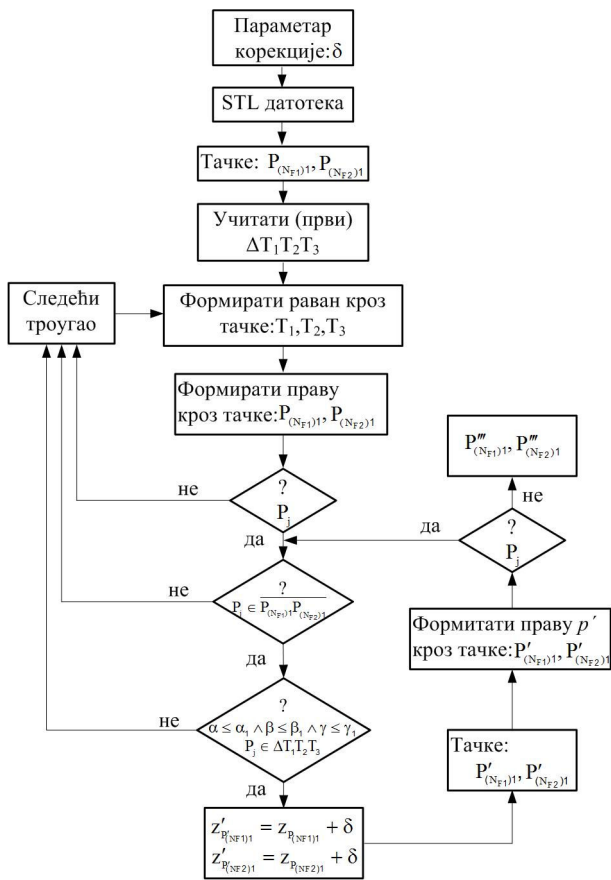
Обзиром да је $\Delta T_1T_2T_3$ представљен са равни и да је дуж $\overline{P_{(N_{F1})l}P_{(N_{F2})l}}$ представљена као део праве p , потребно је проверити да ли се пресечна тачка P_j налази на дужи $\overline{P_{(N_{F1})l}P_{(N_{F2})l}}$ и да ли припада делу равни ограниченом $\Delta T_1T_2T_3$. Овај услов је испуњен уколико је параметар $t \in (0,1)$ и уколико се пресечна тачка налази унутар $\Delta T_1T_2T_3$.

Ако постоји пресек праве p и било ког троугла STL модела ПД итеративним поступком се одређују тачке: $P_{N_{F1}}, P_{N_{F2}}; P'_{N_{F1}}, P'_{N_{F2}}; P''_{N_{F1}}, P''_{N_{F2}}; \dots; P^i_{N_{F1}}, P^i_{N_{F2}}$. Разлика између наредне $P'_{N_{F1}}$ и предходне тачке $P_{N_{F1}}$ је у вредности z - координате. Оне се разликују за вредност параметра корекције δ [mm]. Параметар корекције је константа за један ПД. Поступак се понавља све док не буде пресека између праве и свих троуглова STL модела. Последње формиране тачке итеративног поступка $P'''_{N_{F1}}$ и $P'''_{N_{F2}}$ представљају тачке у којима при инспекцији неће доћи до колизије између мерног сензора и ПД.

Са смањењем броја троуглова унутар STL датотеке овај принцип даје бржи одзив тј. координате тачака без колизије, а готово да не утиче на повећање времена просеса мерења.

3. СИМУЛАЦИЈА ПУТАЊЕ МЕРНОГ СЕНЗОРА

Симулација путање мерног сензора је заснована на моделу расподеле мерних тачака и принципу избегавања колизије при преласку сензора са једног на други примитив у процесу инспекције. Алгоритам за избегавање колизије је показан на слици 4.



Слика 4. Алгоритам за избегавање колизије

праву p' која их садржи. Проверити да ли постоји нова пресечна тачка P_j између p' и уčitане равни. Ако постоји поновити предходно описани поступак провере да ли се налази на дужи и површини ограниченој троуглом. Ако не постоји кориговане тачке $P'_{(NF1)l}$ и $P'_{(NF2)l}$ усвојити као тачке у којима неће доћи до колизије при преласку са једног на други фичер при инспекцији једног облика толеранције. За пример показан на слици 4, алгоритам три пута коригује z -координату и усваја тачке $P''_{(NF1)l}$ и $P''_{(NF2)l}$.

4. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експеримент обухвата мерење два ПДА наменски произведена за ове потребе. Тестирање напред наведеног модела је најпре извршено на првом, геометријски и метролошки простијем делу датом на слици 5 (под г). Овај део се састоји из свих геометријских примитива обухваћених моделом. Након успешно спроведеног експеримента над првим ПД извршено је тестирање модела над другим ПД. У односу на први, други ПД дат на слици 5 (под д), проширен је новим облицима толеранција, који су тестирани.

Улазни параметри алгоритма су вредност параметра корекције по z -оси δ [mm], STL датотека експортиран на основу CAD модела ПД и координате $P_{(NF1)l}$ и $P_{(NF2)l}$.

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 уčitане тачке $P_{(NF1)l}$ и $P_{(NF2)l}$. Потом се проверава да ли постоји пресечна тачка P_j између формиране равни и праве и да ли она припада дужи $\overline{P_{(NF1)l} P_{(NF2)l}}$. Уколико не постоји P_j или постоји али не припада дужи $\overline{P_{(NF1)l} P_{(NF2)l}}$ 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: $\alpha \leq \alpha_1$, $\beta \leq \beta_1$ 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 уčitаних тачака по обрасцима: $z'_{R(NF1)l} = z_{R(NF1)l} + \delta$, $z'_{R(NF2)l} = z_{R(NF2)l} + \delta$, како не би дошло до колизије између ПД и мерног сензора. После описане корекције формирати тачке $P'_{(NF1)l}(x_{P_{(NF1)l}}, y_{P_{(NF1)l}}, z'_{R(NF1)l})$ и $P'_{(NF2)l}(x_{P_{(NF2)l}}, y_{P_{(NF2)l}}, z'_{R(NF2)l})$ као и



Слика 5. Експериментална инсталација за мерење два призматична мерна предмета

Мерењу је предходила калибрација НУММ уз помоћ артефакта домаће (слика 5 под а)). Мерење је извршено у једном стежању и конфигурацији пипака показаној на слици 5 под б)). Помоћни прибор коришћен за причвршћавање ПДА је машинска стега. Помоћни прибор коришћен да се радни предмети доведу у радни простор машине без колизије сензора са радним столом НУММ и помоћним прибором је раван мерни сталак ослоњен на сто машине у три тачке.

Експеримент је извршен на мерној машини ZEISS UMM 500 са основним техничким карактеристикама, такође датим на слици 5. Изглед дела мерног протокола у коришћеном софтверу (ZEISS UMESH) је показан на слици 5 под в)).

Процес инспекције у нашем експерименту се састоји из припремног процеса и процеса мерење. Припремни процес обухвата: 1) постављање мерног дела са анализом помоћног прибора; 2) конфигурисање мерних пипака; 3) калибрација мерних пипака уз помоћ мерне кугле; 4) уравнивање ПД. Процес мерења је заснован на мерном протоколу добијеном као излаз из процеса симулације. На основу генерисаном мерног протокола извршено је програмирање НУММ.

У табели 1 и 2 дати су резултати мерења за оба ПД. Као што се то може видети у табелама мерење је поновљено пет пута и израчуната је стандардна девијација.

Табела 1 Резултати мерења првог мерног предмета

РБ	Толеранције			Резултати мерења					Станд. дев. у μm
	Назив	Ознака	Вред. у mm	1.	2.	3.	4.	5.	
1	Равност	$\square_{0,02}$	0,02	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0004	0,1
2	Равност	$\square_{0,02}$	0,02	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0
3	Пречник	$R25 \pm 0,05$	$\pm 0,1$	50,0851	50,0855	50,0852	50,0856	50,0855	0,2
4	X – позиција	47,5	$\pm 0,05$	47,4611	47,461	47,4607	47,4611	47,4611	0,2
5	Z – позиција	45	$\pm 0,02$	45,0148	45,0148	45,0146	45,0145	45,0146	0,1
6	Управност	$\perp_{0,03A}$	0,03	0,0014	0,0024	0,0023	0,0022	0,0023	0,4
7	Цилиндричност	$\text{C}_{0,04}$	0,04	0,009	0,0089	0,0091	0,009	0,009	0,1
8	Коаксијалност	$\text{C}_{0,05C}$	0,05	0,0474	0,0458	0,0456	0,0455	0,0462	0,8
9	Угао	Конус: 39°	$\pm 0,5^\circ$	39,2991	39,2991	39,2995	39,2982	39,2991	0,5
10	Паралелност	$\parallel_{0,04B}$	0,04	0,035	0,0346	0,035	0,0348	0,035	0,2

Табела 2 Резултати мерења другог мерног предмета

РБ	Толеранције			Резултати мерења					Станд. дев. у μm
	Назив	Ознака	Вред. у mm	1.	2.	3.	4.	5.	
1	Растојање	70	$\pm 0,02$	70,0111	70,0111	70,0112	70,0111	70,0106	0,2
2	Равност	$\square_{0,02}$	0,02	0,0072	0,0069	0,0071	0,0071	0,0072	0,1
3	Управност	$\perp_{0,025A}$	0,025	0,0143	0,0142	0,0142	0,0143	0,0148	0,3
4	Угао	$\leq_{0,2A}$	0,2	15	15	15	15	15	0
5	Угао	$\leq_{0,2A}$	0,2	15	15	15	15	15	0
6	Пречник	$R25 \pm 0,05$	$\pm 0,1$	40,093	40,0936	40,0934	40,0936	40,0928	0,4
7	X – позиција	47,5	$\pm 0,05$	47,5022	47,5026	47,5025	47,5021	47,501	0,6
8	Z – позиција	50	$\pm 0,3$	49,7926	49,7926	49,7927	49,7925	49,7927	0,1
9	Паралелност	$\parallel_{0,2B}$	0,2	0,1366	0,1369	0,136	0,1361	0,1369	0,4
10	Цилиндричност	$\text{C}_{0,02}$	0,02	0,0042	0,0043	0,0041	0,004	0,0041	0,1
11	Угао	Конус: 39°	$\pm 0,5$	39,2986	39,2985	39,2983	39,2991	39,2992	0,4
12	Кружност	$\text{C}_{0,03}$	0,03	0,0094	0,0092	0,0092	0,0101	0,0096	0,4
13	Позиција	$\text{C}_{0,75C}$	0,75	0,6175	0,6277	0,6332	0,6201	0,6125	8,2
14	Позиција	$\text{C}_{0,75C}$	0,75	0,5067	0,5021	0,5219	0,5073	0,5032	8
15	Позиција	$\text{C}_{0,75C}$	0,75	0,6471	0,6483	0,6416	0,6481	0,6424	3,2
16	Коаксијалност	$\text{C}_{0,02D}$	0,02	0,0068	0,008	0,008	0,0091	0,0092	1
17	Коаксијалност	$\text{C}_{0,05D}$	0,05	0,0409	0,041	0,0408	0,0406	0,053	5,4

Резултати аутоматске инспекције два тест ПДА показују да су све толеранције дела у цртежом прописаним границама. Ово потврђује да је изложени модел још један успешан приступ аутоматској инспекцији ПДА и добра основа за развој интелигентног приступа планирању инспекције ПДА. Комплексна геометрија ПД 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.

5. ЗАКЉУЧАК

Спроведена истраживања у овом раду дају основ за даљи развој аутоматског планирања инспекције ПДА. 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 ПДА на НУММ. Модел обједињава анализе расподеле мерних тачака и избегавања колизије, док симулација омогућава визуелну проверу путање мерног пипка и генерисање мерног протокола.

Примена и корист од модела је јако изражена у случају инспекције геометријски комплексних ПДс делова са великим бројем толеранција у појединачној производњи.

6. 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] Albuquerque, A., V., Liou, W. F., Mitchell, R. O.: *Inspection point placement and path planning algorithms for automatic CMM inspection*, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Taylor & Francis Ltd., 13/2:107-120, 2000.
- [3] Lee J. W., Kim M.K., Kim K.: *Optimal Probe Path Generation and New Guide Point Selection Methods*, Engng Applic. Artif. Intell. Elsevier Science Ltd. 7/4:439-445, 1994.
- [4] Gu P., Chan K.: *Generative Inspection Process and Probe Path Planning for Coordinate Measuring Machines*, Journal of Manufacturing Systems, 15/4:240-255, 1996.
- [5] Prieto, F., Redarce, T., Lepage, R., Boulanger, P.: *An Automated Inspection System*, Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London, 19:917–925, 2002.
- [6] Lin, J.-Y., Mahabaleshwarar, R., Massina, E.: *CAD-based CMM dimensional inspection path planning – a generic algorithm*, Robotica, Cambridge University Press, 19:137–148, 2001.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lim, P.C., Menq, H. C.: *CMM feature accessibility path generation*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 32/3:597–618, 1994.
- [10] Стојадиновић, С., Мајсторовић, В.: *Одређивање редоследа инспекције основних геометријских примитива на НУММ*, 38. ЈУПИТЕР Конференција, 5.25-5.30, Београд, 15 – 16 мај, 2012.
- [11] Zhao F., Xu X., Xie Q. S.: *Computer – Aided Inspection Planning – The state of the art*, Computer in Industry, 60/7:453-466, 2009.
- [12] Wong, Y.S.F., Chuah, B.K., Venuvinod, K.P.: *Automated extraction of dimensional inspection features from part computer-aided design models*, International Journal of Production Research, Taylor & Francis Ltd., 43/12:2377–2396, 2005.
- [13] Hesham, A. H., Youssef, M.A., Shoukry, K.M.: *Automated Inspection Planning system for CMMs*, International Conference on Engineering and Technology, pp. 1-6, 2012.
- [14] Stojadinovic S., Majstorović V.: *Towards the Development of Feature – Based Ontology for Inspection Planning System on CMM*, Journal of Machine Engineering, Editorial Institution of the Wroclaw Board of Scientific Technical Societies Federation NOT, Wroclaw, Poland, 12/1:89-98, 2012.
- [15] Majstorovic, D. V., Stojadinovic, M. S.: *Research and Development of Knowledge Base for Inspection Planning Prismatic Parts on CMM*, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, Cracow-Kielce, Poland, September 11-13, 2013.
- [16] Stojadinovic S., Majstorović, V.: *Metrological primitives in production metrology–ontological approach*, Proceedings of the 34th International Conference on Production Engineering, pp. 29-30, Nis, Serbia, 28– 30th September, 2011.
- [17] 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.

Stojadinovic, M. S., Majstorovic, D. V. Durakbasa, M. Numan

AUTOMATED PROBE PATH PLANNING FOR INSPECTION PRISMATIC PARTS ON CMM

Abstract: *This paper presents a model for automated probe path generation for CMM. The method consists from sampling strategy and collision-free generation between probe and prismatic part. Needed geometrical information for path planning are taken from internal file of CAD model prismatic part (IGES and STL), while input data about tolerance entries on the base already created knowledge base. Presented model is a new approach automated inspection, whose advantage is in reduction the total measurement time by reducing the time needed for the preparation of the measurements due automated generation of probe path and allowed opportunities for its optimization.*

Key words: *CMM, measurement sensor, prismatic parts, 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)

ZBORNİK radova [Elektronski izvor] =
Proceedings / [32. simpozijum CIM u
strategiji tehnološkog razvoja industrije
prerade metala [i] 26. simpozijum CAD/CAM [i]
35. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 41.
simpozijum Upravljanje proizvodnjom u
industriji prerade metala [i] 19. simpozijum
Menadžment kvalitetom [sve ovo u okviru]] 39.
Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem
= 39th Jupiter Conference with Foreign
Participants, Beograd, oktobar 2014. ;
[organizator] Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet = University of Belgrade,
Faculty of Mechanical Engineering. - Beograd
: Mašinski fakultet, 2014 (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 978-86-7083-838-3

1. Уп. ств. насл. 2. Јупитер конференција
(39 ; 2014 ; Београд) 3. Симпозијум CIM у
стратегии технолошког развоја индустрије
прераде метала (32 ; 2014 ; Београд) 4.
Симпозијум CAD/CAM (26 ; 2014 ; Београд) 5.
Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (35 ; 2014 ;
Београд) 6. Симпозијум Управљање
производњом у индустрији прераде метала (41
; 2014 ; Београд) 7. Симпозијум Менаџмент
квалитетом (19 ; 2014 ; Београд) 8. 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) Металопраџивачка
индустрија - Управљање - Зборници г)
Управљање квалитетом - Зборници
COBISS.SR-ID 210833676

ISBN 978-86-7083-838-3



9 788670 838383 >