

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNIK RADOVA **PROCEEDINGS**



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, oktobar 2020.

42. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



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

29. simpozijum
CAD/CAM

38. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

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

22. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Beograd, oktobar 2020. godine

42. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA

Organizator i izdavač:

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. 21/2020 od 29.09.2020.

Tehnički urednici:

Prof. dr Bojan Babić

Prof. dr Saša Živanović

Doc. dr Mihajlo Popović

Beograd, oktobar 2020.

Tiraž: 100 primeraka

Štampa: **Planeta print,**

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

ISBN 978-86-6060-055-6

42. JUPITER KONFERENCIJA

PROGRAMSKI I NAUČNI ODBOR

Predsednik:

Prof. dr Ljubodrag Tanović, Mašinski fakultet Beograd

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

ORGANIZACIONI ODBOR

Predsednik:

Prof. dr Bojan Babić, Mašinski fakultet Beograd

Sekretar:

Prof. dr Saša Živanović, Mašinski fakultet Beograd

Članovi:

Doc. dr Branko Kokotović, MF Beograd • Doc. dr Nikola Slavković, MF Beograd • Doc. dr Goran Mladenović, MF Beograd • Doc. dr Mihajlo Popović, MF Beograd • Doc. dr Slavenko Stojadinović, MF Beograd • Doc. dr Milica Petrović, MF Beograd • Doc. dr Miloš Pjević, MF Beograd • Asist. Dušan Nedeljković, MF Beograd • Asist. Nikola Vorkapić, MF Beograd

ZAHVALNICA

Organizacioni odbor **42. JUPITER KONFERENCIJE** se najsrdahnije zahvaljuje svim institucijama i pojedincima koji su ličnim angažovanjem i konstruktivnim delovanjem pomogli u organizovanju ove konferencije, naročito:



CPS-CAD Professional Systems

<https://www.cadpro.co.rs/>



INMOLD INMOLD PLAST d.o.o.

<https://www.inmold-ltd.com/>



Meusburger Georg GmbH & Co KG

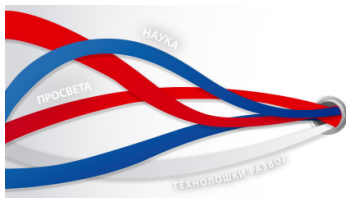
<https://www.meusburger.com/SR/RS/index>



Key IT d.o.o.

<http://www.keyit.co.rs/>

Posebno se zahvaljujemo pokroviteljima:



Министарство просвете,
науке и технолошког развоја



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

<http://www.mpn.gov.rs/>



Istraživačko razvojni institut LOLA d.o.o.

<https://www.li.rs/>

PREDGOVOR

JUPITER Konferencija prikazuje značajne rezultate istraživanja ostvarene u prethodne dve godine. Ovogodišnja XLII JUPITER Konferencija je prilika da se sagledaju trendovi u domenu nauke, obrazovanja i industrije u Republici Srbiji u kontekstu koncepta Industrija 4.0. Industrija 4.0 označava promenu paradigme u proizvodnim kompanijama i njihovim lancima snabdevanja. Dok su procesi proizvodnje i logistike, koji su centralno upravljani sada već deo prošlosti, procesi budućnosti više su poput organizma koji se samostalno organizuje kroz umrežavanje svih uključenih strana.

Ubrzani tehnološki razvoj i digitalna transformacija industrije dovode do značajnih promena na tržištu rada. Industrija 4.0, u kojoj autonomni sajber-fizički sistemi nadgledaju fizičke procese i donose odluke, nije potrebna radna, nego stručna snaga. To traži i potpuno nov pristup obrazovanju – posebno u oblasti inženjerskih nauka

Centar za nove tehnologije - naučni i tehnološki poligon za generisanje novih ideja, koncepta i proizvoda je jedan od nosioca stvaranja tehnoloških platformi Republike Srbije.

Na Konferenciji će biti izloženo 33 rada autora iz Srbije i inostranstva.

Ministarstvo prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Lola institut su finansijskom podrškom omogućili 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 XLII JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 6. oktobar 2020.

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

Бабић, Б., Вишић Ј., Ђермановић А. ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ПАМЕТНОЈ ПРОИЗВОДЊИ И ИНДУСТРИЈИ 4.0	1.1
Baltić, M., Peković, O., Svorcan, J., Kovačević, A. METODE PROIZVODNJE KOMPOZITNIH LOPATICA VETROTURBINA SA HORIZONTALNOM OSOM OBRATANJA	3.73
Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A. UTICAJ KINEMATSKJE VISKOZNOSTI MAZIVA NA GENERISANU TOPLOTU SKLOPA GLAVNOG VRETENA	3.22
Gostimirović, M., Pavkov, B., Rodić, D., Sekulić, M. APLIKACIJA ZA MODELIRANJE I IZBOR MERODAVNIH REŽIMA OBRADJE PRI STRUGANJU	3.29
Hasan, M.S., Vorkapić, M., Ivanov, T., Kovačević, A. PREDIKCIJA BRZINE NA 3D ŠTAMPAČU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	2.7
Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Ševarlić, F., Puzović, R. KOMUNIKACIJA IZMEĐU PROIZVODNIH RESURSA KORIŠĆENJEM OPC-UA STANDARDA	4.1
Jovančićević, L., Popović, M., Pjević, M., Tanović Lj. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UGLA ELASTIČNOG VRAĆANJA KOD ŠIREG SPEKTRA MATERIJALA	3.35
Јовичић, М. О ЖИВОТУ И ДЕЛУ ПРОФ. ДР ВЛАДИМИРА Б. ШОЛАЈЕ	UR
Kalabić R., Popović M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović Lj. ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA OBRADJE NA POKAZATELJE KVALITETA PRI OBRADI REZANJEM POLIMERA	3.41
Kovačević, A., Ivanov, T., Simonović, A., Vorkapić, M. POVEĆANJE PRECIZNOSTI IZRADE 3D ŠTAMPANIH DELOVA PRIMENOM ITERATIVNE METODE	2.13
Kurbegović, R., Janjić, M., Vukčević, M., Đurović, D. UTICAJ PARAMETARA OBRADJE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM NA ODSTUPANJE PREDNJE LINIJE REZA	3.81
Lazarević, D., Nedić, B., Mišić M., Šarkoćević Ž., Čamagić, I. TAČNOST OBRADJE VREtenASTIM GLODALOM U FUNKCIJI ŠIRINE REZANJA	3.88
Lukić, N., Petrović, P. B., Matijašević L. KONCEPTUALNI ASPEKTI KRUTOSTI KONFIGURACIONOG PROSTORA NULE RELEVANTNI ZA PROCES ROBOTIZOVANOG SPAJANJA	3.94
Matijašević, L., Petrović, P., Lukić, N. PODAKTUIRANI SISTEMI ZA ROBOTSKO HVATANJE I MANIPULACIJU OBJEKTIMA U TEHNOLOGIJI ROBOTSKJE MONTAŽE – RAZVOJ CMSysLab ROBOTSKJE ŠAKE	3.100
Miljković, K., Petrović, M.M., Jovanović, R. PRÍLOG RAZVOJU INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA SERVO MOTORAJEDNOSMERNE STRUJE PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	4.24
Mitrović, R. INDUSTRIJA 4.0 - NOVA PARADIGMA U PROIZVODNIM KOMPANIJAMA I OBRAZOVANJU	UR
Mladenović, G., Tanović, Lj., Milovanović, M., Popović, M., Puzović, R., Pjević, M. RAZVOJ SISTEMA ZA AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE PREDOBRADE DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA	2.1

Mladenović, C., Zeljković, M., Košarac, A. DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNOG SISTEMA PRIMENOM FREKVENTNE ANALIZE SIGNALA VIBRACIJA	3.47
Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z. KLASIFIKACIJA SLIKE ZASNOVANA NA PRIMENI KONVOLUCIONIH NEURONSKIH MREŽA	4.13
Nedić, B., Đurić, S., Baralić, J. MONITORING OBRADE REZANJEM ANALIZOM SIGNALA OTPORA REZANJA	4.36
Popović, V. REFORMA FINANSIRANJA I ORGANIZACIJE NAUKE U REPUBLICI SRBIJI	UR.
Sredanović, B., Borojević, S., Čiča, Đ., Tešić, S. AUTOMATIZACIJA PROJEKTOVANJA PROIZVODA PRIMJENOM CAD PROGRAMSKIH SISTEMA NOVE GENERACIJE	2.20
Stefanović, Lj., Milutinović, M., Movrin, D., Vilotić, M., Skakun P., Vilotić, D., Dačević, N. Randelović, S PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U IZRADI MALOSERIJSKIH ALATA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE	3.53
Svorcan, J., Peković, O., Tanović, D., Hasan, M.S. ODREĐIVANJE MODIFIKOVANOG PROFILA BRZINE POMOĆU PRORAČUNA OPSTRUJAVANJA I VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA.....	2.27
Tabaković, S., Zeljković, M., Hadžistević, M ODREĐIVANJE GREŠAKA POZICIONIRANJA NUMERIČKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI PRIMENOM KRUŽNOG TESTA PREMA ISO230-4.....	3.61
Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S. ANALIZA PERFORMANSI VETROTURBINE SA RAZLIČITIM AEROPROFILIMA.....	2.33
Tanović, Lj., Živanović, S., Puzović, R., Kokotović, B., Popović, M., Slavković, N., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N. RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2019. GODINU	3.1
Tešić, S., Zeljković, M., Mladenović, C., Grujić, J. UTICAJ REŽIMA REZANJA NA POSTOJANOST ALATA KOD GLODANJA BIOKOMPATIBILNOG ČELIKA 316LVM.....	3.67
Vasilić, G., Živanović, S. UTICAJ REZOLUCIJE RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA NA TAČNOST KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE ZA PROCES OBRADE SEČENJA ŽICOM.....	3.106
Васильевић, П., Шћеповић, М., Стојадиновић, С., Пузовић, Р. ПЛАНИРАЊЕ КОНТРОЛЕ КВАЛИТЕТА ПРОИЗВОДА У СОФТВЕРУ ОПЕРА МЕС.....	5.1
Vidaković, J., Stepanić, P., Dimić, Z., Rakić, A. SIMULACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA UREĐAJA ZA PROSTORNU DEZORIJENTACIJU PILOTA.....	3.116
Vorkapić, M., Simonović, A., Čočkal, D., Đorđević D. IMPLEMENTACIJA ADITIVNE PROIZVODNJE U LEAN KONCEPT	4.42
Vorkapić, N., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z. PROGRAMIRANJE TROOSNIH NU GLODALICA SA DVE TRANSLATORNE I JEDNOM OBRTNOM OSOM	3.122
Zeljković, M., Tabaković, S. PROIZVODNO MAŠINSTVO POČETKOM XXI VEKA	UR
Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N., Kokotović, B. ANALIZA PRIMENE NOVOG METODA PROGRAMIRANJA CNC STRUGOVA PRIMENOM STEP-NC PROTOKOLA	3.129
Živojinović, D., Svorcan J., Baltić, M., Simonović, A. KUTIJA ELEKTRONIKE – STRUKTURNA ANALIZA I IZRADA.....	2.41

SPISAK AUTORA
LIST OF AUTHORS

BABIĆ, B.
BALTIĆ, M.
BARALIĆ, J.
BLANUŠA, V.
BOROJEVIĆ, S.
ČAMAGIĆ, I.
ČIČA, Đ.
ĆOČKALO, D.
DAČEVIĆ, N.
ĐERMANOVIĆ A.
DIMIĆ, Z.
ĐORĐEVIĆ D.
ĐURIĆ, S.
ĐUROVIĆ, D.
GOSTIMIROVIĆ, M.
GRUJIĆ, J.
HADŽISTEVIĆ, M
HASAN M.S.
HASAN, M.S.
IVANOV, T.
JAKOVLJEVIĆ, Ž.
JANJIĆ, M.
JOVANČIĆEVIĆ, L.
JOVANOVIĆ, R.
JOVIČIĆ, M.
KALABIĆ R.
KOKOTOVIĆ, B.
KOŠARAC, A.
KOVAČEVIĆ, A.
KURBEGOVIĆ, R.

LAZAREVIĆ, D.
LUKIĆ, N.
MATIJAŠEVIĆ L.
MATIJAŠEVIĆ, L.
MILJKOVIĆ, K.
MILJKOVIĆ, Z.
MILOVANOVIĆ, M.
MILUTINOVIĆ, M.
MIŠIĆ M.
MITROVIĆ, R.
MLAĐENOVIĆ, C.
MLADENOVIĆ, G.
MOVRIN, D.
NEDELJKOVIĆ, D.
NEDIĆ, B.
PAVKOV, B.
PEKOVIĆ O.
PEKOVIĆ, O.
PETROVIĆ, M.M.
PETROVIĆ, P.
PETROVIĆ, P. B.
PJEVIĆ, M.
POPOVIĆ M.
POPOVIĆ, M.
POPOVIĆ, V.
PUZOVIĆ, R.
RAKIĆ, A.
RANĐELOVIĆ, S
RODIĆ, D.
ŠARKOČEVIĆ Ž.

ŠĆEPOVIĆ, M.
SEKULIĆ, M.
ŠEVARLIĆ, F.
SIMONOVIĆ, A.
SKAKUN P.
SLAVKOVIĆ, N.
SREDANOVIĆ, B.
STEFANOVIĆ, LJ.
STEPANIĆ, P.
STOJADINOVIĆ, S.
SVORCAN, J.
TABAKOVIĆ, S.
TANOVIĆ D.
TANOVIĆ LJ.
TANOVIĆ, D.
TANOVIĆ, LJ.
TEŠIĆ, S.
VASILIĆ, G.
VASILJEVIĆ, P.
VIDAKOVIĆ, J.
VILOTIĆ, D.
VILOTIĆ, M.
VIŠIĆ J.
VORKAPIĆ, M.
VORKAPIĆ, N.
VUKČEVIĆ, M.
ZELJKOVIĆ, M.
ŽIVANOVIĆ, S.
ŽIVKOVIĆ, A.
ŽIVOJINOVIĆ, D.

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



35. simpozijum

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2020.

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

Бабић, Б., Вишић Ј., Ђермановић А.

ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ПАМЕТНОЈ ПРОИЗВОДЊИ И ИНДУСТРИЈИ 4.0 1.1





Бабић, Б., Вишић, Ј., Ђермановић, А.¹⁾

ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ПАМЕТНОЈ ПРОИЗВОДЊИ И ИНДУСТРИЈИ 4.0²⁾

Резиме

Дигитални близанац представља дигиталну реплика физичких података, процеса, система и дигиталну симулација стварности, која може бити коришћена у различите сврхе. Концепт дигиталног близанца пружа ефикасан начин за сајбер-физичку интеграцију производње и оптимизацију пословних процеса и оперативних процедура производње чиме се постиже нови виши ниво продуктивности. Дигитални близанци могу да користе податке са сензора инсталираних на физичким објектима за представљање њиховог стања у стварном времену, радног стања или положаја. У раду су приказана два примера развоја дигиталног близанца, први заснован на статичкој поставци модела и други заснован на динамичкој поставци.

Кључне речи: Дигитални близанац, Индустрија 4.0, Компјутерска симулација, Паметна производња.

1. УВОД

Многе земље су објавиле своје националне напредне стратегије развоја производње као што је Индустрија 4.0 које су засноване на широј примени информационих технологија нове генерације (*New IT*) у производњи. Један од заједничких циљева примене ових стратегија је за постизање паметне производње, која захтева интероперабилност, интеграцију и фузију физичког света и сајбер света производње [1].

Дигитални близанац пружа ефикасан начин за сајбер-физичку интеграцију производње. Са друге стране, паметни производни сервиси могли би да оптимизују целокупне пословне процесе и оперативни поступак производње, да би се постигао нови, виши ниво продуктивности. Комбинација паметних производних услуга и дигиталних близанца ће радикално променити пројектовање производа, производњу, експлоатацију и друге процесе. Концепт дигиталног близанца ће омогућити ефектније планирање производње и прецизно управљање производњом у циљу постизања паметне производње, кроз двосмерну повезаност између виртуелног и физичког света производње [2].

Количина података прикупљених праћењем паметне фабрике је огромна, али ако ти подаци нису обједињени и организовани на начин који може подржати процес доношења одлука, онда од њих нема користи. Један од метода који се показао као непроцењив за инжењерске и корисничке тимове који желе да искористе прикупљене податке је дигитални близанац.

2. ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ У ИНДУСТРИЈИ

Као што су индустријске револуције представљале значајне прекретница у историји човечанства, дигитални близанац и индустријски IoT (*Internet of Things* – Интернет ствари) представљају значајне промене у производњи.

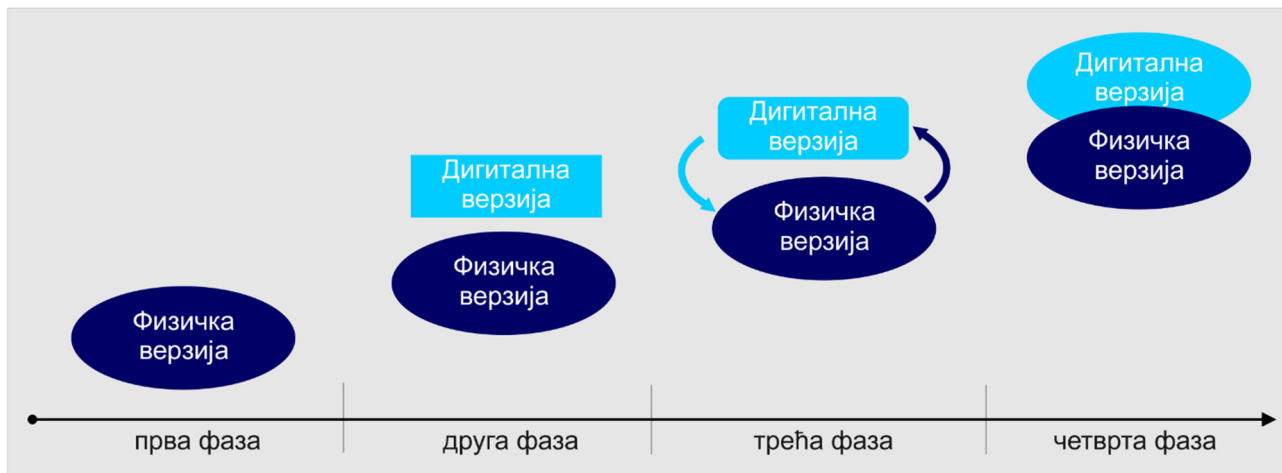
На слици 1 приказане су четири фазе еволуције дигиталног близанца [3]:

- Прва фаза - Читав производни процес постоји само у физичкој верзији.

¹⁾ Проф. др Бојан Бабић, (bbabic@mas.bg.ac.rs), Јанко Вишић, студент (jvisic1996@gmail.com), Александар Ђермановић, студент (adjetmanovic96@gmail.com) Универзитет у Београду, Машински факултет

²⁾ У оквиру рада се саопштавају резултати истраживања спроведених уз подршку Фонда за науку Републике Србије, #6523109, ВИ - MISSION 4.0 и Министарства за науку за просвету, науку и технолошки развој, Пројекат Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства – Дубоко машинско учење интелигентних технолошких система у производном машинству.

- Друга фаза - Додата је дигитална верзија која физичкој верзији обезбеђује додатне информације.
- Трећа фаза - Започиње интеракција између физичке и дигиталне верзије.
- Четврта фаза - Постоји даља интеракција и конвергенција између физичке и дигиталне верзије.



Слика 1. Четири фазе еволуције дигиталног близанца [3]

Дигитални близанци омогућавају нам:

- Вредновање производних одлуке на основу аналитике
- Пуштање у рад машина из удаљених сервисних центара, чиме се смањују трошкови услуге
- Повезивање одвојених система / процеса за побољшано праћење и надгледање
- Решавање проблема са опремом на удаљеним локацијама како би се смањило време решавања отказа
- Стицање контроле над сложеним процесима и системима

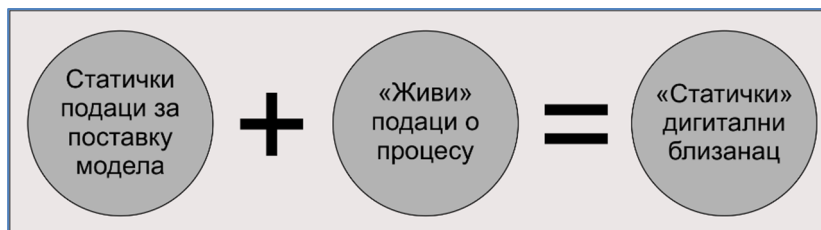
Утицај технологије дигиталних близанаца може се сврстати у три главне области:

- Развој нових производа – анализа понашања постојећих производа при примени у реалном окружењу може да представља добру основу за развој нових производа. Перформансе при експлоатацији огледају се у близанцу и користе се у развој производа и процес производње
- Производња – дигитални близанци подижу ефикасност предвиђањем отказа у производњи, тако да се они могу благовремено отклонити и на тај начин се минимизира утицај отказа на циљеве производње. Такође се могу симулирати побољшања кроз подешавање параметара дуж производне линије у близанцу без ризика да дође до поремећаја производње. Успешне симулације се тада могу применити на систем стварног живота. Поред тога, пројектантски тимови могу анализирати дигиталне близанце производа како би упоредили стварно понашање производа са пројектованим.
- Експлоатација производа – Пројектантски тимови могу да анализирају дигиталне близанце производа како би упоредили понашање производа при експлоатацији са пројектованим. Такође, дигитални близанци омогућавају даљинско пуштање у рад и дијагностику производа који су већ на терену - смањујући трошкове услуге и побољшавајући задовољство купаца.

3. РАЗВОЈ ДИГИТАЛНИХ БЛИЗАНАЦА У ПРОГРАМСКОМ ОКРУЖЕЊУ ANYLOGIC

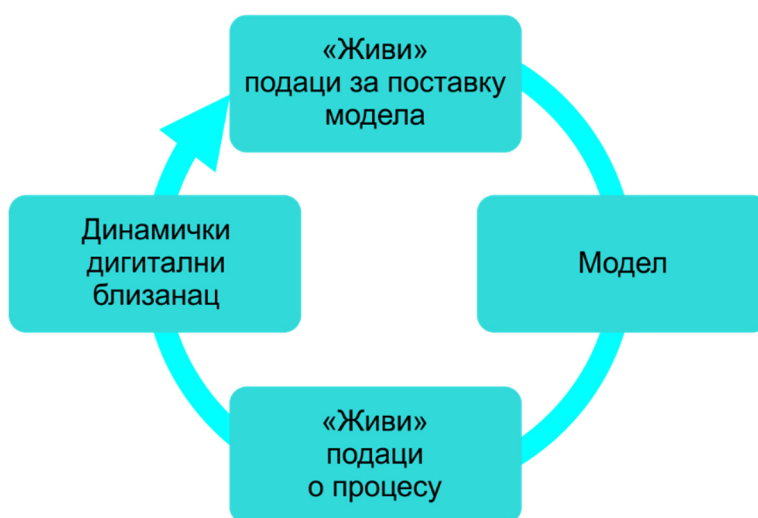
AnyLogic [4] је софтверски пакет за симулацију који подржава све различите методе моделирања. У оквиру овог софтверског пакета, пројектант може изабрати методу и ниво апстракције који најбоље описује проблематику стварног система при чему ће на тај начин обухватити сложеност производње, људских ресурса и њихове интеракције, пословних процеса итд.

Уобичајен приступ је развој статичких модела који представља „снимак“ реалности. Постоји статичка информација о распореду опреме унутар система, начина њихове интеракције и моделирање се врши кроз слагање блокова симулационог софтвера („*Drag and Drop*“). Затим се додају „живи“ подаци тј. променљиви подаци, нпр. број делова који улази у систем, времена обраде, поузданост машина, итд. На овај начин се добија „статички“ дигитални близанац (слика 2).



Слика 2. „Снимак“ реалности - „статички“ дигитални близанац

Друга варијанта је када су подаци за поставку модела променљиве („живи подаци“). Дакле, подаци о броју машина, њиховој позицији, њиховим интеракцијама, итд. су променљиви и користе се за аутоматско креирање модела. Модел се само-конфигурише на основу података. Затим се у модел уносе „живи“ подаци о процесу (број делова, редослед обраде, времена обраде, итд.) и на тај начин се долази до динамичког дигиталног близанца (слика 3). У наставку рада се дају примери развоја и статичког и динамичког дигиталног близанца.

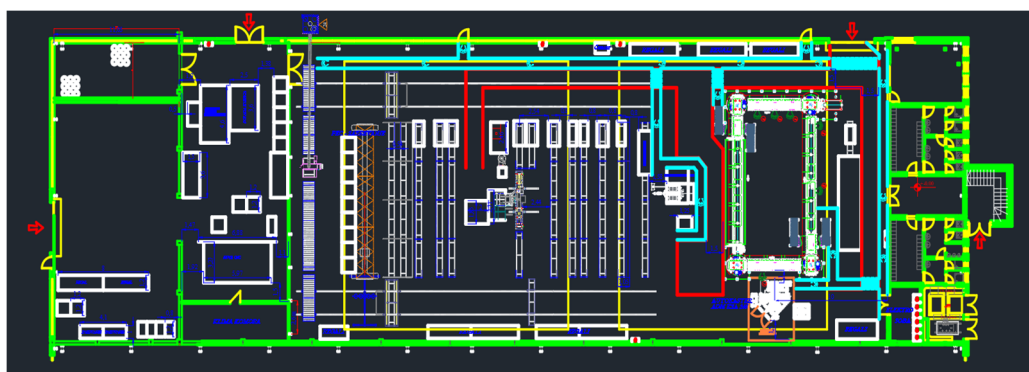


Слика 3. „Динамички“ дигитални близанац

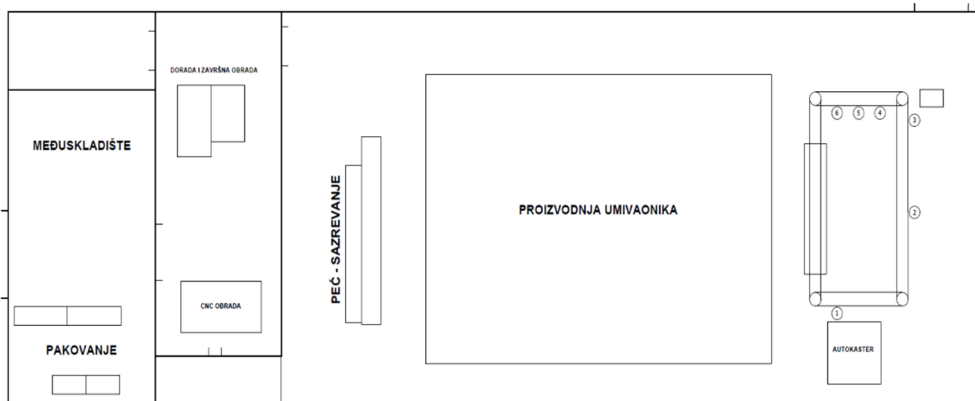
2.1 Симулација рада погона ливених полимера у компанији „Металац Инко“

Пример развоја „статичког“ дигиталног близанца је компјутерска симулација производње и тока материјала у оквиру погона ливених полимера компаније „Металац Инко“. На основу вишедневног мониторинга процеса и праћења производње унутар производних капацитета за израду кварцних судопера у погону у Горњем Милановцу прикупљени су статички подаци за поставку модела и подаци о процесу [5].

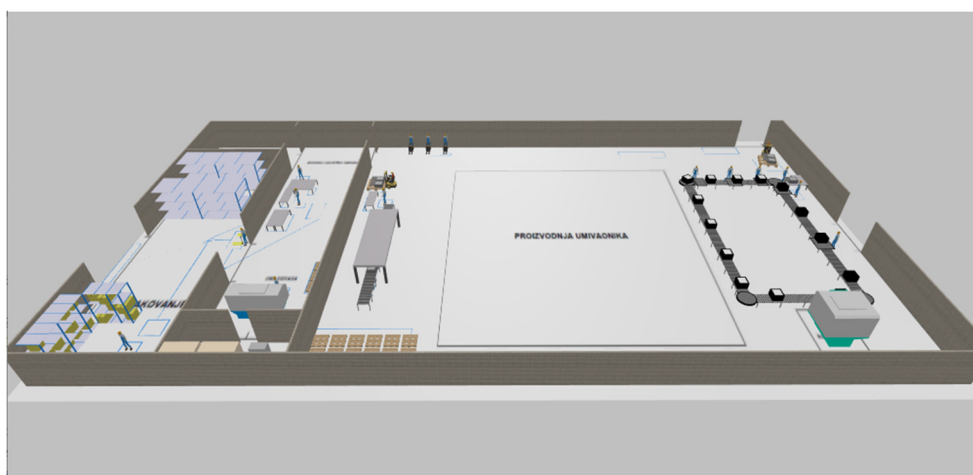
На слици 4 је приказан полазни 2D цртеж погона на основу којег је направљена одговарајућа подлога за креирање 3D приказа у AnyLogic симулационом окружењу. (Слике 5 и 6).



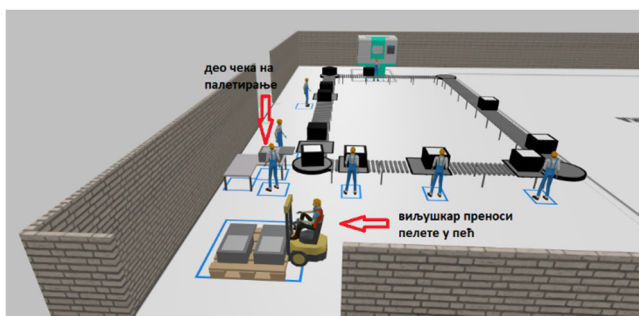
Слика 4. Детаљни AutoCad цртеж погона ливених полимера



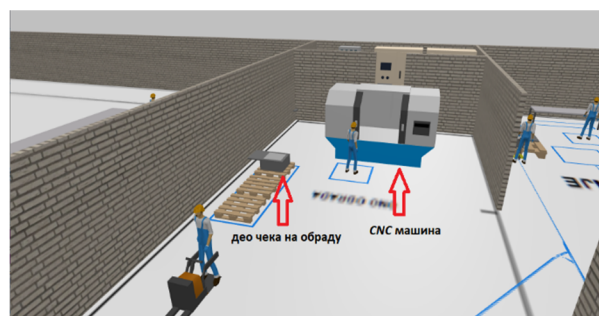
Слика 5. Подлога за графички едитор AnyLogic - а



Слика 6. 3D приказ погона у AnyLogic – у



а)



б)



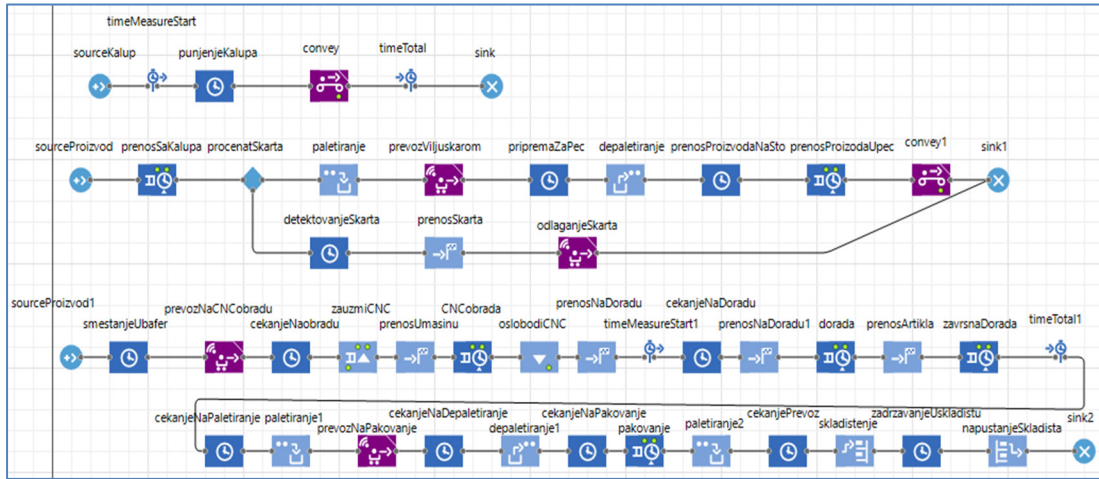
в)



г)

Слика 7. Примери технолошких операција у производњи судопера: а) палетирање, б) CNC обрада, в) ручна дорада, г) палетирање готових производа и припрема за транспорт.

Производне операције било је неопходно превести и моделирати на прави начин у оквиру софтвера *Anylogic*. Већ је наглашено да је симулација осмишљена и детерминисана као статички модел при чему је логика процеса изграђена на помоћу блокова из *Anylogic* библиотеке за моделирање процеса и библиотеке за моделирање система за руковање материјалом. На слици 7 су приказани неке од операција у технолошком процесу производње судопера. Логичка шема симулационог модела сачињена од *Anylogic* блокова из наведених библиотека је приказана на слици 8.



Слика 8. Логичка шема симулационог модела

Променљиви подаци – параметри технолошког процеса се варирају током симулације помоћу „клизача“ приказаних на слици 9. Слика 10 приказује анимирани 3D приказ током симулације.



Слика 9. Клизачи за промену параметара процеса

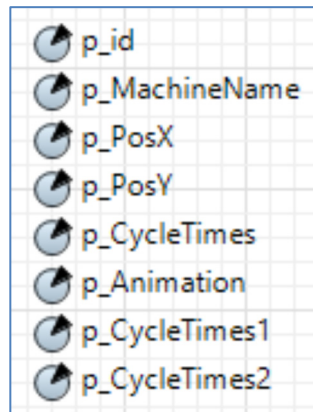


Слика 10. Анимирани 3D приказ током симулације

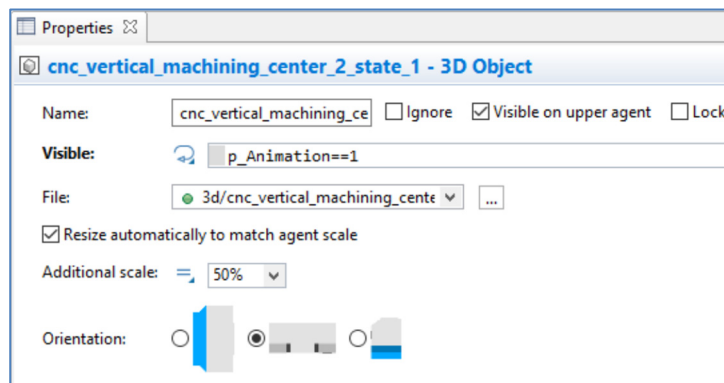
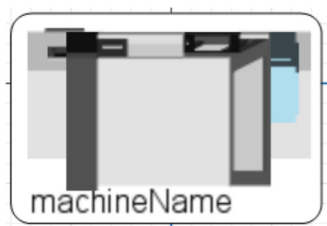
2.1 Развој динамичког дигиталног близанца

Као и при креирању статичког дигиталног близанца и при развоју динамичког модела полази се од диспозиционог плана и креирања његове дигиталне реплике. Следећи корак је креирање агената и њиховог понашања, тачније логике модела. Креће се од креирања машина алатки, затим конвејера и на крају транспортера и то све динамички. Још једном, разлика између статичких и динамичких симулационих модела је у томе што се код динамичких модела не користе неке уграђене опције софтвера, већ се сваки агент креира програмски, како би се задржала потпуна контрола над њим, док се код статичких модела агенти једноставно превлаче на радни простор (“*Drag and Drop*”) и у њиховим постојећим интерфејсима подешавају карактеристике. Поред динамичког креирања агената, такође се и неки параметри, попут времена трајања обраде, позивају из екстерне базе података [6].

На пример при динамичком креирању машина алатки у првом кораку се дефинише база података (*db_machines*), у овом случају унутар софтвера. Сврха ове базе података јесте да се помоћу ње дефинишу неки основни параметри везани за машине у погону. Следећи корак јесте креирање агента Машина (*Machine*) и празне популације машина (*pop_machines*), која ће се при иницијализацији модела попунити машинама из базе података. Да би креирани агент Машина био повезан са базом, најпре је унутар агента потребно креирати параметре, чији типови одговарају типовима података из табеле, слика 11. Да би новонастали агент био видљив током симулације, потребно му је додати и анимацију. У оквиру софтвера *AnyLogic* налази се и картица са тродимензионалним објектима, где се између осталог налазе и машине алатке, слика 12 [6].



Слика 11. Параметри агента машина



Слика 12. Динамичко подешавање видљивости анимација агента Машина

Да би популација машина била видљива током анимације, потребно је креирати функцију која ће претраживати базу података и из ње преузимати информације. На слици 13 приказана је функција са кодом који извршава следећу радњу: претражује базу података од првог до последњег реда, где за сваки ред креира две променљиве које узимају вредност из колона које означавају позицију машина у простору. Потом сваку од вредности из свих колона додаје популацији машина и на крају тренутној машини додељује позицију на основу креираних променљивих.

```

Name: f_CreateMachines  Show name  Ignore
Visible:  yes
 Just action (returns nothing)
 Returns value

Arguments
Function body
List <Tuple> rows = selectFrom(db_machines).list();
for (Tuple row : rows) {
    double posX = row.get(db_machines.pos_x);
    double posY = row.get(db_machines.pos_y);
    double anitype = row.get(db_machines.animation);
    Machine currMachine = add_pop_machines(
        row.get(db_machines.id),
        row.get(db_machines.machine_name),
        posX,
        posY,
        row.get(db_machines.cycle_times),
        row.get(db_machines.animation),
        row.get(db_machines.cycle_times_1),
        row.get(db_machines.cycle_times_2));
    // move to correct position
    currMachine.setXY(posX,posY);
}

```

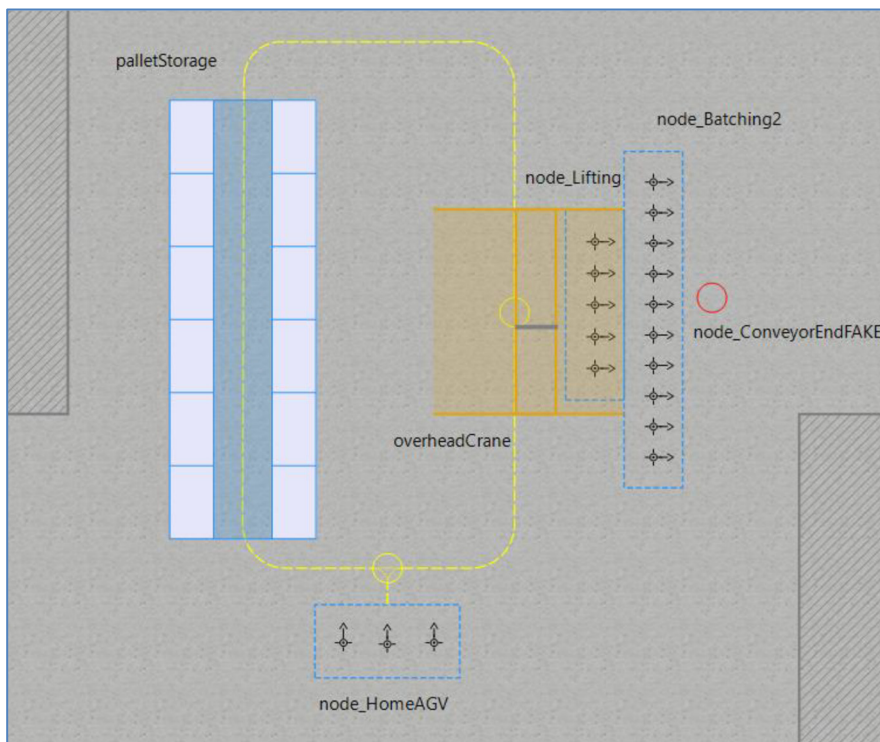
Слика 13. Функција за креирање машина

Наредни корак представља креирање агента производа (*Product*) и агента који представља производе сложене на палету (*Batch*), као и њихових популација (*pop_products* и *pop_batches*). Следи креирање окружења око машина (програмско креирање просторних елемената у моделу). У моделу је потребно креирати „места“ која ће симулирати реалне позиције око машине, попут зоне за долазак делова, зоне за привремено складиштење готових делова, као и места на којем ће се вршити симулација обраде. При типичном креирању симулационих модела у овом софтверу, све позиције и путање се креирају једноставним цртањем. На тај начин, сваки од елемената аутоматски припада мрежи просторних елемената која је по својој природи статичка и у њу се не могу додавати динамички елементи. Из потребе задржавања што веће контроле над моделом и мрежа елемената је креирана програмски. Затим се динамички креира транспортни систем (конвејери и аутоматски вођена колица).

У моделу постоје и неке статичке компоненте модела кажемо да су статичке, креиране коришћењем постојећих блокова. Свака компонента коју је могуће користити у оквиру симулације има уграђени кориснички интерфејс са интуитивним упитима, које пројектант попуњава у складу са својим захтевима. Предност оваквих симулација је у томе што захтевају знатно мање времена за развијање, а такође не захтевају опширно познавања пре свега Јава софтверског језика, на којем је софтвер базиран. Мана оваквих симулационих модела јесте низак ниво флексибилности, пре свега када се говори о потребама брзих и једноставних измена у моделу, што је једна од одлика правих дигиталних близанаца. У овом моделу статички су одрађени елементи чије би креирање динамичким путем представљало редувантан посао, који је притом прилично компликован. За њихово креирање потребно је користити неке од функција за које је експлицитно наведено да не би требале да се позивају од стране корисника. На слици 14 приказан је део погона и његове статичке компоненте. У овом делу погона одвија се део процеса везан за поновно палетирање производа који силазе са транспортне траке и њиховог транспорта у регално складиште.

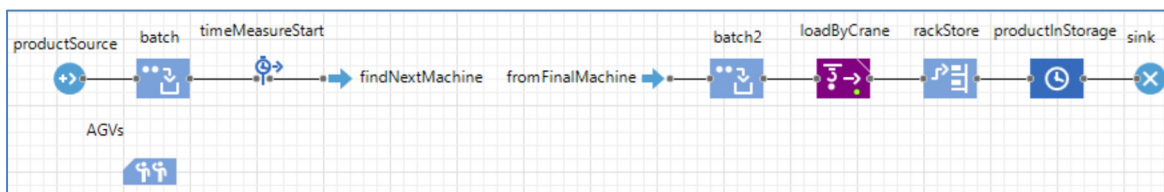
Основу сваког модела заснованог на дискретним догађајима чини процесни дијаграм. Реалан производни процес представља се низом међусобно повезаних логичких блокова који симулирају

најбитније догађаје. Карактеристика дискретних догађаја јесте sukcesивно извршавање, односно промена стања система. Завршетак једне акције представља окидач за покретање друге. У овом поглављу биће представљен и детаљно описан процесни дијаграм модела само-конфигуришуће фабрике. Он се по својој конструкцији не разликује превише од дијаграма статички креираних модела; најбитнија разлика јесте повезивање више различитих процесних дијаграма који се налазе у различитим агентима.



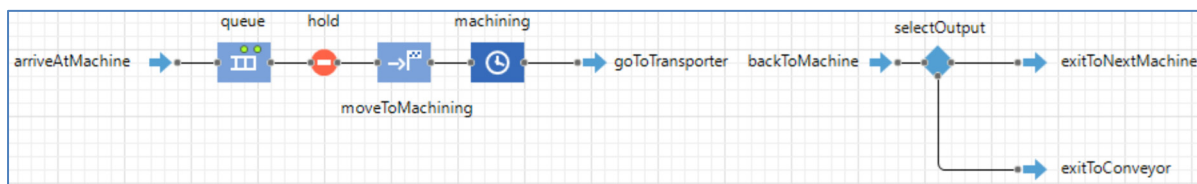
Слика 14. Статички елементи симулационог модела

На слици 15 представљен је процесни дијаграм који се налази у главном агенту. Овај дијаграм представља почетак и крај производног процеса и може се поделити на два дела, први део, до блока *fromFinalMachine*, симулира динамички део модела, док други део, од претходно поменутог па до последњег блока симулира статички формиран део модела.



Слика 15. Процесни дијаграм у главном агенту

У оквиру агента *Machine* налази се процесни дијаграм, слика 16, који је заједнички за све машине из популације. То је могуће из разлога што се процес обраде на свакој машини може описати истим логичким блоковима: *queue*, *hold*, *moveToMachining* и *machining*.

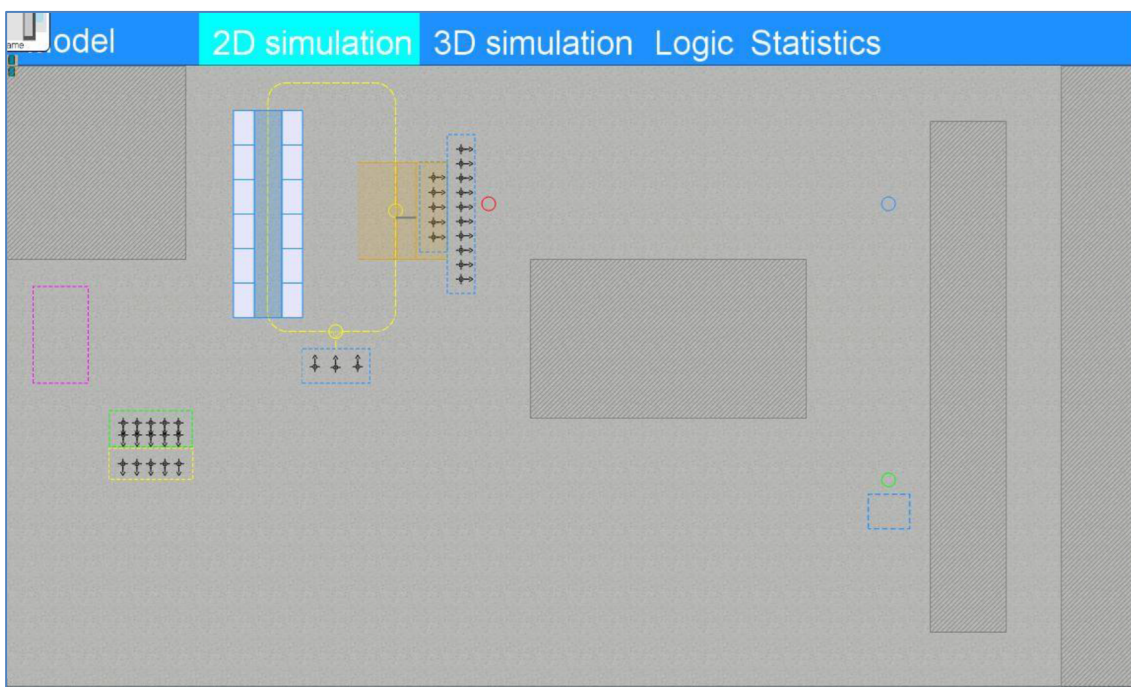


Слика 16. Процесни дијаграм унутар агента *Machine*

Конечна форма, односно поставка модела подељена је у четири одвојене зоне и то:

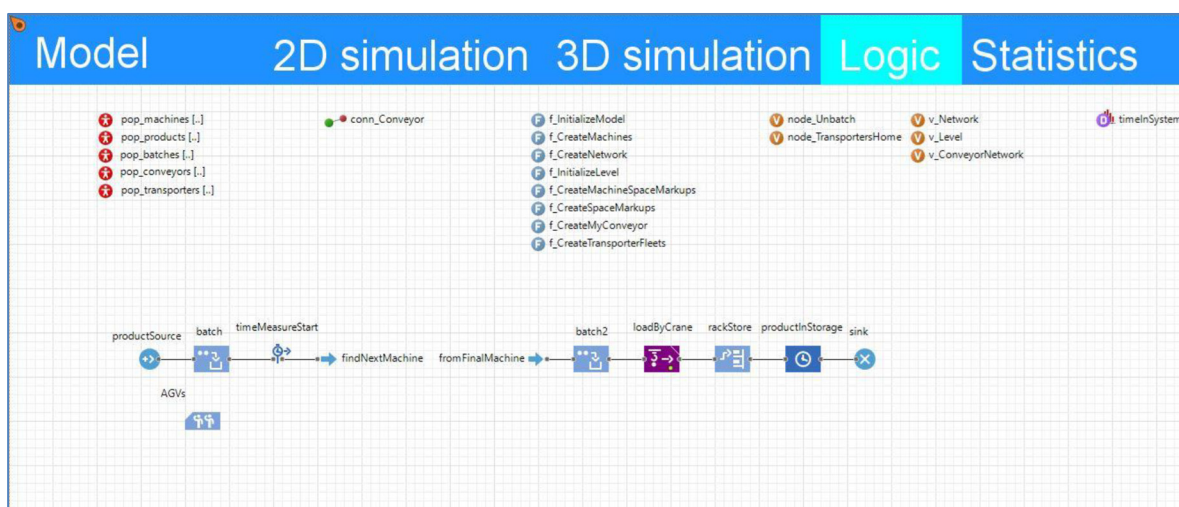
- 2D симулација,
- 3D симулација,
- Логика модела,
- Статистика.

На слици 17 приказана је 2D поставка модела, на којој се налазе анимације свих статички и динамички креираних агената и просторних елемената. Динамички агенти до покретања нису видљиви, што је једна од одлика на тај начин креираних елемената. У горењем делу погледа, може се видети трака са називима четири зоне модела.



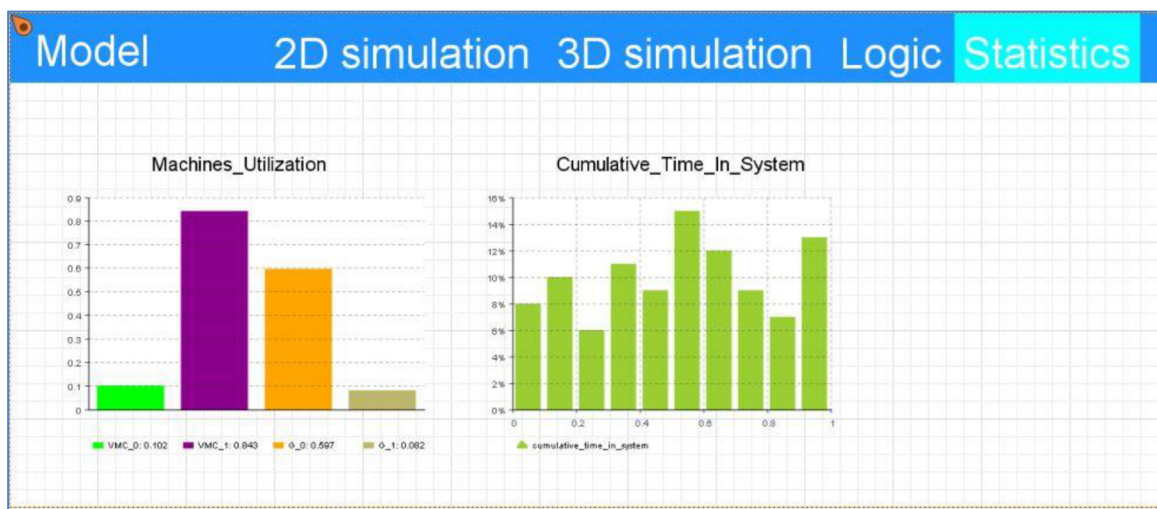
Слика 17. Дводимензионална зона поставке симулационог модела

3D зона симулације није видљива пре покретања саме симулације. У оквиру модела постоји више међусобно повезаних процесних дијаграма који заједно представљају једну целину. У зони модела који се назива Логика, слика 18, приказан је само процесни дијаграм који се налази у главном агенту из разлога што он уједно представља и почетни екран на којем је цела поставка модела формирана.



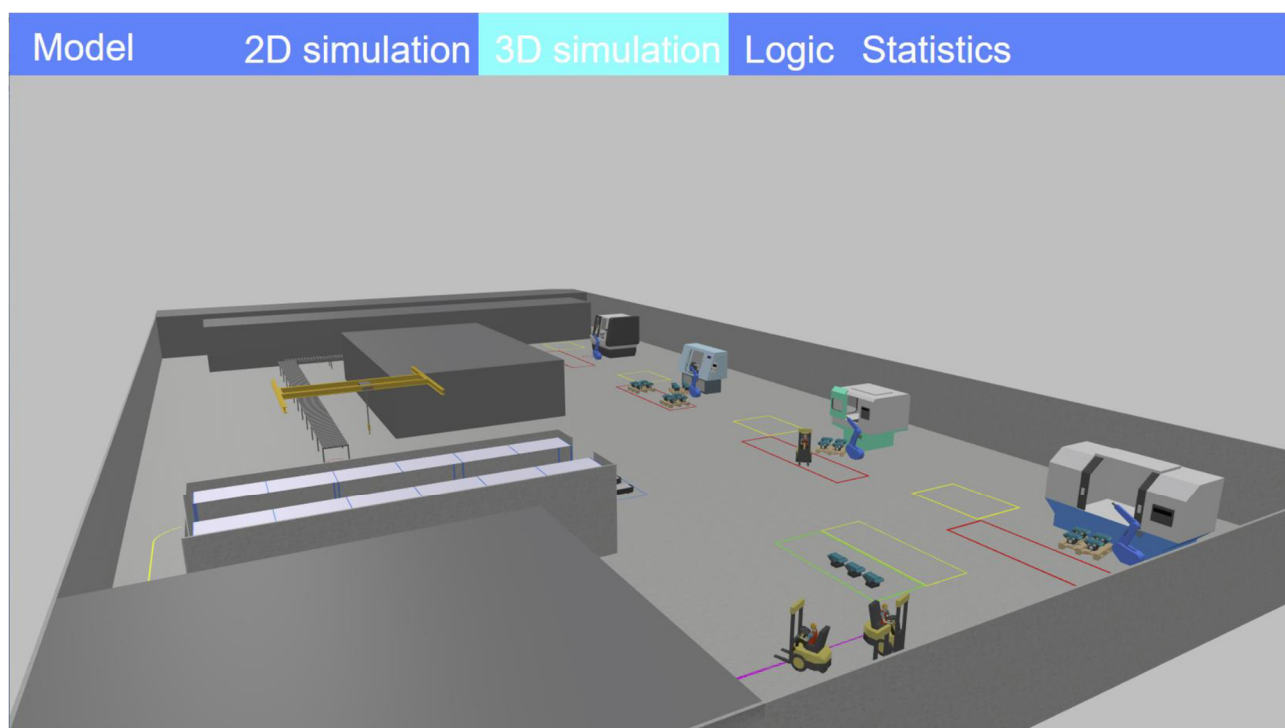
Слика 17. Зона симулационог модела са почетним процесним дијаграмом, функцијама, променљивим и популацијама агената

У четвртој зони модела, слика 18, налазе се дијаграми, односно статистика или излазне информације.



Слика 18. Резултати симулације

Коначно на слици 19 је дат 3D приказ током симулације за задати сет улазних параметре који дефинишу и конфигурацију модела и параметре процеса.



Слика 19. 3D анимирани приказ

9. ЗАКЉУЧАК

Израз „дигитални близанац“ настао је као део велике маркетиншке кампање у оквиру концепта Индустија 4.0, како би се убрзала дигитализација у производњи и логистици. Рачунарски симулациони модели производних и логистичких модела користе се од 50-их година прошлог века. Рачунарски модел је сам по себи дигитални близанац [7].

Ипак чињеница је да дигитални близанац може бити симулациони модел, али симулациони модел не мора нужно бити дигитални близанац [7]. Концепт дигиталног близанаца омогућава произвођачима

да креирају моделе својих технолошких система и процеса користећи податке у реалном времену прикупљене од паметних. Дигитални близанац и физички систем повезани су преко IoT или паметних сензора и актуатора. Синхронизација између дигиталног близанца и његовог физичког близанца, било на мрежи или ван њега, осигурава да су технолошки системи стално оптимизирани док дигитални близанац прима информације о перформансама у реалном времену од физичког система.

У раду су приказане две примера развоја дигиталног близанца, статички и динамички. Динамички модел је комплексан за развој, али омогућава флексибилност у примени. Са друге стране развој динамичког модела за комплексан реалан систем, као што је технолошки систем ливених полимера, за који је развијен модел, може бити врло сложен задатак.

Правци даљих истраживања су усмерени у два правца. Први се односи на развој комплексних динамичких модела уз примену вештачке интелигенције. Други правац је коришћење отворене архитектуре коришћеног симулационог софтвера за прихват улаза са паметних сензора уместо, за сада примењених, коришћења улазних података из базе података.

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tao, F., Qi, Q. *New IT Driven Service-Oriented Smart Manufacturing: Framework and Characteristics*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017; Doi:10.1109/TSMC.2017.2723764.
- [2] Qi Q., Tao, F., Zuo, Y., Zhao, D., *Digital Twin Service towards Smart Manufacturing*, Procedia CIRP, Vol. 72, pp. 237-242, 2018.
- [3] Kitain, L., Digital Twin — The New age of Manufacturing, <https://medium.com/datadriveninvestor/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313>, November, 2018.
- [4] <https://www.anylogic.com/>
- [5] Вишић, Ј., Симулација рада погона ливених полимера у компанији „Металац Инко“, мастер рад, Машински факултет, 2020.
- [6] Ђермановић, Ј., Развој динамичког дигиталног близанца, мастер рад, Машински факултет, 2020.
- [7] Shao, G., Jain, S., Christoph Laroque, Lee, L. H., Lendermann, P., Rose, O., *Digital Twin For Smart Manufacturing: The Simulation Aspect*, Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference, 2019.

Babić, B., Višić, J., Đermanović, A.

DIGITAL TWINS IN THE SMART MANUFACTURING AND INDUSTRY 4.0

Abstract: *The digital twin is a digital replica of physical data, processes, systems and a digital simulation of reality, which can be used for various purposes. The concept of digital twin provides an efficient way for cyber-physical integration of production and optimization of business processes and operational manufacturing procedures thus achieving a new higher level of productivity. Digital twins can use data from sensors installed on physical objects to represent their condition in real time, operating condition or position. The paper presents two examples of digital twin development, the first based on the static setting of the model and the second based on the dynamic setting.*

Key words: *Digital Twin, Industry 4.0, Computer Simulation, Smart Manufacturing.*

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



29. simpozijum

CAD/CAM

Beograd, oktobar 2020.

CAD/CAM

Mladenović, G., Tanović, Lj., Milovanović, M., Popović, M., Puzović, R., Pjević, M. RAZVOJ SISTEMA ZA AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE PREDOBRADE DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA.....	2.1
Hasan, M.S., Vorkapić, M., Ivanov, T., Kovačević, A. PREDIKCIJA BRZINE NA 3D ŠTAMPAČU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	2.7
Kovačević, A., Ivanov, T., Simonović, A., Vorkapić, M. POVEĆANJE PRECIZNOSTI IZRADA 3D ŠTAMPANIH DELOVA PRIMENOM ITERATIVNE METODE.....	2.13
Sredanović, B., Borojević, S., Čiča, Đ., Tešić, S. AUTOMATIZACIJA PROJEKTOVANJA PROIZVODA PRIMJENOM CAD PROGRAMSKIH SISTEMA NOVE GENERACIJE	2.20
Svorcan, J., Peković, O., Tanović, D., Hasan, M.S. ODREĐIVANJE MODIFIKOVANOG PROFILA BRZINE POMOĆU PRORAČUNA OPSTRUJAVANJA I VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA.....	2.27
Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S. ANALIZA PERFORMANSI VETROTURBINE SA RAZLIČITIM AEROPROFILIMA.....	2.33
Živojinović, D., Svorcan J., Baltić, M., Simonović, A. KUTIJA ELEKTRONIKE – STRUKTURNA ANALIZA I IZRADA.....	2.41

← NAZAD

RAZVOJ SISTEMA ZA AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE PREDOBRADE DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA ⁷⁾

Rezime

Na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu su sprovedena istraživanja na temu projektovanja tehnologije obrade delova sa složenim površinama, a prateći trend razvoja komercijalnih CAD/CAM sistema. U prethodnom periodu je akcenat bačen na proširenje prethodno razvijenog sistema za automatsko projektovanje tehnologije obrade i to za slučajeve kada nije moguća obrada cele površine loptastim glodalom već je potreban zahvat predobrade kojim bi se dobio približni oblik površine. Razvijeni sistem je implementiran u softversko rešenje kojim je izvršeno generisanje NC koda kojim su obrađeni delovi. Obradom na obradnom centru je izvršena verifikacija razvijenog sistema.

Ključne reči: Složene površine, CAD/CAM sistemi, predobrada, vretenasto glodalo

1. UVOD

Nekada je upotreba delova sa složenim površinama bila zastupljena samo u pojedinim industrijama poput avio i automobilske. Međutim, danas je opšte poznato da su delovi sa složenim površinama prisutni u svakodnevnom životu. To podrazumeva da se ovakvi delovi mogu naći u domaćinstvu, slika 1.



Slika 1. Primeri delova sa složenim površinama

Nivo upotrebe delova sa slobodnim površinama raste iz dana u dan, može se reći po eksponencijalnom nivou [1]. Proizvodnja delova sa složenim površinama se ne odnosi uvek na obradu samih delova, zapravo su česti slučajevi kada je potrebno izraditi kalupne šupljine u kojima će se izrađivati ovakvi delovi bilo brizganjem plastike, livenjem ili kovanjem. Postoji više načina za obradu ovakvih delova, a najzastupljeniji je metod obrade loptastim glodalom na 3 ili 5 osnim numerički upravljanim mašinama alatcima [2]. Glavni problem prilikom projektovanja tehnologije obrade upotrebom komercijalnih CAD/CAM paketa je što

¹⁾ doc. dr Goran Mladenović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (gmladenovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ prof. dr Ljubodrag Tanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (ltanovic@mas.bg.ac.rs)

³⁾ dr Marko Milovanović, CERN - European Organization for Nuclear Research, CH-1211 Geneva, Switzerland (marko.milovanovic@cern.ch)

⁴⁾ doc. dr Mihajlo Popović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (mpopovic@mas.bg.ac.rs)

⁵⁾ prof. dr Radovan Puzović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (rpuzovic@mas.bg.ac.rs)

⁶⁾ doc. dr Miloš Pjević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (mpjevic@mas.bg.ac.rs)

⁷⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja podržanog od strane MPNTR RS po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105

projektant nema informaciju o prekoračenju sile rezanja tokom simulacije obrade što u realnosti može dovesti do loma alata na samoj mašini u toku obrade [3]. Upravo iz tog razloga su uvedeni metodi obrade sa optimizacijom putanje alata [4]. Ovo podrazumeva između ostalog optimizaciju na osnovu više kriterijuma [5] – maksimalne dozvoljene sile rezanja, maksimalne dozvoljene visine neravnina i maksimalnog dozvoljenog odstupanja složene površine. Na bazi razvijenih procedura razvijena je aplikacija koja predstavlja CAD/CAM sistem za automatsko projektovanje tehnologije obrade delova sa složenim površinama na bazi učitanih CAD modela izratka i priprema u STL formatu file-a. Dodatni problem su se javili u slučajevima kada nije bila moguća obrada loptastim glodalom i pored smanjenja brzine pomoćnog kretanja na minimalnu vrednost što je dalje zahtevalo razvoj procedura za zahvat predobrade čeonim vretenastim glodalom [5].

U radu je prikazana procedura koja predstavlja proširenje prethodno razvijenog sistema [2] u cilju potpuno automatskog projektovanja tehnologije obrade delova sa složenim površinama.

2. DEFINISANJE PROBLEMA

Kako je već rečeno, razvijena aplikacija [2] omogućuje automatsko projektovanje tehnologije obrade na bazi učitanih CAD modela izratka i priprema u STL format file-a. Od korisnika se zahteva unos osnovnih podataka o zahtevanom kvalitetu obrade, maksimalna hrapavost, maksimalno odstupanje i željena brzina pomoćnog kretanja. Nakon sprovedenih procedura modula za simulaciju procesa obrade moguća su dva načina za obradu dela, i to:

1. Obrada loptastim glodalom iz jednog prolaza,
2. Obrada sa zahvatom predobrade.

Ukoliko nije moguća obrada iz jednog prolaza loptastim glodalom korisnik dobija odgovarajuće obaveštenje o tome sa podacima o prekoračenju maksimalno dozvoljene dubine glodanja, slika 2. Pored ovoga daje se i informacija o procentu zastupljenosti prekoračenja maksimalne dozvoljene dubine glodanja po površini kako bi korisnik procenio da li je potrebno sprovesti zahvat predobrade čeonim vretenastim glodalom ili da obradu uradi loptastim glodalom iz više prolaza.

GEOMETRIJSKA ANALIZA	
Preporuceno ravnanje priprema do najviše tačke obratka [mm]	1.99
Najveća dubina rezanja [mm]	16.33
NIJE MOGUĆA OBRADA DATE POVRŠINE IZ JEDNOG PROLAZA	
Minimalna brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	38
Maksimalna dubina glodanja u jednom prolazu [mm]	8
Prekoracenje dubine glodanja [mm]	8.33
Procenat zastupljenosti prekoracenja dubine glodanja [%]	74.2
Potreban broj prolaza u fazi predobrade	2
AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE OBRADE	
PREDOBRADA	ZAVRŠNA OBRADA

Slika 2. Obaveštenje korisniku da nije moguća obrada dele površine iz jednog prolaza [7]

Dalje je bilo potrebno razviti proceduru koja će na osnovu geometrijske analize CAD modela izratka i priprema sprovesti generisanje putanje alata za predobradu date površine u cilju dobijanja stepenastog oblika dela. Na ovaj način će biti omogućeno da u okviru zahvata završne obrade vretenastim glodalom ne dođe do prekoračenja maksimalno dozvoljene dubine rezanja za izabrani alat.

3. KONCEPT SISTEMA

Postupak generisanja putanje alata za zahvat predobrade čeonim vretenastim glodalom se svodi na niz procedura koje se sekvencijalno nadovezuju jedna na drugu, a čiji se opis daje u nastavku.

2.1 Definisane baze podataka o raspoloživim alatima

Postojeća baza podataka je proširena datotekom o raspoloživim alatima tipa čeonog vretenastog glodala gde su korišćeni sledeći atributi za opis alata:

- ID alata
- Prečnik alata
- Dužina reznog dela
- Dužina alata do nosača alata
- Broj zuba
- Ugao nagiba zavojnog žleba
- Materijal alata
- Oznaka dužinske korekcije

2.2 Unos dodatka za obradu

Od korisnika se zahteva unos vrednosti dodatka za obradu u dva pravca, paralelno osi alata (δ_{ax}) i upravno na osu (δ_{rad}). Na osnovu unešena dva parametra dalje je moguć automatski izbor alata kojim će se vršiti obrada, a na osnovu raspoloživih u bazi.

2.3 Određivanje režima rezanja

Određivanje režima rezanja se vrši na osnovu procedure opisane u [8, 9]. Kako je u pitanju zahvat predobrade zahtevani kvalitet obrade je N10 za koji je vrednost srednjeg aritmetičkog odstupanja profila 12.5 μ m. Vrednost koraka (s_z) i brzine rezanja (V) se određuje prema proceduri datoj u [8] prema tablici preporučenih vrednosti. Izbor navedenih parametara se vrši na osnovu maksimalne dubine rezanja (a), materijala alata i materijala obratka.

Određivanje broj obrtaja (n) se vrši na osnovu preporučenih vrednosti prema proceduri datoj u [8]. Za izabrani prečnik alata (D) i brzinu rezanja za datu dubinu rezanja i materijal alata prema:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad [o / \text{min}] \quad (1)$$

Izračunati broj obrtaja se dalje zaokružuje na prvi manji ceo broj saglasno pravilima za izbor broja obrtaja pri projektovanju tehnologije obrade za NUMA. Ukoliko je broj obrtaja veći od maksimalno mogućeg za izabranu mašinu alatku broj obrtaja se zaokružuje na maksimalno mogući broj obrtaja koji izabrana NUMA može da ostvari.

Određivanje brzine pomoćnog kretanja (V_s) se vrši na osnovu usvojenog koraka, broja obrtaja i broja zuba izabranog alata (z) prema [8]:

$$V_s = n \cdot s_z \cdot z \quad [mm / \text{min}] \quad (2)$$

Izračunata vrednost brzine pomoćnog kretanja se dalje zaokružuje na prvi manji ceo broj saglasno pravilima za izbor brzine pomoćnog kretanja pri projektovanju tehnologije obrade za NUMA. Ukoliko se dobijena brzina pomoćnog kretanja ne nalazi u opsegu koji NUMA može da ostvari vrši se korekcija tako da upadne u opseg.

Pored navedenog, razvijeni sistem vrši proveru snage rezanja prema:

$$P_{rez} = \frac{a \cdot b \cdot V_s}{1000} \cdot p \quad [kW] \quad (3)$$

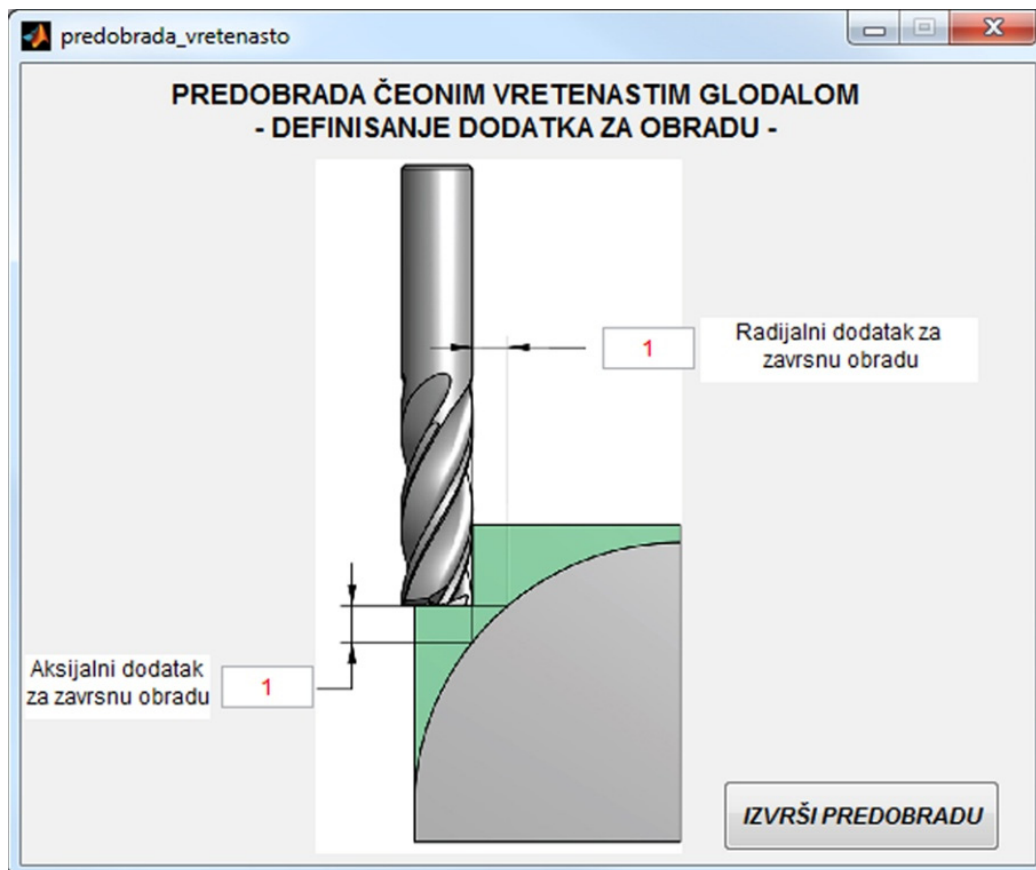
Ukoliko dolazi do prekoračenja snage vrši se korekcija broja obrtaja saglasno pravilima opisanim u [8] ili uvodi veći broj prolaza ukoliko dolazi do znatnog prekoračenja korisne (raspoložive) snage mašine.

4. RAZVOJ SOFTVERSKE PODRŠKE

Upotrebom MATLAB softverskog paketa izvršeno je proširenje razvijene aplikacije tako što su implementirane prethodno opisane procedure koje objedinjene predstavljaju postupak projektovanja tehnologije obrade glodanjem čeonim vretenastim glodalom.

U delu definisanja obradnog sistema izvršeno je proširenje mogućnosti unosa novih alata tipa čeonih vretenastih glodala u bazu podataka prema opisanim atriburima u odeljku 3 ovog rada.

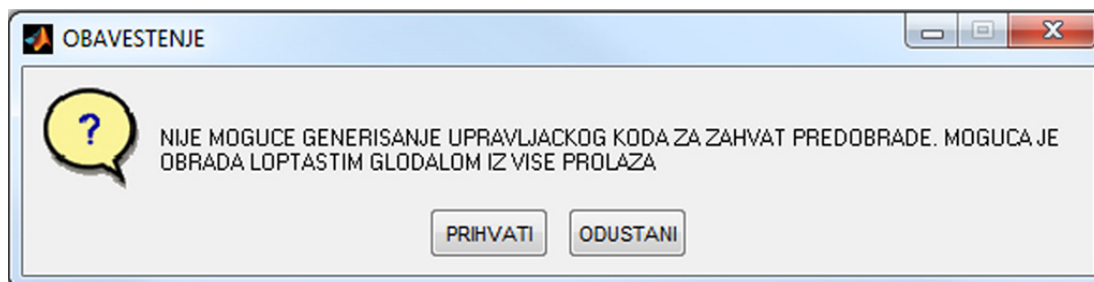
Izborom opcije „PREDOBRADA“ sa slike 2 sistem daje ekran na kome korisnik treba da unese potrebne vrednosti dodatka za završnu obradu i potvrdi opcijom „IZVRŠI PREDOBRADU“, slika 3.



Slika3. Definisiranje dodatka za završnu obradu [7]

Nakom izvršenja procedura sadržanih u ovom modulu formiran je NC kod koji predstavlja putanju alata za zahvat predobrade koji se nalazi u instalacionim folderu date aplikacije.

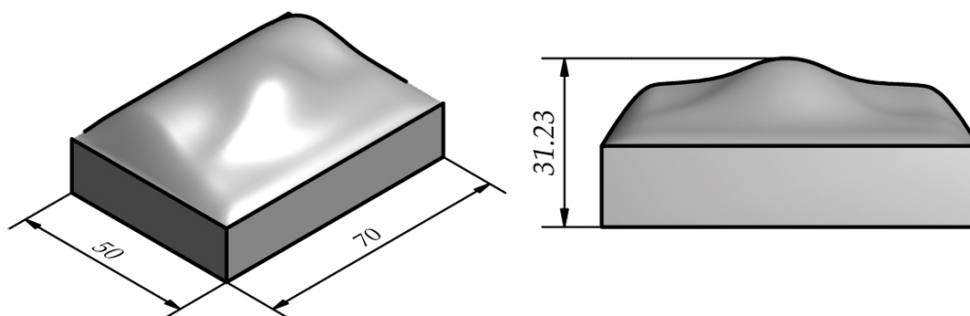
Zavisno od geometrije izratka u nekim slučajevima nije moguća predobrada čeonim vretenastim glodalom i u tim slučajevima sistem daje odgovarajuće obaveštenje koje podrazumeva obradu loptastim glodalom iz više prolaza, slika 4.



Slika 4. Definisiranje dodatka za završnu obradu [7]

5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Upotrebom razvijene aplikacije izvršeno je projektovanje tehnologije obrade za učitani CAD model izratka, slika 5.



Slika 5. CAD model izratka za verifikaciju metoda obrade čeonim vretenastim glodalom [7]

Pripremak dimenzije 70x50x32 je bio stegnut u mašinsku stegu koja je preko ugaonika postavljena na radni sto NUMA. Predobrada je izvršena čeonim vretenastim glodalom prečnika 20mm, a izgled dela nakon izvedenog zahvata je prikazan na slici 6.



Slika 6. Izradak nakon sprovedenog zahvata predobrade čeonim vretenastim glodalom [7]

Na slici 6 se jasno uočava da je izradak stepenastog oblika koji dalje omogućuje završnu obradu kod koje neće doći do prekoračenja maksimalno dozvoljene dubine glodanja u jednom prolazu za izabrano loptasto glodalo.

Nakon sprovedene predobrade izvršena je i završna obrada prema generisanom upravljačkom kodu, a nakon toga provera geometrije izrađenog dela na NUMM čime je verifikovana obrada u zahtevanom kvalitetu.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih istraživanja može se zaključiti da je automatsko projektovanje tehnologije obrade upotrebom datog sistema (aplikacije) moguća. Upotreba datog sistema je ograničena na određenu klasu predmeta koja podrazumeva osnovu oblika kvadrata ili pravougaonika. Eksperimentalnom verifikacijom je potvrđena obrada u propisanim granicama tolerancije i hrapavosti što potvrđuje mogućnost upotrebe datog sistema. Na osnovu opisanog stvoreni su preduslovi za dalji razvoj aplikacije u smeru implementacije novih metoda za postupak predobrade složene površine kada obrada loptastim glodalom iz jednog prolaza nije moguća.

10. LITERATURA

- [1] Mladenovic G., Tanovic LJ., Ehmann K.F.: *Tool Path Generation for Milling of Free Form Surfaces With Feedrate Scheduling*. FME Transactions, 43(1): pp. 9-15, 2015.
- [2] Mladenović G., Tanović Lj., Puzović R., Pjević M., Popović M.: *RAZVOJ SOFTVERSKOG REŠENJA ZA AUTOMATSKO PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE OBRADE DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA*, 41. JUPITER Konferencija, str. 2.19-2.24, Beograd, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd, Jun, 2018.
- [3] Goran M. Mladenovic, Marko J. Milovanovic, Ljubodrag M. Tanovic, Radovan M. Puzovic, Milos D. Pjevic, Mihajlo D. Popovic, Slavenko M. Stojadinovic: *DEVELOPMENT OF APPLICATION SOFTWARE FOR AUTOMATIC MANUFACTURING TECHNOLOGY DESIGN OF FREE FORM SURFACES*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN TECH 2019, str. 65-65, Zlatibor, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd, Jun, 2019.
- [4] Mladenović G., Tanović Lj., Pjević M., Popović M.: *Obrada skulptorskih površina - razvoj CAD/CAM sistema*, 40. JUPITER konferencija, Beograd, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd, maj, 2016.
- [5] 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.
- [6] Goran M. Mladenovic, Marko J. Milovanovic, Ljubodrag M. Tanovic, Radovan M. Puzovic, Milos D. Pjevic, Mihajlo D. Popovic: *CONCEPT DEVELOPMENT FOR ROUGH MILLING OF FREE FORM SURFACES*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN TECH 2020, str. 45-45, Zlatibor, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd, Jun, 2020.
- [7] Mladenovic G. Optimizacija putanje alata pri obradi skulptorskih površina glodanjem, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2015.
- [8] Калајџић М., Тановић. Љ., Бабић Б., Миљковић З., Пузовић Р., Кокотовић Б., Поповић М., Живановић С., Тошић, Д., Васић И., *Технологија обраде резањем – Приручник*, Београд: Машински факултет Београд, 2014.
- [9] М., Калајџић., *Технологија Машиноградње*, Београд: Машински факултет Београд, 2014.

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

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC TECHNOLOGY DESIGN FOR PRE-MACHINING OF PARTS WITH FREE FORM SURFACES

Abstract: *Accompanying of development of commercial CAD / CAM systems, at the Department of Production Engineering of the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, research was conducted on the topic of designing the technology of machining parts with free form surfaces. In the previous period, emphasis was placed on the expansion of the previously developed system for automatic manufacturing technology design, for cases when it is not possible to machine the entire surface with a ball end mill where a pre-machining sequence is needed to obtain an approximate surface shape. The developed system is implemented in a software solution which generates NC code which is used for machining the parts. The experimental verification of the developed system was performed by machining at the machine center.*

Key words: *Free form surfaces, CAD/CAM systems, pre-machining, end mill cutter*



Hasan, M.S.¹⁾, Vorkapić, M.²⁾, Ivanov, T.¹⁾, Kovačević, A.¹⁾

PREDIKCIJA BRZINE NA 3D ŠTAMPAČU PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA³⁾

Rezime

Rezime: U ovom radu, izvršena je analiza i predikcija brzina štampe u eksploatacionim uslovima. Postoje odstupanja zadane brzine na štampaču od proračunate stvarne vrednosti. S tim u vezi, postoji i razlika u vremenima izrade. Ovde je posmatrana brzina kao ravnomerno pravolinijsko kretanja brizgaljke. Zato, VNM je poslužila za predikciju Vsr, sa promenom ulaznih parametara. Za rezultate predikcije brzine dobili smo zadovoljavajuću vrednost regresionog koeficijenta 0.9999 sa ukupnom MAPE greškom koja iznosi 1,84%. Mreža bi se mogla koristiti za obradu, predviđanje i optimizaciju prosečne brzine mlaznice i ostalih procesnih parametara.

Ključne reči: Aditivna proizvodnja, ABS, Brizgaljka, Brzina ispisa, Veštačke neuronske mreže

1. UVOD

Tehnologija aditivne proizvodnje se koristi kod maloserijske proizvodnje i najveću primenu ima u vazduhoplovnoj i automobilske industriji, kao i u medicini [1]. Razvoj velikoserijske i masovne proizvodnje zavisi od obima razvoja tehnologije aditivne proizvodnje [2]. Tehnologija omogućava brzu i ekonomičnu izradu elemenata i veoma je prilagodljiva novonastalim prilikama [3] Primenom aditivne tehnologije delovi se realizuju prema digitalnom prikazu i time su isključeni mašinska obrada, kovanje i livenje [4].

Aditivna proizvodnja (AP) predstavlja proizvodnju u kojoj se elementi/modeli izrađuju na principu dodavanja materijala po slojevima, na osnovu CAD datoteke [5]. Dakle, model predstavlja niz slojeva rastopljenog materijala koji se brzo hladi i očvršćava. AP se u mnogome razlikuje od uobičajenih metoda proizvodnje. Suštinske razlike se odnose na upotrebu materijala, ukupno vreme za obradu/izradu, potrošnju energije, kvalitet dobijenih površina, smanjenje fizičkog otpada, smanjenje upotrebe većeg broja alata i uticaj proizvodnje na životnu sredinu. AP se najviše koristi za proizvodnju prototipova, modela, komponenti i delova uz upotrebu različitih materijala: plastika, metal, keramika, staklo i kompozit [6].

Od termoplastičnih materijala najzastupljeniji su akrilonitril butadien stiro (ABS) i poliaktička kiselina (PLA). Odabir i poznavanje materijala je veoma bitan korak pre nego se krene u štampanje [7]. Pri tome, mehanička svojstva materijala su značajna i variraju, naročito kada se radi o štampi u x,y ili z pravcu.

U ovom radu za izradu modela korišćen je ABS materijal. To je netoksična plastika i ima primenu u industriji ambalaže [8], medicini i stomatologiji [9], automobilske i elektro industriji [10]. Takođe, ABS se primenjuje za injekciono livenje, kao i livenje u kalupu [11]. ABS postaje tečan na temperaturi od 210°C. Prirodno se hladi na sobnoj temperaturi. U ohlađenom stanju model ima temperaturnu otpornost do 110°C (<https://vexmatech.com/abs-material.html>).

2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA – 3D ŠTAMPA

Aditivna tehnologija, ili tehnologija 3D štampe, dozvoljava da se izvrše izmene na modelu. Sve izmene se realizuju pomoću nekog od CAD programa. CAD model na računaru kasnije se realizuje kao 3D objekat na štampaču [12]. Tehnologija 3D štampe uključuje topljenje termoplastičnog materijala kroz zagrejanu brizgaljku. Materijal ili čvrsti filament (1) preko zupčastih valjaka ubacuje se u vodiču (2) i prolazi kroz grejač

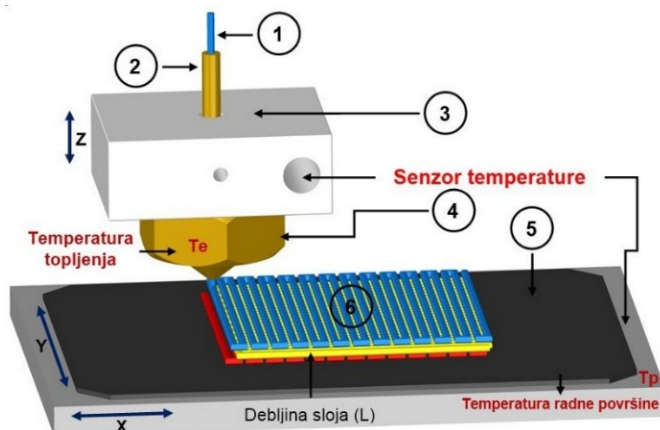
¹⁾ Mohammad Sakib Hasan, doktorand, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dr Toni Ivanov, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (tivanov@mas.bg.ac.rs),

Aleksandar Kovačević, doktorand, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (akovacevic@mas.bg.ac.rs),

²⁾ dr Miloš Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, NU IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, (worcky@nanosys.ihtm.bg.ac.rs);

³⁾ Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

(3), gde se topi na definisanoj temperaturi. Tako istopljeni materijal prolazi kroz brizgaljku (4) nakon čega izlazi i dodiruje radnu površinu (5). Formirane rastopljene niti se lepe za podlogu, a zatim se hlade i očvršćuju u vidu gotovog sloja u xy ravni (6), videti sliku 1. Prvi sloj je važan, zbog procesa hlađenja da ne bi došlo do deformacije modela.



Slika 1. Prikaz 3D štampe u izradi modela

Kada je formiran prvi sloj u xy ravni, brizgaljka se podiže u pravcu z ose prema zadatoj visini sloja (H) i počinje formiranje sledećeg sloja, definisane debljine (L), koji se stapa sa predhodnim i ciklus se ponavlja sve dok se ne dobije gotov model [13]. Definisani razmak između brizgaljke i podloge iznosi 0,1 mm. Ukoliko se razmak povećava rastopljeni materijal (filament) ne može da se lepi pravilno na podlogu štampača i takav deo vremenom postaje labav i lako se odvaja [14]. U slučaju zadavanja visokih temperatura može doći do rastapanja predhodno formiranog sloja što na kraju dovodi do netačnosti u dimenzijama realizovanog modela.

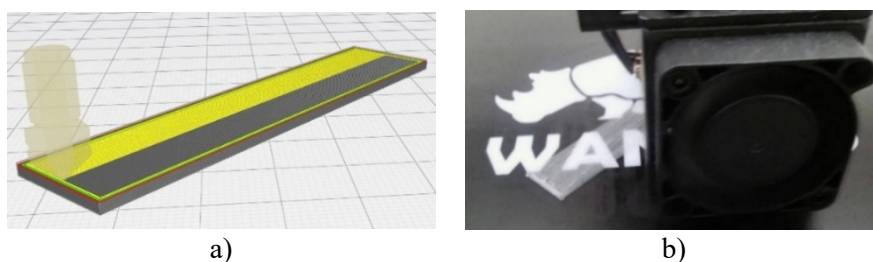
Prilikom formiranja slojeva veoma važnu ulogu igraju: temperatura topljenja (T_e) i temperatura radne površine (T_p). Najčešći problem pri 3D štampanju predstavlja začepljenje brizgaljke, a ono se javlja usled mešanja raznorodnih materijala i očvršćavanja materijala na zidove kanala i spoljne površine brizgaljke.

U našem slučaju, ABS omekšava na temperaturi od 200°C, zatim postaje tečan na temperaturi od 230°C i na kraju procesa se ohladi [15]. Ovde postoji rizik, da hlađenje po slojevima nije linearno, što na kraju daje nepravilan oblik i netačnu geometriju. Proces hlađenja treba da bude kontrolisan, tj. hlađenje da bude sporo i postepeno [16]. Da bi se pričvrstio prvi sloj i formirali naredni slojevi potrebno je da se obezbedi temperatura radne površine od 65°C do 80°C.

3. POSTUPAK IZRADE UZORKA

U ovom radu, realizovani je modeli dimenzija 80x14x2mm. Upotrebljen je ABS materijal i pri tome je izrađeno tri uzorka na osnovu zadatih parametara: debljina sloja 0,4 mm, orijentacija ispune [0/90], gustina ispune 100%, temperatura brizgaljke 234°C i temperatura radne površine 73°C. Svi uzorci izrađeni su na 3D štampaču WANHAO duplikator i3 plus. Za realizaciju modela podešeno je visina sloja 0,1mm, jer je dokazano da na ovoj visini ABS obezbeđuje dobru vezu među slojevima [17]. Prema Bose i dr. [18], za postizanje što bolje rezolucije na 3D štampačima, potreban je odabir parametara, pravilna orijentacija modela i kontrola štampe po slojevima.

Izgled radne površine grafičkog okruženja Ultimaker Cura, kao i relaizacoja modela na 3D štampaču, prikazano je na slici 2. Za realizaciju uzoraka upotrebljen je ABS material.



Slika 2. Postupak realizacije uzorka: a) virtuelni model, b) stvarni model

4. ODREĐIVANJE I PREDIKCIJA BRZINA KOD 3D ŠTAMPE

Veštačka neuronska mreža osmisljena je kao numerički model inspirisan modelom obrade informacija po principu rada ljudskog mozga. Vršiti se obrada velikog broja podataka koji koriste za učenje, memorisanje i generalizaciju. Svaka mreža sastoji se od velikog broja čvorova (ili nodus-a) koji sačinjavaju arhitekturu jedne mreže i čine osnovne procesne elemente koji su međusobno povezani nekom korelacijom. Inspiracija za postavku neuronskih mreža je ljudski mozak, a obrada informacija ide preko neurona.

Za neuronske mreže koristi se naziv „veštačke” (skraćeno VNM), a njeni gradivni elementi nazivaju se neuroni [19]. Svaki čvor je povezan sa drugim i sa samim sobom, a grupa čvorova sačinjava sloj. Glavni sloj je ulazni, a poslednji izlazni sloj. Između ulaznog i izlaznog sloja mogu biti postavljeni i dodatni slojevi, koji se nazivaju „skriveni”. Dakle, svaki neuron ima svoj težinski doprinos.

Prenos signala ulaza obavlja aktivaciona funkcija, a ona može da bude: step, rampa, uni/bipolarna sigmoidalna funkcija. Najčešće se primenjuje sigmoidalna funkcija. Za procenu performace mreže uglavnom se koristi procentualna greška, koja pokazuje razliku vrednosti eksperimentalno dobijenih i predviđenih na osnovu VNM modela. Poznato je da se srednja kvadratna greška smanjuje sa brojem ponovljenih obuka/treninga [20].

U ovom radu, vršena je analiza i predikcija brzina štampe u eksploatacionim uslovima. Primećeno je da postoje odstupanja zadate brzine na štampaču od proračunate stvarne vrednosti. S tim u vezi, postoji i razlika u vremenima izrade. Ovde je posmatrana brzina kao ravnomerno pravolinijsko kretanja brizgaljke pri ispisu ravne linije u jednom sloju. Vreme za realizaciju modela zavisi od složenosti modela i postavljenih parametara. Softversko određivanje vremena može da predstavlja prepreku u realizaciji modela jer ono zahteva više vremena u zavisnosti od primene [21].

Razmatrana su tri slučaja ispisa rastopljenog materijala na 0%,50% i 75% realizovanog modela. U tabeli 1, dati su ulazni parametri na osnovu koje je izvršena VNM analiza.

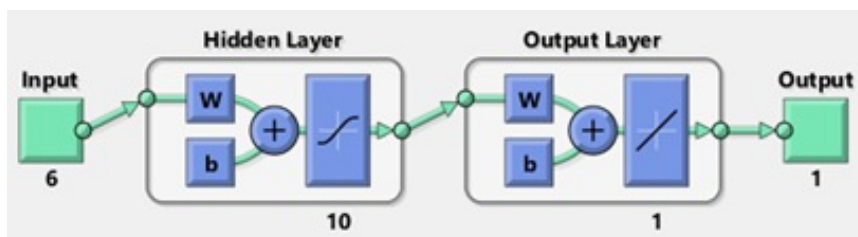
Tabela 1. Početni parametri za analizu

Uzorak	Brzina brizgaljke V_p [mm/s]	Brzina sistema V_t [mm/s]	Programirano vreme t_c [s]	Realno vreme t_r [s]
I	50	50	780	828
II	70	50	540	619
III	90	50	420	509

5. REZULTATI I DISKUSIJA ISTRAŽIVANJA

VNM model je izgrađen u cilju uspostavljanja korelacije između procesnih parametara i merene izlazne veličine. Ulazni parametri mreže su: V_p (brzina brizgaljke), V_t (brzina sistema), t_c (programirano vreme), t_r (ukupno vreme izrade modela), t (vreme ispisa jedne niti sloja), % (procentuana realizacija modela). Korišćen je međusloj, a kao izlaz posmatrana je srednja brzina kretanja brizgaljke (V_{sr}). VNM model je dizajniran korišćenjem softverskog paketa Matlab, Neural Network Toolbox-a i MPL (multi-layer perception) modela za predskazivanje [22]. MLP arhitektura je dizajnirana od ulaznog sloja, međusloja i izlaznog sloja.

Formirana VNM struktura sastoji se od 6 ulaznih nodusa (procesne: V_p , V_t , t_c , t_r , t , %) i jednog izlaznog V_{sr} . Međusloj se sastoji od 10 neurona i koristi hiperboličku sigmoidalnu funkciju transfera. Arhitektura mreže prikazana je na slici 4.



Slika 4. Arhitektura formirane mreže sa varijacijom neurona u međusloju

U tabeli 2, dat je prikaz pomenutih ulaznih veličina kao i izlazna veličina. Na osnovu srednjih greški, u ovom slučaju srednje kvadratne grške (MSE - Mean Squared Error) i determinističkog koeficijenta (R)

određena su odstupanja predikcije za setove podataka za trening, validaciju i testiranje, a to je prikazano u tabeli 3. Ukupna greška predikcije je urađena na osnovu odstupanja eksperimentalnih i predviđenih vrednosti za posmatrani izlaz (V_{sr}) preko srednje apsolutne procentualne greške (MAPE) Za naš postavljeni sistem ona iznosi 1.83%.

Tabela 2. Početni parametri za analizu

V_p	V_t	t_c	t_r	t	%	V_{sr}
50	50	780	828	3.15	0	0.508
50	50	780	828	3.13	0	0.511
50	50	780	828	3.15	0	0.508
50	50	780	828	3.14	0	0.51
50	50	780	828	3.12	0	0.5130
50	50	780	828	3.12	50	0.5130
50	50	780	828	3.08	50	0.5190
50	50	780	828	3.10	50	0.5160
50	50	780	828	3.09	50	0.5180
50	50	780	828	3.09	50	0.5180
50	50	780	828	3.09	75	0.5180
50	50	780	828	3.11	75	0.5140
50	50	780	828	3.10	75	0.5160
50	50	780	828	3.09	75	0.5180
50	50	780	828	3.07	75	0.5210
70	50	540	619	2.18	0	0.5242
70	50	540	619	2.08	0	0.5495
70	50	540	619	2.06	0	0.5548
70	50	540	619	2.08	0	0.5495
70	50	540	619	2.09	0	0.5468
70	50	540	619	2.12	50	0.5391
70	50	540	619	2.06	50	0.5548
70	50	540	619	2.19	50	0.5219
70	50	540	619	2.17	50	0.5267
70	50	540	619	2.09	50	0.5468
70	50	540	619	2.16	75	0.5291
70	50	540	619	2.20	75	0.5195
70	50	540	619	2.19	75	0.5219
70	50	540	619	2.18	75	0.5242
70	50	540	619	2.17	75	0.5267
90	50	420	510	1.70	0	0.5229
90	50	420	510	1.69	0	0.5260
90	50	420	510	1.67	0	0.5323
90	50	420	510	1.71	0	0.5198
90	50	420	510	1.71	0	0.5198
90	50	420	510	1.68	50	0.5291
90	50	420	510	1.65	50	0.5387
90	50	420	510	1.66	50	0.5355
90	50	420	510	1.71	50	0.5198
90	50	420	510	1.65	50	0.5387
90	50	420	510	1.71	75	0.5198
90	50	420	510	1.72	75	0.5168
90	50	420	510	1.70	75	0.5229
90	50	420	510	1.69	75	0.5260
90	50	420	510	1.74	75	0.5109

Performanse VNM sa različitim konfiguracijama i algoritmima treninga procenjuju se pomoću linearnog koeficijenta korelacije (R), srednje kvadratne greške (MSE). Regresioni koeficijent (R), predstavlja vezu između izlaza i cilja.

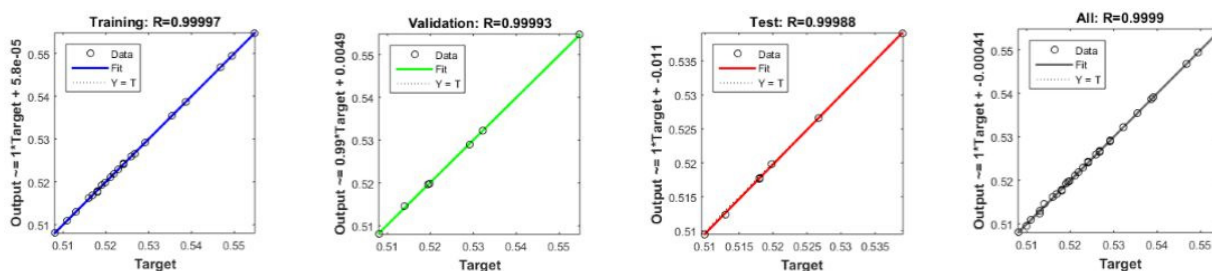
Vrednost 1 ukazuje na blisku korelaciju i idealno poklapanje, dok vrednost 0 ukazuje da nema korelacije ili je nasumično postavljena. Podaci su podeljeni u tri grupe, odnosno 70 % podataka je odabrano za učenje mreže (treniranje), 15% za validaciju i 15% za testiranje.

Tabela 3. MSE i R za setove podataka

Primer	MSE	R
Trening	9.06670e-9	9.99970e-1
Validacija	5.08361e-8	9.99925e-1
Testiranje	1.04785e-7	9.99884e-1

Gde su: N - ukupan broj experimentalnih podataka; Vsri - experimentalna izlazna promenljiva; Vsrpi - predviđena izlazna promenljiva; Vsr' - srednja vrednost predviđene promenljive izlaza. Regresioni koeficijent iznosi 0.9999, Na osnovu ovih vrednosti, zaključujemo da se VNM model može da se koristi za procenu izlaza (V_{sr}) sa varijacijom ulaznih varijabli.

VNM može da se koristi u izboru optimalnih procesnih parametara, predikciji nove vrednosti izlaza. Na osnovu naučenog ponašanja sistema iz prošlosti, možemo da generišemo nove vrednosti u budućnosti i time redukujemo broj eksperimenata. Na osnovu izloženog, VNM služi za predikciju Vsr, sa promenom ulaznih parametara. Rezultati eksperimenta i predikcije, sa greskom za svaki uzorak i ukupnom MAPE greskom koja iznosi 1,84%, dati su na slici 5.



Slika 4. Arhitektura formirane mreže sa varijacijom neurona u međusloju

6. ZAKLJUČAK

Sa aspekta produktivnosti proizvodnje i kvaliteta, aditivna proizvodnje ima dosta problema. Ona je fokusirana na pojedinačnu ili maloserijsku proizvodnju. Međutim, 3D tehnologijom moguće je: izvršiti brzu promenu na postojećem proizvodu, izvršiti eksperimente na postojećem dizajnu i omogućiti prilagođavanje organizacije konceptu brze izrade prototipova. U radu se pretpostavljalo da proces štampanja uzoraka ide savršeno, tj. bez ikakvih grešaka. Promena brzine brizgaljke ili greške u sistemima za pozicioniranje mogu da prouzrokuju anomalije na delovima/modelima. S obzirom da na većini 3D štampača nema informacije o radu sistema tokom eksploatacije, može se konstatovati da nije došlo do greške: element nije pomeren tokom procesa štampanja, nije došlo do promene temperature ili prvi sloj se nije pravilno prilepio na podlogu. To ispravljanje grešaka čini sistem veoma komplikovanim.

Zato primenom VNM dobili smo vrednosti regresionog koeficijenta koji ukazuje da je veza ulaznih podataka sa posmatranim izlazom zadovoljavajuća i dali mreža može da se koristi za obradu, predikciju i optimizaciju kako za srednju brzine brizgaljke tako i za ostale procesne promenljive. U daljem istraživanju, potrebno je da se formira novi paket podataka, iskoristiti razvijeni model, a zatim naknadno da se testira rad mreže sa novim veličinama. Greške predviđanja su male, ali model je odgovarajući za predikciju srednje (eksploatacione) brzine brizgaljke.

6. LITERATURA

- [1.] Lu, B., Li, D. Tian, X.: *Development trends in additive manufacturing and 3D printing*. Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 85-89, 2015.
- [2.] Hague, R., Campbell, I., Dickens, P.: *Implications on design of rapid manufacturing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 217, No. 1, pp. 25-30, 2003.
- [3.] Chen, R. K., Jin, Y. A., Wensman, J., Shih, A.: *Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses-a review*. Additive Manufacturing, Vol. 12, pp. 77-89, 2016.
- [4.] Shah, R. and Ward, P.T.: *Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance*. Journal of operations management, Vol. 21, No. 2, pp. 129-149, 2003.

- [5.] Sun, Z., Tan, X., Tor, S. B., Yeong, W. Y.: *Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates*. Materials and Design, Vol. 104, pp. 197-204, 2016.
- [6.] Lyons, B.: *Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook*. Bridge, Vol. 44, No. 3, pp. 13-19, 2014.
- [7.] Lanzetta, M. and Sachs, E.: *Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 157-166, 2003.
- [8.] Zelený, P., Šafka, J., Elkina, I.: *The mechanical characteristics of 3D printed parts according to the build orientation*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 474, pp. 381-386, 2014.
- [9.] Wong, J. Y.: *3D printing applications for space missions*. Aerospace medicine and human performance, Vol. 87, No. 6, pp. 580-582, 2016.
- [10.] Zhou, S., Zhang, S., Chen, Q.: *Vehicle ABS Equipped with an EMB System Based on the Slip Ratio Control*. Transactions of FAMENA, 43(SI-1), 1-12, 2019.
- [11.] Padzi, M. M., Bazin, M. M., Muhamad, W. M. W.: *Fatigue Characteristics of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*. Materials Science and Engineering Conference Series, Vol. 269, No. 1, pp. 012060, 2017.
- [12.] Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B.: *Could 3D printing change the world? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Atlantic Council, Washington DC 2011.
- [13.] Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., Li, D.: *Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Vol. 88, pp. 198-205, 2016.
- [14.] Rao, P. K., Liu, J. P., Roberson, D., Kong, Z. J., Williams, C.: *Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 137, No. 6, 2015.
- [15.] Shah, J., Snider, B., Clarke, T., Kozutsky, S., Lacki, M., Hosseini, A.: *Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 104, No. 9-12, pp. 3679-3693, 2019.
- [16.] Taj, S.: *Applying lean assessment tools in Chinese hi-tech industries*. Management Decision, Vol. 43, No. 4, pp. 628-643, 2005.
- [17.] Guessasma, S., Nouri, H., Roger, F.: *Microstructural and mechanical implications of microscaled assembly in droplet-based multi-material additive manufacturing*", Polymers, Vol. 9 No. 12, pp. 372, 2017.
- [18.] Bose, S., Vahabzadeh, S. and Bandyopadhyay, A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials today*, Vol. 16, No. 12, pp. 496-504, 2013.
- [19.] Tapia, G., Elwany, A. H., Sang, H.: *Prediction of porosity in metal-based additive manufacturing using spatial Gaussian process models*. Additive Manufacturing, Vol. 12, pp. 282-290, 2016.
- [20.] Mukherjee, T., Zhang, W., DebRoy, T.: *An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing*. Computational Materials Science, Vol 126, pp. 360-372, 2017.
- [21.] Brajlilh T, Valentan B, Balic J, Drstvenssek I.: *Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines*. Rapid Prototyp Journal, Vol. 17, No. 1, pp. 64-75, 2011.
- [22.] Wu, H., Yu, Z., Wang, Y.: *Experimental study of the process failure diagnosis in additive manufacturing based on acoustic emission*. Measurement, Vol. 136, pp. 445-453, 2019.

Mohammad Sakib Hasan, Miloš Vorkapić, Toni Ivanov, Aleksandar Simonović

SPEED PREDICTION ON 3D PRINTERS WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IMPLEMENTATION

Abstract: In this paper, an analysis and printing speed prediction in exploitation conditions performed. There are set speed deviations of the on the printer from the calculated actual value. In this regard, there is also a difference in manufacturing times. Here, speed viewed as a uniform perpendicular nozzle motion. Therefore, the VNM used the V_{sr} prediction, with the input parameters changing. For the speed prediction results, we received a satisfactory regression coefficient value of 0.9999 with a total MAPE error of 1.84%. The network could be use for processing, prediction and, nozzle average speed optimization and other process parameters

Key words: Additive manufacturing, ABS, Print speed, Artificial neural network



Kovačević A., Ivanov, T., Simonović, A.¹⁾, Vorkapić, M.²⁾

POVEĆANJE PRECIZNOSTI IZRADE 3D ŠTAMPANIH DELOVA PRIMENOM ITERATIVNE METODE³⁾

Rezime: *Veoma veliki porast upotrebe 3D štampe u poslednje dve decenije posledica je niza benefita koje ova proizvodna tehnologija nudi. U ovom radu analizirano je odstupanje geometrije štampanog modela u odnosu na CAD model. Izrada eksperimentalnog modela izvršena je metodom fuzionog taloženja filamenta (FDM) pri čemu je korišćen akrilonitril butadien stiro (ABS) materijal. Pokazano je kako se sa brojem iteracija odstupanje geometrije 3D štampanih modela u odnosu na CAD model smanjuje. U zaključku je dat pregled celokupnog procesa i preporuke u pogledu ograničenja upotrebe ove metode.*

Ključne reči: Preciznost izrade, Aditivna tehnologija, Iterativni proces, FDM metoda, ABS

1. UVOD

Pod pojmom Aditivna tehnologija podrazumevaju se sve tehnike koje na osnovu CAD (Computer Aided Design) modela sukcesivno slažući slojeve materijala kreiraju fizički model [1]. U odnosu na formativnu i substruktivnu, aditivna tehnologija koja se često naziva i 3D štampa, značajno se razlikuje upravo zbog principa po kom funkcioniše. Početak njenog razvoja datira još od 70-ih godina prošlog veka. Veliki doprinos u početnoj fazi razvoja ove tehnologije dao je Čarls Hal (Charles Hull) koji je 1984. godine patentirao metod za proizvodnju trodimenzionalnih objekata pomoću stereolitografije (SLA) [2]. Značajan iskorak u istom pravcu učinio je i Skot Kramp (Scott Crump) patentiranjem metode fuzionog taloženja filamenta (FDM) 1988. godine [3]. Osim prethodno dve navedene, danas u upotrebi postoje i sledeće tehnike 3D štampe: Vezivanje prskanjem (BJ), Usmereno taloženje energije (DED), Brizganje materijala u mlazu (MJ), Selektivno spajanje čestica praha (PBF) i Laminacija plastičnih slojeva (SL) [4]. Prednosti ove tehnologije u odnosu na sve druge su: mogućnost izrade delova veoma kompleksne geometrije, široka paleta materijala koji se primenjuju, minimalna količina otpadnog materijala, fleksibilnost prilikom dizajniranja određenih modela [5]. Zahvaljujući velikom razvoju u poslednjih deset godina, oprema za 3D štampu je postala relativno jeftina i lako dostupna što predstavlja veoma značajan benefit ove proizvodne tehnologije. S druge strane, jedan od glavnih nedostataka predstavljaju relativno loše mehaničke karakteristike 3D štampanih delova zbog anizotropnosti izazvane samim načinom njihovog formiranja [6]. Takođe, kvalitet izrade delova bilo kojom od prethodno navedenih metoda zavisi i od ambijentalnih uslova tokom procesa što predstavlja veliki problem kada je u pitanju serijska proizvodnja. Ipak, uprkos određenim nedostacima i ograničenjima u kvalitetu izrade, aditivna tehnologija našla je primenu u industriji, naročito u procesu izrade prototipskih modela i kalupa za izradu kompozitnih struktura. U medicini se primenjuje za izradu implanta. Kod sve tri prethodno navedene primene 3D štampe veoma je značajna preciznost izrade.

Do sada su rađene analize gde su ispitivani različiti uticaji na preciznost izrade. Na primer, u radu [7] upoređivana je preciznost izrade štampanog modela primenom tri metode aditivne tehnologije dok su u [8] predmet razmatranja bili parametri štampanja i orijentacija modela prilikom izrade FDM metodom. U [9] je razmatran uticaj prečnika brizgaljke, vrsta pomoćne strukture kao i orijentacija modela pri čemu je takođe korišćena FDM metoda. U ovom radu analizirano je povećanje preciznosti izrade 3D štampanih delova primenom iterativne metode. Eksperimentalni model izrađen je od akrilonitril butadien stiro (ABS) materijala primenom FDM metode. Provera dimenzija izvršena je kljunastim pomičnim merilom i

¹⁾ Aleksandar Kovačević, doktorand, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (akovacevic@mas.bg.ac.rs),

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

dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (asimonovic@mas.bg.ac.rs),

²⁾ dr Miloš Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, NU IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, (worcky@nanosys.ihtm.bg.ac.rs);

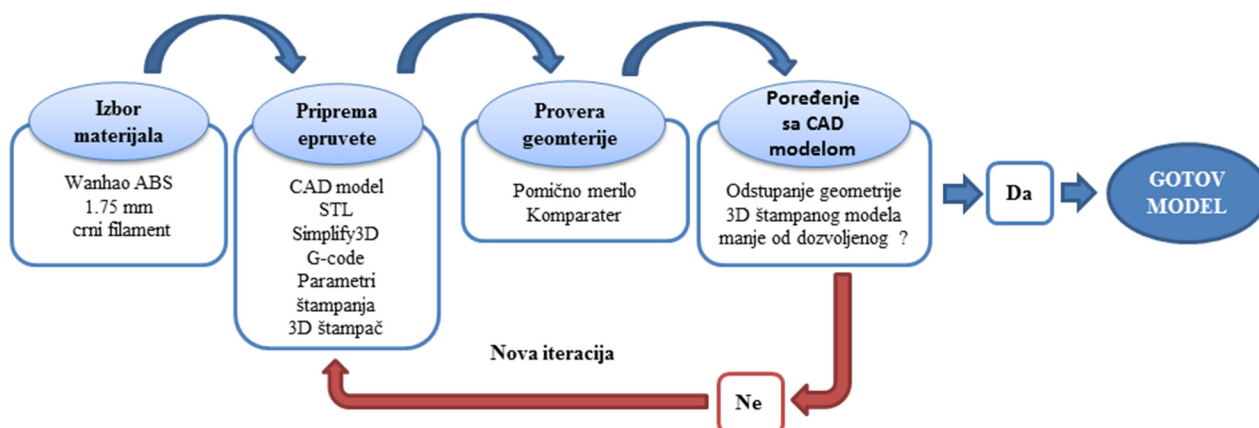
³⁾ Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

komparaterom u kombinaciji sa CNC ruterom. Geometrija epruvete u narednoj iteraciji formirana je na osnovu merenja prethodne pri čemu je izvršeno i poređenje izmerenih dimenzija sa CAD modelom epruvete.

Cilj ovog rada je da se prikaže jedan od načina povećanja preciznosti 3D štampe upotrebom FDM metode u uslovima koji ne zahtevaju skupu opremu. Ovo se posebno odnosi na izradu manjih kalupa za izradu kompozitnih struktura.

2. METODOLOGIJA

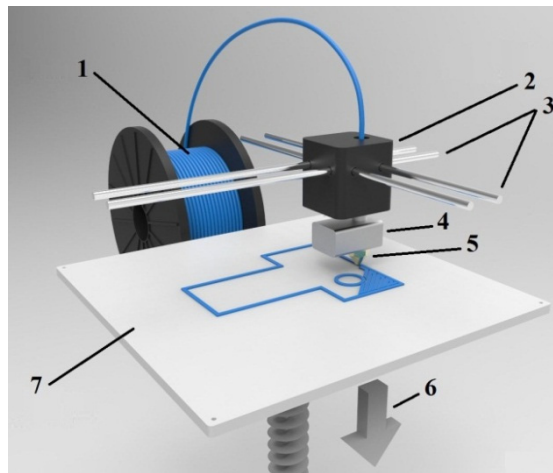
U ovom radu prikazan je način povećanja preciznosti izrade 3D štampanih delova pomoću iterativnog procesa. 3D štampani koji rade po principu FDM metode imaju relativno nisku cenu na tržištu i jednostavni su za korišćenje. To je učinilo da pored raznih vrsta industrije i određenih laboratorija nadju primenu u obrazovnim ustanovama, a neretko se nalaze i u posedu entuzijasta tj. u ličnoj upotrebi. Iz tog razloga je FDM metoda korišćena u ovom radu. Za izradu epruveta korišćen je akrilonitril butadien stiroil (ABS) materijal, koji je pored poliaktičke kiseline (PLA) najčešće korišćen materijal u okviru FDM tehnike 3D štampanja. Eksperimentalni postupak podeljen je u nekoliko etapa prikazanih na slici 1. Najpre je izvršen izbor materijala. Drugu etapu procesa predstavlja kreiranje CAD modela epruvete, definisanje parametara štampanja i pristupanje samom procesu njene izrade. Nakon štampanja epruvete u prvoj iteraciji, u trećoj etapi procesa izmerena je njena geometrija. Usledilo je poređenje sa CAD modelom. Dalje se tok eksperimeta može odvijati na dva načina. Ukoliko su odstupanja geometrije epruvete iz prve iteracije manja ili jednaka dozvoljenim, model se smatra gotovim i spremnim za dalju upotrebu u zavisnosti od namene. U drugom slučaju, ukoliko odstupanja prevazilaze maksimalnu dozvoljenu vrednost, proces se vraća na drugu etapu tj. kreiranje CAD modela prilikom čije izrade su uzeta u obzir geometrijska odstupanja epruvete iz prve iteracije. Iterativni postupak se nastavlja dok odštampani model ne zadovolji kriterijum maksimalnog dozvoljenog odstupanja.



Slika 1. Tok iterativnog procesa

2.1 FDM metoda i izbor materijala

Metod fuzionog taloženja filameta (FDM) zbog jednostavnosti sistema, načina korišćenja i relativno niske cene opreme na tržištu, najzastupljenija je tehnika izrade trodimenzionalnih modela kada je u pitanju aditivna tehnologija. Ova tehnika 3D štampe podrazumeva topljenje najčešće polimernog materijala i ređanje slojeva sve dok se ne dobije željeni model [10]. Osnovni delovi jednog 3D štampanja ove vrste prikazani su na slici 2 [10]. Postupak štampe se odvija tako što koračni motor koji se nalazi u glavi štampanja (2) povlači materijal (filament) sa kotura (1). Dalje se filament posle koračnog motora kreće kroz grejač (4) i izlazi kroz mlaznicu (5). Glava štampanja se kreće po vodičama (3) prateći zadatu putanju i ostavljajući na podlozi (7) filament iz mlaznice da se hladi formirajući tako sloj. Kada je sloj formiran, podloga se pomera za određenu vrednost u pravcu (6) nakon čega sledi formiranje sledećeg sloja. Standardni prečnici filameta su 1,75 mm i 3 mm, prečnik mlaznice kreće od 0,1 mm do 0,7 mm, a maksimalna temperatura grejača najčešće dostiže 280°C [11].



Slika 2. Princip izrade modela FDM metodom

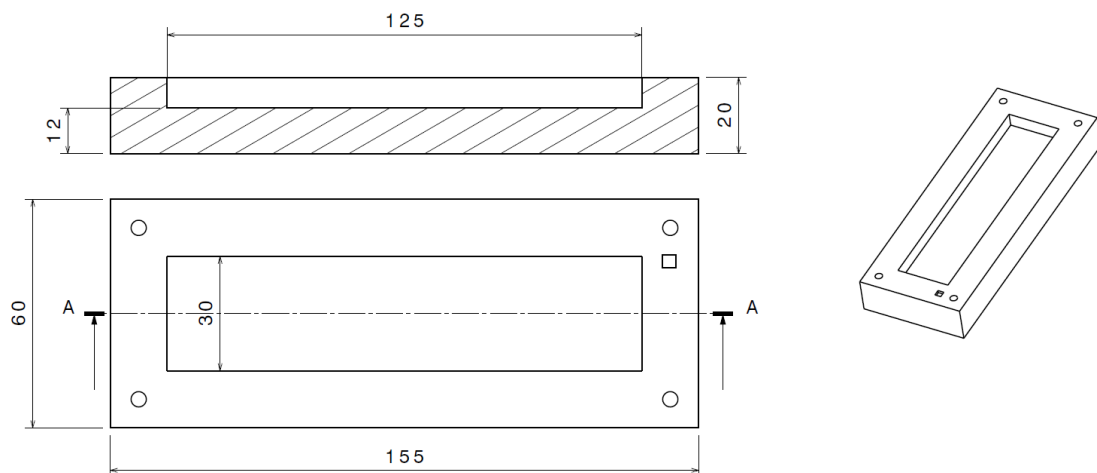
Prilikom izrade modela FDM metodom uglavnom se koriste polimerni materijali. Najčešće korišćeni polimerni materijali u ovom procesu su akrilonitril butadien stiroil (ABS) i poliaktička kiselina (PLA). Za ovaj eksperiment korišćen je ABS filament. Razlog za to je njegova veća otpornost na povišenim temperaturama. Delovi izrađeni od PLA filameta počinju se deformisati već na 60°C, dok u slučaju ABS materijala ta temperatura iznosi oko 100°C. Osnovne karakteristike ABS materijala date su u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike ABS materijala

Specifična težina (g/cm ³)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Temperatura štampanja (°C)	Temperatura ploče (°C)	Temperatura omekšavanja (°C)
1,04	42,18	230-240	90-100	~ 95

2.2 Postupak modeliranja i izrade epruvete

Obzirom da je cilj eksperimenta da se postigne što veća preciznost izrade kako bi se 3D štampa koristila u izradi kalupa za proizvodnju kompozitnih struktura tako je i oblik korišćene epruvete nestandardnog oblika. Naime, model epruvete predstavlja simulaciju određenog kalupa pravilne geometrija kako bi jednostavnije bilo izvršiti postupak merenja dimenzija. Prilikom modeliranja epruvete korišćen je programski paket CATIA. Nakon završenog CAD modela, potrebno je kreirati STL fajl koji je čitljiv u programu za pripremu 3D štampe. Na slici 3 prikazan je izgled modelirane epruvete.



Slika 3. Prikaz modela epruvete

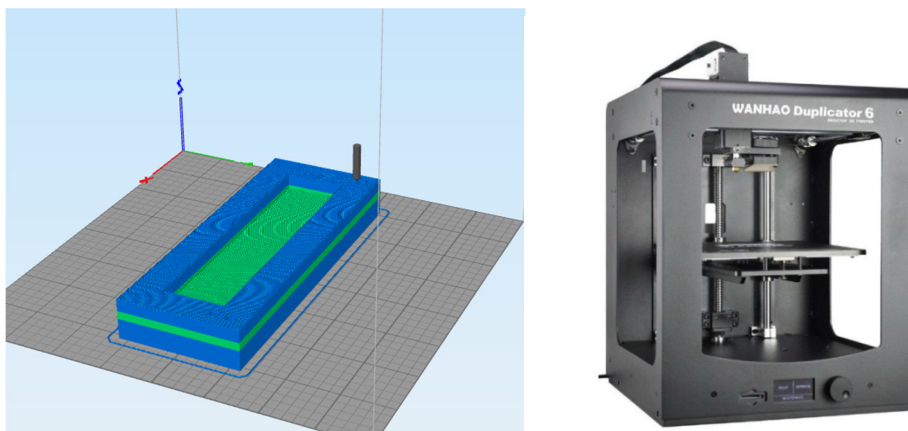
Postupak realizacije modela nastavljen je definisanjem parametara štampanja u programu Simplify3D. Parametri kao što su brzina štampanja, gustina ispune, orijentacija prilikom štampanja preuzeti su iz

dosadašnjih istraživanja na polju preciznosti izrade 3D štampanih delova [12] dok su temperatura štampanja i temperatura podloge uzete iz opsega vrednosti koje je preporučio proizvođač filameta. Parametri štampanja dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Parametri štampanja

Temperatura štampanja [°C]	Temperatura podloge [°C]	Ispuna [%]	Brzina štampanja [m/s]	Visina sloja [mm]
230	100	70	70	0,2 i 0,05

Prilikom izrade epruvete korišćene su dve visine sloja štampanja. Prvih 10 mm po visini štampano je sa visinom sloja 0,2 mm, a u zoni od 10 mm - 14 mm štampano je sa korakom 0,05 mm. Ovo je urađeno da bi unutrašnja površina modela koja predstavlja prostor za laminiranje određene kompozitne strukture bila što preciznije urađena. Na slici 4 [14] dat je prikaz pripreme modela u softverskom paketu Simplify3D kao i izgled 3D štampača WANHAO D6 koji je korišćen za izradu epruvete.



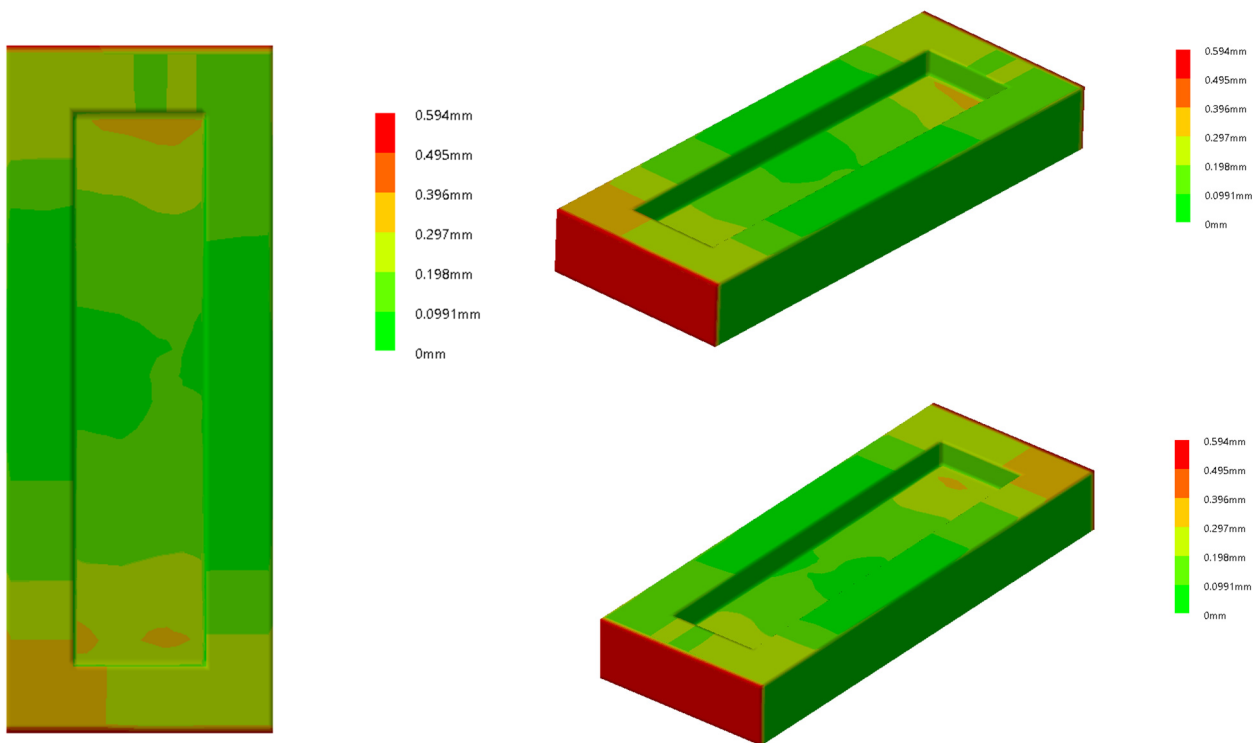
Slika 4. Prikaz pripreme modela u programu Simplify3D i izgled 3D štampača WANHAO D6

3. POSTUPAK MERENJA I ANALIZA REZULTATA

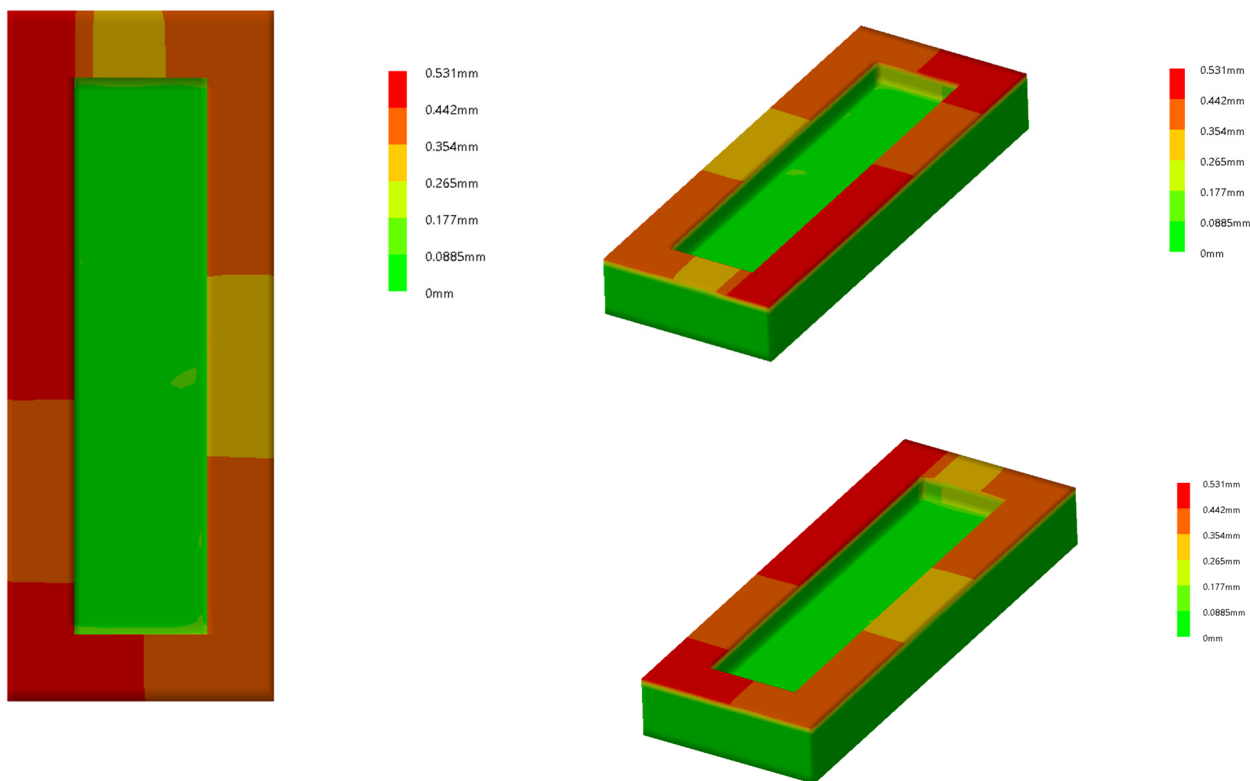
Geometrija epruvete merena je pomoću kljunastog pomičnog merila i komparatera. Oba merna instrumenta su preciznosti 0,01 mm. Merenje komparaterom obavljeno je uz pomoć CNC rutera. Unutrašnja površina epruvete podeljena je na 100 mernih tačaka. Ostatak modela izmeren je u 80 tačaka. Obzirom da model predstavlja simulaciju kalupa za izradu kompozitne strukture, njegove gabaritne dimenzije nisu uzimane u obzir kada je u pitanju kriterijum maksimalnog dozvoljenog odstupanja. Gabaritne dimenzije kraće strane modela izmerene su u 15 tačaka, dok je duža stranica izmerena u 3 tačke. Na slici 5 prikazan je komparater koji je montiran na CNC ruter.



Slika 5. Merenje epruvete komparaterom uz pomoć CNC mašine



Slika6. Odstupanja geometrije epruvete izrađene u prvoj iteraciji u odnosu na CAD model



Slika7. Odstupanja geometrije epruvete izrađene u drugoj iteraciji u odnosu na CAD model

Na slikama 6 i 7 prikazana su odstupanja geomtrije epruveta izrađenih u prvoj i drugoj iteraciji. Na slici 6 se može videti da geometrija epruvete izrađene u prvoj iteraciji ima znatna odstupanja na svojim krajevima, dok je u srednjem delu dosta približnija geometriji CAD modela. Odstupanja u unutrašnjem delu koji predstavlja simulaciju kalupa kreću se najviše do 0,39 mm. Slična je situacija i na gornjem obodu modela, dok se po

dužini javlja najveće odstupanje od skoro 0,6 mm. Posmatrajući model po širini u najvećem delu su odstupanja minimalna dok u zoni spajanja sa čeonim stranama modela blago povećavaju. Modifikacija na osnovu ovih podataka iz prvog koraka ovog procesa svodila se na prepravljajući geometrije unutrašnjeg dela. Dakle odstupanja gabaritnih dimenzija nisu uzimana u obzir u daljem procesu postizanja veće preciznosti izrade. Razlog tome je, kao što je ranije navedeno, eventualna namena izrađene epruvete kao kalupa za izradu određene kompozitne strukture pa samim tim određene mere nisu od velike važnosti.

Na slici 7 prikazana su odstupanja epruvete izrađene u drugoj iteraciji. Uočavamo da su odstupanja u unutrašnjem delu, koji je jedini modifikovani deo epruvete, značajno manja u odnosu na ona iz prve iteracije. Skoro cela unutrašnja površina je jarko zelene boje koja se na skali kreće u opsegu vrednosti 0-0,099 mm. Nešto veća neusklađenost odštampane geometrije javlja se na veoma maloj površini u srednjoj zoni unutrašnjeg dela kao i u donjem desnom delu posmatrajući projekciju odozgo na slici 7. Stanje na bočnim stranama unutrašnjeg segmenta je nešto lošije u pogledu preciznosti u odnosu na horizontalnu površinu. Ukupna širina i dužina imaju dosta dobro poklapanje sa CAD modelom. Ono što je jako uočljivo jeste gornja površina čija se odstupanja kreću u opsegu 0,265-0,531 mm koja su ujedno i najveća u drugoj iteraciji.

Generalno posmatrajući modele vidimo da maksimalna odstupanja epruvete iz druge iteracije nisu značajno smanjena u odnosu na onu iz prve. Međutim, modifikovanjem epruvete u onoj zoni koja je važna za njenu namenu možemo uvideti da su greške geometrije smanjene sa 0,39 mm na 0,11.

Obzirom da je samom metodologijom predviđeno da se postupak nastavlja do dobijanja željene preciznosti potrebno je prethodno definisati vrednost maksimalnog dozvoljenog odstupanja. Preciznost opreme za merenje, kao što je već navedeno, je 0,01 mm. Međutim, obzirom da je najmanji korak u procesu štampanja bio 0,05 mm to bi se mogla uzeti kao referentna vrednost. Evidentno je da ni u drugoj iteraciji ta preciznost nije zadovoljena određenim segmentima epruvete. Ipak, u zoni koja je od interesa za namenu odštampalog dela ostvareno je značajno poboljšanje samo u jednoj iteraciji. Ovo znači da bi već u sledećem koraku sva odstupanja na pomenutoj površini bila ispod maksimalne dozvoljene vrednosti. Iako to u ovom radu nije postignuto, dat je način kako se to može ostvariti a i prikazani rezultati govore o mogućnosti ostvarivanja određene preciznosti.

4. ZAKLJUČAK

Pojam izrade preciznosti delova uvek se povezuje sa skupom opremom. Svakako da ovakav stav ima opravdanje, no ipak zavisi dosta od tehnologije koja se koristi. Razvojem i upotrebom aditivne tehnologije znatno je smanjena cena opreme na tržištu. S druge strane se postavlja pitanje preciznosti izrade komponenti korišćenjem ove tehnologije. Upravo taj kompromis cene i određene preciznosti izrade bio je motiv i za pisanje ovog rada. Imajući u vidu da modeli izrađeni od polimernih materijala, naročito oni izrađeni FDM metodom 3D štampe, nemaju dovoljno dobre mehaničke karakteristike fokus je stavljen na mogućnost dobijanja što veće preciznosti. Danas postoje tendencije da ova tehnologija sve više učestvuje u izradi kalupa za kompozitne strukture. U ovom radu pažnja je posvećena istoj nameni.

Prikazana je mogućnost izrade kalupa relativno malih dimenzija, no s drug strane to je učinjeno korišćenjem opreme relativno niske cene koja je danas dostupna skoro svima. Dat je način za postizanje određene preciznosti. Metodologija podrazumeva da se to postiže iz nekoliko iteracija što je i pored viška materijala koji nastaje ipak ekonomski najpristupačniji način za kreiranje jednog kalupa kakav je prikazan u ovom radu. Razvoj aditivne tehnologije svakako se odvija brzo tako da postoji mogućnost za postizanje boljeg kompromisa cene opreme i kvaliteta proizvoda u budućnosti.

5. LITERATURA

- [1.] ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing - General principles – Terminology
- [2.] Hull, Charles W. "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography." *United States Patent, Appl., No. 638905, Filed* (1984).
- [3.] Crump, S. Scott. "Apparatus and method for creating three-dimensional objects." U.S. Patent No. 5,121,329. 9 Jun. 1992.
- [4.] Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.

- [5.] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- [6.] Ivanova O, Williams C, Campbell T. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyp J* 2013;19(5):353–64.
- [7.] Kim, T., Lee, S., Kim, G. B., Hong, D., Kwon, J., Park, J. W., & Kim, N. (2019). Accuracy of a simplified 3D-printed implant surgical guide. *The Journal of prosthetic dentistry*.
- [8.] Maurya, N. K., Rastogi, V., & Singh, P. (2019). Investigation of dimensional accuracy and international tolerance grades of 3D printed polycarbonate parts. *Materials Today: Proceedings*.
- [9.] Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain
- [10.] Lee, W. C., Wei, C. C., & Chung, S. C. (2014). Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2366-2374.
- [11.] Minetola, P., & Galati, M. (2018). A challenge for enhancing the dimensional accuracy of a low-cost 3D printer by means of self-replicated parts. *Additive Manufacturing*, 22, 256-264.
- [12.] Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.
- [13.] Additive Blog - 3D Printing and Design, Dostupno na: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>. Pristupljeno April 12, 2020.
- [14.] 3D Market, Dostupno na: <https://3dmarket.rs/shop/3d-stampaci/wanhao/wanhao-d6/>. Pristupljeno April 4, 2020.

Aleksandar Kovačević, Toni Ivanov, Aleksandar Simonović, Miloš Vorkapić

INCREASING GEOMETRY ACCURACY OF 3D PRINTED PARTS USING ITERATIVE METHOD

Abstract: Large increase in the use of 3D printing or rapid prototyping in the last two decades is due to the many benefits that this manufacturing technology offers. In this article geometry accuracy of 3D printed parts is analyzed. For printing of the analyzed model Fused Deposition Modeling (FDM) method was employed. ABS material was used to create the specimens. The measurement results have shown that the dimensional accuracy of printed parts increases with the number of iterations. The overview of analyze and some recommendations in the sense of limitation in the application of this method are given as a conclusion of this paper.

Key words: Accuracy of production, Additive technology, Iterative process, FDM, ABS



AUTOMATIZACIJA PROJEKTOVANJA PROIZVODA PRIMJENOM CAD PROGRAMSKIH SISTEMA NOVE GENERACIJE

Rezime

U ovom radu predstavljen je proces automatizacije projektovanja proizvoda u okviru savremenih CAD programskih sistema. U okviru pomenutih CAD sistema postoji nekoliko načina za realizaciju automatizacije projektovanja, dok je u ovom radu prezentovana metodologija bazirana na postojećem ugrađenom modulu i definisanju pravila i ograničenja za projektovanje na bazi formula. Antizvučni panel za industrijsku upotrebu iskorišćen je u svrhu prikaza mogućnosti i prednosti automatizacije projektovanja proizvoda. Vrijeme projektovanja ovog proizvoda (uključujući definisanje njegove tehničke dokumentacije) skraćeno je za 20 puta.

Ključne reči: CAD, automatizacija projektovanja proizvoda, antizvučni panel

1. UVOD

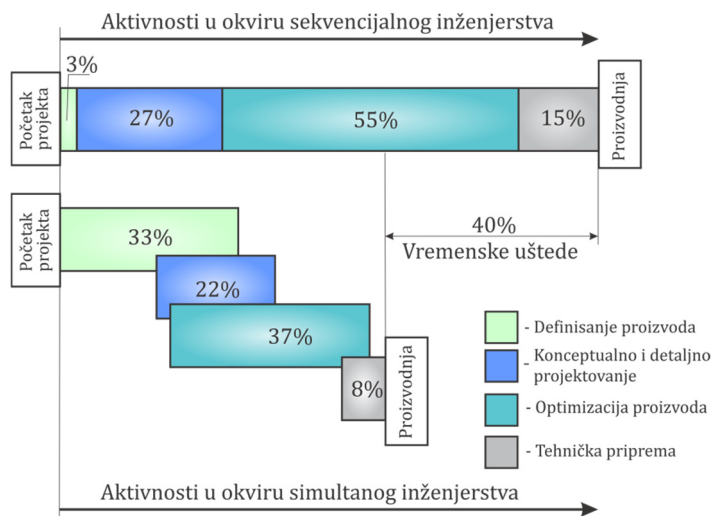
Projektovanje proizvoda danas se vrši primjenom namjenskih programskih sistema, kao što su *SolidWorks®*, *Creo®*, *SolidEdge®*, *Inventor®* i mnogi drugi. Cilj projektovanja proizvoda je generisanje virtuelnog modela proizvoda čiji je zadatak vjerna digitalna prezentacija stvarnog proizvoda [1]. Pored toga, model proizvoda se koristi u svrhu obezbjeđenja: širokog spektra analiza proizvoda, tehničke pripreme proizvodnje, pakovanja, marketinga, reciklaže i dr. Obezbediti prisustvo novog ili inoviranog proizvoda na tržištu u što kraćem vremenskom roku, danas je imperativ. Međutim, to zahtjeva da sve faze razvojnog ciklusa proizvoda budu što je moguće kraće. U tom pogledu, jedno od rješenja predstavlja i automatizacija projektovanja proizvoda.

2. RAZVOJ I PROJEKTOVANJE PROIZVODA

Poznato je da razvojni ciklus proizvoda obuhvata veliki broj aktivnosti, počevši od idejnog definisanja proizvoda, preko projektovanja proizvoda, tehnološke pripreme, proizvodnje, plasmana proizvoda na tržište, zrelosti razmjene proizvoda sa tržištem, pa sve do uklanjanja proizvoda sa tržišta. Savremena tržišna pravila nalažu da sve ove aktivnosti traju što je moguće kraće uz postizanje svih zadatih zahtjeva po pitanju kvaliteta, količina i efektivnosti proizvoda i proizvodnje [2]. Ukoliko se fokusiramo na aktivnosti razvoja i projektovanja proizvoda, one su se tokom vremena značajno mijenjale, kako po metodama tako i prema pristupima. Razvoj proizvoda se u početku industrijske revolucije odvijao bez sistemskih pravila, isključivo na bazi inovativnosti individualaca. Industrijalizacija je donijela sistematizaciju razvoja proizvoda i njegovo izvršavanje na manuelni način (bez korišćenja računara). U računarskom dobu ovaj proces se digitalizovao i kontinualno unaprjeđivao. U tom smislu važno je pomenuti dva pristupa: redosljedno (sekvencijalno) i simultano (konkurentno) inženjerstvo. Redosljedno inženjerstvo predstavlja pristup kod koga se razvoj proizvoda, projektovanje proizvoda i proizvodnih procesa, marketinga, aktivnosti izrade prototipa i količinske proizvodnje vrše na redosljedni način, odnosno jedna za drugom. Tokom realizacije razvojnog ciklusa proizvoda primjenom ovog pristupa ne omogućava se timski rad, nego se razvojne aktivnosti, koje se vrše po izolovanim odjeljenjima, prebacuju „preko zida“ u naredno odjeljenje. S druge strane, uvođenje paralelnog koncepta pri realizaciji aktivnosti razvojnog ciklusa proizvoda i timskog rada, rezultovalo je novim inženjerskim pristupom koji se naziva simultano ili konkurentno inženjerstvo. Osnovna prednost primjene simultanog inženjerstva, u svim fazama i aktivnostima razvojnog ciklusa proizvoda je skraćenje vremena

¹⁾ Doc. dr Branislav Srdanović, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (branislav.sredanovic@unibl.mf.org), prof.dr Stevo Borojević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (stevo.borojevic@unibl.mf.org), prof.dr Đorđe Čiča, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (djordje.cica@unibl.mf.org), Ma Saša Tešić, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (sasa.tesic@unibl.mf.org)

potrebnog za realizaciju pomenutih aktivnosti. Ključni efekti simultanog inženjerstva, u odnosu na redosljedno, javljaju se u vremenskim uštedama, koje su prikazane na slici 1 [3].

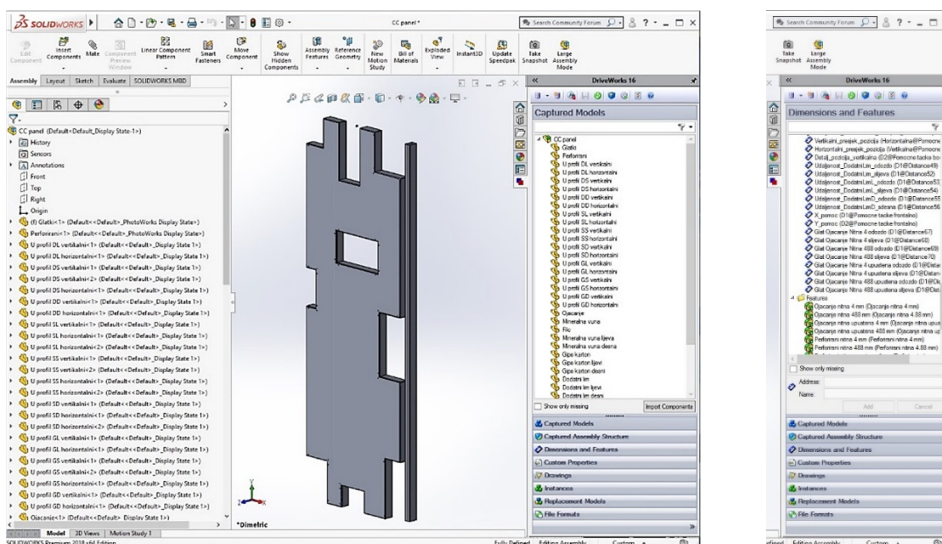


Slika 1 Vremenske uštede u funkciji inženjerskog pristupa za projektovanje

3. AUTOMATIZACIJA PROJEKTOVANJA ANTIZVUČNOG PANELA

U okviru ovog rada izvršen je opis i rezultati automatizacije projektovanja antizvučnog panela u okviru modula *DriveWorks 16*® [4] programskog sistema *SolidWorks 2018*®. Zahtjev od strane preduzeća Limex d.o.o. Petrovo odnosio se na ubrzanje procesa projektovanja tipskih proizvoda u vidu antizvučnih panela. Antizvučni paneli se karakterišu kompleksnom varijantnosti, širokim dijapazonom dimenzija i isključivo se izrađuju prema zahtjevima kupaca.

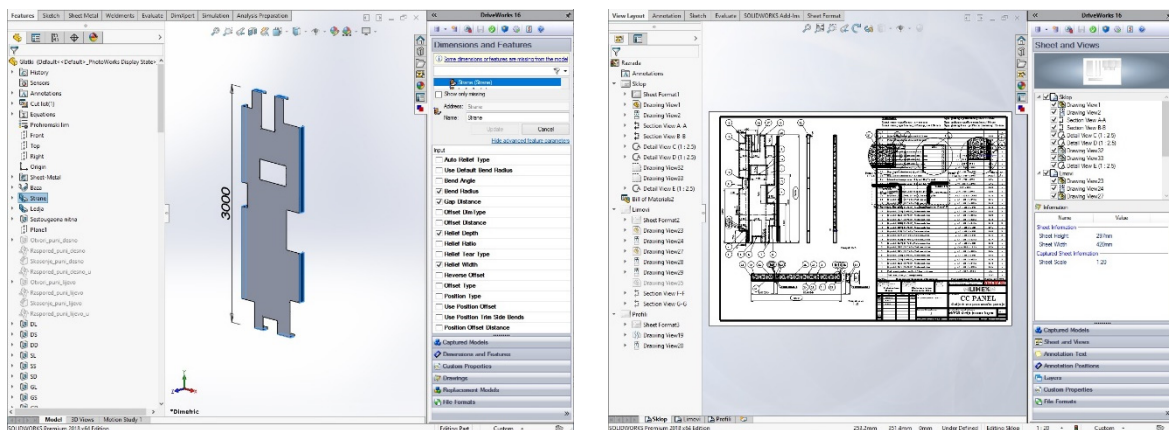
Prva faza u proceduri automatizacije se sastojala u kreiranju CAD modela kompleksnog proizvoda i prateće tehničke i proizvodne dokumentacije. Pri tome su u obzir uzete sve varijante proizvoda, a u ovom slučaju sve varijante dijelova i sve varijante sklopa antizvučnog panela. Na slici 2 je prikazan CAD model kompleksnog proizvoda, gdje su u okviru integrisanog *DriveWorks* modula selektovani CAD modeli dijelova u sklopu, čijim se svojstvima želi upravljati u procesu automatizacije.



Slika 2 CAD model kompleksnog proizvoda antizvučni panel (lijevo) i baza njegovih upravljivih svojstava (desno)

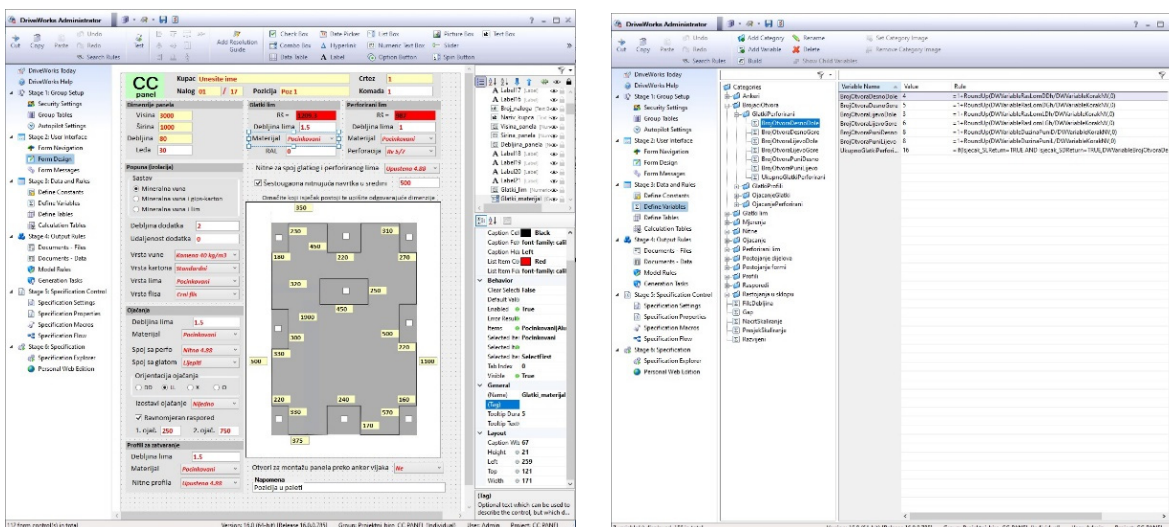
Korisniku se, pored mogućnosti upravljanja sastavom sklopa, nudi i mogućnost upravljanja ostalim svojstvima CAD modela sklopa. Izbor pomenutih svojstava sklopa, a u svrhu upravljanja, izvršena je njihovom jednostavnom selekcijom u strukturnom stablu sklopa ili radnom prostoru sklopa, čime je stvorena baza upravljivih parametara CAD modela, koja će se kasnije iskoristiti u *DriveWorks-u*. Na CAD modelu kompleksnog proizvoda antizvučni panel, odabrane su dimenzije i relacije između dijelova u sklopu kojima je

definisani njihov međusobni položaj i orijentacija u sklopu. Takođe, selektovani su parametri umnožavanja po rasporedu istih dijelova u sklopu. Unutar CAD modela, svakoj dimenziji ili svojstvu je dodijeljeno jedinstveno ime, što je čini jedinstvenom varijablom. Ova činjenica je upravo iskorišćena i u modulu *DriveWorks*, gdje se elementu može dodijeliti odgovarajuće imena, kao i detaljniji opisa. Nakon kreiranja baze upravljivih parametara sklopa, pristupa se kreiranju iste baze za pojedinačne dijelove sklopa. Shodno prethodnom, na svakom pojedinačnom CAD modelu dijelova su izabrani elementi modela kojima se želi upravljati (slika 3). Na primjer, na CAD modelu su izabrani geometrijske forme (fičeri) koji će se kasnije po potrebi brisati, te su izabrane promjenjive dimenzije i relacije. Selekcijom fičera iz grupe *SheetMetal*, u *DriveWorks* izdvojeni su specijalni parametri vezani za proces obrade deformisanja lima, kao što su k - faktor, radijus savijanja, ugao savijanja, vrijednosti zazora, i sl. Priprema baze upravljivih parametara tehničke i tehnološke dokumentacije je zahtijevalo njenu detaljnu i potpunu razradu, te izdvajanje elemenata (slika 3). Sastavnica sklopa je automatski kreirana. Upravljanje pogledima, presjecima, detaljima, oznakama pozicija, dimenzijama je vršena automatskim brisanjem viškova elemenata sa crteža. Sastavnica sklopa se automatski ažurira nakon rekonstrukcije CAD modela sklopa, dok se vrijednosti dimenzija automatski preuzimaju sa CAD modela.



Slika 3 CAD model dijela u sklopu (lijevo), tehnička dokumentacija (desno)

U drugoj fazi automatizacije projektovanja antizvučnog panela korišćena je aplikacija *DriveWorks Administrator* [4]. Na slici 4 je prikazan razvoj korisničkog okruženja sa osnovnom formom, odgovarajućim brojem tekstualnih i broječnih polja, opcionih lista i padajućih lista, čijim se osobinama može upravljati (slika 4 lijevo) [5]. Svakom elementu forme odnosno broječnoj, tekstualnoj ili logičkoj ulaznoj varijabli je dodijeljeno jedinstveno ime. Nadalje, kreirana je baza opštih varijabli koji se odnose na tehnološke i geometrijske veličine (slika 4 desno).



Slika 4 Razvoj korisničkog okruženja i baza opštih varijabli

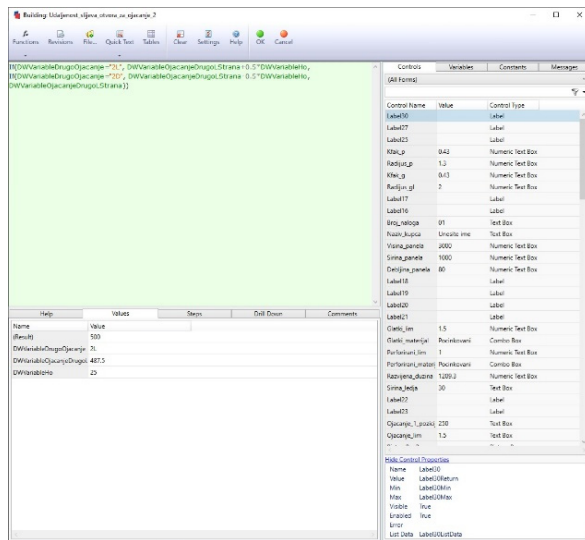
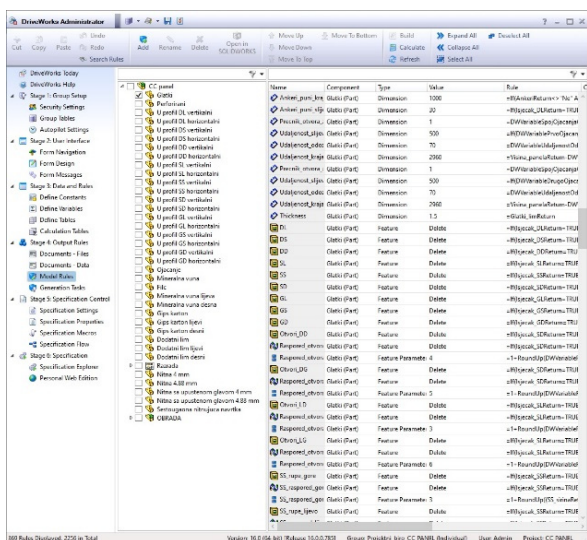
Na slici 5, prikazana je baza upravljivih parametara za dio koji nosi naziv Glatki lim, čije se izrazi kreiraju u posebnom dijaloškom prozoru. Kao elementi logičkih i matematičkih izraza za vrijednosti promjenjivih

parametara CAD modela, korišćene su vrijednosti koje se unose preko korisničke forme i vrijednosti ranije kreiranih opštih varijabli. Sintaksa pisanja pomenutih izraza je slična sintaksi *Microsoft Excel*-a [6].. U svakom slučaju, potrebno je napredno znanje u programiranju i korišćenju algoritama i matematičko-logičkih izraza. Potrebna je vještina u zapisu vrlo složenih izraza, kao što je sljedeći primjer koji se odnosi na *k*-faktor čija vrijednost zavisi od vrste materijala i debljine lima:

```

If(DWVariableRg>=3*Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Pocinkovani", 0,5, If(DWVariableRg>= 3*Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Aluminijumski", 0,5, If(DWVariableRg>=3*Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Alucink", 0,5, If(DWVariableRg>=Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Prohromski", 0,5, If(DWVariableRg>=Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Pocinkovani", 0,43, If(DWVariableRg>=Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Aluminijumski", 0,40, If(DWVariableRg>=Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Alucink", 0,43, If(DWVariableRg>=Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Prohromski", 0,45, If(DWVariableRg< Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Pocinkovani",0,38, If(DWVariableRg< Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Aluminijumski", 0,33, If(DWVariableRg<Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Alucink", 0,38, If(DWVariableRg<Glatki_limReturn AND Glatki_materijalReturn="Prohromski",0,40,0,43))))))))))

```

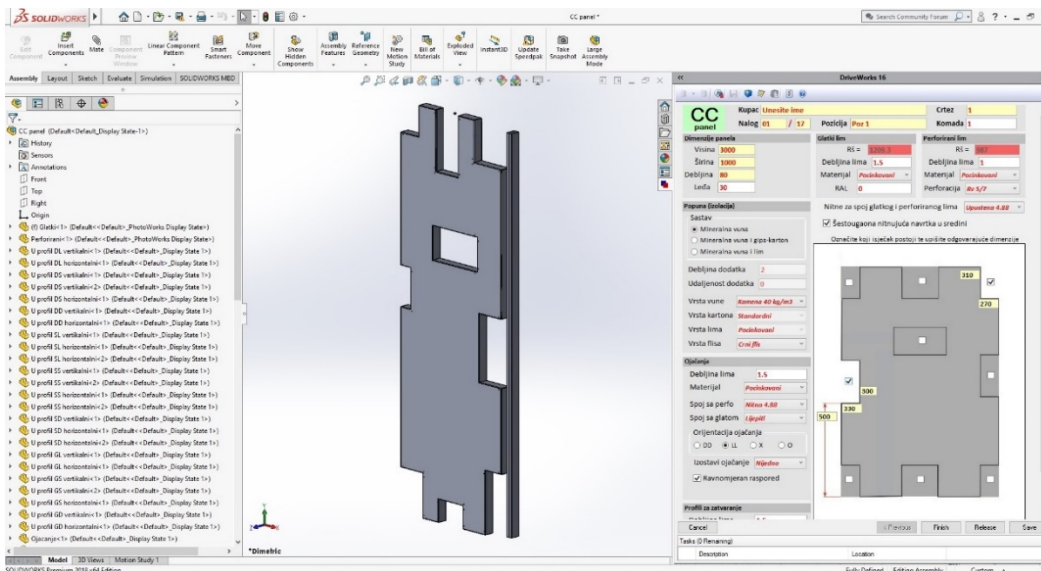


Slika 5 Baza izraza upravljivih parametara CAD modela i njihov oblik

4. ANALIZA, PRIMJENA I VERIFIKACIJA RAZVIJENOG RJEŠENJA

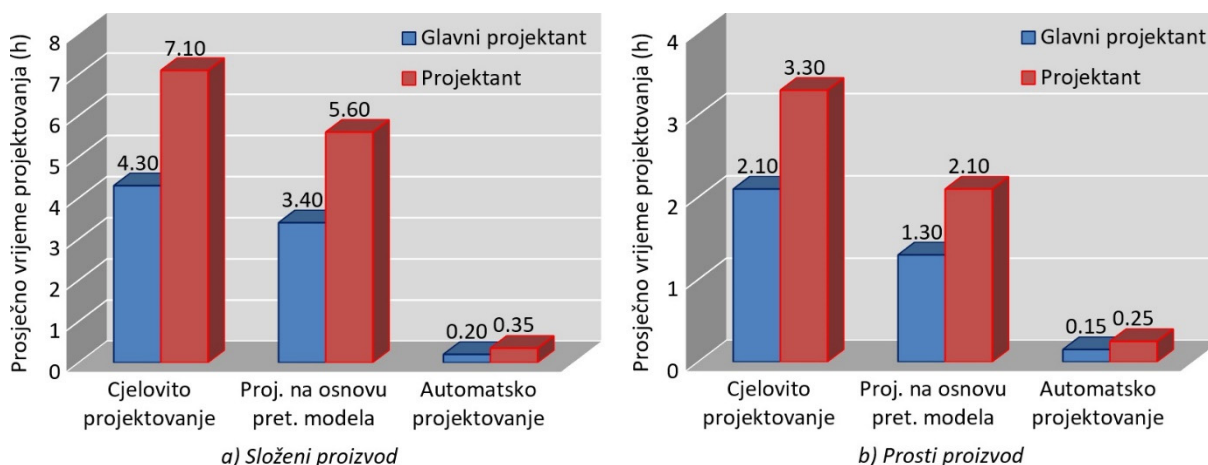
Razvoj okruženja za automatsko projektovanje je rezultovao unosom oko 2200 manje ili više složenih matematičko-logičkih izraza u kombinaciji sa moguće upravljivim parametrima na CAD modelima [3].. Unesen izrazi su objedinili inženjersko znanje o projektovanju antizvučnih panela. Stvoreno je okruženje koje omogućuje automatsko projektovanje više od preko veliki broj različitih tipova antizvučnog panela, promjenjivog oblika i dimenzija u zavisnošću od potreba kupca (slika 6). Korisničko okruženje je pregledno i intuitivno kreirano, sa dinamičkim ponašanjem elemenata na korisničkoj formi, čime se mogućnost greške prilikom izbora ili unosa veličina svelo na minimum. Korisnici se, jednostavnim unosom karakterističnih dimenzija, izborom materijala i standardni dijelova, kao i dodatnih podataka, rješavaju mukotrpnog rada detaljnog projektovanja koje je uvijek podloga za mnoge greške. Sam sistem razvijen u *DriveWorks*-u je postavljen na server računar, sa kojeg korisnici povlače model. Mogućnost naknadnih promjena baznih modela i izraza, kao i mogućnost nivoa korišćenja je hijerarhijski uspostavljena kroz samu aplikaciju *DriveWorks*.

U svrhu analize valjanosti i efekata primjene sistema za automatsko projektovanje antizvučnih panela, izvršena je analiza efikasnosti projektovanja u projektnom birou preduzeća Limex d.o.o. Proizvodi su podijeljeni u dvije grupe: prosti i složeni. Projektanti su podijeljeni u dvije grupe, i to: projektant i glavni projektant. Glavni projektanti su projektanti sa višegodišnjim iskustvom i visokim tehničkim obrazovanjem, dok su projektanti osobe sa manje iskustva. Analizirane su tri metode projektovanja, i to: cjelovito projektovanje, projektovanje na osnovu prethodnog modela, te automatsko projektovanje pomoću razvijenog sistema. Cjelovito projektovanje je predstavljalo projektovanje antizvučnih panela od početka, dok je projektovanje na osnovu prethodnog modela, je rad sa kopiranjem, migracijom i prepravkom sličnih CAD modela. Ukupno vrijeme praćenja procesa u projektnom birou i proizvodnji je bio jedan mjesec. Analiza je obuhvatila vrijeme projektovanja proizvoda od primanja zahtjeva do prosljeđivanja dokumentacije u proizvodnju, te broj projektantskih grešaka uslijed pogrešne ili nepotpune informacije, a koja je remetila proizvodni ciklus odgađanjem izrade za više od jednog sata.



Slika 6 Razvijeno korisničko okruženje za automatsko projektovanje antizvučnih panela

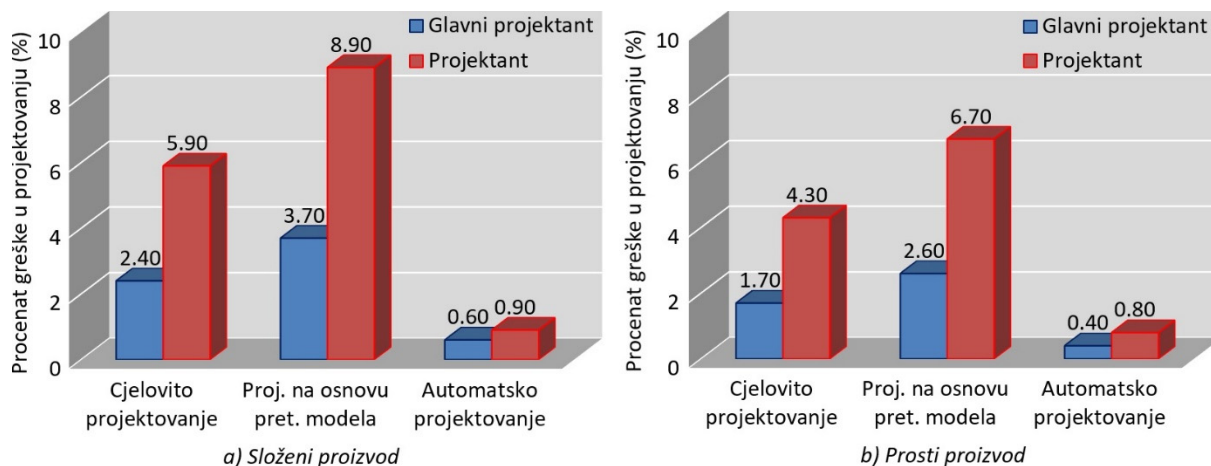
Na slici 7 su prikazan odnos prosječnog vremena projektovanja za glavne projektante i projektante u zavisnosti od metode projektovanja i složenosti proizvoda. U svakom slučaju, glavni projektanti su relativno brže završavali proces projektovanja u odnosu na projektante, pogotovo kada se radilo o složenim antizvučnim panelima. Za obe grupe projektanata najveće prosječno vrijeme je utrošeno na cjelovito projektovanje proizvoda. Razlozi za to su jasni, na strani glavnih projektanata je iskustvo, pogotovo kada se radi o složenim proizvodima. Razlike između projektanata su značajne i prilikom korišćenja metode projektovanja na osnovu prethodnog modela. U slučaju korišćenja sistema za automatsko projektovanje, razlike između grupa projektanata su male. Mjerenje i poređenjem došlo se do zaključka da se korišćenjem sistema automatskog projektovanja vrijeme projektovanja ne razlikuje značajno u zavisnosti od složenosti proizvoda i hijerarhije projektanata. Razlog tome je informatička podloga, jednostavno i intuitivno korisničko okruženje i jedinstveno formalizovano ekspertsko znanje u ugrađeno sistem, što projektante lišava mukotrpnog detaljnog projektovanja u svim fazama. Vrijeme projektovanja u odnosu na cjelovito projektovanje je skraćeno za 20 puta, dok je u odnosu na projektovanje na osnovu prethodnog modela skraćeno za 15 puta.



Slika 7 Poređenje prosječnog vremena projektovanja

Odnos procenta greške za različite grupe projektanata, metode i složenosti proizvoda prikazano je na slici 8. Jasno se vidi da su glavni projektanti, zbog stečenog iskustva, pravili manje grešaka u odnosu na projektante. Ovo je slučaj prilikom projektovanja i prostih i složenih proizvoda. Svi projektanti su najveći broj grešaka pravili prilikom korišćenja metode projektovanja na osnovu prethodnog modela. Posmatranjem i analizom se došlo do zaključka da su greške u projektovanju na osnovu prethodnog modela većinom tehnološke prirode, iz razloga što projektanti nisu obraćali pažnju na faktore vezane za proces deformisanja lima i sl. Greške u pogledu geometrije su generalno bile manje. Iz tog razloga izuzetno veliki procenat greške se javio kod

projektanata prilikom korišćenja metode projektovanja na osnovu prethodnog modela u slučaju modelovanja složenih proizvoda. Analiza procenta grešaka je pokazala da je sistem za automatsko projektovanje antizvučnih panela svodi grešku projektovanja ispod 1%. Isti rezultati su dobijeni bez obzira na složenost proizvoda i iskustvo projektanta.



Slika 8 Poređenje procenta greške u projektovanju

Cjelokupna prethodna analiza je pokazala da se korišćenjem sistema za automatsko projektovanje antizvučnih panela vrijeme projektovanja značajno smanjilo. Jako je bitna činjenica da su greške projektovanja svedene na minimum. Ukoliko su se javile greške, odnosile su se na nesmotren odabir na opcija ili unos na korisničkoj formi, koji je vršen na osnovu zahtjeva kupca. Svakako, bitno je napomenuti da vrijeme automatskog projektovanja ipak zavisi od performansi radnih stanica u projektnom birou.

5. ZAKLJUČAK

Automatizacija procesa projektovanja nema alternativu u smislu razvoja industrije, a kroz objedinjavanje, formalizovanje i informatičku obradu ekspertnog znanja. Razvoj sistema za automatsko projektovanje, prikazan u ovom radu, se odvijao u dvije faze: stvaranju baze promjenjivih parametara odnosno varijabli, te njihovom matematičko-logičkom opisivanju odnosno stvaranju izraza zavisnih od podataka sa korisničke forme. Sistemom je obuhvaćen veliki broj varijanti proizvoda, sa promjenjivim sastavom, geometrijom, materijalima i tehnološkim osobinama. Složenost sistema se ogleda u velikom broju od preko 2200 ugrađenih matematičko-logičkih izraza, vezanih za dimenzije, tehnološke osobine i ostale podatke. Korisnička forma je dinamična, što svodi grešku projektovanja na minimum. Glavne prednosti upotrebe sistema za automatsko projektovanje je ušteda vremena projekta od skoro 20 puta, te jednako bitno, u svodenju greške projektovanja na minimum, i to ispod 1%. Korišćenje ove metode projektovanja i sistema sličnih ovom može biti šansa za rješenje prisutnih problema u projektnim biroima širom regiona, kao što su nedostatak školovane, kvalitetne i iskusne radne snage. U pogledu budućih aktivnosti, nastaviće se realizacija automatskog projektovanja za ostale proizvode iz proizvodnog procesa preduzeća. Krajnji cilj je uspostaviti automatizaciju osnovnih proizvoda iz palete preduzeća, čime bi se ostavilo više mjesta za rad na projektovanju i proizvodnji specijalnih proizvoda.

10. LITERATURA

- [1] Jokanović, S., Čiča, Đ.: *CAD/CAM sistemi*, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, Banjaluka, 2018.
- [2] Borojević, S.: *Simultano projektovanje proizvoda i tehnoloških procesa*, Monografija, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, 2019.
- [3] Hirz, M.: *CAX in automotive and engine technology*, Graz University of Technology, Graz, 2011.
- [4] DriveWorks Ltd, Laskey Lane, Thelwall, Cheshire, WA4 2TF, UK <https://www.driveworks.co.uk/>.
- [5] DriveWorks Ltd. "MOBILE GANTRY TUTORIAL: An Introduction to DriveWorksXpress", Tutorial, 2015.
- [6] DriveWorks Ltd, "DriveWorksXpress Tutorial - Rules Based Design Automation", Cheshire, UK, 2007.

Sredanović, B., Borojević, S., Čiča, Đ., Tešić, S.

PRODUCT DESIGN AUTOMATION WITH IMPLEMENTATION OF NEW GENERATION OF CAD PROGRAM SYSTEMS

Abstract: *This paper presents the process of automation of product design within modern CAD software systems. Within the mentioned CAD systems, there are several ways to implement design automation, while this paper presents a methodology based on the existing embedded module with defining rules and constraints for design, based on formulas. The anti-sound panel for industrial use was used to show the possibilities and advantages of product design automation. The design time of this product (including the definition of its technical documentation) has been shortened by 20 times.*

Key words: *CAD, product design automation, anti-sound panel*



ODREĐIVANJE MODIFIKOVANOG PROFILA BRZINE POMOĆU PRORAČUNA OPSTRUJAVANJA I VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA²⁾

Rezime

Efikasno iskorišćenje energije vetra (kao jednog od najzastupljenijih obnovljivih izvora energije) je danas veoma aktuelna tema. Mnogo se radi na poboljšanju aerodinamičkih performansi vetroturbin u urbanim sredinama gde je raspoloživi prostor ograničen i postoji mnogo okolnih objekata koji mogu lokalno da unaprede ili unazade nadolazeći profil brzine. Iz tog razloga, često se postavljaju pomoćne geometrije (koncentratori) koje treba da usmere ili povećaju brzinu kroz rotor. Rad prikazuje olakšano određivanje takvog modifikovanog (ubrzanog) profila brzine pomoću sprege numeričkih simulacija opstrujavanja koncentratora i veštačkih neuronskih mreža. Geometrija koncentratora je parametrizovana da bi se postiglo najveće moguće ubrzanje za uslove na određenoj lokaciji.

Ključne reči: koncentrator, povećanje brzine, proračunska aerodinamika, veštačke neuronske mreže

1. UVOD

Kao odgovor na sve veće energetske potrebe, broj instalisanih vetroturbin širom sveta stalno se povećava. Internacionalna agencija za obnovljive izvore energije (International Renewable Energy Agency, IRENA) beleži da je 2018. godine dostignut ukupni energetski prinos vetrogeneratora od približno 564 GW [1]. Tako je efikasno iskorišćenje energije vetra, kao jednog od najzastupljenijih obnovljivih izvora energije (OIE), danas veoma aktuelna tema. Veliki stimulans istraživanjima u ovoj oblasti pruža i najnovija prepravka direktive Evropske unije o upotrebi OIE gde je jedan od postavljenih ciljeva dostizanje 32% potrošnje energije u EU iz OIE do 2030. godine [2].

Male vetroturbine, kako sa horizontalnom tako i sa vertikalnom osom obrtanja, postavljene u urbanim i gusto naseljenim sredinama takođe mogu doprineti ovom cilju. Iako se do nedavno smatralo da je snaga generisana na ovaj način nedovoljna i neisplativa jer vetroturbine rade u Zemljinom graničnom sloju gde je brzina mala i promenljiva, a mogu se javiti i vrtlozi odvojeni od okolnih zgrada/objekata, sve je više stručnih radova koji se bave problematikom što većeg iskorišćenja energije vetra u oblastima velike površinske hrapavosti kao što su gradska jezgra, predgrađa, šume, nacionalni parkovi, poljoprivredno zemljište, itd. [3-5]. Unapređenje strujnog polja moguće je ostvariti lokalno, u neposrednoj blizini rotora vetroturbin, dodavanjem određenih kanala ili uvodnika/slivnika, kao što je probano u [6-9].

Tema predstavljenog istraživanja je što tačnija procena mogućih doprinosa (pre svega brzini kroz rotor, a posledično i generisanoj mehaničkoj snazi vetroturbin) postavljanja elipsoidnog koncentratora u različite nadolazeće profile brzine vetra, što je najpre ostvareno ravanskim numeričkim simulacijama strujnog polja oko koncentratora, a potom znatno olakšano i ubrzano uvođenjem veštačkih neuronskih mreža (VNM) [10] kao pogodnog predikcionog alata. U tu svrhu, geometrijski oblik koncentratora i nadolazeći profil brzine vetra parametrizovani su pomoću pet ulaznih promenljivih, dok se vektor izlaznih veličina dimenzije 2 sastoji iz procenjene vrednosti srednje V_{sr} i maksimalne brzine V_{max} po najužem, središnjem poprečnom preseku koncentratora.

¹⁾ van. prof. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs), van. prof. dr Ognjen Peković, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (opekovic@mas.bg.ac.rs), Dragoljub Tanović, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (dtanovic@mas.bg.ac.rs), Mohammad Sakib Hasan, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (sakibhasan89@yahoo.com)

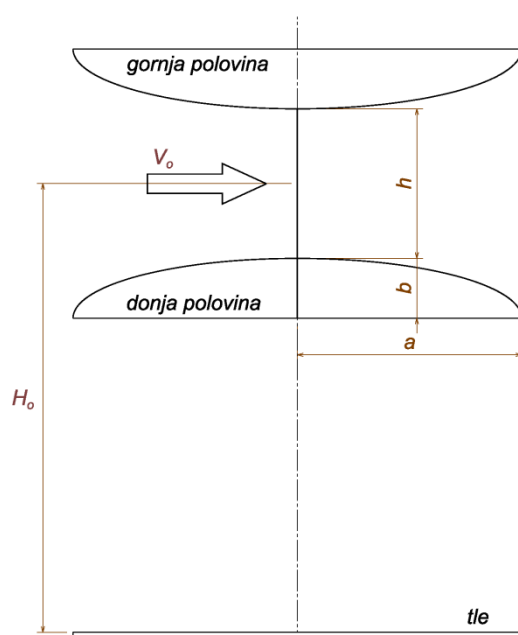
²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105 koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

2. GEOMETRIJSKI MODEL KONCENTRATORA

Model koncentrataora sastoji se iz dva jednaka, saosno postavljena dela, poluelipsoida, koji su određeni vrednostima svojih poluosa, veće a i manje b . Rastojanje između dve polovine označeno je promenljivom h i odgovara prečniku vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja ili visini vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja. Visinska koordinata središta vetroturbine (tačke centralno postavljene između dva poluelipsoida) odgovara referentnoj visini $H_0 = 3$ m na kojoj je neporemećena brzina vetra jednaka V_0 . Profil brzine u Zemljinom atmosferskom graničnom sloju aproksimiran je stepenim zakonom:

$$v(H) = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha, \quad (1)$$

gde eksponent α predstavlja hrapavost površine. Ovde su razmatrane tri različite vrednosti eksponenta $\alpha = [0.1807, 0.2126, 0.2308]$, klase hrapavosti 3, koje redom odgovaraju terenu sa drvećem i žbunjem, predgrađu i gradskom jezgru. Pobrojani ulazni parametri $[a, b, h, V_0, \alpha]$ kao i položaj koncentrataora određen referentnom visinom H_0 skicirani su na slici 1.

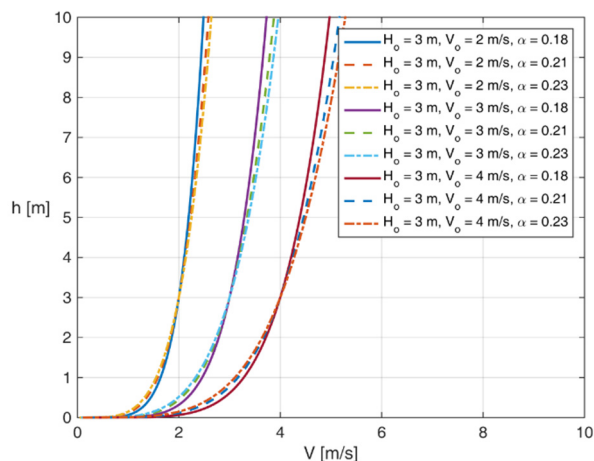


Slika 1. Prikaz ulaznih parametara i položaj geometrije u prostoru

Tabela 1 prikazuje moguće vrednosti i jedinice pet ulaznih parametara kao i veličinu prostora ulaznih promenljivih. Kako je koncentratore planiran za primenu na malim vetroturbinama maksimalne vrednosti veće i manje poluose su 2 m i 1 m, redom. Slično, prečnik ili visina vetroturbine ograničena je na 1.5 m. Takođe, referentnoj brzini vetra pridodeljene su male vrednosti (brzina V_0 razmatrana je u približnom opsegu 2-4 m/s) što opet treba da odgovara realnim, svakodnevnim uslovima strujanja u urbanim sredinama.

Tabela 1. Prostor ulaznih promenljivih			
Promenljiva	Jedinica	Moguće vrednosti	Dimenzija skupa
a	[m]	[1.0, 1.5, 2.0]	3
b	[m]	[0.4, 0.7, 1.0]	3
h	[m]	[0.5, 1.0, 1.5]	3
V_0	[m/s]	[2, ..., 4]	6
α	[-]	[0.1807, 0.2126, 0.2308]	3

U prvoj iteraciji, izvedeno je ukupno 486 različitih simulacija opstrujavanja, što je dobijeno razmatranjem 27 različitih geometrija koncentrataora pri 18 različitih nadolazećih profila brzine od kojih su neki skicirani na slici 2.



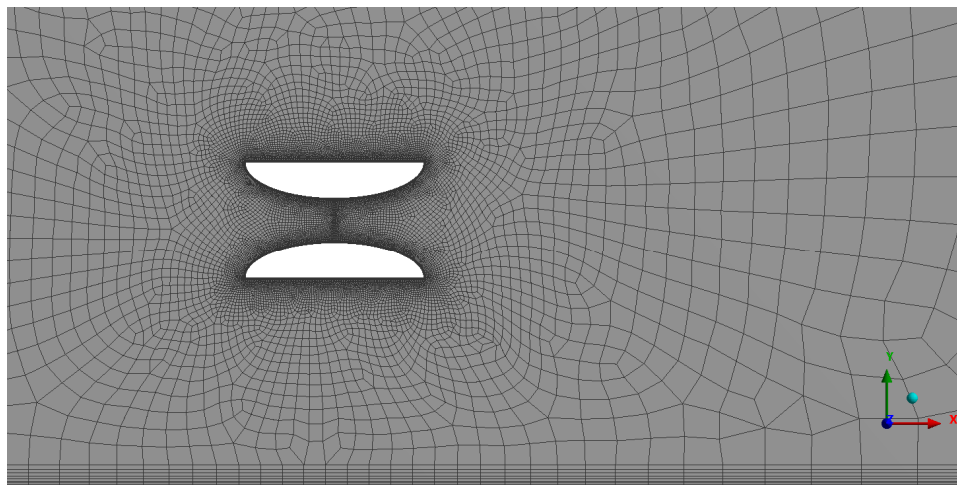
Slika 2. Deo razmatranih nadolazećih profila brzine pri referentnoj visini $H_o = 3$ m

3. PRORAČUNI OPSTRUJAVANJA KONCENTRATORA

Ravanski proračuni opstrujavanja koncentratora sprovedeni su u komercijalnom softverskom paketu ANSYS posebno namenjenom inženjerskim proračunima.

Okolni pravougaoni proračunski domen prostire se -25 m ispred i 50 m iza ose koncentratora, a visine je 25 m. Dve polovine koncentratora isečene su iz proračunskog domena. Definisane granice domena su: ulazna, izlazna, tle i zidovi koncentratora.

Generisane proračunske mreže su hibridne nestruktuirane, srednje finoće i sadrže približno 25-30 hiljada ćelija, primer prikazan na slici 3. Definisane su funkcije veličine po i granični sloj (izduženih prizmatičnih ćelija) u neposrednoj blizini zidova koncentratora i tla.



Slika 3. Detalj proračunske mreže oko koncentratora struje vazduha

Proračun opstrujavanja sproveden je numeričkim rešavanjem jednačina održanja mase, količine kretanja i dopunskih jednačina transporta turbulentnih veličina metodom konačnih zapremina u softverskom paketu ANSYS FLUENT.

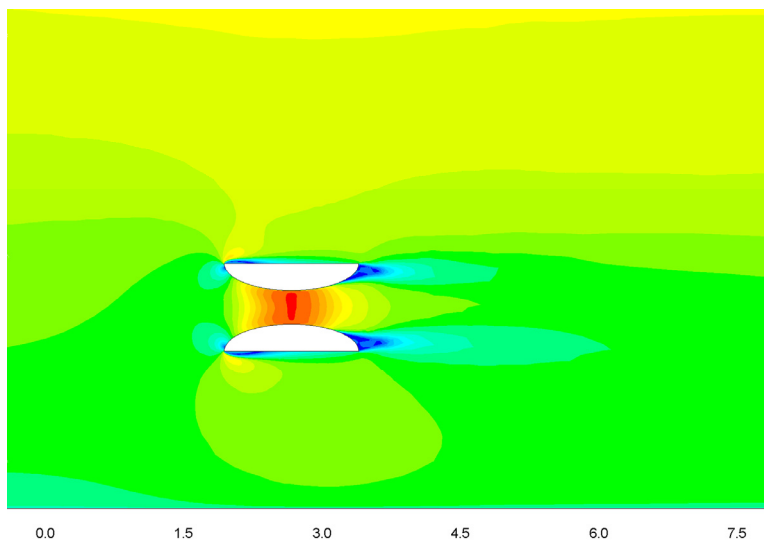
Strujanje je pretpostavljeno kao ravansko, stacionarno, nestišljivo i viskozno. Za zatvaranje Navije-Stoksovih jednačina osrednjenih Rejnoldsovom statistikom korišćen je dvojednačinski $k-\omega$ SST turbulentni model, veoma zastupljen u vazduhoplovnim primenama.

Po ulaznoj granici definisane su vrednosti intenziteta brzine $V(H)$ i turbulentnih veličina $k(H)$ i $\omega(H)$ neporemećenog strujnog polja u funkciji visine H . Po izlaznoj granici pretpostavljena je nulta vrednost natpritiska.

Kako je strujanje nestišljivo korišćen je segregatni solver. Za sprezanje polja pritiska i brzine upotrebljena je SIMPLEX šema, dok su prostorni gradijenti aproksimirani šemama 2. reda tačnosti.

Proračuni su vršeni do postizanja konvergiranih vrednosti srednje V_{sr} i maksimalne brzine V_{max} po središnjem preseku za šta je bilo dovoljno 2000 iteracija.

Primer proračunatog strujnog polja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Proračunate konture brzine oko koncentratora pri $V_o = 4 \text{ m/s}$ na $H_o = 3 \text{ m}$

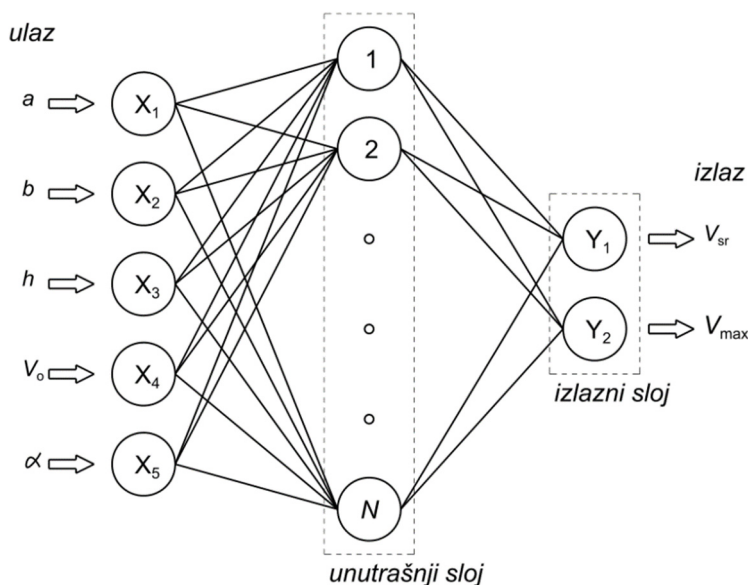
4. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

VNM su pogodan alat za procenu ponašanja složenih, nelinearnih sistema [10]. Uprošćeni prikaz arhitekture korišćenih VNM prikazan je na slici 5. Sve testirane veštačke neuronske mreže su nepovratne dvoslojne (1 skriveni i izlazni sloj) pri čemu je menjan broj neurona, $N = [5, 10, 15, 20]$, u unutrašnjem, skrivenom sloju. Tip treniranja je nadgledan. Ovakve VNM su robusne i pogodne za široki opseg primena. Ovde su upotrebljene za bržu procenu strujnog polja nego što se dobija rešavanjem Navije-Stoksovih jednačina.

Za aktivacionu funkciju odabran je tangens hiperbolički:

$$f(x) = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (2)$$

zbog svojih pogodnih osobina: neprekidnosti, glatkoće, monotonosti, ograničenosti na opseg $(-1, 1)$ i diferencijabilnosti.



Slika 5. Ilustracija arhitektura korišćenih VNM

Generalno, veći broj neurona u unutrašnjem sluju VNM čini fleksibilnijom, ali može voditi i do

"prezasićenja", odnosno prevelikog prilagođavanja skupu za treniranje (dok je greška procene novog skupa u suštini prevelika) iz kog razloga se mreža proverava na skupu za validaciju. Ovde je 70% početnog skupa (od 486 kombinacija) upotrebljeno za treniranje mreže, dok je po preostalih 15% iskorišćeno za validaciju i testiranje koje se sprovodi na kraju procesa učenja zarad procene konačnih performansi i kvaliteta VNM.

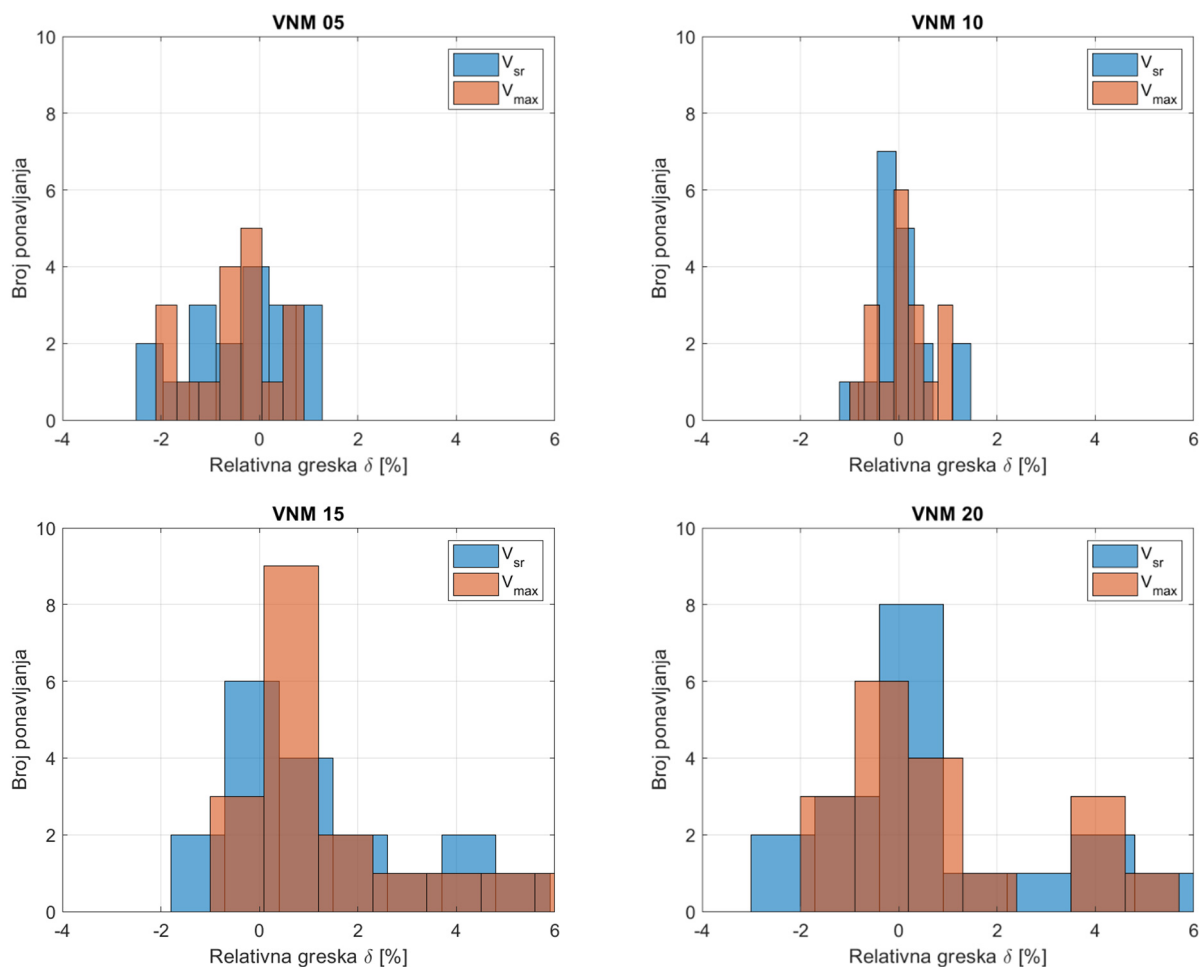
5. REZULTATI I DISKUSIJA

Karakteristike i kvalitet VNM moguće je oceniti poređenjem generalnih parametara: ukupnim brojem iteracija učenja n , brzinom učenja η , standardnom devijacijom σ i srednjom vrednošću kvadrata greške (mean squared error) mse . Tabela 2 prikazuje dobijene vrednosti globalnih pokazatelja kvaliteta testiranih VNM. Mreže sa 5, 10, 15 i 20 neurona u unutrašnjem sloju označene su kao VNM 05, VNM 10, VNM 15 i VNM 20, redom.

Pokazatelj	VNM 05	VNM 10	VNM 15	VNM 20
n	41	47	36	66
η	0.00010	0.00001	0.00001	0.00001
σ	0.06	0.04	0.03	0.03
mse	0.00222	0.00045	0.00114	0.00105

Primetno je da dalje dodavanje neurona i povećanje unutrašnjeg sloja neće značajno doprineti boljoj proceni parametara strujnog polja i da mreža sa 10 neurona pruža zadovoljavajuće rezultate. Sa druge strane, proširenjem polaznog skupa verovatno je moguće unekoliko poboljšati performanse VNM.

Formirane VNM dodatno su testirane nad novim skupom od 18 različitih kombinacija geometrija koncentratora i profila brzina. Slika 6 prikazuje histograme relativne greške procene srednje i maksimalne brzine po središnjem preseku koncentratora.



Slika 6. Raspodela greške procene srednje i maksimalne brzine pomoću VNM nad novim skupom

Na kraju, zanimljivo je spomenuti i koje je to očekivano povećanje brzine između dve polovine koncentratora u odnosu na neporemećeno strujno polje. Različitim geometrijama koncentratora srednju brzinu moguće je ubrzati 30-110% (najverovatnije povećanje je oko 60-70%), što bi se odrazilo na posledično povećanje snage između dva i devet puta (najverovatnije je četverostruko).

6. ZAKLJUČAK

Prikazana brza i efikasna metodologija procene očekivanog profila brzine pruža uvid u moguće doprinose koncentratora aerodinamičkim performansama male vetroturbine postavljene u urbanoj sredini. Izuzetno je pogodna za preliminarne faze projektovanja vetroturbine, procenu radnih uslova na lokaciji, različite optimizacione studije i sl.

Rad demonstrira mogućnost primene veštačkih neuronskih mreža u rešavanju realnog inženjerskog problema iz oblasti iskorišćenja energije vetra. Na osnovu relativno malog skupa numeričkih rezultata (proračunato je samo 486 različitih slučajeva opstrujavanja), a za nemali broj raznorodnih ulaznih parametara (ovde 5), razvijen je robusan alat za brzu, zadovoljavajuće tačnu procenu lokalnog povećanja brzine vetra koja nadolazi na rotor. Takođe je pokazano da pravilno definisana geometrija koncentratora može dovesti do višestrukog povećanja generisane snage vetroturbine.

10. LITERATURA

- [1] IRENA: *Renewable capacity statistics 2019*. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019.
- [2] L 328: *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*.
- [3] Arteaga-Lopez, E., Angeles-Camacho, C., Banuelos-Ruedas, F.: *Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis*, Energy, Vol. 167, pp. 181-188, 2019.
- [4] Stathopoulos, T., Alrawashdeh, H., Al-Quraan, A., Blocken, B., Dilimulati, A., Paraschivoiu, M., Pilay, P.: *Urban wind energy: Some views on potential and challenges*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 179, pp. 146-157, 2018.
- [5] Ishugah, T.F., Li, Z., Wang, R.Z., Kiplagat, J.K.: *Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 37, pp. 613-626, 2014.
- [6] Alom, N., Saha, U.K.: *Four Decades of Research Into the Augmentation Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor*, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 140, e050801, 2018.
- [7] Alizadeh, H., Jahangir, M.H., Ghasempour, R.: *CFD-based improvement of Savonius type hydrokinetic turbine using optimized barrier at the low-speed flows*, Ocean Engineering, Vol. 202, e107178, 2020.
- [8] de Santoli, L., Albo, A., Garcia, D.A., Bruschi, D., Cumo, F.: *A preliminary energy and environmental assessment of a micro wind turbine prototype in natural protected areas*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 8, pp. 42-56, 2014.
- [9] Wong, K.H., Chong, W.T., Sukiman, N.L., Poh, S.C., Shiah, Y.-C., Wang, C.-T.: *Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 73, pp. 904-921, 2017.
- [10] Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H.: *Neural Network Design*. PWS Publishing, Boston, 1996.

Svorcan, J., Peković, O., Tanović, D., Hasan, M.S.

ASSESSMENT OF THE MODIFIED VELOCITY PROFILE THROUGH FLOW SIMULATIONS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract: Efficient wind energy extraction presents a very attractive contemporary research topic. A lot is being done on the improvement of aerodynamic performances of wind turbines in urban environments where available space is limited and there are numerous surrounding objects that can locally improve or deteriorate the oncoming velocity profile. Thus, it is possible to install a flow concentrator whose main purpose is to direct and augment velocity through the rotor. The paper describes a simplified estimation of the modified velocity profile by coupling fluid flow simulations with artificial neural networks. Concentrator geometry is parameterized in order to achieve the greatest possible flow acceleration at a particular location.

Key words: flow concentrator, speed augmentation, computational aerodynamics, artificial neural networks

Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S. ¹⁾

ANALIZA PERFORMANSI VETROTURBINA RAZLIČITIH AEROPROFILA ²⁾

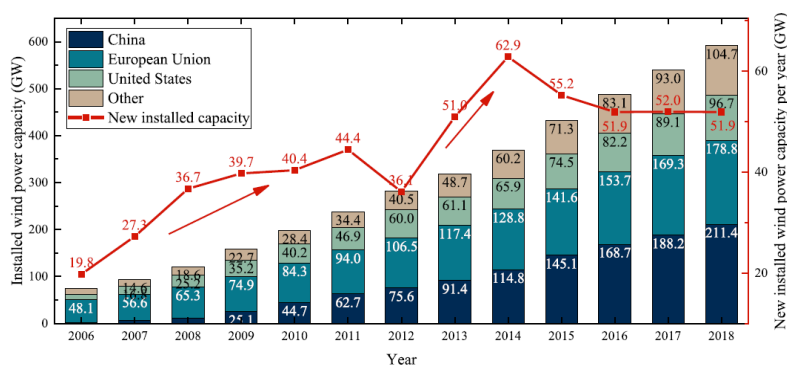
Rezime

Rastuća zabrinutost zbog globalnog zagrevanja, zagađenja životne sredine i poskupljenja fosilnih goriva doveli su do interesovanja za razvoj obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora energije. Stoga istraživanja u oblasti obnovljivih izvora, posebno energije vetra, postaju izuzetno aktuelna. U radu je izvršena aerodinamička analiza vetroturbin sa vertikalnom osom obrtanja - VAWT, koje imaju različite aeroprofile. Korišćene su dve metode BEM - Blade Element Momentum i DMS - Double Multiple Streamtube, obično usvojene za rani dizajn i ocenu turbina. U radu je korišćen program Qblade, a dobijeni rezultati snage u zavisnosti od brzine vetra omogućavaju upoređivanje performansi vetroturbin.

Ključne reči: QBlade, vetroturbin, aeroprofile, obnovljivi izvori energije

1. UVOD

Vetar je bogat energetski resurs koji pokreće Sunce. Procenjuje se da se oko 3% sunčeve toplotne energije pretvara u energiju vetra [1]. Među svim tehnologijama baziranim na ekološkoj zaštiti sredine i obnovljivim izvorima energije, energija vetra ima vitalnu ulogu. Sa razlogom veliki broj istraživačkih projekata se bavi projektovanjem i proizvodnjom vetroturbin. Godišnji porast instaliranih kapaciteta vetroturbin u svetu je prikazan na sl.1.



Slika 1. Instalirani kapaciteti vetroturbin u periodu između 2006. i 2018. godine [2]

Energija vetra se smatra jednom od vodećih obnovljivih izvora energije koja ima minimalan i prihvatljiv uticaj na okolinu u kojoj se nalazi. Takođe, ne doprinosi povećanju toksina i ostalih štetnih gasova u okruženju. Primena energije vetra promovise održivi razvoj, zadovoljavajući potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe.

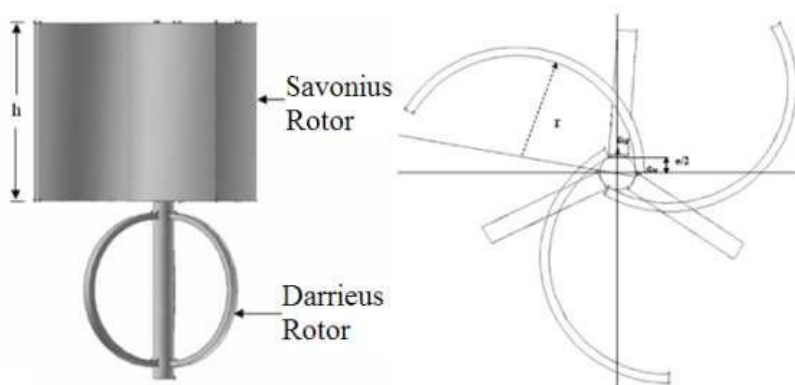
¹⁾ MSc Dragoljub Tanović, student DAS, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dtanovic@mas.bg.ac.rs), dr Jelena Svorcan, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs), dr Ognjen Peković, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (opekovic@mas.bg.ac.rs), MSc Mohammad Sakib Hasan, student DAS, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (sakibhasan89@yahoo.com)

²⁾ U okviru rada saopšteni su rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-35035, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

Danas je jedan od prioritarnih zadataka u oblasti energetike, suspostuisanje fosilnih goriva i nuklearnih elektrana iz upotrebe, koji ne samo da štetno utiču nego i prete da ugroze živi svet u budućnosti. Ova degradacija u kratkom roku ugrožava zdravlje ljudi i kvalitet života i dugoročno utiče na ekološku ravnotežu i biološku raznolikost. Sa druge strane, energija vetra koja se koristi iz prirodnog ekosistema je ekološki neiscrpna. Zahvaljujući sve većim naporima globalnih zajednica u borbi protiv emisije gasova sa efektom staklene bašte iz konvencionalnih tehnologija fosilnih goriva, primene vetroturbina imaće sve značajniju ulogu u narednim godinama.

Većina vetroturbina spada u tip sa horizontalnom osom obrtanja (*HAWT*) i danas ih je zastupljeno preko 90% na tržištu [3]. Vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja (*VAWT*) su znatno manje u upotrebi, a samim tim i manje izučavane. Kao što *Gipe* napominje [4], postoji podela na 2 podtipa *VAWT*-a, Savonijusov i Darijusov, mada postoji i nekoliko različitih Darijusovih vetroturbina. Neka od ovih su u fokusu trenutnih istraživanja.

Prve istorijski zapisane informacije datiraju jos davne 945. godine o postojanju vetrenjača na teritoriji nekadašnje Persije i primarno su, snagom vetra, korišćene za mlevenje zrna [5]. Savonijus je, usavršavajući ove vetrenjače razvio svoj tip turbine sa vertikalnom osom obrtanja čije lopatice imaju oblik latiničnog slova „S“. Darijus je 1931. godine patentirao svoj tip u Sjedinjenim Američkim Državama [6]. Iskrivljene lopatice oblika „S“ je zamenio sa najčešće 2 ili 3 čiji poprečni presek je sličan krilu aviona (Slika 2.). Postoje i drugi oblici Darijusove vetroturbine, a kao najbitniji se izdvaja „H“ dizajn. Darijusova „H“ turbina najčešća je konfiguracija vetroturbine sa vertikalnom osom sa pravim, neiskrivljenim lopaticama (*SBVAWT*). Ovaj podtip može imati važnu ulogu u razvoju energije vetra u budućnosti.



Slika 2. Poprečni presek podtipova vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja [7]

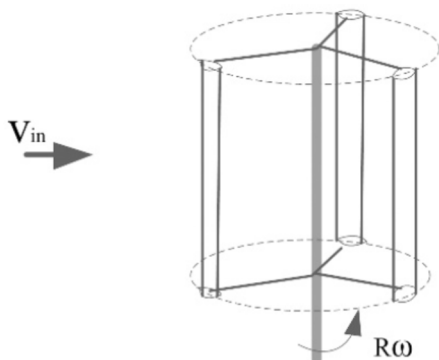
Turbine sa vertikalnom osom obrtanja imaju nekoliko prednosti zbog kojih se poslednjih decenija sve češće koriste. Jedan od najjednostavnijih primera ovog tipa je sa pravim, neiskrivljenim lopaticama-*SBVAWT* što daje mogućnost jednostavne izrade sa odličnim performansama. Budući da se *VAWT* mogu prilagoditi strujanju vetra iz bilo kog pravca, one mogu raditi u turbulentnim i promenljivim uslovima daleko bolje od *HAWT* [8]. Zapravo, *VAWT* često mogu proizvoditi veću količinu energije pri istim uslovima od *HAWT*. Njihova dobra karakteristika je da se mogu postaviti bliže jedna drugoj a da međusobno ne utiču na rad. Ove prednosti su dovele do toga da se u nekim gradskim sredinama uvedu vetroturbine koje uopšte ne utiču na sredinu u kojoj se nalaze [9]. Njihovo kućište, u kome je alternator, nalazi se na zemlji što olakšava održavanje turbine. Neki novi dizajni ovog tipa imaju veći koeficijent snage koji omogućava veću količinu dobijene električne energije. *Marsh* i *Peace* [10] napominju da novi dizajni *VAWT* mogu takođe prevazići granicu od 10 MV jer orijentacija lopatica u kombinaciji sa proizvodnim tehnikama omogućava da se *VAWT* proizvedu gabarita većih od *HAWT*. Međutim, postoje razlozi zašto su *VAWT* manje u upotrebi u odnosu na *HAWT*.

Efikasnost i dalje predstavlja glavni nedostatak upotrebe *VAWT* u komercijalnoj proizvodnji električne energije. Vrhunski *HAWT* mogu ostvariti vrednosti koeficijenta snage (C_p) mnogo veće u odnosu na turbine sa vertikalnom osom obrtanja. Najveći problem predstavlja činjenica da se ovaj tip turbina ne može samopokrenuti, a izrada njihovih lopatica zbog velike složenosti iziskuje velika finansijska ulaganja.

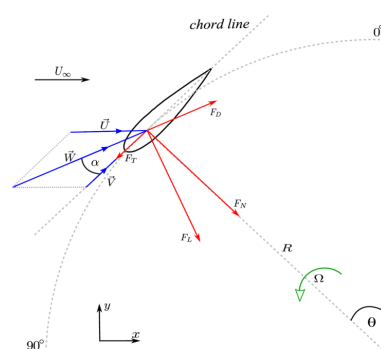
Međutim, istraživanja pokazuju da Darijusova turbina može samostalno da se pokrene pri brzinama vetra ispod 10 m/s [11]. Najčešće se koriste simetrični aeroprofil, jer od svih iz NACA baze daju najbolje rezultate. Razvojem aeroprofila, u proizvodnji vetroturbina našli su primenu i profili S809 i DU 06-W-200.

2. ANALIZA

Princip obrtanja lopatica oko ose vetroturbine je isti kao obrtanje propela na avionu. Prilikom strujanja vetra (sl.3), na lopaticu deluje rezultujuća sila koja se može razložiti na dve komponente – silu uzgona i silu otpora (sl.4). Sila uzgona (F_L) predstavlja komponentu aerodinamičke sile koja je upravna na pravac vetra, dok sila otpora (F_D) deluje u smeru kretanja vetra.



Slika 3. Darijusova vetroturbina [12]



Slika 4. Uticaj sile na lopaticu [13]

U radu je upoređeno 5 različitih aeroprofila (tabela 1.) pri istim karakteristikama vetroturbine. Autori [14] su pokazali da turbina sa 3 lopatice daje najbolje rezultate što je bio i osnov da u našim istraživanjima analiziramo koncept tri lopatice pri Rejnoldsovoj i Mahovoj vrednosti od 350000 i 0.03 .

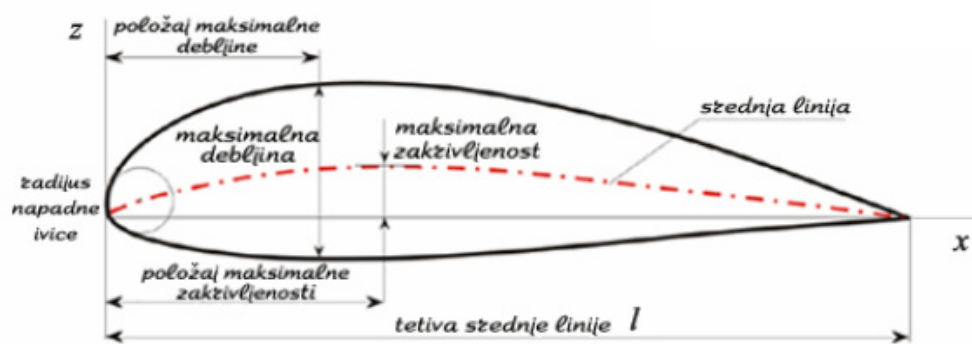
Tabela 1. Karakteristike analizirane vetroturbine

Slučaj	1	2	3	4	5
Aeroprofil	NACA 0012	S809	DU 06-W-200	NACA 2415	NACA 23012
Visina lopatice (m)	2				
Poluprečnik (m)	1				
Tetiva (m)	0.15				
Mahov broj	0.03				
Rejnoldsov broj	350000				

NACA 0012 (sl.6) je četvorocifreni aeroprofil i jedan od najčešćih eksperimentalno testiranih i korišćenih pri različitim vrednostima Rejnoldsovih brojeva. Spada u aeroprofile gde prve dve vrednosti- 00 govore da je u pitanju simetričan aeroprofil, jer je maksimalna relativna zakrivljenost $(c/l)_{max} = 0\%$ na rastojanju $(x/l)_{mc} = 0\%$ od napadne ivice. Takođe, naredne dve vrednosti- 12 daju informacije kao što je maksimalna relativna debljina $(d/l)_{max} = 12\%$ na standardnom rastojanju $(x/l)_{md} = 30\%$ od napadne ivice.

NACA 2415 (sl.7) je još jedan četvorocifreni aeroprofil koji nije simetričan i ne koristi se toliko često za vetroturbine. Njegova maksimalna relativna zakrivljenost iznosi $(c/l)_{max} = 2\%$ na rastojanju $(x/l)_{mc} = 40\%$ od napadne ivice, dok je vrednost maksimalne relativne debljine $(d/l)_{max} = 15\%$ na standardnom rastojanju $(x/l)_{md} = 30\%$ od napadne ivice.

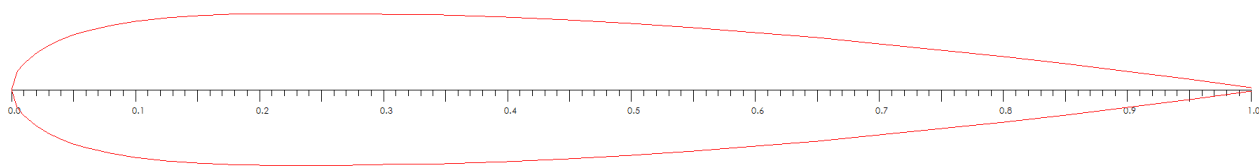
NACA 23012 (sl. 8) je petocifreni aeroprofil, često korišćen ne samo za krila aviona, već i za lopatice glavnih rotora helikoptera, jer ima idealni (konstruktivni) koeficijent uzgona koji je skoro jednak praktičnom. To znači da aeroprofil stvara minimalni otpor. Relativna debljina iznosi $(d/l)_{max} = 15\%$ dok je $(x/l)_{mc} = 0.15$.



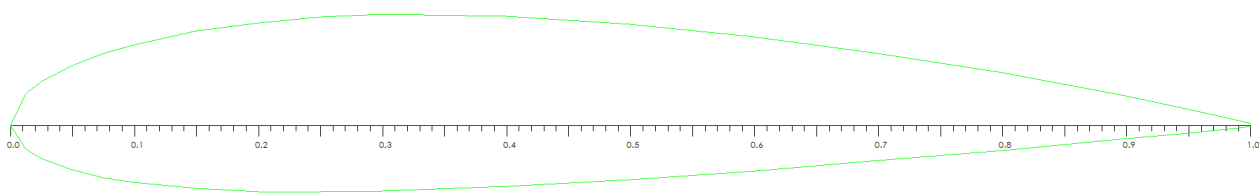
Slika 5. Osnovni konstruktivni parametri aeroprofila [15]

Za razliku od razmatranih aeroprofila, S809 (sl.9) ne pripada NACA grupi i ima maksimalnu relativnu debljinu 21% na rastojanju od 38% od napadne ivice. Dobijen je eksperimentalnim istraživanjem i najviše je u upotrebi za vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja [16].

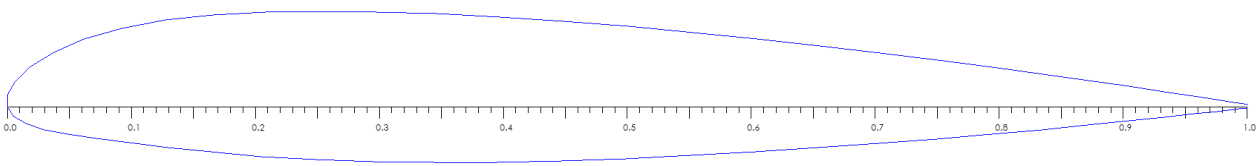
Kao i S809, DU 06-W-200 (sl.10) ne pripada NACA aeroprofilima, ali za razliku od njega koristi se kod vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja [17]. Maksimalna relativna debljina iznosi 20% na rastojanju od 31% od napadne ivice.



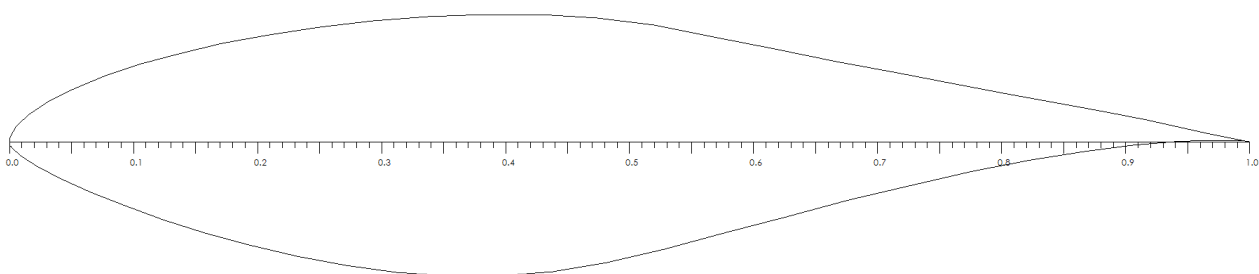
Slika 6. Aeroprofil NACA 0012



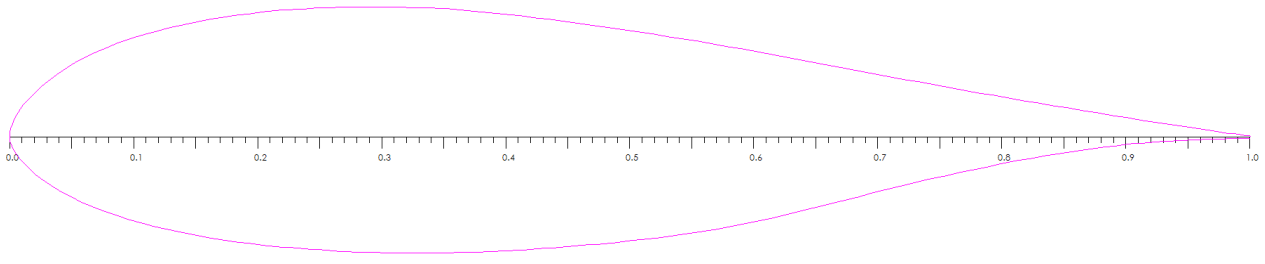
Slika 7. Aeroprofil NACA 2415



Slika 8. Aeroprofil NACA 23012

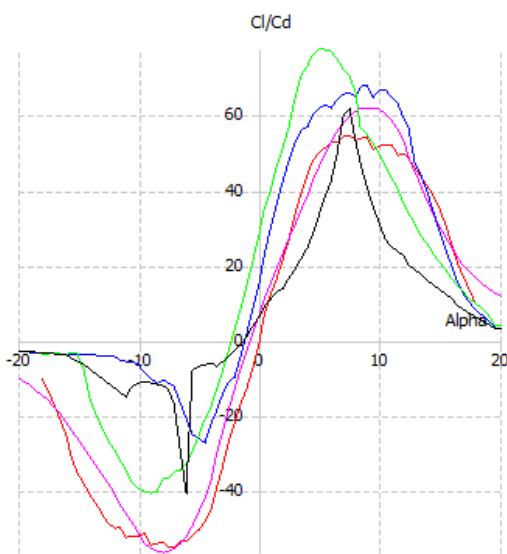


Slika 9. Aeroprofil S809

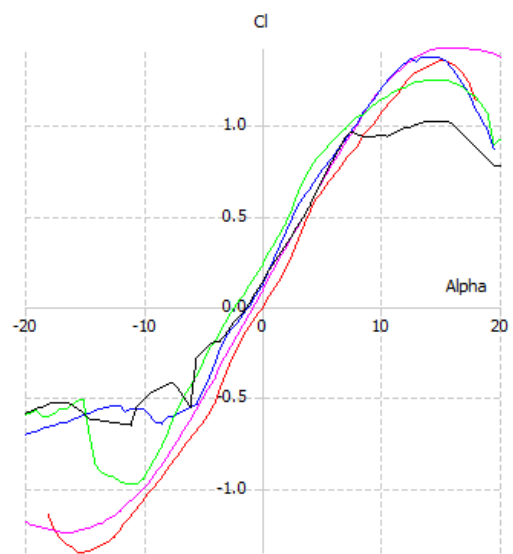


Slika 10. Aeroprofil DU-06-W-200

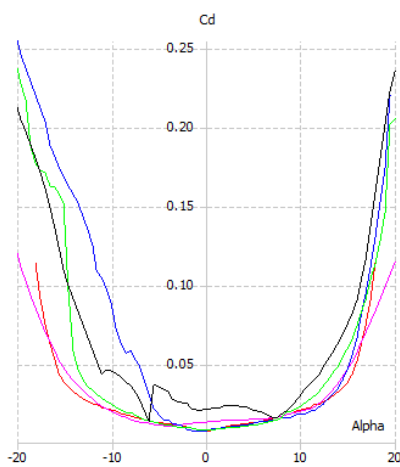
Finesa je karakteristika aeroprofila lopatice i predstavlja međusobni odnos koeficijenata aerodinamičkih sila uzgona i otpora (sl.11). To je broj koji pokazuje koliko puta je koeficijent sile uzgona (C_l) veći od koeficijenta sile otpora (C_d) pri odgovarajućem napadnom uglu. Povećanjem napadnog ugla povećava se i finesa sve dok ne dostigne maksimalnu vrednost, a pri daljem povećanju ugla ona se smanjuje. Na sl.12 i sl.13 su prikazane krive uzgona i otpora nastale pri ispitivanju odgovarajućih oblika aeroprofila u uslovima definisanim u tabeli 1.



Slika 11. Finesa aeroprofila

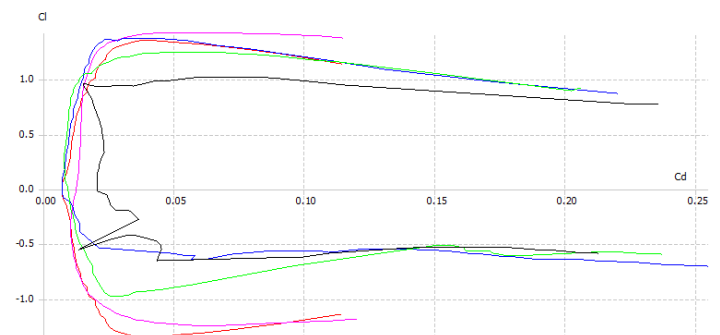


Slika 12. Kriva uzgona



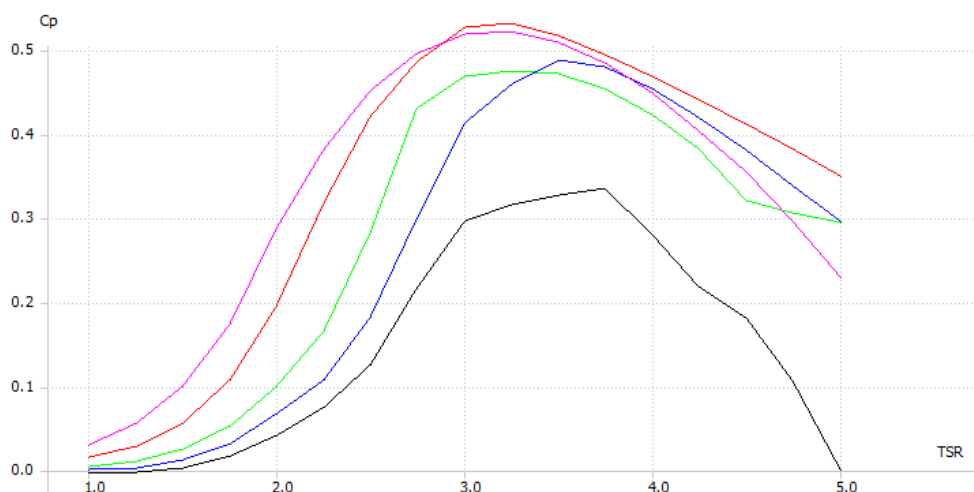
Slika 13. Kriva otpora

Polara (sl.14) predstavlja međusobni odnos koeficijenata aerodinamičkih sila uzgona i otpora.



Slika 14. Polara

Sa aspekta performansi, analizirana je promena koeficijenta snage (C_p) u funkciji koeficijenta rada (TSR) za sve razmatrane oblike aeroprofila i prikazana je na sl.15 i u tabeli 2.



Slika 15. Odnos koeficijenta snage i rada

Tabela 2. Prikaz maksimalnog koeficijenta snage sa različitim aeroprofilima

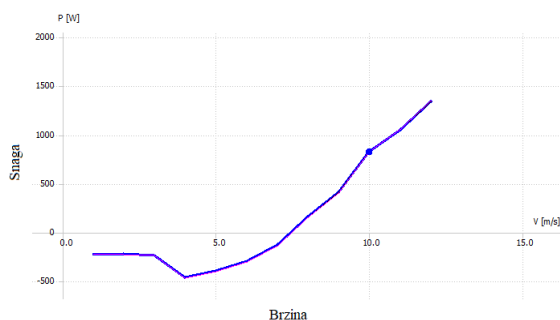
Aeroprofil	NACA 23012	NACA 2415	NACA 0012	S809	DU-06-W-200
Koeficijent rada - TSR	3.5	3.25	3.25	3.75	3.25
Maksimalni koeficijent snage - C_p	0.48	0.47	0.53	0.34	0.52

Iz tabele se može zaključiti da vetroturbine sa simetričnim aeroprofilom NACA 0012, kao i DU-06-W-200 daju najbolje rezultate. Koeficijenti rada imaju prosečne vrednosti kao i kod ostalih aeroprofila i kreću se između 3 i 4, međutim maksimalni koeficijenti snage su znatno veći. To je veoma bitan parametar koji direktno utiče na snagu vetroturbine i koji ne sme da prelazi 0.593 [18]. Treba imati na umu da su ovo rezultati u idealnim uslovima i da bi u realnim ove vrednosti bile manje zbog poremećajnih faktora.

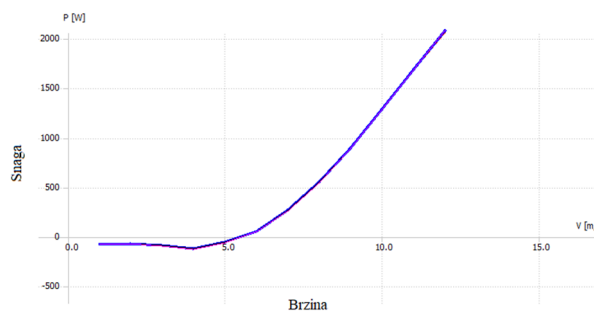
Dijagrami na sl. 16-20., predstavljaju promenu snage razmatranih turbina u funkciji brzine vetra, a u tabeli 3. navedene su njihove maksimalne snage pri razmatranoj brzini vetra od 10 m/s .

Tabela 3. Prikaz dobijene snage sa različitim aeroprofilima

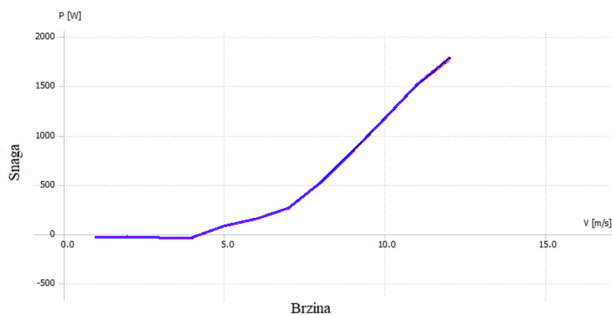
Aeroprofil	NACA 23012	NACA 2415	NACA 0012	S809	DU-06-W-200
Snaga [W]	1193	1162	1300	820	1280



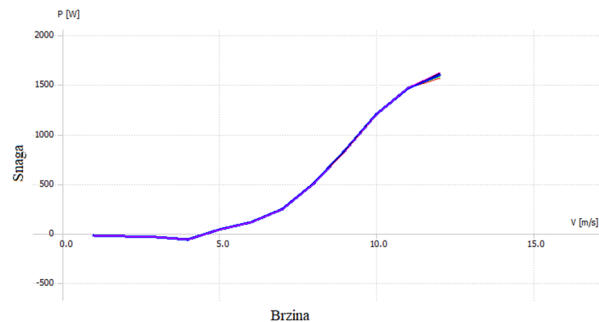
Slika 16. Odnos snage i brzine vetra za S809



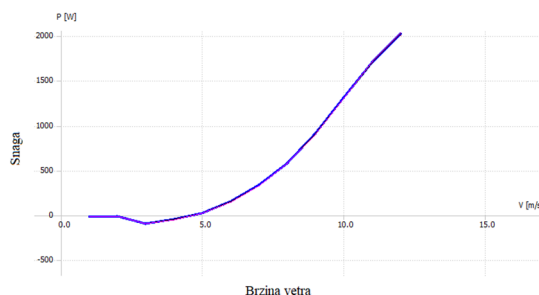
Slika 18. Odnos snage i brzine vetra za DU-06-W-200



Slika 17. Odnos snage i brzine vetra za NACA 2415



Slika 19. Odnos snage i brzine vetra za NACA 23012



Slika 20. Odnos snage i brzine vetra za NACA 0012

Na osnovu dijagrama i iz tabele 3. može se primetiti da je dobijena snaga kod razmatranih aeroprofila pri istim uslovima skoro identična sem kod aeroprofila S809, čime je i pokazano da on nije namenjen za ovaj tip vetroturbine. Uočena je razlika u minimalnoj brzini vetra koja je potrebna za samopokretanje turbine i ona se kreće u intervalu od $4 - 7 \text{ m/s}$. Ovo i dalje predstavlja njihovu glavnu manu zbog koje nemaju široku primenu u praksi.

3. ZAKLJUČAK

Vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja će i u narednom periodu predstavljati izazov za istraživače. Njihove performanse a i oblici aeroprofila nisu dovoljno istraženi i biće predmet daljih razmatranja. Najbolji aeroprofil koji su se pokazali, iz NACA serije su četvorocifreni i simetrični- 0012, kao i eksperimentalni aeroprofil DU-06-W-200. Ostali takođe daju prihvatljive ali ne i najbolje rezultate. U ovom trenutku mogućnosti primene ovih vetroturbina u gradovima su ograničene.

Energija koja se na ovaj način proizvodi može biti dovoljna za domaće potrebe bez uticaja na promene. Osim aerodinamike, važnu ulogu ima i struktura konstruktivnog i tehnološkog rešenja komponenata, kako ne bi došlo do havarije vetroturbina pri brzinama vetra iznad graničnih.

4. LITERATURA

- [1] Chinchilla, Guccione, Tillman, *Wind Power Technologies: A Need for Research and Development in Improving VAWT's Airfoil Characteristics*, Journal of Industrial Technology, vol. 27, No. 1, 2011.
- [2] M. Zhang, J. Zhang, Li, Yu, Qin, Wei, Song, *Multi-site measurement for energy application of small distributed wind farm in complex mountainous areas*, Energy Reports, 2020.
- [3] Da Rosa A.: *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Elsevier, New York, 2009.
- [4] Gipe P.: *Wind power: renewable energy for home, farm, and business*, White River Junction, 2004.
- [5] Hau E.: *Wind Turbines*, Springer, Berlin, 2006
- [6] Eriksson S., Bernhoff H., Leijon M.: Evaluation of different turbine concepts for wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12., pp. 1419-1434, 2008.
- [7] Zhipeng T., Yingxue Y., Liang Z., Bowen Y., *A review on the new structure of Savonius wind turbines*, *Advanced Materials Research*, pp. 467-478, 2013.
- [8] Barry M., Chapman R., *Distributed small-scale wind in New Zealand: Advantages, barriers and policy support instruments*, *Energy Policy*, 3358-3369, 2009.
- [9] Ragheb M., *Wind turbines in the urban environment*, 2008.

- [10] Marsh G., Peace S., Tilting at windmills: Utility-scale VAWTs: towards 10MW and beyond, *Refocus*, vol. 6, pp. 37-42, 2005.
- [11] Dominy R., Lunt P., Bickerdyke A., Dominy J., *Self-starting capability of a Darrieus turbine*, Sage journals, vol. 221., pp. 111-120, 2007.
- [12] Li S., Li Y., Yang C., Zhang X., Wang Q., Li D., Zhong W., Wang T., *Design and Testing of a LUT Airfoil for Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines*, Applied Sciences, 2018.
- [13] Hand B., Kelly G., Cashman A., *Numerical simulation of a vertical axis wind turbine airfoil experiencing dynamic stall at high Reynolds number*, Computer & Fluids, 2017.
- [14] Li Q., Maeda T., Kamada Y., Mori N., *Investigation of wake characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine in vertical axis direction with field experiments*, Energy, vol. 141, pp. 262-272, 2017
- [15] Kostić I., *Primenjena aerodinamika*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
- [16] Somers D. , *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*, Springfield, 1997.
- [17] Castelli M., Simioni G., Benini E., *Numerical Analysis of the Influence of Airfoil Asymmetry on VAWT Performance*, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, vol. 6, No. 1, 2012.
- [18] Crnojevic C., *Mehanika fluida*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, 2014.

Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S.

PERFORMANCE ANALYSIS OF WIND TURBINE WITH DIFFERENT AIRFOILS

Abstract

Growing concerns about global warming, pollution and price increases for fossil fuels have led to an interest in developing renewable and environmentally friendly energy sources. Therefore, research into renewables, especially wind energy is constantly expanding. In this paper was performed an aerodynamic analysis of a vertical axis wind turbine - VAWT, which has different airfoils. Two methods were used: BEM - Blade Element Momentum and DMS - Double Multiple Streamtube, usually adopted for early design and rating of turbines. The program used in this paper is QBlade. The obtained power results, depending on the wind speed, make it possible to compare the performance of the wind turbine.

Keywords: QBlade ,wind turbine ,airfoils, renewable energy sources



KUTIJA ELEKTRONIKE – STRUKTURNA ANALIZA I IZRADA ⁵⁾

Rezime

Rezime: Aditivna proizvodnja pomaže organizacijama da uštede u procesu projektovanja i da smanje troškove realizacije prototipova. U ovom radu analizirana je kutija elektronike. Kućište je modelirano u nekom od 3D softverskih paketa, zatim je urađena strukturna analiza i na kraju je izrađen model na 3D štampaču. Kutija je izrađena od biorazgradivog termoplastičnog materijala PLA. Ideja ovog rada je da se pokaže kako aditivna tehnologija može da zameni konvencionalnu tehnologiju na onim mestima koja nisu kritična i rizična. Strukturna analiza pokazala je da plastično kućište može da izdrži opterećenje od 150 daN. To je važno sa aspekta izrade plastičnog proizvoda umesto metalnog.

Cljučne reči: Aditivna proizvodnja, PLA, Kutija elektronike, Strukturna analiza, 3D štampa.

1. UVOD

Aditivna proizvodnja (AP) se koristi za proizvodnju prototipova, modela, komponenti i delova uz upotrebu različitih materijala, kao što su: plastika, metal, keramika, staklo i kompozit [1]. Primena AP daje mogućnost uklanjanja različitih izvora otpada, koji se javljanju tokom proizvodnje.

AP predstavlja revolucionarni iskorak, jer se delovi realizuju prema digitalnom prikazu (3D modelu). Na taj način su isključeni konvencionalni postupci izrade delova: obrada rezanjem, kovanjem i livenjem [2]. Takođe, primenjuje se u proizvodnji sofisticiranih proizvoda, koja podrazumeva upotrebu novih materijala i realizaciju kompleksne geometrije. Određeni proizvodi se prilagođavaju potrebama kupaca, uz poštovanje zahteva projekatana. U tom kontekstu, AP može da postane ključna tehnologija za masovnu proizvodnju proizvoda.

Tehnologija 3D štampe omogućava izmene na modelu pre puštanja u proizvodnju. Ove izmene je jednostavno realizovati pomoću nekog od raspoloživih CAD programa. Konceptualni CAD model na računaru kasnije se realizuje kao 3D objekat na štampaču [2]. Međutim, prema Cupari dr. [3] za 3D štampu potrebno je napredno tehničko znanje u pripremi, zadavanju parametara, kao i pri samom postupku realizacije štampe.

2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA - ZNAČAJ

Aditivna tehnologija ima primenu u sledeća tri slučaja, [4,5,6]:

- razvoj i izrada prototipova (brza izrada prototipova);
- razvoj i izrada alata (brzi alati) i
- brza proizvodnja.

Prikaz 3D modela centralnog dela kutije i radne površine sa teorijskom putanjom brizgaljke, dat je na slici 1. Prema Bose i dr. [7], za postizanje što bolje preciznosti i rezolucije na 3D štampačima, potrebno je da rastojanje između slojeva bude što manje, koje isključivo zavisi od karakteristika materijala i parametara konstrukcije. S tim u vezi, korišćena je popunjenost od 100%. Program Ultimaker Cura deli model na tanke slojeve, posmatrano po vertikali. Pre procesa realizacije i ispisa ***gcod**, program nudi mogućnost simulacije postupka AP za 3D model koji će biti realizovan. Vizualizacijom procesa izrade na 3D štampaču jasnije se

¹⁾dr Danijela Živojinović, prof. strukovnih studija, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, odsek: kompjutersko-mašinsko inženjerstvo (danijela.zivojinovic@yahoo.com)

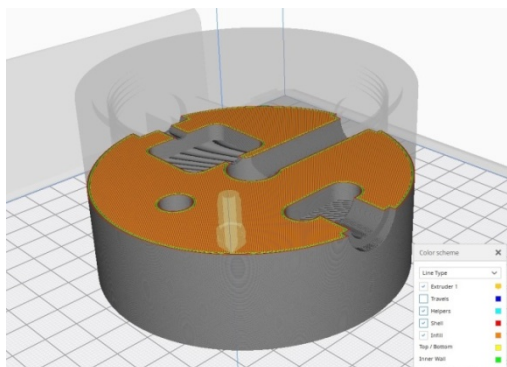
²⁾prof. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs)

³⁾dr Marija Baltić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mbaltic@mas.bg.ac.rs)

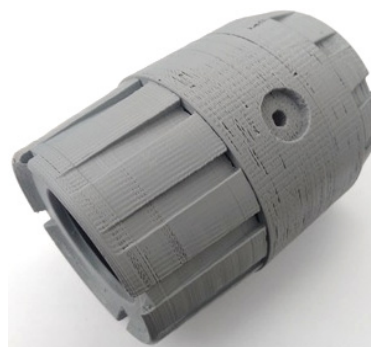
⁴⁾prof. dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (asimonovic@mas.bg.ac.rs)

⁵⁾Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

uočavaju potencijalne greške i to pre samog postupka proizvodnje. Pravovremenim otklanjanjem grešaka vrši se ušteda u vremenu i troškovima izrade dela.



Slika 1. Prikaz radne površine Ultimaker Cura



Slika 2. Realizovana kutija od PLA (bez obrade)

Pri realizaciji kutije elektronike korišćeni su sledeći parametri: 1) 215°C za brizgaljku (printing temperature), 2) 60°C za podlogu (build plate temperature), 3) 50 mm/s, brzina štampe (print speed), 4) 70 mm/s, brzina kretanja brizgaljke u praznom hodu (travel speed) i 5) 90/-45/0/+45, orijentacija ispune (infill orientation).

Prilikom formiranja slojeva, veoma važnu ulogu igraju: temperature topljenja u brizgaljki i temperature radne podloge. U ovom slučaju, PLA postaje tečan na temperaturi od 150°C, zatim se zagreje do tačke topljenja do 210°C i nakraju procesa se ohladi [8]. Ovde postoji rizik, da će hlađenje po slojevima biti nelinearno, što na kraju daje nepravilan oblik i dimezije dela (netačna geometrija). U tom slučaju, treba obezbediti da temperaturna razlika između brizgaljke i radnog dela bude što manja.

Kompletno realizovana kutija elektronike na 3D štampaču prikazana je na slici 2. Sa slike se može uočiti da postoje mnoge nepravilnosti u realizaciji definisanih površina što zahteva dodatnu obradu. Međutim, to u pomenutom smislu nije predmet ovog rada.

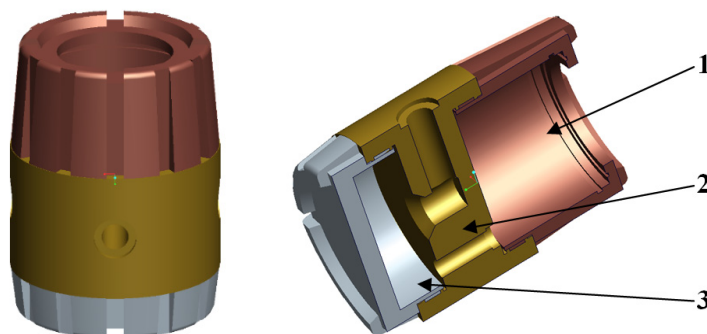
3. STRUKTURNA ANALIZA SKLOPA KUTIJE

3.1. Ulazni podaci

Ideja ovog rada je da se ispita kutija elektronike koja je izrađena na 3D štampaču. Realizacijom kutije, projektantima je omogućeno da isprave eventualne greške nastale tokom procesa projektovanja, ali i da se izvrše dodatne modifikacije prema zahtevima krajnjih korisnika.

U radu je analizirana nosivost sklopa kutije elektronike pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja.

Osnovni elementi kutije elektronike su: 1) poklopac bez otvora, 2) centralni deo i 3) poklopac sa otvorom, videti sliku 3.



Slika 3. Model sklopa kutije elektronike:

1 – poklopac sa otvorom, 2 – centralni deo, 3 – poklopac bez otvora

Poklopac sa otvorom je dublji, jer se u njemu smešta elektronika i služi za očitavanje podataka ispisanih na displeju elektronike. U poklopcu sa otvorom smešteni su: 1) staklo, 2) plastični odstojnik i 3) Zegerov

uskočni prsten. Komponente sklopa su međusobno povezane posredstvom navoja. Sva tri dela izrađena su od materijala PLA (izotropnog materijala), sa sledećim mehaničkim karakteristikama, videti tabelu 1:

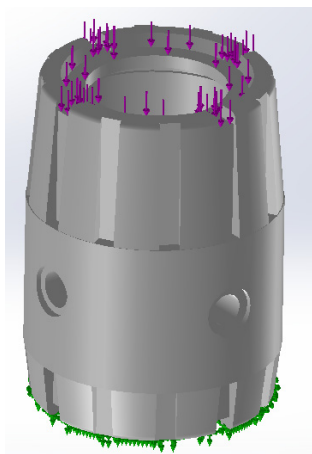
Tabela 1. Mehanička svojstva PLA materijala

Oznaka	Opis	Jednica	Vrednost
E	Jangov modul elastičnosti	[N/mm ² =MPa]	3 500
ν	Poasonov koeficijent	-	0.36
σ_t	Napon na granici tečenja	[N/mm ² =MPa]	49.6
σ_m	Zatezna čvrstoća	[N/mm ² =MPa]	73

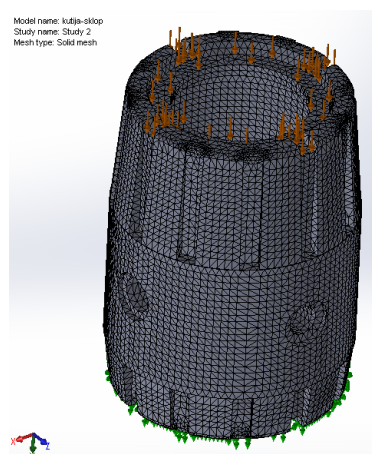
U radu je analiziran uticaj aksijalne (pritisne) sile F na nosivost konstrukcije. Kao maksimalna vrednost opterećenja usvojena je sila od $F_{max}=150$ daN. U radu je izvršen proračun nosivosti kutije u slučaju da se na istu nehodično, svom svojim težinom, nasloni operater pri radu, odnosno ispituje se situacija izdržljivosti kutije pri dejstvu maksimalno mogućeg opterećenja.

3.2. Numerički proračun

Numerički proračun je rađen u okviru programa SolidWorks/Simulation. Izmodelirani su pojedinačni delovi sklopa, a potom su spojeni u sklop, videti sliku 4. Pritisna sila deluje na gornjoj površini poklopca sa otvorom, dok je na suprotnom kraju (donjoj površini poklopca bez otvora) definisano konzolno ukleštenje (svih 6 stepeni slobode su fiksirani) [9].



Slika 4. Prikaz dejstva opterećenja na sklopu kutije elektronike



Slika 5. 3D model sklopa kutije sa generisanom konačno-elementnom mrežom

Na 3D modelu sklopa kutije, kreirana je konačno-elementna mreža (slika 5), pri čemu je korišćena metoda konačnih elemenata (MKE). U sklopu su formirani tetraedarski i heksaedarski konačni elementi (3D elementi). Na mestima naglih promena geometrije (zarezi, žljebovi i sl.) program automatski generiše sitniju mrežu, kako bi se na mestima potencijalne koncentracije napona izvršio što tačniji numerički proračun. Formirana konačno-elementna mreža sadrži ukupno 181.500 konačnih elemenata.

3.3. Dobijeni rezultati proračuna i analiza

Kako bi se analizirala nosivost date konstrukcije sklopa, a potom donele i primenile adekvatne mere u cilju obezbeđenja integriteta konstrukcije, neophodno je izvršiti proračun sledećih veličina:

- von Mises-ov napon u svakoj tački strukture: $\sigma = \sigma(x, y, z)$,
- deformacija strukture: $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$,
- tzv. faktor sigurnosti (*FOS-Factor Of Safety*): $FOS = FOS(x, y, z)$.

Von Mises-ov napon predstavlja ekvivalenti (rezultujuć) napon u strukturi pod dejstvom aplikovanog opterećenja [9,10]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

Faktor sigurnosti ili koeficijent sigurnosti (*FOS-Factor Of Safety*) se može predstaviti sledećom jednačinom [9,10]:

$$FOS(x, y, z) = \frac{\sigma_t}{\sigma(x, y, z)} \quad (2)$$

Kao rezultati proračuna u adekvatnom software-u dobijaju se gore navedene i tražene veličine.

Ukupno je analizirano 9 vrednosti intenziteta sile i to: $F = \{70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150\}$ daN. Dobijeni rezultati proračuna: distribucija napona u strukturi- $\sigma = \sigma(x, y, z)$, deformacija strukture- $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$, kao i raspodela faktora sigurnosti- $FOS = FOS(x, y, z)$, su prikazani grafički (tabela 2).

Tabela 2. Prikaz distribucije von Mises-ovog napona- σ , deformacije- ε i tzv. faktora sigurnosti-FOS

Rezultati	F=70 daN	F=110 daN	F _{max} =150 daN
von Mises naponi $\sigma = \sigma(x, y, z)$			
Deformacije $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$			
Faktor sigurnosti-FOS			

Analizom gore prikazanih rezultata proračuna, dolazi se do sledećih zaključaka:

- napon u strukturi ne prelazi vrednost napona na granici tečenja (σ_t), štaviše značajno je ispod ove vrednosti. Samim tim, sve nastale deformacije u strukturi su male i elastične (povratne). Po prestanku

dejstva sile, struktura se vraća u prvobitno stanje. Dakle, rezultati proračuna ukazuju na to da su deformacije u linearno-elastičnoj oblasti.

- Maksimalne vrednosti napona i deformacije se javljaju na poklopcu sa otvorom. U toj zoni, osim aksijalnog naprezanja (pritiska), javlja se i savijanje na tzv. prstenastoj konzoli.
- Faktor sigurnosti je značajno iznad vrednosti 1, što ukazuje na to da naponi koji se javljaju u strukturi pod dejstvom aplikovanog opterećenja su značajno manji od napona na granici tečenja. Što znači da konstrukcija ima deleko veću nosivost od potrebne.
- Na pojedinim mestima u konstrukciji dolazi do lokalnog rasta napona, što je posledica postojanja tzv. koncentratora napona (zarezi, žlebovi i sl.). Ovo se prevazilazi dodavanjem zaobljenja, koji su na modelu tendenciozno ukinuti iz razloga pojednostavljenja numeričkog proračuna.

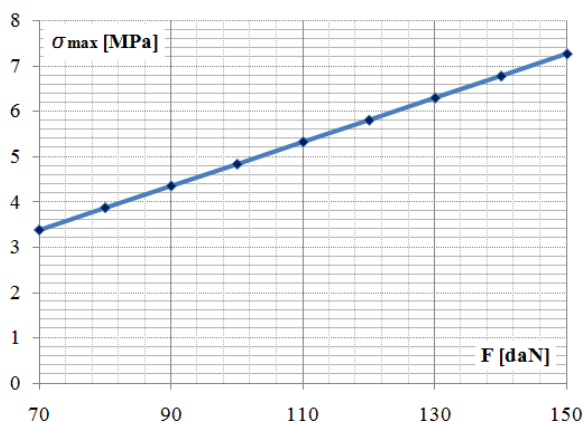
Posebno je analiziran ekstremni slučaj opterećenja pri $F_{max}=150$ daN. I u slučaju ekstremnih opterećenja, deformacije kutuje su veoma male, što ne remeti samu formu kutije. Samim tim, obezbeđuje se funkcionalnost kutije elektronike, jer je njena osnovna namena da služi za smeštaj elektronike. Takođe, elektronika je bezbedna, tj. neće doći do njenog oštećenja, jer i pod dejstvom maksimalno aplikovanog opterećenja struktura ima integritet. Dakle neće doći do njenog loma niti do pojave većih neželjenih elastičnih, niti do još većih trajnih plastičnih deformacija.

U tabeli 3, analizom spektra vrednosti opterećenja dati su podaci funkcionalne zavisnosti maksimalnog napona- σ_{max} i maksimalne deformacije- ϵ_{max} od intenziteta sile F . Dobijaju se sledeće zavisnosti:

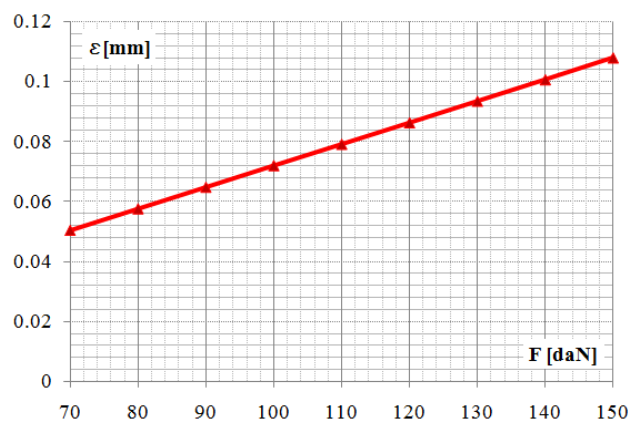
Tabela 3. Tabelarni prikaz zavisnosti maksimalnog napona i maksimalne deformacije od intenziteta sile F

Sila F [daN]	Maksimalni napon - von Mises σ_{max} [MPa]	Maksimalna deformacija ϵ_{max} [mm]
70	3.39	0.0504
80	3.88	0.0576
90	4.36	0.0648
100	4.84	0.0720
110	5.33	0.0792
120	5.81	0.0863
130	6.30	0.0935
140	6.78	0.1007
150	7.27	0.1080

Na dijagramima (slika 6 i slika 7) uočavaju se linearne zavisnosti maksimalnog napona σ_{max} , odnosno maksimalne deformacije ϵ_{max} u strukturi od intenziteta primenjenog opterećenja F .



Slika 6. Dijagram zavisnosti maksimalnog napona σ_{max} od intenziteta sile F



Slika 7. Dijagram zavisnosti maksimalne deformacije ϵ_{max} od intenziteta sile F

4. ZAKLJUČAK

Ukoliko se uporede karakteristike kutija napravljenih od dva različita materijala, aluminijuma (Al) i PLA, dolazi se do sledećih zaključaka:

- PLA je jeftiniji materijal (ekonomski aspekt);
- proizvodnja sklopa kutije od PLA je jednostavnija i isplativija;

- masa sklopa kutije napravljene od PLA iznosi $m_{PLA}=0.639$ kg, dok je masa iste takve kutije od aluminijuma $m_{Al}=1.380$ kg. To znači daje masa PLA kutije čak više od 2 puta manja u odnosu na sklop proizveden od aluminijuma (gustina $\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$, dok je $\rho_{PLA} = 1250 \text{ kg/m}^3$). Proizvodnjom PLA kutije vrši se ušteda u količini upotrebljenog materijala (ušteda u materijalu);
- nosivost sklopa kutije napravljenog od PLA je više nego zadovoljavajuća (strukturni aspekt);
- PLA je reciklabilan (biorazgradiv), tako da je njegovom upotrebom uključen i aspekt zaštite životne sredine.

Analizom svih aspekata dolazi se do zaključka da PLA materijal ispunjava sve potrebne zahteve i da ima prednost u odnosu na dosada upotrebjavani aluminijum, te da se može upotrebiti za izradu sklopa kutije elektronike, ali u ograničavajućem domenu primene.

6. LITERATURA

- [1] Lu, B., Li, D., Tian, X.: *Development trends in additive manufacturing and 3D printing*. Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 85-89, 2015.
- [2] Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B.: *Could 3D printing change the world? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Atlantic Council, Washington DC, 2011.
- [3] Cupar, A., Pogačar, V., Stjepanović, Z.: *Shape verification of fused deposition modelling 3D prints*. International journal of information and computer science, Vol. 4, pp.1-8, 2015.
- [4] Chen, T., Lin, Y. C.: *Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3d printing: a review*. International Journal of Intelligent Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 394-413, 2017.
- [5] Bibb, R., Winder, J.: *A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques*. Radiography, Vol. 16, No. 1, pp. 78-83, 2010.
- [6] Campbell, R.I., De Beer, D.J., Pei, E.: *Additive manufacturing in South Africa: building on the foundations*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 156-162, 2011.
- [7] Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A.: *Bone tissue engineering using 3D printing*. Materials today, Vol. 16, No. 12, pp. 496–504, 2013.
- [8] Shah, J., Snider, B., Clarke, T., Kozutsky, S., Lacki, M., Hosseini, A.: *Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.104, No. 9-12, pp. 3679–3693, 2019.
- [9] Jones, R.: *Deformation theory of plasticity*, Bull Ridge Corporation, 2009.
- [10] Young, W.C., Budynas, R.G., Sadegh, A.M.: *Roark's Formulas For Stress And Strain*, Amayon, Vol. 7, New York: McGraw-Hill, 2002.

Danijela Živojinović, Jelena Svorcan, Marija Baltić, Aleksandar Simonović

ELECTRONIC ENCLOSURE - STRUCTURAL ANALYSIS AND MANUFACTURING

Abstract: Additive manufacturing helps organizations to save money in the design process and reduce the cost of prototypes. In this paper, the electronics enclosure is analyzed. The enclosure was modeled in one of the 3D software packages, then a structural analysis was done, and finally, a model was made on a 3D printer. The enclosure is made of biodegradable thermoplastic material PLA. The idea of this paper is to show how additive technology can replace conventional technology in those places that are not critical and risky. Structural analysis has shown that the plastic enclosure can withstand a load of 150 daN. This is important from the aspect of making a plastic product instead of a metal one.

Key words: Additive manufacturing, PLA, Electronic enclosure, Structural analysis, 3D printing

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



38. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, oktobar 2020.

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 1

Tanović, Lj., Živanović, S., Puzović, R., Kokotović, B., Popović, M., Slavković, N., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N. RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2019. GODINU.....	3.1
Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A. UTICAJ KINEMATSKE VISKOZNOSTI MAZIVA NA GENERISANU TOPLOTU SKLOPA GLAVNOG VRETENA	3.22
Gostimirović, M., Pavkov, B., Rodić, D., Sekulić, M. APLIKACIJA ZA MODELIRANJE I IZBOR MERODAVNIH REŽIMA OBRADNE PRI STRUGANJU.....	3.29
Jovančičević, L., Popović, M., Pjević, M., Tanović Lj. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UGLA ELASTIČNOG VRAĆANJA KOD ŠIREG SPEKTRA MATERIJALA.....	3.35
Kalabić R., Popović M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović Lj. ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA OBRADNE NA POKAZATELJE KVALITETA PRI OBRADI REZANJEM POLIMERA	3.41
Mladenović, C., Zeljković, M., Košarac, A. DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNOG SISTEMA PRIMENOM FREKVENTNE ANALIZE SIGNALA VIBRACIJA	3.47
Stefanović, Lj., Milutinović, M., Movrin, D., Vilotić, M., Skakun P., Vilotić, D., Dačević, N. Randelović, S PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U IZRADI MALOSERIJSKIH ALATA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE	3.53
Tabaković, S., Zeljković, M., Hadžistević, M ODREĐIVANJE GREŠAKA POZICIONIRANJA NUMERIČKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI PRIMENOM KRUŽNOG TESTA PREMA ISO230-4.....	3.61
Tešić, S., Zeljković, M., Mladenović, C., Grujić, J. UTICAJ REŽIMA REZANJA NA POSTOJANOST ALATA KOD GLODANJA BIOKOMPATIBILNOG ČELIKA 316LVM.....	3.67

← NAZAD

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 2

Baltić, M., Peković, O., Svorcan, J., Kovačević, A. METODE PROIZVODNJE KOMPOZITNIH LOPATICA VETROTURBINA SA HORIZONTALNOM OSOM OBRATANJA.....	3.73
Kurbegović, R., Janjić, M., Vukčević, M., Đurović, D. UTICAJ PARAMETARA OBRADNE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM NA ODSTUPANJE PREDNJE LINIJE REZA	3.81
Lazarević, D., Nedić, B., Mišić M., Šarkočević Ž., Čamagić, I. TAČNOST OBRADNE VRETNASTIM GLODALOM U FUNKCIJI ŠIRINE REZANJA.....	3.88
Lukić, N., Petrović, P. B., Matijašević L. KONCEPTUALNI ASPEKTI KRUTOSTI KONFIGURACIONOG PROSTORA NULE RELEVANTNI ZA PROCES ROBOTIZOVANOG SPAJANJA	3.94
Matijašević, L., Petrović, P., Lukić, N. PODAKTUIRANI SISTEMI ZA ROBOTSKO HVATANJE I MANIPULACIJU OBJEKTIMA U TEHNOLOGIJI ROBOTSKE MONTAŽE – RAZVOJ CMSysLab ROBOTSKE ŠAKE	3.100
Vasilić, G., Živanović, S. UTICAJ REZOLUCIJE RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA NA TAČNOST KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE ZA PROCES OBRADNE SEČENJA ŽICOM.....	3.106
Vidaković, J., Štepanić, P., Dimić, Z., Rakić, A. SIMULACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA UREĐAJA ZA PROSTORNU DEZORIJENTACIJU PILOTA.....	3.116
Vorkapić, N., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z. PROGRAMIRANJE TROOSNIH NU GLODALICA SA DVE TRANSLATORNE I JEDNOM OBRATNOM OSOM	3.122
Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N., Kokotović, B. ANALIZA PRIMENE NOVOG METODA PROGRAMIRANJA CNC STRUGOVA PRIMENOM STEP-NC PROTOKOLA	3.129

← NAZAD



Lj. Tanović, S. Živanović, R. Puzović, B. Kokotović, M. Popović, N. Slavković,
G. Mladenović, S. Stojadinović, M. Pjević, N. Vorkapić¹

RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA² REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2019. GODINU

Rezime

Predmet istraživanja je nova generacija domaćih obradnih sistema, zajedno sa proizvodnim tehnologijama, koje su potrebne za razvoj tih obradnih sistema i za njihov nesmetani rad. Ključne oblasti istraživanja u ovim tehnologijama su mašine alatke, roboti, alati, tehnološki procesi i digitalni kvalitet. Istraživanja su usmerena ka tehnologijama otvorene arhitekture, u pogledu sistema upravljanja i programiranja, ali i u pogledu struktura ovih sistema, prateći aktuelna istraživanja u ovim oblastima. Tako se obezbeđuju fleksibilnost tehnoloških resursa i agilnost kompanija, kojima su i namenjeni ovi novi obradni sistemi, sa svojim pratećim tehnologijama. Ovde se daje pregled rezultata istraživanja za 2019. godinu, čime je zaokružen ovaj devetogodišnji ciklus projekata.

Ključne reči: obradni sistem, tehnologije, mašina alatka, obrada robotom, mikrozrezanje, digitalni kvalitet

1. UVOD

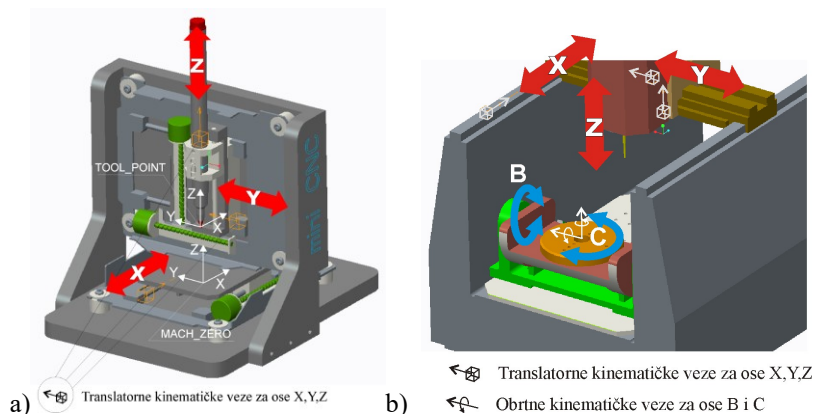
U okviru projekta "Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema", kompanije se posmatraju kao mreže svojih resursa, ali i kao delovi globalnih mreža resursa, da bi se uspostavila dinamičnost njihovih struktura u prihvatanju izazova tržišta. To je osnova brzog i globalnog transfera informacija, kao uslova za stalnu optimizaciju struktura tehnologija za nove proizvodne programe. Ovde su dati kratki prikazi rezultata istraživanja u 2019. godini za ključne oblasti: *mašine* (mašine alatke i robote), *tehnologije* (alate i tehnološke procese) i *kvalitet* (digitalnu kompaniju i digitalni kvalitet).

U 2019. godini, u okviru Faze 9, planiran je nastavak istraživanja za teme 1,2,3,5 i 6, koja su izvedena prema sledećem planu: *Tema 1:* Multifunkcionalna mašina alatka, aktivnosti 66 i 67. U aktivnosti 66 se planira konfigurisanje i integrisanje virtuelnih mašina alatki (troosnih i petoosnih) sa sistemom za programiranje i upravljanje. U aktivnosti 67 se planira analiza metoda programiranja, verifikacije i simulacije tehnologija dodavanja materijala. *Tema 2:* Virtuelna proizvodnja i obrada robotima, aktivnosti 68 do 70. U domenu virtuelne proizvodnje u okviru aktivnosti 68 planira se Off-line optimizacija CNC obrade na bazi simulacionog modela sila rezanja. U oblasti obrade robotima se planiraju dve aktivnosti i to 69 i 70. U aktivnosti 69 je planirana verifikacija korigovane putanje alata primenom modela virtuelnog robota koji uključuje i sile rezanja, dok je u aktivnosti 70 planiran novi pristup primene STEP-NC standarda za programiranje robota robotskim programskim jezikom. *Tema 3:* Istraživanje i razvoj prototipa mini industrijske i edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom, aktivnost 71. U okviru aktivnosti 71 planiran je razvoj mini CNC mašine alatke sa sistemom upravljanja otvorene arhitekture, koji obuhvata konfigurisanje virtuelnog prototipa, realizaciju prototipa i upravljanja za troosnu mini CNC mašinu alatku. *Tema 5:* Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera), aktivnosti 72 i 73. Aktivnosti 72 obuhvata analizu interakcije alata i obratka pri mikro rezanju materijala na bazi mermera i granita. U okviru aktivnosti 73 je planiran razvoj autonomnog sistema za optimizaciju procesa obrade glodanjem delova sa složenim površinama. *Tema 6:* Digitalna kompanija/kvalitet–ontološki prilaz, aktivnost 74. U okviru aktivnosti 74, planirana je verifikacija merne putanje pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu.

¹ Prof dr Ljubodrag Tanović, ltanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Saša Živanović, szivanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Radovan Puzović, rpuzovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Branko Kokotović, bkokotovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Mihajlo Popović, mpopovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Nikola Slavković, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Goran Mladenović, gmladenovic@mas.bg.ac.rs, doc dr Slavenko Stojadinović, sstojadinovic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Miloš Pjević, Nikola Vorkapić, mast. inž. maš., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

² U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105, od 24.01.2020. godine.

2. KONFIGURISANJE I INTEGRISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ALATKI (TROOSNIH I PETOOSNIH) SA SISTEMOM ZA PROGRAMIRANJE I UPRAVLJANJE



a) Troosna mini CNC mašina alatka (X'OYZ) b) Petoosna mašina alatka (C'B'VXYZ)

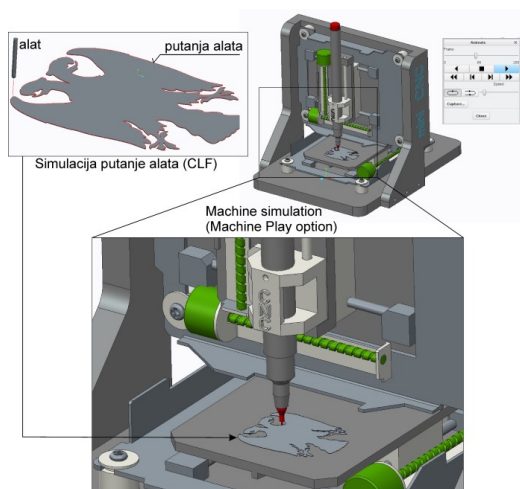
Slika 2.1 Definisane kinematičkih veza u CAD/CAM okruženju

i/ili programa za obradu (G - kôda). Pri tome je ovaj poslednji vid simulacije koji uključuje kompletan model mašine, koja radi po zadatom programu, vrlo značajan za petoosne obrade zbog mogućnosti uočavanja eventualnih kolizija koje se ne mogu uočiti prethodno pomenutim simulacijama. U okviru ove aktivnosti su razmatrane dve mašine i to: jedna troosna mini CNC mašina alatka strukture X'OYZ (Slika 2.1a) i jedna petoosna sa dve obrtne ose na grani obratka strukture C'B'VXYZ (Slika 2.1b).

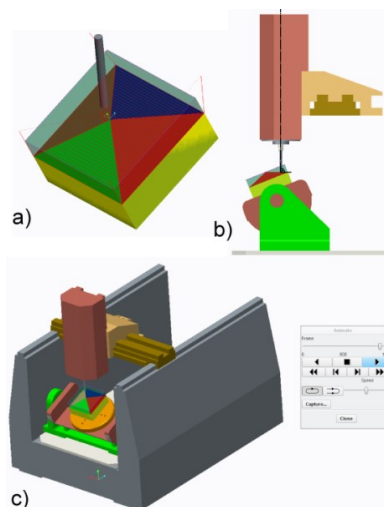
Programiranje razmatranih mašina je uobičajeno primenom CAD/CAM sistema. Integracija virtuelnih mašina u sistem za programiranje omogućava simulaciju rada virtuelnih mašina koje rade po zadatom programu.

Faze za konfigurisanje virtuelne mašine alatke su: (1) Opis kinematičke strukture mašine alatke, odnosno njenog skeleton modela; (2) Kompletiranje CAD modela virtuelne mašine alatke, odnosno, modeliranje baznih komponenata modela mašine. Ako model mašine već postoji, koristi se model mašine alatke obično u STEP i STL formatima; (3) Definisane kinematičkih veza i pokretljivosti osa mašine, podrazumeva analizu modela virtuelne mašine alatke i integrisanje odgovarajućih kinematičkih veza, koje će omogućiti pokretljivost elemenata mašine, slika 2.1. Ovde je potrebno i korektno definisati smerove i hodove pokretnih komponenata mašine, kako translatorskih tako i obrtnih. Na kraju ove faze neophodno je analizirati pokretljivost modela u definisanim granicama; (4) Simulacija rada virtuelne mašine alatke po zadatom programu, koji u zavisnosti od primenjenog okruženja za programiranje i metoda programiranja može najčešće biti, putanja alata (CLF – Cutter Location File) ili G kôd. Ovakva simulacija obrade omogućava učitavanje kompletnog modela virtuelne mašine alatke za potrebe verifikacije programa.

Primeri simulacije rada virtuelnih mašina u CAD/CAM okruženju PTC Creo, za obe razmatrane mašine je pokazani su na slikama 2.2 i 2.3.



Slika 2.2 Simulacija rada virtuelne troosne mašine



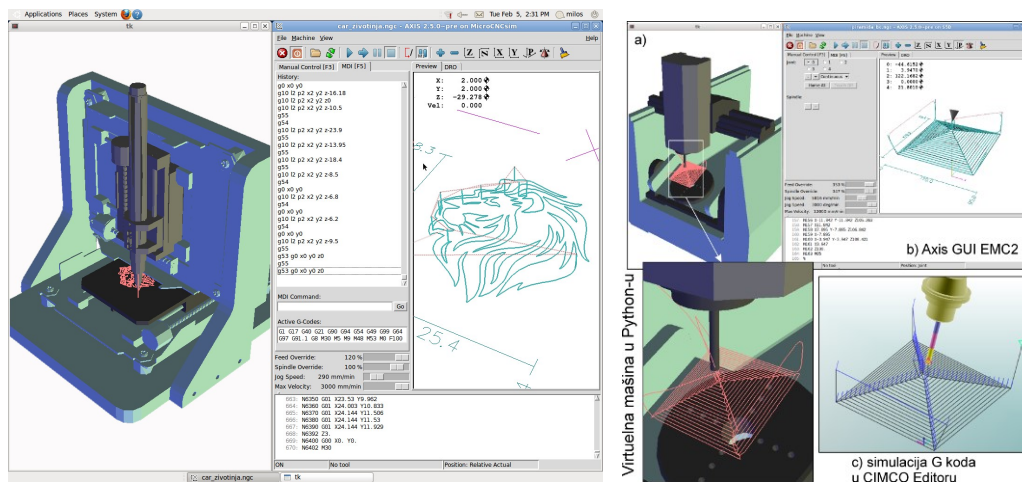
Slika 2.3 Simulacije rada petoosne mašine S5D za zadati program obrade

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 1: Multifunkcionalna mašina alatka. U Aktivnosti 66, razmatrano je konfigurisanje i integrisanje virtuelnih mašina alatki sa sistemom za programiranje i upravljanje. Razmatrane su troosne i petoosne mašine alatke. Primena CAD/CAM sistema u domenu verifikacije programa omogućava prikaz simulacije putanje alata, simulaciju uklanjanja materijala (NC Check), simulaciju rada kompletnog modela mašine alatke na bazi putanje alata (Cutter Location File – CLF)

Cilj tokom istraživanja u ovoj aktivnosti je bio i da se ostvari simulacija rada virtuelne mašine alatke, koja se upravlja na isti način kao i stvarna mašina i koja je integrisana sa upravljačkim sistemom, ovde Linux CNC sistem EMC2, za krajnju verifikaciju programa pre puštanja mašine u rad. Pored toga, kada se vrši razvoj nove mašine alatke, virtuelna mašina integrisana sa upravljanjem je i način da se verifikuje upravljanje i kinematički model mašine koji je integrisan u sistem upravljanja. Na taj način je moguće imati testirano upravljanje i pre realizacije same mašine.

Konfigurisanje virtuelne mašine integrisane sa upravljanjem je realizovano primenom Python objektno orijentisanog programskog jezika, koji se koristi i za programiranje grafičkih korisničkih interfejsa i omogućava programiranje i povezivanje geometrijskih primitiva, kao i njihovu integraciju sa LinuxCNC sistemom upravljanja. U njemu je programirano i samo okruženje Axis, koje se koristi kao GUI (Graphical User Interface) za LinuxCNC upravljanje. Povezivanjem virtuelne mašine alatke sa upravljačkim jezgrom LinuxCNC sistema kompletira se i virtuelna mašina u OpenGL 3D grafičkom okruženju za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja.

Za potrebe konfigurisanja razmatranih virtuelnih mašina u ovoj aktivnosti iskorišćeni su kompletni modeli svih podsklopova mašina, koje su modelirane u CAD/CAM okruženju. Potrebno je sve podsklopove pripremiti u Ascii STL ili Ascii OBJ formatu, koje Python može direktno učitati u referentnom koordinatnom sistemu, nakon čega treba komponente orijentisati i postaviti na odgovarajuće mesto u sklopu virtuelne mašine. Kao rezultat se dobijaju virtuelne mašine u Python 3D okruženju, integrisane sa grafičkim interfejsom Axis, slika 2.4. Virtuelna mašina radi u posebnom prozoru i omogućava kretanje osa mašine, sa iscrtavanjem putanje alata. Ova simulacija je nastala kao rezultat izvršenja programa (G - kôda) u realnom vremenu, na isti način kao da se vrši upravljanje stvarnom mašinom.



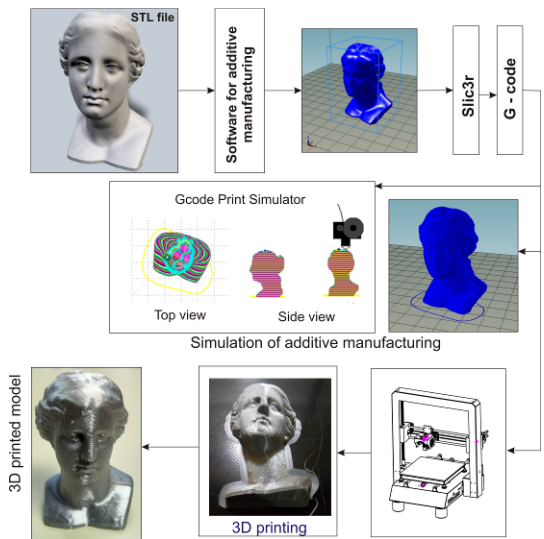
Slika 2.4 Simulacija rada virtuelnih mašina integrisanih sa sistemom upravljanja Linux CNC

3. PROGRAMIRANJE, VERIFIKACIJA I SIMULACIJA TEHNOLOGIJA DODAVANJA MATERIJALA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 1: Multifunkcionalna mašina alatka. U Aktivnosti 67, razmatrano je programiranje, verifikacija i simulacija tehnologija dodavanja materijala, za mašine koje se koriste za brzu izradu prototipova postupcima dodavanja materijala.

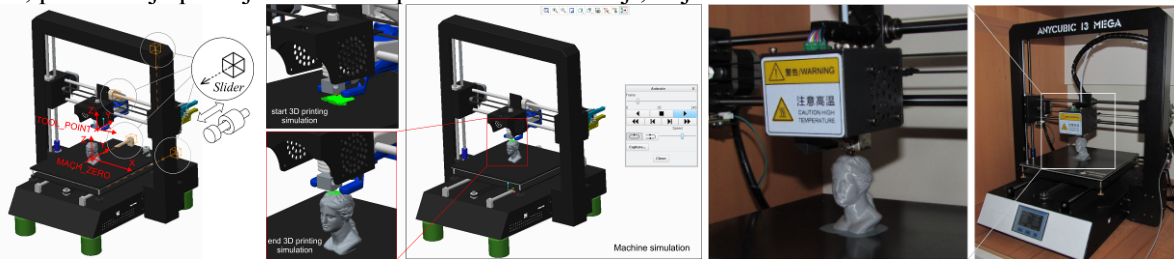
Brza izrada prototipova je danas jedna od ključnih tehnologija koje omogućavaju, skraćivanje vremena projektovanja i vreme razvoja proizvoda. Ove tehnologije omogućavaju brzu izradu fizičkih modela, funkcionalnih prototipova i malih serija delova direktno iz CAD modela. Ova tehnologije su poznate i kao aditivne tehnologije, proizvodnja u slojevima, izrada dodavanjem materijala ili 3D štampa. Primena novih tehnologija brze izrade prototipova dodavanjem materijala bazirana je na modelima u STL formatu. U okviru ove aktivnosti se razmatraju metodi za programiranje i simulaciju dodavanja materijala u cilju verifikacije programa upravljanja.

Kao model za analizu programiranja i simulacije dodavanja materijala, korišćen je model Afrodite (Venus) u STL formatu. Razmatrano je programiranje dodavanjem materijala pomoću tehnologije fuzionog deponovanja materijala (FDM – Fused Deposition Material), slika 3.1. Korišćeni su specijalizovani softveri za programiranje i simulaciju dodavanja materijala i oni mogu da simuliraju putanju mlaznice dodavanja

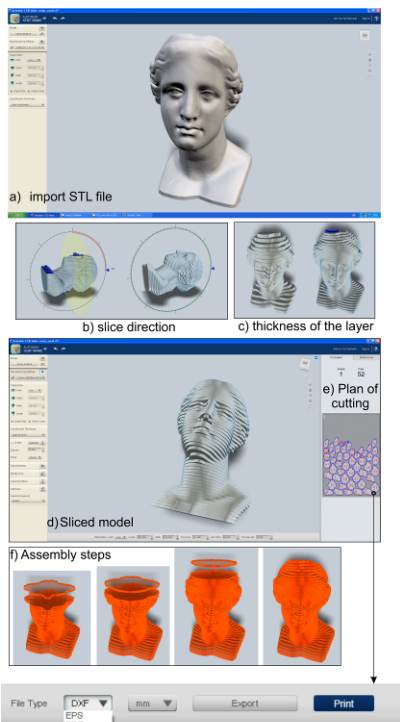


Slika 3.1 Programiranja i simulacija dodavanjem materijala na primeru FDM

3D štampača koji se koristi sve translacije i podrazumevaju definisanje veza tipa Slider. Potrebno je definisati odgovarajuće koordinatne sisteme obratka i radnog stola (MACH_ZERO) i koordinatni sistem alata (ovde mlaznice) - TOOL_POINT, slika 3.2. Za dobijanje putanje po kojoj će se kretati mlaznica mašine, potrebno je putanju iz G koda pretvoriti u DXF fajl, koji se učitava u CAM modul.



Slika 3.2 Simulacija rada 3D štampača u CAD/CAM okruženju i prikaz rada u realnom okruženju



Slika 3.3 Generisanje slojeva sečenja i simulacija dodavanja materijala sloj po sloj na primeru softvera 123Dmake

materijala, ali ne mogu da uključe u simulaciju i model virtualne mašine za aditivnu gradnju (3D štampač). Ovakve simulacije koriste generisani G kod za prikaz putanje mlaznice. Ovo je uobičajena opcija specijalizovanih softvera za 3D štampu, a takođe postoje i nezavisni programi za simulaciju već generisanog programa za 3D štampu kao što je G code Print Simulator. Sa druge strane, standardna karakteristika većine CAD/CAM sistema je mogućnost simulacije koja uključuje i virtuelnu mašinu alatku koja radi na osnovu programa.

Za sada postoji mala mogućnost direktne simulacije virtualne mašine za postupke dodavanja materijala, ali je to moguće ostvariti indirektnim putem u CAD/CAM okruženju (PTC Creo), na sličan način kao i za glodalicu. Ova indirektna metoda podrazumeva da se mašina za aditivnu proizvodnju modelira na isti način kao i glodalica sa istom kinematikom, koja podrazumeva modeliranje mašine sa svim kinematičkim vezama, koje su ovom slučaju za primer

Kao drugi primer pripreme za izradu istog modela, koji se formira na bazi dodavanja kompletnih 2D slojeva, korišćene su mogućnosti softvera Autodesk 123D Make, koji omogućava izradu lejera, slično kao kod postupka dodavanja materijala u slojevima LOM (Laminated Object Manufacturing). Primer generisanja slojeva, i dobijanja plana sečenja, koja uključuje i simulaciju dodavanja materijala sloj po sloj, pokazan je na slici 3.3a. Nova verzija softvera je poznata pod imenom Slicer for Autodesk Fusion 360, koja ima iste mogućnosti kao i prvobitna verzija softvera.

Generisanje slojeva sečenja u softveru Autodesk 123D Make, je pokazano na slici 3.3a. Kao ulaz se koristi model u STL formatu (Import STL file). Program nudi nekoliko opcija za generisanje modela i načina gradnje. Za razmatrani primer je korišćena opcija sečenja modela paralelnim ravnima (Stacked slices), koje je moguće orijentisati prema najpovoljnijoj ravni modela za njegovu gradnju, slika 3.3b. Izborom opcije Manufacturing settings, zadaju se osnovni parametri za gradnju modela, od kojih je najznačajnija debljina sloja, slika 3.3c. Prikaz modela nakon konačno usvjene debljine jednog sloja je pokazan na slici 3.3d. Nakon toga je moguće generisati plan sečenja (Get Plans option), slika 3.3e. Moguće je izabrati dve opcije: Simple i Nested layers. Druga opcija je povoljnija jer pravi optimalni raspored slojeva na izabranoj veličini materijala. Na ovaj način se dobija 2D plan sečenja svih slojeva, koji se iz softvera mogu generisati u različitim formatima EPS, DXF i PDF, slika 3.3. Na osnovu izlaza u DXF formatu moguće je lako generisati i program za mašinu za sečenje



Slika 3.4 Model dobijen lepljenjem slojeva kartona

laserom kojom se mogu iseći svi potrebni slojevi za gradnju fizičkog modela, lepljenjem svih slojeva prema planu gradnje.

Softver takođe poseduje i mogućnost simulacije dodavanja materijala, korišćenjem opcije Assembly Steps, slika 3.3f, koji omogućava simulaciju dodavanja slojeva i virtuelno kreiranje modela. Dobijeni model sečenjem kartona debljine 1mm, po slojevima i lepljenjem svih slojeva prema rednom broju, pokazan je na slici 3.4. Svaki sloj se u odnosu na prethodni pozicionira pomoću markera koji su obeleženi na svakom sloju. Ovaj model je samo ilustracija metoda aditivne gradnje s

obzirom da je debljina slojeva velika, a samimi tim i dobijeni model ima vrlo grubi izgled. Korišćenjem tanjih slojeva papira može se dobiti verniji prikaz modela.

4. OFF-LINE OPTIMIZACIJA CNC OBRADE NA BAZI SIMULACIONOG MODELA SILA REZANJA

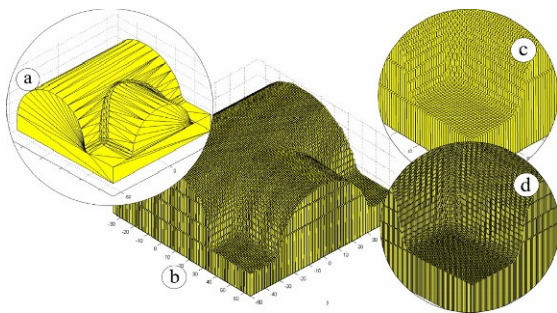
Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 68, razmatrana je Off-line optimizacija CNC obrade na bazi simulacionog modela sila rezanja.

U okviru ove aktivnosti predstavljeno je istraživanje koje se odnosi na optimizaciju CNC obrade glodanjem ravanskih kontura ravnim vretenastim glodalima. Kako je u poslednje vreme sve više popularno programiranje primenom CAD/CAM sistema, optimizacija procesa obrade koju CAD/CAM sistemi nude, svodi se na definisanje različitih strategija obrade, koje mogu uticati na nivo proizvodnosti. Pravi pokazatelj stabilnosti obradnog sistema jesu sile u zoni obrade. Da bi jedan proizvodni proces bio stabilan, očekuje se da sile u toku procesa rezanja budu konstantne. Međutim često se zbog spoljašnjeg ili unutrašnjeg oblika konture sile u toku rezanja razlikuju zato što se alat programira tako da prati geometriju dela koji treba izraditi, a ne vodi se računa o trenutnoj zahvaćenoj površini materijala. Na nekim delovima putanje alata, najčešće na nekom pravom delu, ugao zahvata će biti mali i konstantan, pa se očekuje da sile rezanja budu konstantne. Na prelazima sa jednog dela konture na drugi, najčešće u ćoškovima, ugao zahvata alata je veći i sile rezanja naglo rastu. Tada dolazi do oštećenja alata, što u nastavku procesa obrade znatno može uticati na kvalitet obrađene površine i tačnost definisanih mera. Optimizaciju procesa obrade moguće je izvršiti variranjem nekih od parametara kao što su dubina rezanja ili brzina pomoćnog kretanja.

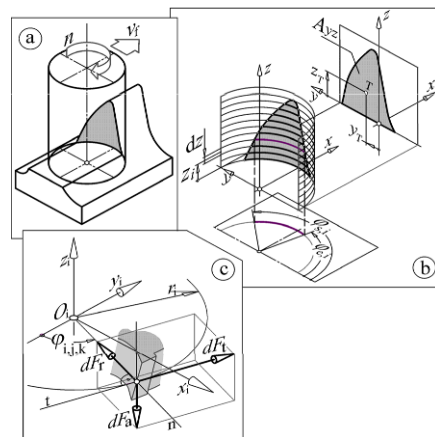
Da bi se odredile trenutne sile u zoni obrade, neophodno je definisati matematičke modele sila rezanja, kao i specifične sile rezanja koje na njih utiču. Matematički modeli sila rezanja definisani su u izrazu 1.

$$\begin{aligned} dF_t(i, j) &= u m (K_{tc} h_s(i, j) dz + K_{te} dL) \\ dF_r(i, j) &= u m (K_{rc} h_s(i, j) dz + K_{re} dL) \\ dF_a(i, j) &= u m (K_{ac} h_s(i, j) dz + K_{ae} dL) \end{aligned} \quad (1)$$

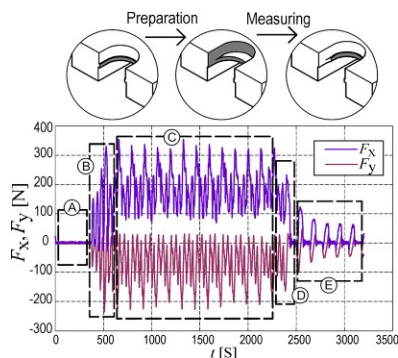
Ovako definisani matematičke modeli, predstavljaju elementarne vrednosti sila rezanja u zoni obrade, koje deluju na elementarno sečivo alata i na elementarnu zahvaćenu površinu obratka tim alatom (slika 4.2). Da bi se ove elementarne veličine definisale, neophodno je izvršiti diskretizaciju alata i obrtka. Diskretizacija obratka interpretirana je u pomoću Z-mape (slika 4.1).



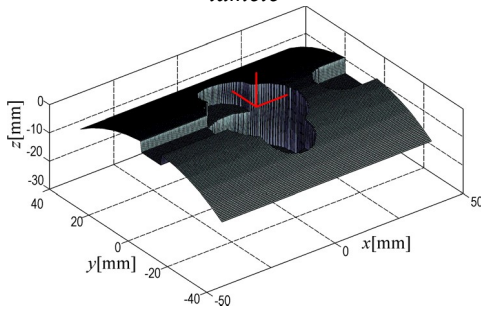
Slika 4.1 Interpretacija obratka pomoću Z-mape



Slika 4.2. Interpretacija diskretizovanog sečiva alata i trenutne zahvaćene površine materijala obratka



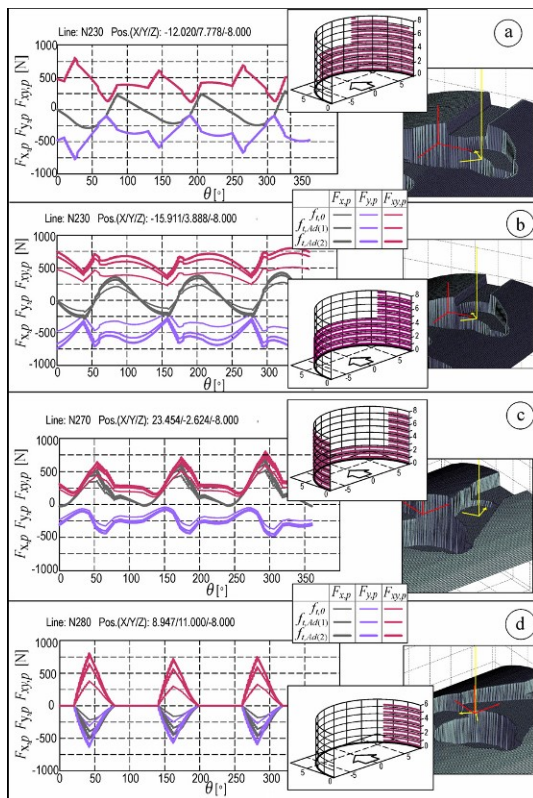
Slika 4.3 Prikaz rezultata obrade tanke lamele



Slika 4.4 Interpretacija izabranog dela pomoću Z-mape

Nakon definisanja matematičkog modela, potrebno je za date uslove obrade koje podrazumevaju izabrani tip materijala alata i obratka, kao i izabranu geometriju alata, odrediti specifične sile rezanja. Napravljen je pripremak u vidu tanke lamele, određene debljine (slika 4.3). Tako izrađen pripremak, postavljen je na šestokomponentni dinamometar i izvršena je obrada tanke lamele pri određenim režimima obrade. Dobijene vrednosti sila rezanja su naknadno obrađene i iz njih su prema odgovarajućim matematičkim modelima izvučene vrednosti specifičnih sila rezanja. Dobijene specifične sile, mogu se koristiti za predikovanje sila rezanja duž programirane putanje alata, pri istim uslovima obrade kao za tanku lamelu. Za potrebe verifikacije predstavljene metodologije, izvršena je obrada dela prikazanog na slici 4.4. Optimizacija G koda koja je primenjena u okviru ove aktivnosti, odnosila se na optimizaciju variranjem brzine pomoćnog kretanja. U okviru softverskog paketa matlab, izvučene su odgovarajuće mape zahvata i prema njima su predikovane sile rezanja.

Rezultati dobijeni predikcijom sila rezanja za odgovarajuće mape zahvata, prikazani su na slici 4.5, a na slici 4.6 može se videti program u G kodu sa prilagođenim vrednostima brzine pomoćnog kretanja, takve da sile rezanja u toku procesa obrade budu konstantnih vrednosti.



Slika 4.5 Interpretacija predikovanih sila rezanja za odgovarajuće mape zahvata

%	
:8022(S802SHED.TAP)	N44G3X0.Y-14.000R14.F570
(SHEDULINGFX Y800N)	N45G3X0.500Y-13.991R14.F180
(RESHED.VF INCR=30MM/MIN)	N46G3X7.000Y-12.124R14.F150
N10G54G40G49G80G90	N47G1X8.7321Y-11.124F150
N11G0H00Z-50.M5	N48G1X17.392Y-6.124F120
N12M00	N49G1X19.558Y-4.874F150
N13(-MILL16MM3FHSSE---H16)	N50G1X20.424Y-4.374F180
N14G56X0.Y0.B0.	N51G1X21.723Y-3.624F210
N15M03S796F191	N52G1X23.022Y-2.874F240
N16G43H16Z30.	N53G1X24.321Y-2.124F270
N17G0X0.Y10.	N54G1X24.754Y-1.874F300
N18G1Z-8.F200	N55G1X25.620Y-1.374F330
N19M00	N56G1X27.676Y-0.187F300
N20G1X0.Y14.000F570	N57G1X28.000Y0.F270
N21G3X-.500Y13.991R14.F360	N58G1X22.804Y3.000F120
N22G3X-.999Y13.964R14.F180	N59G1X19.340Y5.000F150
N23G3X-.987Y11.497R14.F150	N60G1X14.143Y8.000F180
N24G3X-.543Y10.243R14.F120	N61G1X13.277Y8.500F210
N25G3X-.899Y9.899R14.F150	N62G1X12.844Y8.750F240
N26G1X-11.313Y8.485F150	N63G1X11.978Y9.250F270
N27G1X-12.374Y7.424F180	N64G1X11.545Y9.500F300
N28G1X-13.435Y6.364F210	N65G1X11.112Y9.750F330
N29G1X-13.788Y6.010F240	N66G1X10.679Y10.000F360
N30G1X-14.495Y5.303F270	N67G1X10.246Y10.250F390
N31G1X-15.203Y4.596F300	N68G1X9.813Y10.500F420
N32G1X-16.617Y3.182F330	N69G1X9.380Y10.750F450
N33G1X-16.970Y2.828F180	N70G1X8.947Y11.000F510
N34G1X-19.799Y0.F150	N71G1X8.514Y11.250F540
N35G1X-16.970Y-2.828F150	N72G1X7.000Y12.124F570
N36G1X-13.081Y-6.717F180	N73G3X0.Y14.000R14.F570
N37G1X-12.020Y-7.778F210	N74G1X0.Y10.000F570
N38G1X-10.960Y-8.838F240	N75G0Z30.
N39G1X-9.899Y-9.899F270	N76(--ENDOFFPROG--)
N40G3X-9.540Y-10.247R14.F330	N77G54G40G49G80G90
N41G3X-9.168Y-10.581R14.F390	N78G0H00Z-50.M5
N42G3X-8.784Y-10.901R14.F420	M30
N43G3X-8.389Y-11.208R14.F480	%

Slika 4.6 Interpretacija optimizovanog G koda

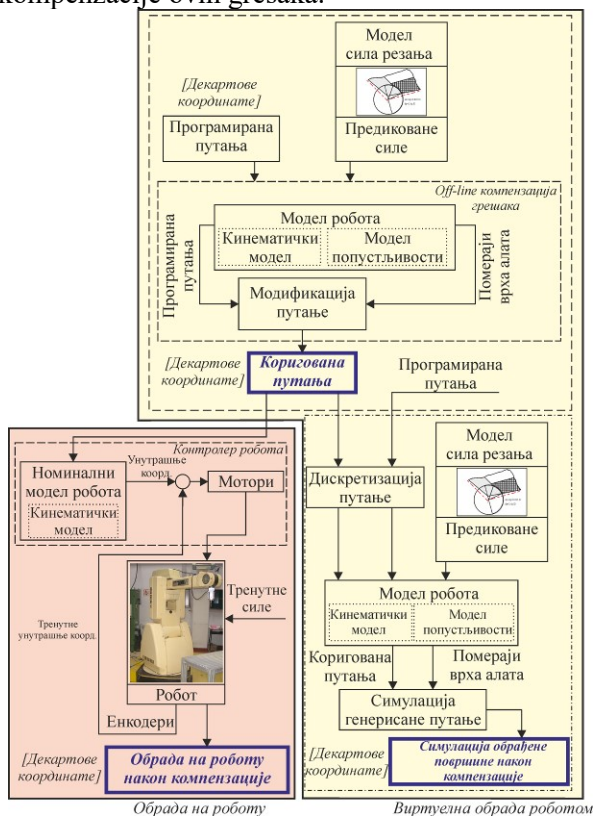
U ovoj aktivnosti prikazana je jedna uspešna primena postupka rasporeda brzine pomoćnog kretanja. Set potrebnih funkcija razvijen je u matlab softverskom okruženju. Čitav problem bio je podeljen u dve faze: off-line prilagođavanje brzine pomoćnog kretanja duž putanje alata i optimizacija brzine pomoćnog kretanja duž ove staze, u pogledu specifičnih kriterijuma. Približavanje zapremine radnog komada pomoću Z-mape omogućava njegovu relativno jednostavnu manipulaciju. Nedostatak ovog pristupa je nemogućnost obrade

složenijih oblika radnog komada. Takođe, promene rezolucije Z-mape uzrokuju porast vremena obrade. Eksperiment takođe pokazuje ograničenja primenjenih modela. Jedan od njih je odsustvo dinamičnog modela mašine, alata i procesa. Stoga, predloženi postupak ne može sprečiti vibracije u izvođenju NC programa, modifikovanog na ovaj način.

5. VERIFIKACIJA KORIGOVANE PUTANJE ALATA PRIMENOM MODELA VIRTUELNOG ROBOTA KOJI UKLJUČUJE I SILE REZANJA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 69, razmatran je razvoj modela virtuelnog robota za verifikaciju korigovane putanje alata.

Industrijski roboti su prepoznati kao uspešna alternativa 5-osnim mašinama alatkama za obradu glodanjem velikih delova složene geometrije od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti. Međutim, nedovoljna krutost strukture robota predstavlja jedan od ograničavajućih faktora za širu upotrebu robota u zadacima višeosne obrade glodanjem. Sile i momenti rezanja, koji su po pravilu dinamički, izazivaju značajne deformacije pri obradi delova robotom što veoma utiče na tačnost obrade. Na veličinu ovih grešaka utiče popustljivost robota i veličina sila rezanja. U cilju rešavanja problema nedovoljne krutosti robota za zadatke višeosne obrade pored analize popustljivosti robota u radnom prostoru i izbora režima obrade, čime se može uticati na veličinu sila rezanja, danas se razvijaju i različiti off-line i on-line algoritama kompenzacije ovih grešaka.



Slika 5.1 Obrada na realnom robotu i virtuelni model robota za obradu

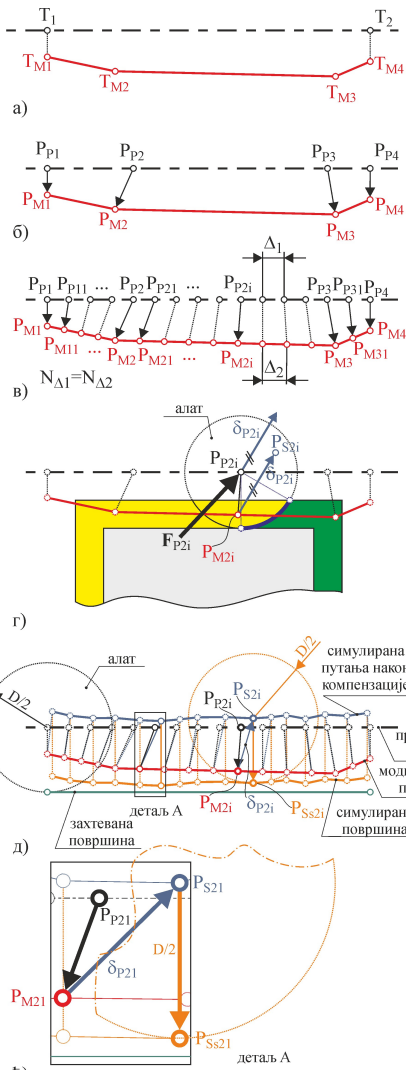
U okviru ovih istraživanja razmatran je razvoj modela virtuelnog robota za verifikaciju korigovane putanje alata dobijene primenom razvijenog off-line algoritma za kompenzaciju grešaka usled statičke popustljivosti robota izazvanih silama rezanja. Kao osnova za razvoj virtuelnog modela robota za obradu, slika 5.1, koji se koristi za simulaciju kompenzovane putanje alata, korišćen je razvijen obradni sistem na bazi robota, koji je rezultat prethodnih istraživanja u okviru ovog projekta vezanih za temu 2, a koja se odnosi na virtuelnu proizvodnju i obradu robotima. Razvoj obradnog sistema na bazi robota je obuhvatio: (i) razvoj sistema upravljanja otvorene arhitekture sa programiranjem u G-kodu, i (ii) rešavanje problema tačnosti i popustljivosti robota kroz razvoj off-line algoritma kompenzacije grešaka nastalih usled statičke popustljivosti robota izazvanih silama rezanja. Obradni sistem je baziran na raspoloživom 6-osnom robotu LOLA50 vertikalne zglobne konfiguracije nosivosti 50kg koji je opremljen motornim vretenom sa maksimalnim brojem obrtaja od 18000min⁻¹.

Razvijeni virtuelni model robota za obradu, slika 5.1, se u suštini sastoji iz dva dela: (i) generisanja korigovane putanje, i (ii) generisanja simulirane obrađene površine nakon kompenzacije grešaka izazvanih silama rezanja.

Generisanje korigovane putanje je bazirano na: (i)

kinematičkom modelu robota, (ii) modelu popustljivosti robota, i (iii) modelu sila rezanja. Modifikacija putanje alata na osnovu koje se generiše korigovana putanja se vrši na osnovu razvijenog algoritma za modifikaciju programiranog linearnog segmenta.

Kompletna procedura generisanja simulirane obrađene površine nakon kompenzacije grešaka na osnovu programirane i korigovane putanje se sastoji iz nekoliko koraka. Primer generisanja virtuelne obrađene površine, slika 5.2, je razmatran za slučaj proizvoljno izabranog linijskog segmenta T1T2 i njegove pripadajuće modifikovane putanje alata, dobijene primenom razvijenog algoritma za kompenzaciju grešaka. Proizvoljno izabrani linijski segment T1T2 i njegova pripadajuća modifikovana putanja alata, koja se sastoji iz tri segmenta definisanih tačkama TM1, TM2, TM3 i TM4, su prikazani na slici 5.2a. Prvi korak predstavlja identifikaciju tačaka modifikovane putanje alata PMi kao i tačaka na programiranoj putanji alata PPi, slika 5.2b. Za primer sa slike 5.2b se vidi da postoje po četiri tačke PPi i odgovarajuće tačke PMi, odnosno da se programirani linearni segment i modifikovana putanja alata sastoji iz 3 dela.



Слика 5.2 Generisanje virtualne obrađene površine



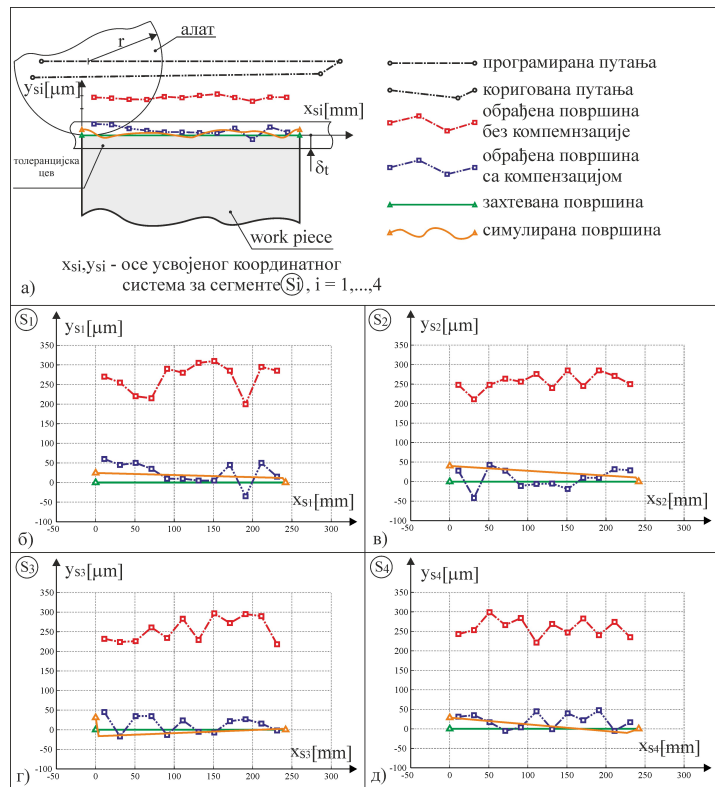
Слика 5.3 Obrada konture kvadrata test radnog dela na robotu LOLA50

U sledećem koraku se svaki od ova 3 dela programiranog linearnog segmenta diskretizuju na željeni broj podeoka, slika 5.2v. Sa slike 5.2v se vidi da svakoj čvornoj tački ili diskretizovanoj među tački odgovara jedna čvorna ili diskretizovana među tačka na modifikovanoj putanji alata. Kao što je pokazano na slici 5.2g, nakon izvršene diskretizacije programirane i modifikovane putanje potrebno je odrediti za svaku čvornu tačku i među tačku programiranog linearnog segmenta vektor sila rezanja, koji se izračunava na osnovu mehanističkog modela za predikciju sila rezanja. Nakon toga se, na osnovu vektora sila rezanja i popustljivosti robota u Dekartovim koordinatama izračunava se vektor pomeraja vrha alata. Zatim se generiše odgovarajuća tačka simulirane putanje alata, npr. P_{S2i} , prema sledećoj jednačini:

$$p_{S2i} = \begin{bmatrix} x_{PS2i} \\ y_{PS2i} \\ z_{PS2i} \end{bmatrix} = p_{M2i} + \delta_{P2i} = \begin{bmatrix} x_{PM2i} \\ y_{PM2i} \\ z_{PM2i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta x_{P2i} \\ \delta y_{P2i} \\ \delta z_{P2i} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Na slici 5.2d je dat prikaz, na ovaj način generisanih svih tačaka simulirane putanje alata nakon kompenzacije. Detalj A sa slike 5.2d, je uvećano prikazan na slici 5.2f i pokazuje kako se, na osnovu generisane tačke simulirane putanje alata dobija odgovarajuća tačka na projekciji virtualne obrađene površine. Za verifikaciju razvijenog virtuelnog modela robota za obradu vršeni su eksperimenti obrade na test radnim delovima od aluminijuma, slika 5.3, u cilju poređenja generisane simulirane površine nakon kompenzacije i dobijene stvarne površine obradom na realnom robotu.

Uporedni prikaz rezultata obrade segmenata kvadrata, sa i bez kompenzacije, na robotu i rezultata generisanja projekcije virtualne obrađene površine su prikazani na slici 5.4.



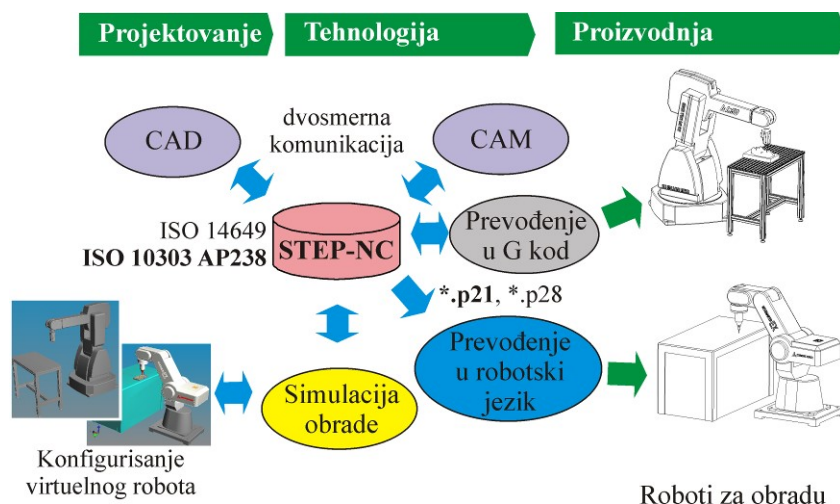
Слика 5.4 Uporedni grafički prikaz rezultata dobijenih na izdvojenim segmentima kvadrata

6. PRISTUP PRIMENE STEP-NC STANDARDA ZA PROGRAMIRANJE ROBOTA ROBOTSKIM PROGRAMSKIM JEZIKOM

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 2: Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. U Aktivnosti 70, razmatrana je pristup primene STEP-NC standarda za programiranje robota robotskim programskim jezikom.

Danas se novi standard, poznatiji kao STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control), koristi kao osnova za razvoj nove generacije upravljačkih jedinica mašina alatki. Novi standardi su ISO 14649 i ISO 10303-238, i oba se primenjuju paralelno. S obzirom da se industrijski roboti sve više i više uključuju u zadatke višeosne obrade određene klase delova, neophodno je njihovo programiranje prilagoditi STEP-NC standardu u cilju približavanja programiranja industrijskih robota programiranju višeosnih mašina alatki. Prikazani pristup obuhvata programiranje i simulaciju industrijskih robota u zadacima obrade robotima. U okviru metodologije je razvijen i translator jezika koji prevodi STEP-NC program, po standardu ISO 10303-238, u odgovarajući jezik za programiranje industrijskih robota za slučaj 3-osne obrade. Verifikacija razvijene metodologije je izvršena prvo, kroz simulacije na virtuelnim robotima konfigurisanim u STEP-NC Machine softveru, a potom i eksperimentalno na raspoloživim robotima.

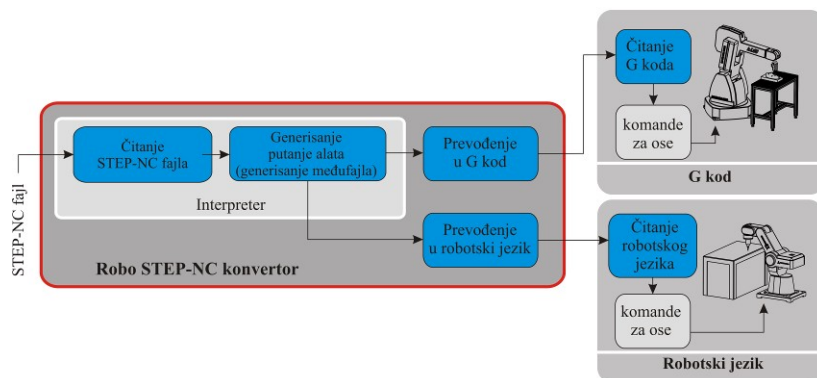
Program u STEP-NC formatu bi bilo moguće pokrenuti i na robotima za obradu samo uz uslov da robot ima upravljačku jedinicu koja podržava interpretiranje STEP-NC programa. Kao što je prikazano na slici 6.1, drugi način je indirektni metod programiranja koji je baziran na STEP-NC programu. Ovo se može uraditi na dva načina: (i) korišćenjem opcije izvoza u softveru STEP-NC Machine za izvoz programa u G-kod ako kontroler robota može direktno interpretirati G-kod, ili (ii) pomoću odgovarajućeg translatora radi prevođenja STEP-NC programa na programski jezik robota.



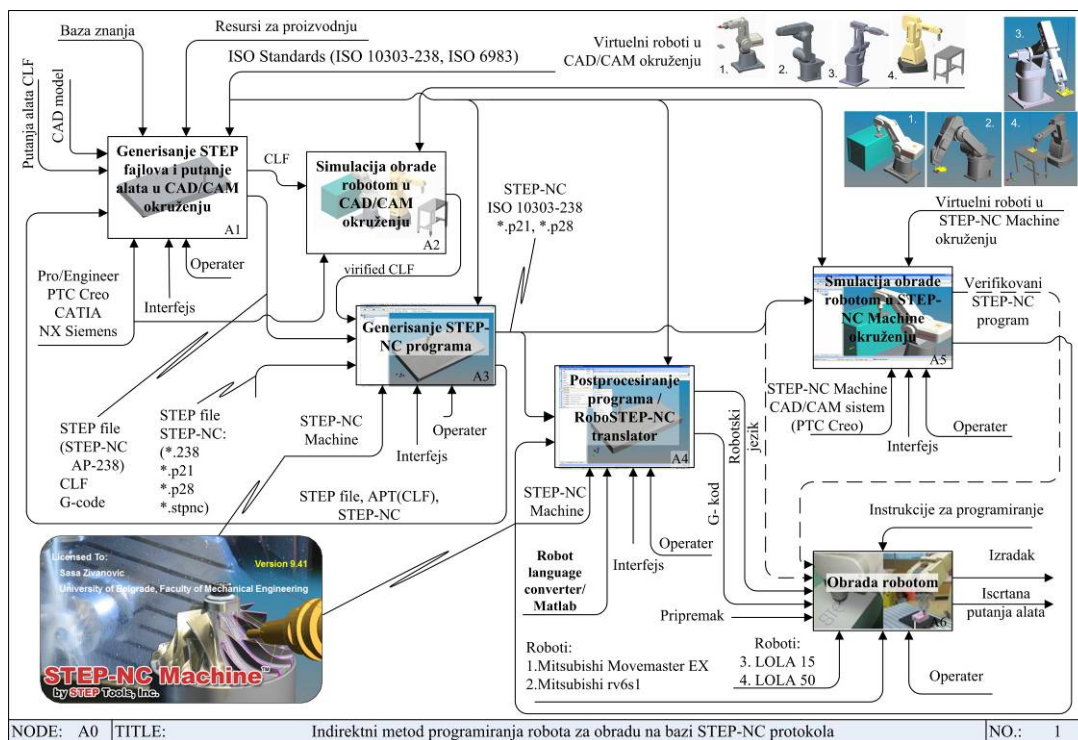
Slika 6.1 Programiranje robota za obradu primenom STEP-NC protokola

Razmatrani metod indirektnog programiranja, zasnovan na standardu ISO 10303-238, koristi razvijeni translator, slika 6.2, koji se koristi za prevođenje STEP-NC fajla u formatu p21 na odgovarajući programski jezik robota. Kao što je prikazano na slici 6.2, translator jezika se sastoji od tri osnovna dela koji se odnose na: (i) čitanje i analizu STEP-NC fajla, (ii) generisanje putanje alata (generisanje među fajla) i (iii) prevođenje među fajla na robotski jezik. Translator jezika je program koji čitanjem kompletnog p21 fajla generiše među fajl, koji sadrži sve informacije neophodne za generisanje programskog jezika robota. Tako generisan među fajl se može u opštem slučaju prevesti na odgovarajući programski jezik robota, uz poznavanje njegove sintakse. U ovim istraživanjima je on prevođen na programski jezik raspoloživog robota Mitsubishi Movemaster EX.

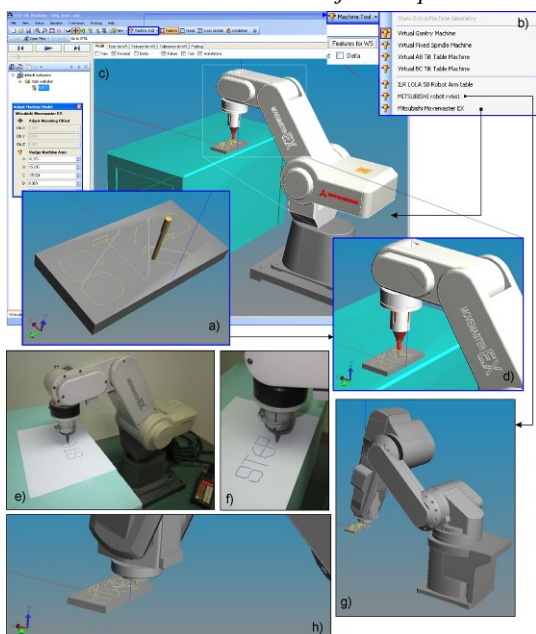
Metodologija za programiranje robota za obradu na bazi STEP-NC protokola opisana je korišćenjem IDEFO dijagrama. Ilustracija kontekstnog dijagrama A0 najvišeg nivoa koja opisuje osnovni tok aktivnosti pokazana je na slici 6.3. Osnovni redosled aktivnosti za realizaciju indirektnog metoda programiranja robota za obradu na bazi STEP-NC protokola je: A1: Generisanje STEP fajlova i putanje alata u CAD/CAM okruženju, A2: Simulacija obrade robotom u CAD/CAM okruženju, A3: Generisanje STEP-NC programa, A4: Post procesiranje programa primenom translatora, A5: Simulacija obrade robotom u STEP-NC Machine okruženju i A6: Obrada robotom.



Slika 6.2 Indirektni metod programiranja robota na bazi STEP-NC protokola



Slika 6.3 Metodologija indirektnog metoda programiranja robota na bazi STEP-NC protokola



Slika 6.4 Eksperimentalna verifikacija razvijene metodooigje

Verifikacija razvijene metodologije kroz isctavanja putanja alata, slika 6.4, je izvršena na raspoloživom robotu Mitsubishi Movemaster EX uz programiranje, simulaciju i prevođenje programa u formatu p21 na odgovarajući jezik za programiranje robota korišćenjem razvijenog translatora. Pre izvođenja eksperimenata za svaki eksperiment su, korišćenjem softvera PTC Creo 2.0, pripremljeni putanja alata, STEP fajlovi priprema, obratka i alata koji su potom učitani u softver STEP-NC Machine. Softver STEP-NC Machine je iskorišćen za pripremu programa u formatu p21. Nakon simulacije i verifikacije programa na generisanom virtuelnom robotu u STEP-NC Machine softveru, izvršeno je prevođenje programa razvijanim translatorom na programski jezik robota Mitsubishi Movemaster EX, koji je potom korišćen pri isctavanju putanju na robotu.

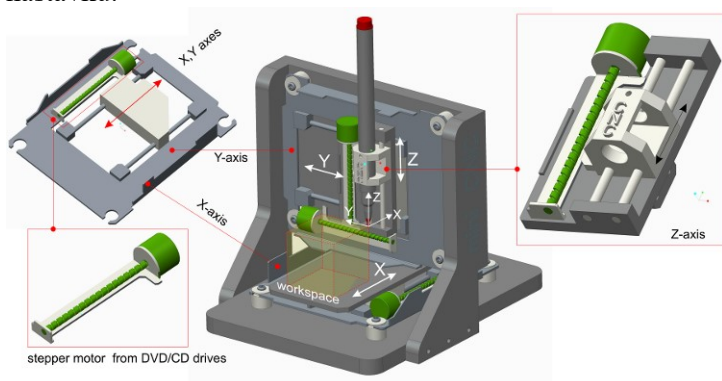
7. MINI CNC MAŠINA ALATKA SA SISTEMOM UPRAVLJANJA OTVORENE ARHITEKTURE

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 3: Istraživanje i razvoj mini laboratorijske i edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom. U Aktivnosti 71, razmatrano je konfigurisanje i realizacija mini CNC mašine alatke sa sistemom upravljanja otvorene arhitekture.

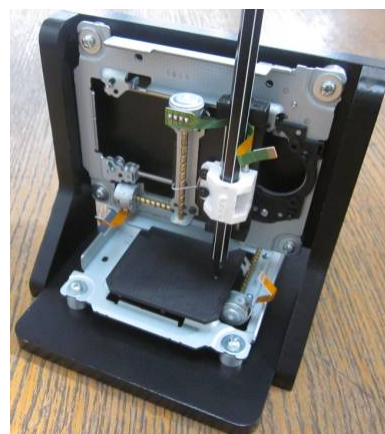
U okviru ove aktivnosti mini CNC mašina alatka je konfigurisana i napravljena od postojećih komponenta pogona DVD/CD uređaja, kao troosna mašina. Oformljeno je okruženje za njeno programiranje i simulaciju rada virtuelne mašine (u okviru aktivnosti 66), koja radi po zadatom programu u CAD/CAM okruženju. Napravljen je i prvi prototip masine za koju je realizovano upravljanje na bazi LinuxCNC sistema otovrene arhitekture i ostvaren probni eksperimentalni rad za verifikaciju upravljanja i programiranja mašine.

Konfigurisanje mašine bazirano na ideji realizacije mašine sa pogonskim osama od DVD/CD uređaja, uslovile su geometrijske i kinematičke parametre mašine, tako da ima mašina ima mali radni prostor, oblika kocke čije su dimenzije 35x35x35 mm. CAD model virtuelnog prototipa troosne mini CNC mašine alatke je pokazan na slici 7.1. Usvojena kinematička struktura mašine je X'OYZ. Po osi X' se kreće radni sto, dok se po osi Y kreće klizač koji nosi Z osu. Za usvojenu koncepciju mini CNC mašine alatke osnovni funkcionalni zahtevi za njeno konfigurisanje su: (i) niskobudžetna mini CNC mašina alatka, (ii) laboratorijska i edukaciona mašina alatka, (iii) mašina koja iscertava programiranu konturu i/ili vrši lasersko graviranje, (iv) upravljanje otvorene arhitekture, (v) programiranje mašine na uobičajeni način u G-kodu.

Fizički prototip mašine sa nosećom strukturom i povezanim komponentama svih osa je pokazan na slici 7.2. Ovako pripremljeni hardver mašine je spreman za implementaciju upravljanja, što se objašnjava u nastavku.



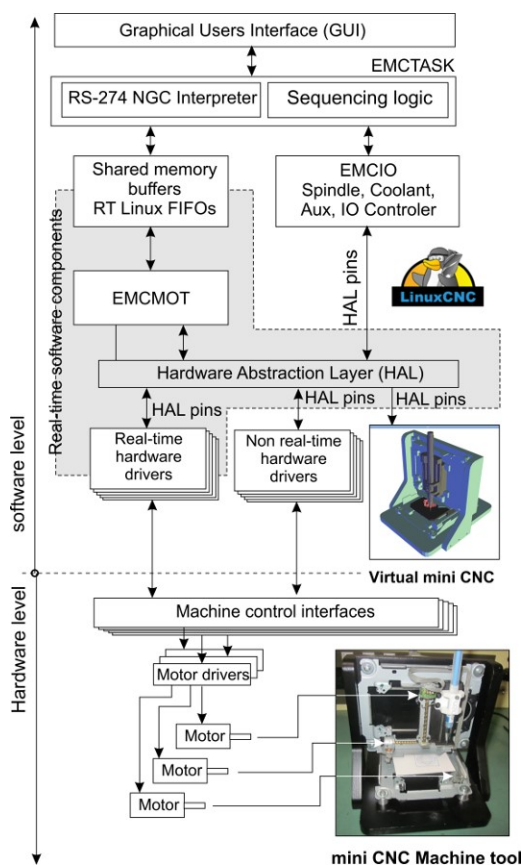
Slika 7.1 CAD model troosne mini CNC mašine alatke



Slika 7.2 Prototip troosne mini CNC mašine alatke, bez upravljanja

LinuxCNC predstavlja real-time upravljački softver otvorene arhitekture, koji se može iskoristiti za upravljanje najrazličitijih mašina alatki i robota. Obiman rad i iskustvo koji su godinama ulagani u razvoj LinuxCNC-a, u svetskim razmerama predstavljaju dobru tehnološku osnovu za implementaciju sopstvenog sistema upravljanja mašina alatki i robota. Uprošćena struktura sistema upravljanja za primer razmatrane mini CNC mašine alatke na bazi LinuxCNC sistema prikazana je na slici 7.3. Kao što se sa slike 7.3 može videti, LinuxCNC sistem sadrži četiri osnovna modula: (1) Kontroler kretanja EMCMOT; (2) Kontroler ulazno/izlaznih diskretnih signala EMCIO; (3) Kontroler procesa EMCTASK i (4) Grafički korisnički interfejs GUI (Graphical User Interface).

EMCMOT je softverski modul koji radi u realnom vremenu. Zadužen je za interpolaciju programirane putanje, proračun direktne i inverzne kinematike, kao i generisanje odgovarajućih vrednosti signala koji se predaju regulatorima motora u sukcesivnim vremenskim trenucima. EMCIO modul procesira sve operacije nad periferijama koje nisu u direktnoj vezi sa motorima za pogon osa mašine. EMCTASK modul je odgovoran za interpretiranje instrukcija G-kôda i koordinaciju aktivnosti modula EMCMOT i EMCIO. Ove aktivnosti su sadržane u programu obrade, odnosno nizu instrukcija G kôda, koje kontroler procesa interpretira i u odgovarajućim vremenskim trenucima prosleđuje kontroleru kretanja ili ulazno/izlaznom kontroleru diskretnih signala. Kao što se sa slike 7.3 može videti, komunikacija između modula koji rade u realnom vremenu (real-time) EMCMOT modula i modula koji ne rade u realnom vremenu (non-real time) EMCTASK, se obavlja preko deljenog memorijskog bafera posredstvom RTLinux FIFO mehanizma.



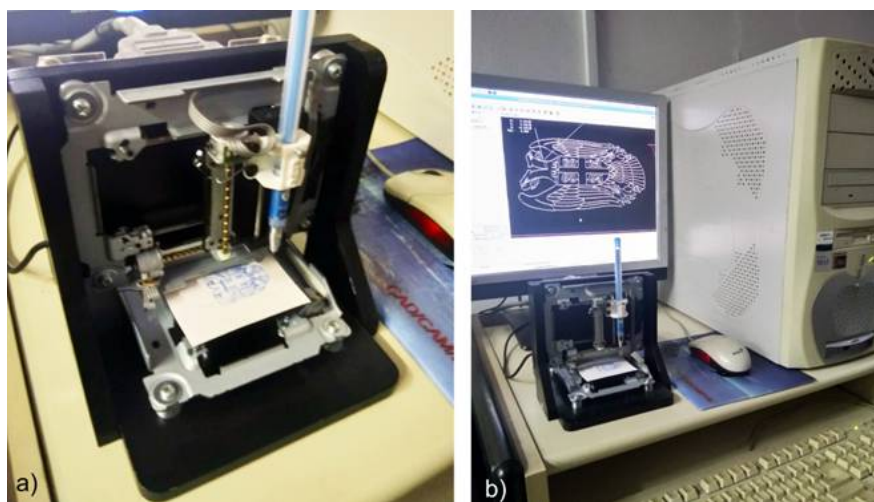
Slika 7.3 Arhitektura LinuxCNC upravljanja otvorene arhitekture za troosnu mini CNC mašinu alatku

GUI spada u eksterne programske module i predstavlja grafički korisnički interfejs za preuzimanje i pokretanje programa obrade, inicijalizaciju kao i praćenje rada mašine posredstvom grafičkog prikazaputanje alata i virtuelnog okruženja mini CNC mašine alatke. LinuxCNC na raspolaganju ima različite korisničke grafičke interfejse: TkLinuxCNC, Mini GUI, Axis GUI, GMOCCAPY GUI. Najčešće je u upotrebi Axis korisnički grafički interfejs, koji je korišćen za pokazano upravljanje mini CNC mašine alatke.

Značajan doprinos širenju i popularizaciji LinuxCNC doneo je razvoj HAL-a (Hardware Abstraction Layer) koji omogućava jednostavnu integraciju funkcija inverzne i direktne kinematike u sistem za upravljanje, kao i uniformni interfejs za povezivanje sa hardverskim i softverskim modulima sistema.

Razvoj upravljačkog sistema je obuhvatio: (1) Formiranje direktorijuma koji objedinjuje sve konfiguracione datoteke upravljačke jedinice; (2) Definisanje konfiguracionih *.ini datoteka koja sadrži parametre mašine, kao sto su: opsezi kretanja radnih osa, maksimalne i radne brzine i ubrzanja za pojedine ose, parametri za rad sistema u realnom vremenu itd; (3) Definisanje konfiguracionih *.hal datoteka koje sadrže elemente i parametre za vezu sa drajverima koračnih motora, odnosno sa odgovarajućim komponentama virtuelne mašine; (4) Konfigurisanje hardvera upravljačkog sistema na odabranoj računarskoj platformi koja je zasnovana na PC arhitekturi ili jednoj od kompaktnih računarskih platformi, kao što su Raspberry Pi ili BeagleBone black. Konfigurisanje virtuelne mini CNC mašine alatke u okviru LinuxCNC

sistema primenom raspolozivoh OpenGL-Python 3D okruženja (pokazano u aktivnosti 66).

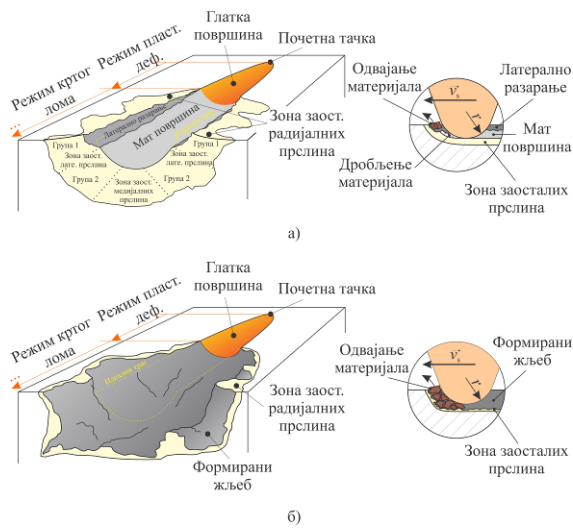


Slika 7.4 Radno okruženje i probni eksperimentalni rad

Za realizovanu mini CNC mašinu alatku posle integracije upravljanja sa hardverom mašine, usledio je njen probni rad, slika 7.4. Tokom probnog rada planirano je iscertavanje programiranih kontura. Tako je postavljeno prvo i najvažnije ispitivanje: provera da li sistem za upravljanje korektno planira putanju alata (pisača) i da li alat (pisač) zaista vodi po toj putanji. Elementi geometrije su planirani tako da se mogu nacrtati u raspoloživom radnom prostoru. Radno

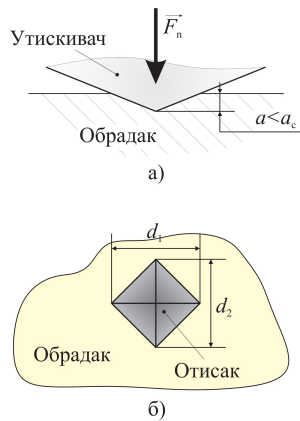
okruženje za mini CNC mašinu alatku je pokazano na slici 7.4b, dok je na slici 7.4a pokazana jedna od programiranih i iscertanih kontura. Neki od detalja prilikom probnog rada mašine su sledeći: (1) izgled nacrtane i programirane konture potvrđuju ostvareni koncept upravljanja i programiranja, (2) pozicioniranje u granicama radnog prostora je bilo dobro, (3) ostvarivanje poklapanja pozicije vrha alata (pisača) sa nultom tačkom pokazalo je dobro pozicioniranje i određivanje nulte tačke, (4) izgled nacrtanih elemenata geometrije programiranih kontura, potvrđuje ispravnost postavki referentnih tačaka na pogonskim osama i uspešan rad realizovane mašine.

8. ANALIZA INTERAKCIJE ALATA I OBRATKA PRI MIKRO REZANJU MATERIJALA NA BAZI MERMERA I GRANITA

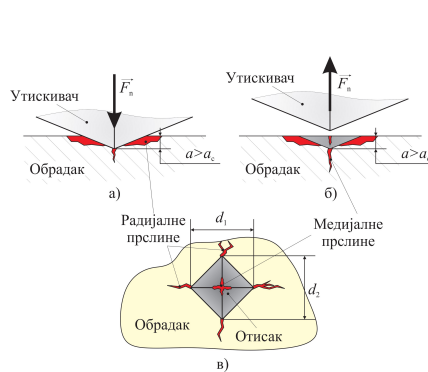


Slika 8.1 Mehанизam mikro rezanja a) mermera Plavi tok i b) granita Jošanica i Bukovik

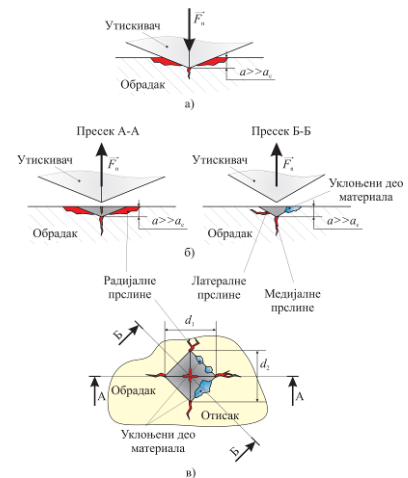
rezanja, među kojima su: brzina mikro rezanja, dubina prodiranja alata i vrednost radijusa zaobljenja vrha alata. Metodom utiskivanja utiskivača pri statičkom dejstvu sile utiskivanja, predložen je, a kasnije i eksperimentalno potvrđen mehanizam na osnovu kog se, sa jedne strane dolazi do formiranja otiska u režimu platičnog deformisanja, dok je sa druge strane objašnjen razvoj prslina koje dovode do krtog odvajanja materijala unutar materijala u režimu krtog loma.



Slika 8.2 Faza 1 a) na samom kraju utiskivanja i b) izgled otiska nakon rasterećenja materijala



Slika 8.3 Faza 2 na samom kraju utiskivanja a), nakon rasterećenja materijala b) i krajnji izgled otiska utiskivača v)

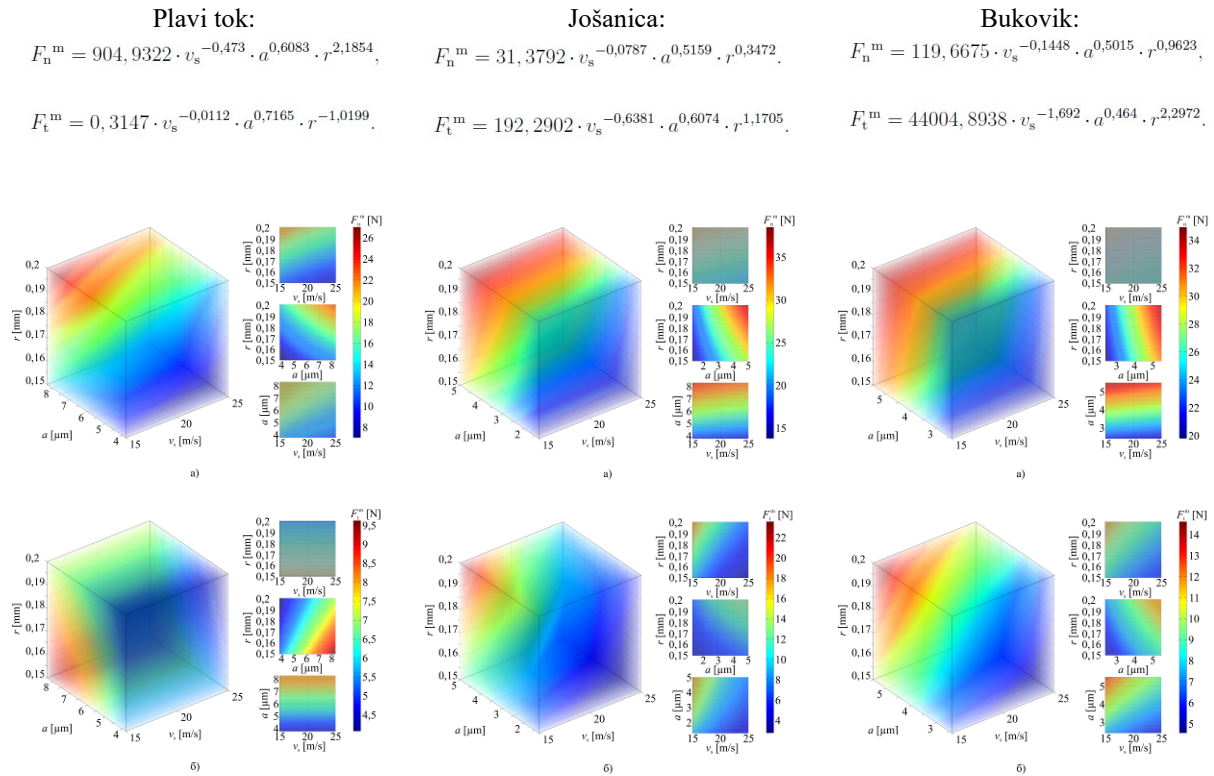


Slika 8.4 Faza 3 na samom kraju procesa utiskivanja a), nakon rasterećenja materijala b) i krajnji izgled otiska utiskivača v)

Kritične vrednosti dubina u zavisnosti od dejstva samo normalne komponente sile mikro rezanja, a koje razdvajaju ova dva režima, definisane su za sva tri materijala. Mehanizam koji, pored normalne komponente sile rezanja, u sebi ima uključen i uticaj tangencijalne komponente, predložen je u okviru sprovedenih istraživanja, a zatim i potvrđen eksperimentima mikro rezanja (grebanja). Ustanovljeno je da usled promene geometrije vrha dijamantskog alata (vrednosti radijusa vrha alata) dolazi do promene kritične vrednosti dubine prodiranja. Ovo nastaje kao posledica promene efektivne vrednosti grudnog ugla. U režimu krtog loma, intenzitet razaranja materijala različit je među materijalima, a na njega dodatno utiču geometrija alata i brzina mikro rezanja. Pri ovom režimu, mermer Plavi tok se ima drugačiji mehanizam uklanjanja materijala u poređenju sa mikro rezanjem granita Jošanica i Bukovik. Ustanovljeno je da pored geometrije vrha alata i brzina mikro rezanja utiče na vrednosti kritične dubine prodiranja, a koje se razlikuju među ovim materijalima. Izmerene su vrednosti intenziteta komponenta sila mikro rezanja i date su krive koje najbliže

opisuju njihovu promenu u funkciji od brzine mikro rezanja, dubine prodiranja i vrednosti radijusa zaobljenja vrha alata.

Pored ovoga, određene su i krive specifične energije mikro rezanja za sva tri materijala, a u funkciji od istih parametara. Uočeno je da se najveći deo energije troši na plastično deformisanje materijala, dok, u znatno manjem procentu, deo energije odlazi na inicijalizaciju i dalji rast prslina u režimu krtog loma. Poslednja faza istraživanja obuhvatila je formiranje matematičkog modela komponenta sile mikro rezanja određivanjem parametara obradljivosti, čije se računске vrednosti u granicama tolerancije poklapaju sa stvarnim.



Slika 8.5 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za mermer Plavi tok

Slika 8.6 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za granit Jošanica

Slika 8.7 Računske vrednosti komponenta sile rezanja a) F_n^m i b) F_t^m u funkciji od vrednosti brzine mikro rezanja v_s , dubine prodiranja a i radijusa zaobljenja vrha alata r , za granit Bukovik

9. RAZVOJ AUTONOMNOG SISTEMA ZA OPTIMIZACIJU PROCESA OBRADE GLODANJEM DELOVA SA SLOŽENIM POVRŠINAMA

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 5: Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera). U Aktivnosti 73, razmatran je razvoj autonomnog sistema za optimizaciju procesa obrade glodanjem delova sa složenim površinama.

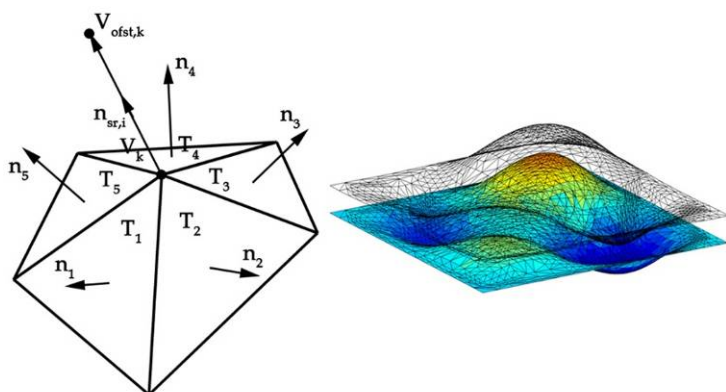
Prisutnost delova sa složenim površinama je u porastu u svim granama inženjerstva. Kako cena gotovih delova direktno zavisi od vremena obrade to je neophodno razviti nove metode za generisanje i optimizaciju procesa obrade delova sa složenim površinama. Najzastupljeniji metod obrade ovakvih delova je glodanjem loptastim glodalima na numerički upravljanim mašinama alatkama. U okviru sprovedenih istraživanja aktivnosti su išle u smeru razvoja CAD/CAM sistema koji bi bio u stanju da sam odredi tehnologiju kojom bi se obrađivao konkretan deo. Istraživanjima je obuhvaćena klasa delova kod kojih je baza oblika pravougaonika ili kvadrata, a složena površina se nalazi samo sa jedne strane dela. Proces generisanja i optimizacije putanje alata se odnosi samo na proces grube obrade složene površine gde je potrebno ukloniti što što veću količinu materijala u što kraćem vremenskom roku.

Celokupna procedura generisanja i optimizacije procesa obrade započinje učitavanjem 3D CAD modela izratka i priprema. Sistem je koncipiran tako da omogućava učitavanje CAD modela u STL formatu. Nakon učitavanja CAD modela sistem iste konvertuje u interni zapis kako bi se matematičke operacije lakše i brže sprovodile i time bi sistem radio efikasnije. Kada se govori o konverziji CAD modela priprema on se u ovom slučaju konvertuje u model Z mape. Takođe se izračunavaju zapremine učitanih CAD modela priprema i izratka, a nakon toga računa njihova razlika i time se dobija vrednost zapremine koju je u procesu obrade potrebno rezanjem ukloniti. Korisnik dalje u ovoj fazi projektovanja tehnologije definiše materijal priprema, zahtevani kvalitet obrade i metod optimizacije putanje alata koji može biti jedno ili više kriterijumski.

Sledeća faza u procesu projektovanja tehnologije obrade je određivanje tačaka preseka složene površine i paralelnih ravni u odgovarajućoj rezoluciji i to u dva upravna pravca koji odgovaraju vodećim ravnima putanje alata, a sve u cilju određivanja potrebnog prečnika alata kojim će se vršiti obrada. Za svaku od presečnih ravni sistem formira interpolacione polinome koji aproksimiraju krivu koja prati skup tačaka preseka. Za tako formirane interpolacione polinome, sistem vrši izračunavanje minimalnog radijusa krivine na konveksnom delu putanje, a na osnovu toga se vrši odabir alata kojim će se vršiti obrada iz prethodno formirane baze podataka izabranog obradnog sistema. Ukoliko u bazi podataka izabranog obradnog sistema ne postoji alat kojim bi se vršila obrada sistem vrši izbor prvog približnog alata i daje odgovarajuće upozorenje da će se obradom dobiti približni oblik površine. Ukoliko korisnik sistema nije zadovoljan automatskim izborom alata u ovoj fazi projektovanja tehnologije ima mogućnost ručnog definisanja geometrije alata.

Sledeća faza u procesu projektovanja tehnologije obrade je određivanje vodećih ravni kojim je definisana putanja alata. Predviđene vodeće ravni su paralelne ravnima XZ i YZ osnovnog koordinatnog sistema. Osnovni cilj ove faze je određivanje vrednosti poprečnog i uzdužnog koraka. Vrednost poprečnog koraka se određuje na osnovu kriterijuma maksimalne dozvoljene hrapavosti obrađene površine dok se vrednost uzdužnog koraka određuje na osnovu maksimalnog dozvoljenog odstupanja složene površine.

Da bi proces više kriterijumske optimizacije koji podrazumeva i optimizaciju obrade variranjem brzine pomoćnog kretanja bio moguć, sistem u sledećoj fazi projektovanja tehnologije vrši izračunavanje dubine i širine glodanja duž putanje alata. Metod obrade variranjem brzine pomoćnog kretanja podrazumeva da se u svakoj tački putanje alata obrada vrši drugačijom brzinom pomoćnog kretanja kako bi sila glodanja imala konstantnu vrednosti i time se izbegao eventualni lom alata koji može prouzrokovati dodatne troškove ili čak nastanak škarta. U svrhu formiranja modela za predikciju sila glodanja, a koji je u sklopu modula za simulaciju procesa obrade razvijenog sistema izvršeno je eksperimentalno određivanje skupa koeficijenata rezanja za izabranu geometriju i materila alata/obratka. U ovom slučaju je vršena obrada aluminijuma AlMg4.5Mn loptastim glodalom prečnika 10, 12 i 14mm sa dva zuba, ugla nagiba zavojnice 30° , materijala HSSE 8%Co.



Slika 9.1 Osrednjavanje vektora normale i ofsetovana površina

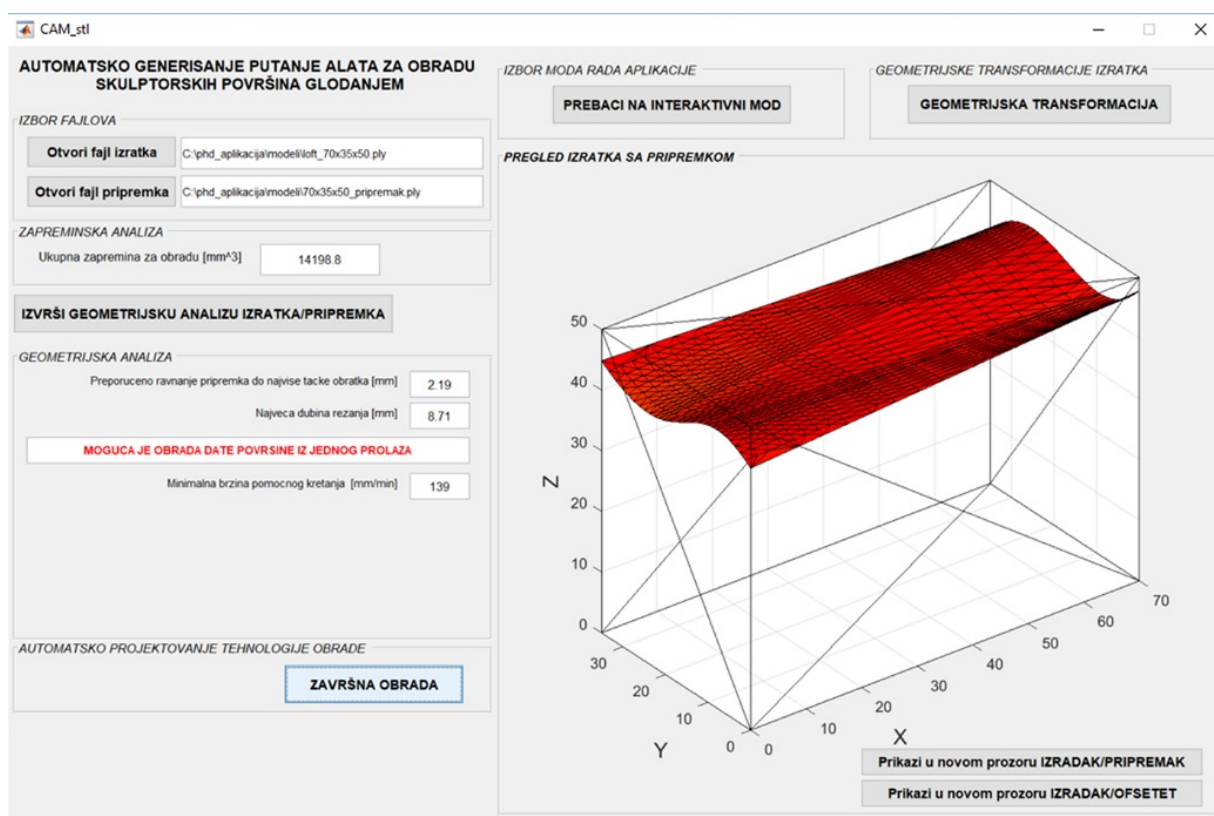
koju se ofsetuje složena površina.

Na bazi prethodno opisanih procedura sistem vrši analizu topologije putanje alata. U zavisnosti za koju se topologiju putanje alata dobija minimalno vreme obrade sistem generiše odgovarajući upravljački kod za izabranu numerički upravljaju mašinu alatku. U sistem su ugrađene sledeće topologije putanje alata: (1) obrada u jednom smeru, (2) ZIG-ZAG i (3) spiralna topologija.

Sve prethodno opisane faze, tj procedure su pomoću MatLab softverskog paketa ugrađene u jedinstveno softversko rešenje koje predstavlja CAD/CAM aplikaciju za automatsko projektovanje tehnologije obrade

Na bazi izabranog prečnika alata, sistem dalje vrši ofsetovanje složene površine u pravcu vektora normale na površinu za vrednost radijusa loptastog dela glodala. Na bazi ove generisanje ofsetovane površine sistem će kasnije odrediti tačke lokacije alata. Kako je složena površina aproksimirana skupom trouglova to jedno teme može da bude zajedničko za više trouglova. Iz tog razloga je potrebno izvršiti osrednjavanje vektora normale na složenu površinu, slika 9.1. Pored svega ovoga, omogućeno je i uključivanje vrednosti dodatka za finu obradu u vrednost za

delova sa složenim površinama glodanjem loptastim glodalom na 3-osnim numerički upravljanim mašinama alatkama, slika 9.2.

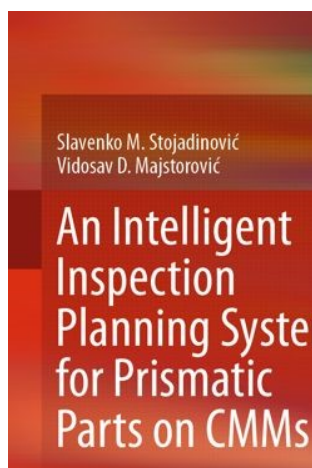


Slika 9.2 Razvijeno softversko rešenje

Eksperimentalna verifikacija razvijenog softverskog rešenja je sprovedena obradom delova na obradnom centru na bazi generisanih upravljačkih kodova pomoću razvijene aplikacije. Nakon obrade vršeno je merenje geometrije izrađenih delova na numerički upravljanoj mernoj mašini čime je verifikovano da je obrada izvedena u zadatim tolerancijama i predviđenom kvalitetu obrađene površine.

10. VERIFIKACIJA MERNE PUTANJE PRI INSPEKCIJI PRIZMATIČNIH DELOVA NA NUMM BAZIRANA NA MODIFIKOVANOM HEMERSLEJEVOM ALGORITMU

Ovaj odeljak se odnosi na istraživanja koja su obavljena u 2019. godini za Temu 6: Digitalna kompanija/kvalitet. U Aktivnosti 74, verifikovana je merna putanja pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu.



Slika 10.1 Monografija

izdanja su sledeće:

Nakon aktivnosti sprovedenih u prethodnoj istraživačkoj 2018. godini, a koje su se odnosile na razvoj metodologije konfigurisanja mernih senzora pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM u okviru digitalne kompanije/kvaliteta, a kojima je prethodio razvoj novog modela generisanja putanje mernog senzora pri planiranju putanje na mernoj mašini i razvoja metode za optimizaciju merne putanje primenom optimizacionog algoritma na bazi kolonije mrava logičan nastavak je i nova aktivnost tj. verifikacija merne putanje pri inspekciji prizmatičnih delova na NUMM bazirana na modifikovanom Hemerslejevom algoritmu. Sve ove tri aktivnosti, kao i aktivnosti sprovedene u prethodnim istraživačkim temama (godinama) su objedinjene u 2019. godini i objavljene u međunarodnoj monografiji (slika 10.1) pod naslovom: An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs, autora doc. dr Slavenka Stojadinovića i prof. dr Vidosava Majstorovića u izdanju renomiranog svetskog izdavača poznatog u naučnoj i stručnoj javnosti pod nazivom Springer International Publishing (nosilac: Springer Nature Switzerland AG). Bibliografske informacije

- elek. adresa stranica izdavača:
<https://www.springer.com/gp/book/9783030128067>
- godina izdanja: 2019.
- ISBN elektronskog izdanja: 978-3-030-12807-4
- ISBN štampanog izdanja - meki povez: 978-3-030-12809-8
- ISBN štampanog izdanja - tvrdi povez: 978-3-030-12806-7
- DOI: 10.1007/978-3-030-12807-4
- broj stranica: 139
- broj poglavlja: 6
- broj izdanja: 1.

Ukratko, predmet istraživanja u objavljenoj međunarodnoj monografiji je inteligentni sistem za planiranje inspekcije prizmatičnih delova na numerički upravljanim mernim mašina. Istraživanja su nova i sprovedena kroz razvoj četiri glavne celine: (1) inženjerska ontologija i ontološka baza znanja za klasifikaciju, ponovnu upotrebu i deljenje znanja u oblasti metrologije, (2) model planiranja inspekcije prizmatičnih delova na NUMM, koji se sastoji iz: definisanja metoloških primitiva, matematičkog modela distribucije mernih i čvornih tačaka, analize pristupačnosti mernog senzora, principa izbegavanja kolizije i automatskog generisanja merne putanje, (3) model optimizacije merne putanje primenom optimizacionog algoritma na bazi kolonije mrava, (4) modela postavljanja prizmatičnih mernih delova i konfigurisanja mernih senzora primenom genetskih algoritama. Naučno delo je potvrđeno u praksi kroz izvršen eksperiment za dva dela koja su obrađena (proizvedena) u svrhe ovog istraživanja. Rezultati inspekcije su potvrdili teorijske pretpostavke tj. pokazuju da su sva odstupanja za oba dela u unapred propisanim granicama. Dobijena optimizovana putanja se poredi sa mernom putanjom dobijenom pri *on-line* programiranju merenja na NUMM i sa mernom putanjom dobijenom u modulu za merne mašine u komercijalnom softveru PTC Creo (raniji naziv Pro/Engineer). Rezultati poređenja pokazuju da je optimizovana putanja, razvijena i implementirana u ovom naučnom delu, najmanje 20% kraća od putanje dobijene pogonskim programiranjem (*on-line*) NUMM i najmanje 10% kraća od putanje dobijene generisanje pomoću modula za merne mašine u softveru PTC Creo (PRO/Engineer).

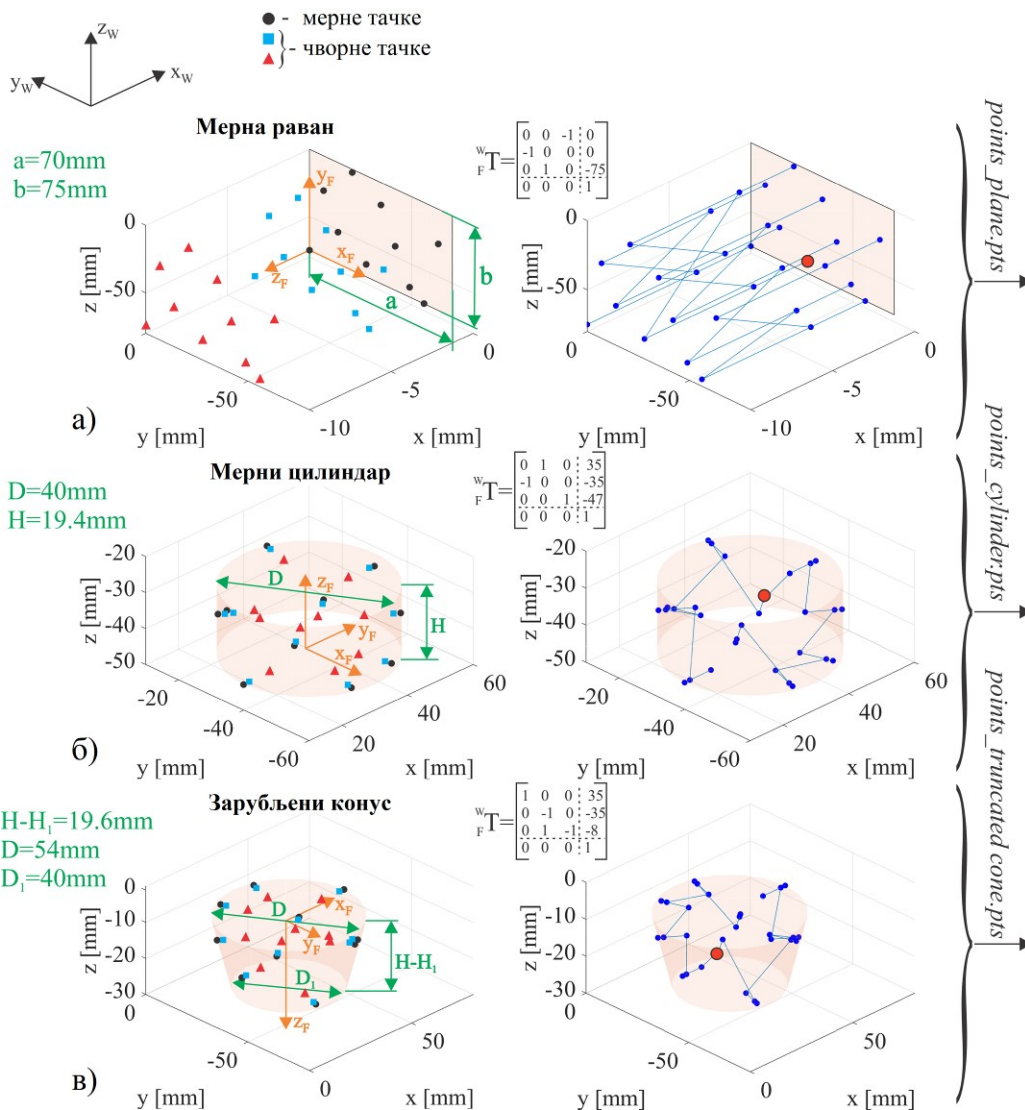
Numerički upravljane merne mašine (NUMM) su prepoznate kao fleksibilni element proizvodne metrologije, i kao takve primenljive su za širok spektar metroloških zadataka. Sa druge strane, metrološki zadaci zavise od geometrijske i metrološke kompleksnosti mernih delova i vrlo je važno da se verifikuje merna putanja pre izvršenja procesa merenja na NUMM.

Verifikacija merne putanje za planiranje inspekcije na NUMM ima za cilj vizuelnu proveru kolizije između mernog senzora, mernog predmeta i pomoćnog pribora. Predložena verifikacija je realizovana na konfigurisanoj virtuelnoj NUMM u CAD/CAM okruženju. Polazi od modeliranja mernog predmeta u odgovarajućem CAD sistemu, a potom generisanja merne putanje za planiranje inspekcije uz pomoć modifikovanog Hemerslejevog algoritma koji putanju definiše uz pomoć tri skupa tačaka. Prvi skup tačaka su merne tačke, drugi skup predstavljaju čvorne tačke i treći skup tačaka su tačke za izbegavanje kolizije. Koordinate ovih tačaka su definisane u prethodnim, a verifikovane u ovoj aktivnosti. Potom je izvršeno sortiranje (klasifikacija po pravilnom redosledu) tačaka u MatLab okruženju u svrhe generisanja point-to-point merne putanje. Sledeći korak je simulacija putanje na virtuelnoj NUMM u CAD/CAM sistemu za šta je prethodno potrebno, kao što je rečeno, modeliranje mernog dela, potom učitavanje point-to-point merne putanje, modeliranje komponenti NUMM koje obuhvata i definisanje kinematskih veza između njih i podešavanje koordinatnih sistema. Zajedno sa uvozom pomoćnog pribora i mernog predmeta u softver i podešavanjem mernih parametara kreira se virtuelni merni sistem i virtuelna NUMM. Izlaz iz virtuelnog mernog sistema je CL datoteka (DMIS program).

Koncept verifikacije potvrđen je kroz nekoliko primera generisanih mernih putanja za odabrane primitive koji učestvuju u kreiranju tolerancija za posebno dizajniran prizmatičan merni deo dat na slici u nastavku (slika 10.3 pod v)). Za metrološke primitive su odabrani ravan (slika 10.2 pod a)), cilindar (slika 10.2 pod b)) i zarubljeni konus (slika 10.2 pod v)). Crnom bojom su pokazane merne tačke, dok su plavom i crvenom bojom pokazane čvorne tačke merne putanje. Za jedan trenutni položaj u procesu simulacije na slici 10.2, plavom bojom je pokazana merna putanja sa mernim pipkom uprošćeno predstavljenim u obliku kruga ispunjenog crvenom bojom. Vizuelizacija je izvršena u softveru MatLab i na izlazu generiše sekvence putanje po primitivima. U ovom slučaju su to prema slici 10.2 *points_plane.pts*, *points_cylinder.pts* i *points_truncated_cone.pts*.

Simulacija putanje na virtualnoj NUMM zasniva se na generisanju point-to-point merne putanje kao jedinstvene sekvence u formatu (datoteci) pogodnom za učitavanje u CAD/CAM sistem. Merna putanja koja se simulira na virtuelnoj NUMM je najkraća moguća (optimizovana) i sa stanovišta troškova

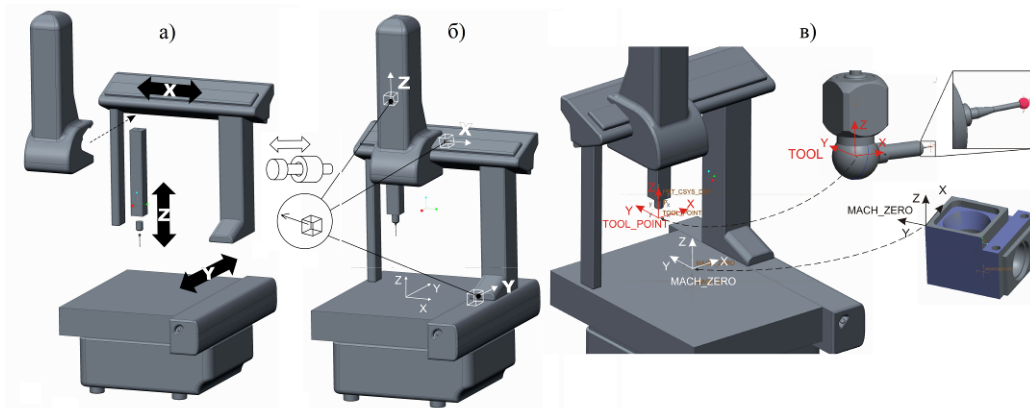
najekonomičnija, kao i najsigurnija zbog izbegavanja kolizije. Za programiranje merne putanje koristi se CMM podmodul, modula za CAD/CAM u okviru softvera PTC Creo.



Slika 10.2 Vizuelizacija merne putanje u MatLab okruženju za primitive: a) ravan, b) cilindar i, v) zarubljeni konus

Za generisanje merne putanje u CMM podmodulu CAD/CAM sistema kao što je PTC Creo, potrebno je realizovati nekoliko aktivnosti: (1) učitavanje referentnog CAD modela mernog dela za inspekciju, (2) modeliranje komponenti i sklopa NUMM, (3) definisanje mernih operacija i odabir koordinatnih sistema, (4) konfigurisanje mernih senzora, (5) izbor primitiva za inspekciju u skladu sa zadatim tolerancijama, (6) podešavanje mernih parametara, (7) uvoz mernih tačaka, dat kao rezultat izlaza MatLab koda za vizuelizaciju za primitive koji se mere, (8) generisanje merne putanje za sve metrološke primitive; (9) simulacija merne putanje, uključujući i senzor, i (10) simulacija merne putanje na konfigurisanoj virtuelnoj NUMM, koristeći opciju Machine Play Option.

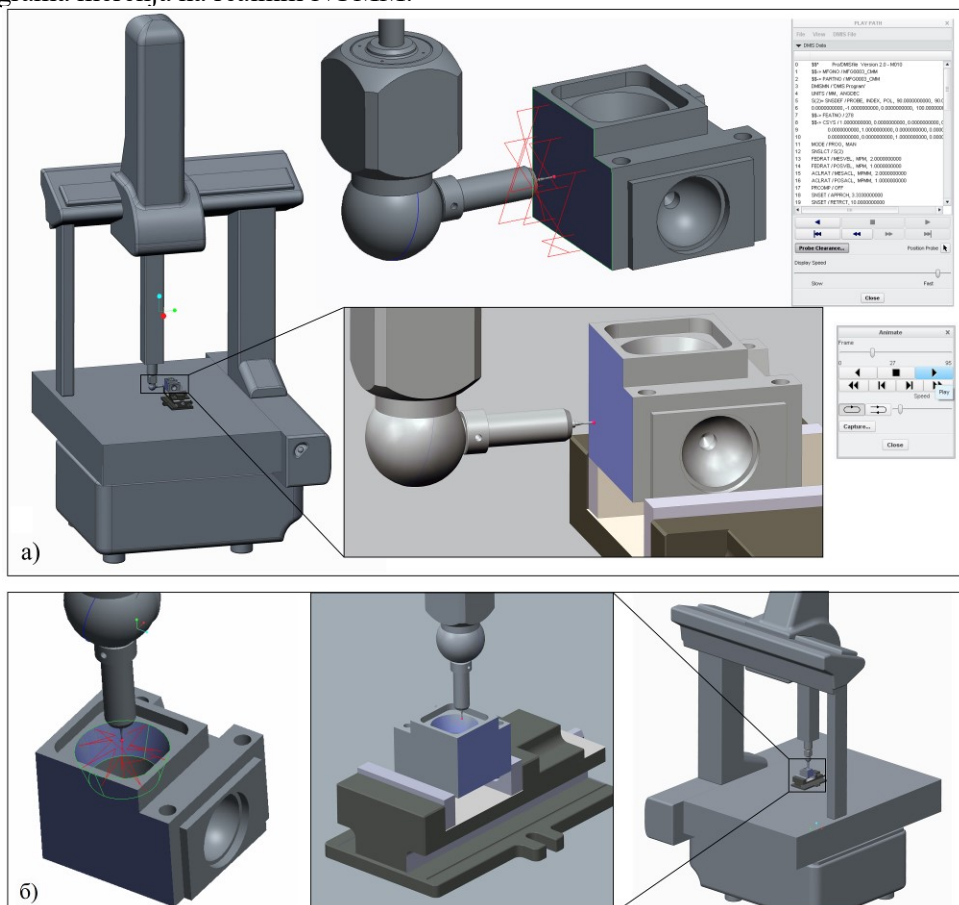
Na osnovu prethodnih istraživanja i rezultata u konfigurisanju virtuelnih mašina alatki i robota, što je u okviru projekta dato u ranijim istraživanjima i aktivnostima, konfigurise se i virtuelna NUMM u ovoj aktivnosti. Osnovna namena konfigurisane virtualne NUMM je provera programirane merne putanje u CAD/CAM okruženju na bazi putanje dobijene modifikovanim Hemerslejevim algoritmom i vizueluzacijom u MatLab softveru, kao i generisanje izlazne datoteke pogodne za dalju obradu i postprocesiranje. Simulacija merne putanje je sprovedena u cilju: (1) konfigurisanja off-line NUMM okruženja za programiranje, (2) verifikaciju programa pre procesa merenja, i (3) izbegavanje kolizije mernog senzora sa pomoćnim priborom i mernim delom. Detaljan prikaz virtuelne NUMM u softveru PTC Creo, sa osnovnim komponentama, sklopom i kinematskim vezama između pokretnih i nepokretnih komponenti je prikazano na slici 10.3. Pokretne veze (klizači) se koristi za sva translatorna kretanja (X, Y, Z). One omogućavaju kretanje komponenti NUMM u dozvoljenim granicama za svaku osu i ostvaruju programiranu putanju mernog pipka kao završnog uređaja.



Slika 10.3 CAD model NUMM za simulaciju merne putanje: a) osnovne komponente NUMM, b) sklop merne mašine sa tipovima kinematskih veza, v) koordinatni sistemi mernog predmeta i senzora

Kao što se može videti na slici 9.3 neophodno je definisati koordinatne sisteme: (i) radnog stola, obeleženog sa MACH_ZERO, (ii) mernog dela, obeleženog sa MACH_ZERO, (iii) nosača senzora, obeleženog sa TOOL_POINT, čije ose zauzimaju isti pravac i orijentaciju kao i ose koordinatnog sistema mernog predmeta, i (iv) mernog pipka, obeleženog sa TOOL, ukoliko je neophodno kreirati naknadno modeliran merni pipak. Poklapanjem koordinatnog sistema MACH_ZERO mernog dela i koordinatnog sistema MACH_ZERO radnog stola omogućava se postavljanje mernog dela na sto konfigurisane virtuelne merne mašine tokom simulacije. Ista procedura je i za podešavanje koordinatnih sistema TOOL i TOOL_POINT za podešavanje pipka u nosaču mernog senzora.

Za vreme simulacije merne putanje na virtuelnoj NUMM, slika 10.4, za ostvarivanje zadate putanje pored mernog predmeta i mernog senzora koristi se i pomoćni pribor. Pribor se može modelirati iznova (nestandardni pribor) ili učitati kao postojeći (standardni pribor), a od velikog značaja je za verifikaciju merne putanje sa stanovišta kolizije i tokom izvođenja programa. Nakon simulacije na virtuelnoj NUMM, verificirana je merna putanja i snimljena u CL datoteku (DMIS program) za dalju distribuciju u svrhe izvršenja programa merenja na realnim NUMM.



Slika 10.4 Simulacija merna putanja na virtuelnoj NUMM u CAD/CAM okruženju: a) ravna površina sa delom DMIS programa, i b) zarubljeni konus sa prikazom stezanja u pomoćnom priboru

Sumarno, u ovoj aktivnosti verifikovana je merna putanja, na bazi modifikovanog Hemerslejevog algoritma za distribuciju mernih tačaka za osnovne geometrijske primitive. Najpre se merna putanja vizualizuje u MatLab softveru, a zatim simulira u CMM modulu PTC Creo softvera. Simulacija merne putanje realizovana je na konfigurisanoj virtualnoj NUMM u CAD/CAM okruženju. Izlaz iz simulacije na virtualnoj NUMM je CL datoteka (DMIS program). Generisanjem ove datoteke i razvojem odgovarajućeg postprocesora ostavlja se mogućnost kreiranja liste upravljačkih podataka za različite NUMM. Imajući u vidu da se NUMM programiraju u jeziku svog proizvođača, predloženi koncept simulacije i njegov izlaz (datoteka) mogao bi biti koristan u smislu formata unifikacije softvera za programiranje NUMM različitih proizvođača.

11. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovih istraživanja je ojačavanje tehnologija u domaćim malim i srednjim preduzećima, radi podizanja konkurentnosti privrede Republike Srbije. Ovim preglednim radom pokazani su ostvareni rezultati istraživanja u 2019. godini, kao završnoj devetoj godini istraživanja.

Ciljevi ovog projekta su bili pojedinačni doprinosi razvoju domaće industrije: (1) razvoj novih domaćih obradnih sistema za izradu složenih proizvoda i za obradu složenih delova niže klase tačnosti, (2) znanja o višeosnim obradnim sistemima i o objektnom programiranju tih sistema, (3) razvoj domaćih mini obradnih sistema sa paralelnom kinematikom, (4) razvoj domaćih sistema za pakovanje i montažu na bazi robota sa paralelnom kinematikom, (5) povećavanje proizvodnosti i bolje energetske dejstvo alata na obradak i maksimalno iskorišćenje sistema mašina alatka-obradak-alat, obradom bez ekoloških posledica i (6) povećanje agilnosti i fleksibilnosti domaćih kompanija u pogledu kvaliteta na osnovu kreiranog digitalnog modela kvaliteta, zasnovanog na ontološkom modelu.

Značaj istraživanja u ovom projektu je u razvoju i implementaciji jedne strategije bazirane na istraživanju i inoviranju radi ubrzavanja reinženjeringa industrije putem uvođenja nove generacije obradnih sistema. Ostvareni rezultati u devetoj godini istraživanja koji su prezentovani u časopisima sa SCI liste, vodećim nacionalnim časopisima, međunarodnom monografijom, međunarodnim i domaćim konferencijama, daju nam za pravo da smatramo izvedena istraživanja veoma uspešnim i da ona predstavljaju osnovu za dalje aktivnosti tokom nastavka realizacije budućih projekata.

12. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Predstavljeni rezultati istraživanja su nastali tokom realizacije projekta, koji je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105.

13. LITERATURA

Ovo je spisak literature koja predstavlja ostvarene rezultate u devetoj godini istraživanja koji su prezentovani u časopisima sa SCI liste, vodećim nacionalnim časopisima, međunarodnoj monografiji, međunarodnim i domaćim konferencijama, i koja je korišćena za sastavljanje ovog preglednog rada.

- [1] Pjevic, M., Stojadinović, S., Tanović, Lj., Popović, M., Mladenović, G., Puzović, R.: *Determination of the Optimal Regression Model for the Measurement Quality Characteristics of the Micro Cutting Stone-Based Materials*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp.185 - 200, 2019.
- [2] Stojadinovic, S., Zivanovic, S., Slavkovic, N.: *Verification of the CMM Measuring Path Based on the Modified Hammersly's Algorithm*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp. 25 - 38, 2019.
- [3] Mladenovic, G., Milovanovic, M., Tanovic, Lj., Puzovic, R., Pjevic, M., Popovic, M., Stojadinovic, S.: *Development of application software for automatic manufacturing technology design of free form surfaces*, 3rd International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies – CNN TECH 2019, pp. 65 - 65, Zlatibor, Jul 2019.
- [4] Vasilic, G., Zivanovic, S., Kokotovic, B., Dimic, Z.: *Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No.7, pp. 3407 - 3421, 2019.
- [5] Pjević M., Popović M., Tanović Lj.: *Determination of the mathematical model of the micro cutting force for the granite jošanica in the ductile mode*, XX International Scientific and Technical Conference "Progressive

- Engineering, Technology and Engineering Education", pp. 210 - 212, Kyiv - Kherson, Ukraine, Sep, 2019.
- [6] Slavkovic, N., Zivanovic, S. Milutinovic, D.: *An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC*, International journal of computer integrated manufacturing, Vol.32, No.1, pp. 43 - 57, 2019.
- [7] Živanović, S., Dimić, Z.: *Virtuelna petoosna mašina alatka integrisana sa sistemom programiranja i upravljanja*, Tehnika – Mašinstvo, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, Vol. 68, No.3, pp. 397 - 404, 2019.
- [8] Zivanovic, S. Dimic, Z., Vorkapic, N., Mitrovic, S.: *Configuring of 3 axis mini CNC machine tool with control system based on LINUXCNC*, 14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019, pp. 15 - 28, Banjaluka, May 2019.
- [9] Toquica, JS., Zivanovic, S., Bonnard, R., Rodriguez, E., Alvares, AJ., Ferreira, JCE.: *STEP- NC based machining architecture applied to industrial robots*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol.41, pp. 314.1 - 314.18, 2019.
- [10] Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović, Lj., Milošević, M., Milovanović, A., Milošević, N., *Experimental Determination of Type of Fracture PLA Specimens in the Function of Printing Conditions*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN Tech 2019, pp. 42 - 42, Zlatibor, Srbija, 2019.
- [11] Živanović, S., Vorkapić, N., Dimić, Z.: *Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osne mini CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi*, Tehnika – Mašinstvo, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, Vol.68, No.6, pp. 823 - 831, 2019.
- [12] Pjević, M.: *Istraživanje uticaja radijusa zaobljenja vrha alata i brzine rezanja na pokazatelje kvaliteta pri mikro rezanju materijala na bazi mermera i granita*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2019.
- [13] Mladenovic, G., Milovanovic, M., Tanovic, Lj., Puzovic, R., Pjevic, M., Popovic, M., Stojadinovic, S.: *The Development of CAD/CAM System for Automatic Manufacturing Technology Design for Part with Free Form Surfaces*, Computational and Experimental Approaches in Materials Science and Engineering within Series Title Lecture Notes in Networks and Systems, 90, pp. 460 - 476, 2019.
- [14] Stojadinovic, S., Majstorovic, V.: *An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs*, Springer International Publishing, Switzerland, 2019.
- [15] Kokotovic, B., Vorkapic, N.: *Feedrate Optimization for 2.5D Milling Operations*, FME Transactions, Vol. 47, No. 3, pp. 613 - 623, 2019.
- [16] Majstorovic, V., Durakbasa, N., Takaya, Y., Stojadinovic, S.: *Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, pp. 1 - 11, 2019.
- [17] Zivanovic, S., Tabakovic, S., Randjelovic, S.: *Rapid Prototyping of Art Sculptural Shapes According to the Sample*, Journal for Technology of Plasticity, Fakultet tehničkih nauka, Vol. 44, No.1, pp. 27 - 32, 2019.

Lj. Tanović, S. Živanović, R. Puzović, B. Kokotović, M. Popović, N. Slavković,
G. Mladenović, S. Stojadinović, M. Pjević, N. Vorkapić

The development of a new generation of domestic machining systems The results of research activities in 2019.

Abstract

The subject of research activities is a new generation of domestic machining systems, together with manufacturing technologies that are needed for development of these machining systems and for their undisturbed functioning. The key research areas in these technologies are machine tools, robots, tools, manufacturing processes and digital quality. The research activities are focused to the open architecture technologies regarding the control systems and programming, but regarding the structures of these systems, up to date research in these areas is followed. In this way we provide the flexibility of manufacturing resources and agility of the company for which these new manufacturing systems together with accompanying technologies are developed. In this paper we give a review of the research results in 2019. that round out this nine-year project cycle.

Key words: machining system, technologies, machine tool, machining by robot, microcutting, digital quality



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

UTICAJ KINEMATSKE VISKOZNOSTI NA GENERISANU TOPLITU U SKLOPU GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG CILINDRIČNO VALJKASTIM DVOREDIM LEŽAJEM

Rezime: Sklop glavnog vretena predstavlja jedan od najvažnijih sklopova u mehaničkoj strukturi mašine alatke, čije ponašanje u eksploataciji ima limitirajući uticaj na tačnost i proizvodnost. Toplotne i elastične karakteristike sklopa glavnog vretena se menjaju u zavisnosti od uslova kao što su početni zazori u sklopu, toplotne deformacije elemenata sklopa, uslova obrade i hlađenja. Kod savremenih konstrukcionih rešenja sklopa glavnog vretena, izuzev motor vretena, osnovni izvori toplote su ležaji, pa pri definisanju toplotnog modela navedenog sklopa treba uzeti u obzir sve kotrljajne elemente, prstenove ležaja, vreteno, kućište i toplotu koja se prenosi kroz njih.

U radu je analiziran uticaj kinematske viskoznosti na generisanu toplotu u ležaju, kao i toplotno ponašanje konstrukcionog rešenja sklopa glavnog vretena uležištenog cilindrično valjkastim dvoredim ležajem. Analiza toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena izvršena je primenom metode konačnih elemenata. Takođe u radu je prikazan način izračunavanja koeficijenata provođenja i prelaženja, kao i količine generisane toplote, pri različitim brojevima obrtaja, za konkretno konstrukciono rešenje sklopa glavnog vretena.

Ključne reči: Sklop glavnog vretena, kinematska viskoznost, generisana toplota, valjkasti dvoredi ležaj

1. UVOD

Sklop glavnog vretena predstavlja jedan od najvažnijih sklopova u mehaničkoj strukturi mašine alatke, čije ponašanje ima limitirajući uticaj na tačnost i proizvodnost. Toplotne i elastične karakteristike sklopa glavnog vretena se menjaju u zavisnosti od uslova kao što su početni zazori sklopa, toplotne deformacije elemenata sklopa, uslova obrade i hlađenja. Kod savremenih konstrukcionih rešenja sklopa glavnog vretena, izuzev motor vretena, osnovni izvori toplote u sklopu glavnog vretena su ležaji. Imajući prethodno u vidu, pri definisanju toplotnog modela sklopa glavnog vretena treba uzeti u obzir kotrljajne elemente i prstenove ležišta, vreteno i toplotu koja se prenosi kroz njih. Razvijena toplota izaziva promenu kontaktnog pritiska u ležaju, koji utiče na granične uslove kao što su: razvijena toplota, toplotna kontaktna provodljivost, dinamička krutost, prigušenje sklopa glavnog vretena itd. Početni preklop stvara početni kontaktni pritisak na dodirnim površinama prstenova. Kako se toplotni gradijent menja, duž radijalnog pravca, sa vremenom i režimima rada vretena, dolazi do toplotnih deformacija elemenata ležaja koje prouzrokuju povećanje prednaprežanja, a samim tim i promenu krutosti sklopa glavnog vretena.

Danas su prisutne izuzetne mogućnosti za analizu toplotno-elastičnog ponašanja primenom metode konačnih elemenata. Sve to stvara uslove i nameće potrebu da se procesu projektovanja sklopa glavnog vretena pristupi u sasvim drugim uslovima nego što su bili prisutni pre nekoliko decenije. Savremena računarska tehnika i programski sistemi pružaju mogućnosti da se proces projektovanja značajno ubrza i na taj način skрати vreme razvoja proizvoda, kao i da se u procesu projektovanja dođe do daleko boljih rešenja [4].

Temperatura je jedan od glavnih uzroka koji dovodi do otkaza sklopa glavnog vretena mašina alatki i njene vrednosti su određene eksperimentalno i računarski [11]. Primenom savremene opreme za merenje temperature određene su vrednosti temperature na karakterističnim tačkama sklopa glavnog vretena u stacionarnom temperaturnom stanju [1]. Razvijena količina toplote u ležajevima izračunata je na osnovu momenata trenja usled opterećenja i momenata trenja usled podmazivanja. Polazeći od usvojenog modela

¹ Pred. dr Vladimir Blanuša, dipl. inž.-master, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Novi Sad, blanusa@vtsns.edu.rs

² Prof.dr Milan Zeljković, dipl. inž., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, milanz@uns.ac.rs

³ Vanr. prof. dr Aleksandar Živković, dipl. inž., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, aco@uns.ac.rs

prostiranja toplote u navedenom sklopu određene su vrednosti koeficijenata konvekcije i provođenja toplote, kao polazne veličine za računarsko modeovanje.

Polazeći od dosadašnjih rezultata u analizi toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena u radu je analiziran uticaj kinematske viskoznosti na vrednost generisane toplote u ležaju za slučaj uležištenja sa cilindrično valjkastim dvoredim ležajem.

2. ODREĐIVANJE KOEFICIJENATA KONVEKCIJE I PROVOĐENJA TOPLOTE

U sklopu glavnog vretena osnovni unutrašnji mehanizmi prostiranja toplote su: konvekcija usled obrtanja ležaja, konvekcija usled obrtanja vretena, provođenje između kotrljajnih tela i prstenova, provođenje između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno provođenje između unutrašnjeg prstena i glavnog vretena [11], [4]. Da bi se izvršila računarske analize potrebno je izračunati vrednosti koeficijenata konvekcije i provođenja toplote.

Konvekcija usled obrtanja ležaja. Ostvaruje se između ležaja i vazduha. Apsorbovana toplota od masti se u ovom radu ne razmatra. Pošto se zbog male temperaturne razlike zračenje može zanemariti, koeficijent prelaza toplote se izračunava prema [3] iz uslova protoka vazduha kroz ležaj, pri turbulentnom strujanju. U slučaju ovakog prelaza toplote ukupna brzina strujanja vazduha usled obrtanja ležaja se izračunava iz aksijalne i tangencijalne komponente. Površina za aksijalni protok vazduha između unutrašnje i spoljašnje staze kotrljanja je:

$$A_{ax} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad m$$

Aksijalna brzina strujanja se može odrediti kao brzina strujanja između dva cilindra iz relacije:

$$u_{ax} = \frac{V}{A_{ax}} = \frac{4V}{\pi(D+d)} \quad m^2/s$$

gde je V-zapreminski protok vazduha određen iz jednačine kontinuiteta:

$$V = u_{sr} \cdot A_s = \frac{u}{2} \cdot B \cdot s = \frac{1}{2} \cdot d_m \cdot \omega \cdot s \cdot B \quad m^3/s$$

U prethodnoj relaciji je razmatrana srednja brzina vazduha, kroz prostor poprečnog preseka:

$$A_s = B \cdot x \cdot s$$

Tangencijalna komponenta brzine strujanja po srednjem prečniku se određuje iz relacije za strujanje vazduha između pokretnog i nepokretnog cilindra:

$$u_{tan} = \frac{\omega \cdot d_m}{2} = \frac{\pi \cdot f \cdot (D+d)}{4}$$

gde su:

f-frekvencija ležaja Hz

D-prečnik spoljašnjeg prstena *m*

d-prečnik unutrašnjeg prstena *m*

Rezultujuća brzina strujanja vazduha pri obrtanju ležaja određuje se iz aksijalne i tangencijalne komponente.

$$U = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{tan}^2} \quad m^2/s$$

Koeficijent konvekcije se izračunava prema [2]:

$$\alpha = (c_0 + c_1 U^2) \frac{W}{m^2 K}$$

Pri čemu su c_0 i c_1 konstante dobijene eksperimentalno [3], [11].

U tabeli 1 su date vrednosti koeficijenta konvekcije kroz ležaj za različite brojeve obrtaja glavnog vretena.

Tabela 1. Vrednosti koeficijenta konvekcije pri obrtanju ležaja za različite brojeve obrtaja [11]

Broj obrtaja <i>o/min</i>	Koeficijent konvekcije α <i>W/m²K</i>
2800	160,8
3550	252,2
4500	400,1
5600	614,4
6300	775

Konvekcija usled obrtanja glavnog vretena je definisana u skladu sa teorijom izračunavanja koeficijenta konvekcije pri strujanju vazduha oko ravne ploče. Koeficijent konvekcije pri obrtanju glavnog vretena se određuje sledećom relacijom uz pretpostavku da je razlika temperature mala:

$$h = \frac{Nu_D \cdot \lambda}{D} \quad W/m^2K$$

gde je:

λ -toplotna provodljivost vazduha [W/m^2K]

D_i -prečnik vretena m

Nu_{Di} -Nusseltov broj koji se određuje iz relacije:

$$Nu_d = 0,133 \cdot Re_D^{2/3} \cdot Pr^{1/3}$$

Pri čemu je: Re_D -Rejnoldsov broj, a Pr -Prantlov broj.

Prethodne relacije važe za slučaj kada je $Re_D > 10000$ i $Pr > 0,7$.

Polazeći od konstrukcionog rešenja razmatranog sklopa glavnog vretena može se konstatovati da prostiranje toplote konvekcijom nastaje na spoljnoj i unutrašnjoj površini vrha vretena. Na osnovu prethodnih relacija određen je koeficijent konvekcije usled obrtanja na spoljašnjoj cilindričnoj i na unutrašnjoj konusnoj površini vrha glavnog vretena za različite brojeve obrtaja (tabela 2).

Tabela 2. Vrednosti koeficijenata konvekcije pri obrtanju vretena za različite brojeve obrtaja

Broj obrtaja o/min	Koeficijent konvekcije za spoljnu cilindričnu površinu $h \quad W/m^2K$	Koeficijent konvekcije za unutrašnju konusnu površinu $h \quad W/m^2K$
2800	29,18	21,44
3550	37,56	25,1
4500	40,3	32,65
5600	46,1	34,2
6300	55,5	36,1

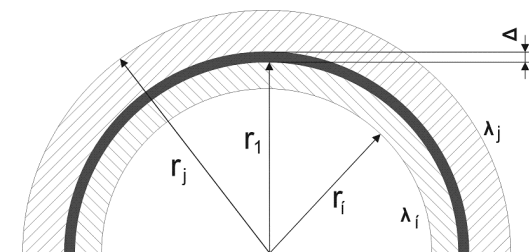
Provođenje toplote između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno unutrašnjeg prstena i vretena.

Koeficijent provođenja toplote kod sklopa glavnog vretena u velikoj meri zavisi od zazora između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno unutrašnjeg prstena i vretena. Pojedini autori čak predlažu postavljanje određenih kompozitnih materijala (npr. poliestra) na mestu dodira da bi se smanjile toplotne deformacije glavnog vretena. Toplotna provodljivost između dva elementa se može odrediti na osnovu relacije [5]:

$$\lambda_{ij} = \frac{\ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)}{\frac{\ln\left(\frac{r_j}{r_1}\right)}{\lambda_j} + \frac{R_w}{r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{\lambda_i}}$$

gde su λ_i i λ_j -toplotne provodljivosti prstena, odnosno kućišta.

Ostale oznake su prikazane na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz kontakta između spoljašnjeg prstena ležaja i kućišta [11]

U prethodnoj relaciji R_w predstavlja toplotnu kontaktanu otpornost na mestu dodira prstena sa kućištem i prema [5] se određuje iz relacije:

$$R_w = \frac{r_1}{\lambda_{ij}} \ln\left(\frac{r_1 + \Delta}{r_1}\right)$$

gde je Δ -zazor između posmatranih elementata, uz pretpostavku da je zazor isti po celom obimu između prstena i kućišta ležaja.

Na sličan način zamenom prečnika i zazora je određena provodljivost na mestu kontakta između unutrašnjeg prstena i vretena. U tabeli 3 prikazane su vrednosti koeficijenta provođenja toplote određene na osnovu prethodnih relacija [10].

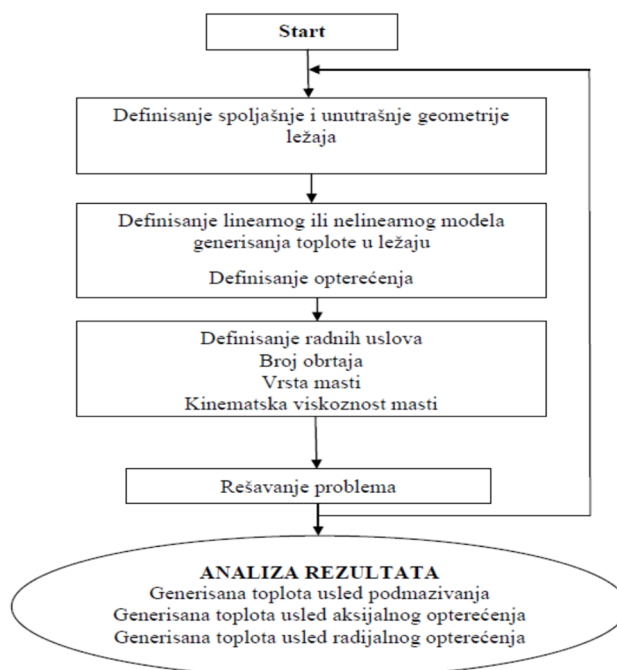
Tabela 3. Vrednosti koeficijenta provođenja između prstena i kućišta, odnosno prstena i vretena [11]

Mesto kontakta	Koeficijent provođenja $\Delta \text{ W/m}^2\text{K}$
Unutrašnji prsten/glavno vreteno	30,41
Spoljašnji prsten/pinola (kućište)	49,95

3. ODREĐIVANJE GENERISANE TOPLOTE U LEŽAJU U ZAVISNOSTI OD VREDNOSTI KOEFICIJENTA KINEMATSKE VISKOZNOSTI

Unutar ležaja u toku njegove eksploatacije stalno dolazi do prenosa toplote sa jednog na drugo telo koja čine sam ležaj. Dve osnovne fizičke veličine koje određuju razmenu toplote između dva tela su: količina toplote i temperatura. Dva tela u fizičkom kontaktu razmenjuju toplotu sve dok se intenzivnost kretanja njihovih molekula (temperatura) ne izjednačini. Temperaturna razlika dva tela predstavlja pogonsku silu za razmenu toplote među njima.

Algoritam matematičkog modela za određivanje generisane toplote u ležajima prikazan je na slici 2.



Slika 2. Algoritam matematičkog modela određivanja generisane toplote [2]

Određivanje momenta trenja

$$M = M_0 + M_1 + M_2 \quad Nmm$$

M_0 -moment trenja usled podmazivanja,

M_1 -moment trenja usled radijalnog opterećenja,

M_2 -moment trenja usled aksijalnog opterećenja.

$$M_0 = 10^{-7} \cdot f_0 (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_m^3 \text{ Nmm}$$

f_0 -koeficijent zavisan od tipa ležaja, i od tipa sredstva za podmazivanje (za valjkasti ležaj iznosi 3),
 v -kinematska viskoznost sredstva za podmazivanje ,
 n -broj obrtaja,
 d_m -srednji prečnik ležaja.

$$M_1 = f_1 \cdot F_r \cdot d_m \text{ Nmm}$$

f_1 -koeficijent zavisan od tipa ležaja i za valjkasti ležaj iznosi 0,0003-0,0004,
 F_r -radijalno opterećenje ležaja ,

$$M_2 = f_2 \cdot F_a \cdot d_m \text{ Nmm}$$

f_2 -na osnovu n d_m v i F_a/A ,

$$A = k_B \cdot 10^{-3} \cdot d_m^{2,1}$$

A-površina,

F_a -aksijalno opterećenje ležaja

Određivanje količine razvijene toplote u ležaju

Razvijena toplota u ležajima je izračunata na osnovu momenta trenja usled opterećenja i momenta trenja usled podmazivanja. Ukupna količina generisane toplote na cilindrično valjkastom ležaju se dobija na osnovu jednačine:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 \text{ W}$$

$$Q_u = M_t \cdot \omega$$

$$\omega = \pi \cdot n / 30$$

Za matematičko izračunavanje generisane toplote u ležaju mogu se primeniti dve vrste modela raspodele opterećenja: linearan i nelinearan. U samom radu biće prikazan samo linearan model generiranja toplote.

Linearan model

Q_0 -generisana toplota usled podmazivanja,

Q_1 -generisana toplota usled radijalnog opterećenja,

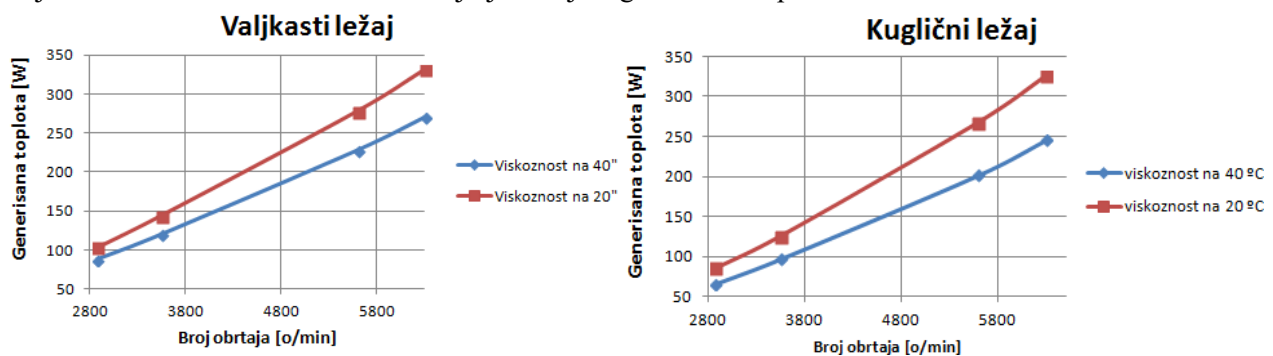
Q_2 -generisana toplota usled aksijalnog opterećenja.

$$Q_0 = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot f_0 (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_m^3 \cdot 10^{-7}$$

$$Q_1 = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot d_m \cdot n \cdot f_1 \cdot F_R$$

$$Q_2 = 1,05 \cdot 10^{-4} \cdot d_m \cdot n \cdot f_2 \cdot F_a \cdot 0,1$$

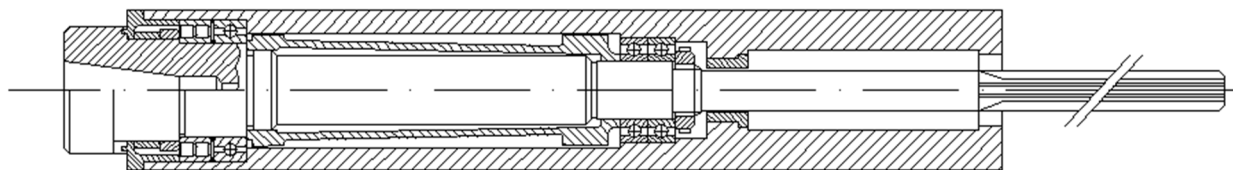
Uticaj kinematske viskoznosti na veličinu generisane toplote u cilindrično valjkastom dvoredom ležaju za glavna vretena i kugličnom ležaju sa kosim dodirnom prikazana je na slici 3. Na osnovu rezultata vidi se da cilindrično valjkasti ležaj generiše nešto veću toplotu u odnosu na kuglični, i da pri većim brojevima obrtaja ležaja kinematska viskoznost ima značajniji uticaj na generisanu toplotu.



Slika 3. Uticaj kinematske viskoznosti na generisanu toplotu cilindrično valjkastog i kugličnog ležaja za glavna vretena [2]

4. RAČUNARSKO MODELOVANJE TOPLOTNOG PONAŠANJA SKLOPA GLAVNOG VRETENA

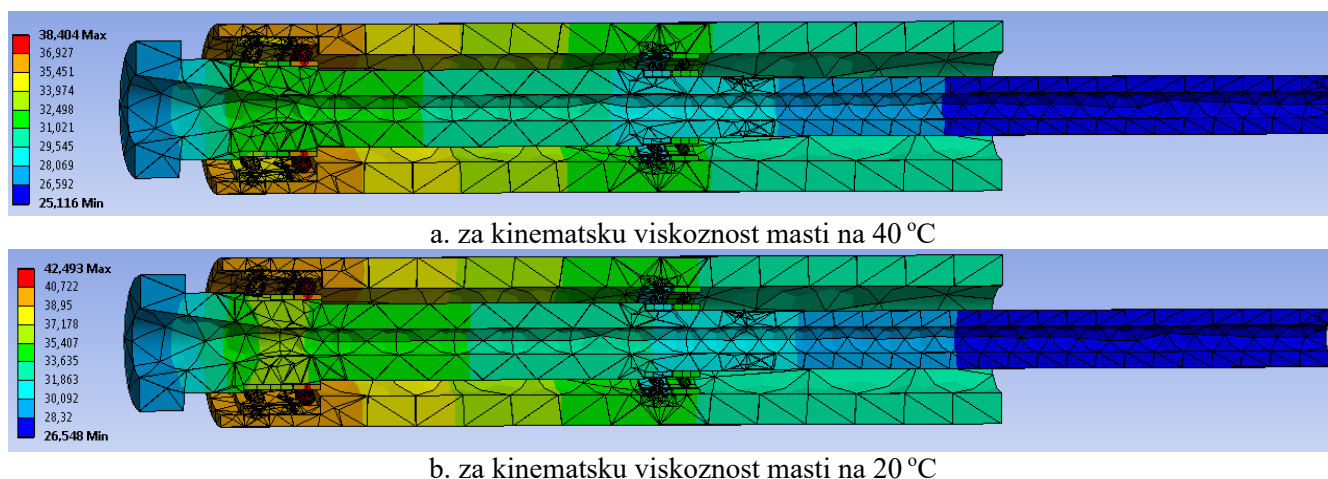
Na slici 4 prikazano je konstrukciono rešenje analiziranog sklopa glavnog vretena sa valjkastim dvorednim ležajem.



Slika 4. Izgled sklopa glavnog vretena sa valjkastim dvorednim ležajem

Na osnovu zapreminskog modela primenom metode konačnih elemenata u fazi preprocesiranja definisana je mreža 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). Takođe u fazi preprocesiranja potrebno je definisati generisanu toplotu u ležaju, koeficijente provođenja i prevođenja, vrednost temperature okoline kao i ograničenja.

Na slici 5. prikazani su rezultati toplotnog ponašanja (raspored temperaturnih polja po 3D modelu) sklopa glavnog vretena za kinematsku viskoznost masti na temperaturi od 40 °C (slika 5.a) i 20 °C (slika 5.b).



a. za kinematsku viskoznost masti na 40 °C

b. za kinematsku viskoznost masti na 20 °C

Slika 5. Rezultati toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena nakon postprocesiranja

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata prikazanih u radu vidi se da kinematska viskoznost ima veći uticaj na generisanu toplotu sa porastom broja obrtaja i kod valjkastog i kugličnog ležaja. Posebnu pažnju ovom parametru treba posvetiti pri analizi visokobrzinskih glavnih vretena mašina alatki, ili ležajnih sklopova gde se generišu visoke temperature.

Primenom matematičkog modela za određivanje generisane toplote u ležaju, kao i računarskog modelovanja sklopa glavnog vretena postoji mogućnost da se još u fazi projektovanja, sa što većom pouzdanošću predvidi toplotno ponašanje sklopa glavnog vretena u eksploataciji.

6. LITERATURA

- [1] Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A., Štrbac, B., Hadžistević, M.: Savremeni postupci merenja temperature, Zbornik radova, CD rom, Infoteh-Jahorina, Sesija PRS-Proizvodni sistemi, Ref. Prs 6, ISSN: 99938-624-2-8, 2012.
- [2] Blanuša, V.: Analiza ponašanja cilindrično valjkastih ležaja za specijalne namene, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [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] 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, Issue 6, Pages 1003-1010, 2006.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Uticaj toplotnog opterećenja na prednaprezanje kugličnih ležišta sa kosim dodirrom, Zbornik radova, CD rom, 33 JUPITER konferencija, 20 Simpozijum CAD/CAM, ISSN: 978-86-7083-628-0, Pages 2.1-2.6, 2007.
- [10] 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 učešćem, ISSN: 978-86-7892-131-5, Pages 409-412, 2008.
- [11] Živković, A.: Eksperimentalna i računarska analiza toplotno-elastičnog ponašanja sklopa visokobrzinskog glavnog vretena mašina alatki, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [12] Živković, A.: Računarska i eksperimentalna analiza ponašanja kugličnih ležaja za specijalne namene, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.

INFLUENCE OF KINEMATIC VISCOSITY ON GENERATED HEAT UNDER THE MAIN SPINDLE OF BEARING CYLINDRICALLY CYLINDER ROLLER BEARING

Abstract: *The main spindle assembly is one of the most important assemblies in the mechanical structure of a machine tool, whose operation behavior has a limiting effect on accuracy and productivity. The thermal and elastic characteristics of the main spindle assembly change depending on conditions such as the initial clearances in the assembly, the thermal deformation of the assembly elements, the processing and cooling conditions. In modern construction solutions of the main spindle assembly, except for the spindle motor, the basic heat sources are bearings, so when defining the thermal model of the said assembly, all rolling elements, bearing rings, spindle, housing and heat transferred through them should be taken into account.*

The paper analyzes the influence of kinematic viscosity on the generated heat in the bearing, as well as the thermal behavior of the structural solution of the main spindle assembly bearing a cylindrically cylindrical double row bearing. The analysis of the thermal behavior of the main spindle assembly was performed using the finite element method. Also, the paper presents the method of calculating the conduction and transition coefficients, as well as the amount of heat generated, at different speeds, for the specific structural solution of the main spindle assembly.

Key words: *Main spindle assembly, kinematic viscosity, heat generated, double row roller bearing*

Napomena: *U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.*



Gostimirović, M., Pavkov, B., Rodić, D., Sekulić, M. ¹⁾

APLIKACIJA ZA MODELIRANJE I IZBOR MERODAVNIH REŽIMA OBRADNE PRI STRUGANJU

Rezime

U uslovima računarom integrisane proizvodnje, osnovni problem pri izboru najpovoljnijih režima obrade je što ne postoje pouzdani matematički modeli kojima se opisuju tehno-ekonomski pokazatelji procesa obrade rezanja. Stoga se vrlo često elementi režima obrade određuju korišćenjem iskustvenih saznanja ili preporuka naučno-istraživačkih institucija i proizvođača alata, a koji su daleko od najpovoljnijih za dato stanje. U tom kontekstu, ovaj rad prikazuje projektovanje koncepta baze podataka elemenata režima obrade pri struganju, kao mogućeg integrisanog podsistema sveobuhvatnog informacionog sistema. Implementacijom razvijene aplikacije stiče se osnovni preduslov za modeliranje i izbora merodavnih elemenata režima obrade za tekuće uslove obrade.

Ključne reči: *informacioni sistem, baza podataka, obradni proces, elementi režima obrade*

1. UVOD

Današnja proizvodnja, u uslovima konkurentskog i turbulentnog okruženja, zahteva potpuno zadovoljenje potrošača u pogledu obezbeđenja proizvoda ili usluga potrebnog kvaliteta, prihvatljivih cena i minimalnih rokova isporuke. Uz to, globalno tržište traži raznovrstan asortiman proizvoda kratkog životnog ciklusa, tako da na tržištu mogu opstati samo proizvodi koji potrošačima pružaju više od očekivanog. Ovi zahtevi tržišno orijentisane proizvodnje uslovljavaju integraciju industrijskog sistema na svim eksternim i internim nivoima. Integracija svih računarom podržanih aktivnosti procesa proizvodnje i njegovog poslovnog okruženja, u naučno-stručnoj javnosti naziva se računarom integrisana proizvodnja.

Kod računarom integrisane proizvodnje, obezbeđenje efikasne i produktivne izrade delova traženog kvaliteta obrade, postiže se definisanjem najpovoljnijih uslova proizvodnje u svim njenim segmentima. Posebno važna stavka je definisanje elemenata režima obrade koji su u najeksplicitnijoj vezi sa funkcionalnim i izlaznim karakteristikama obradnog sistema [1,2].

Izbor najpovoljnijih elemenata režima obrade koji se u datim uslovima mogu ostvariti, posebno dobija na značaju kod fleksibilnih obradnih sistema visokih investicionih vrednosti. Naime, samo upotrebom adekvatnih elemenata režima obrade mogu se zadovoljiti strogi zahtevi savremene proizvodnje, uz istovremenu isplativost uloženi investicionih zahvata.

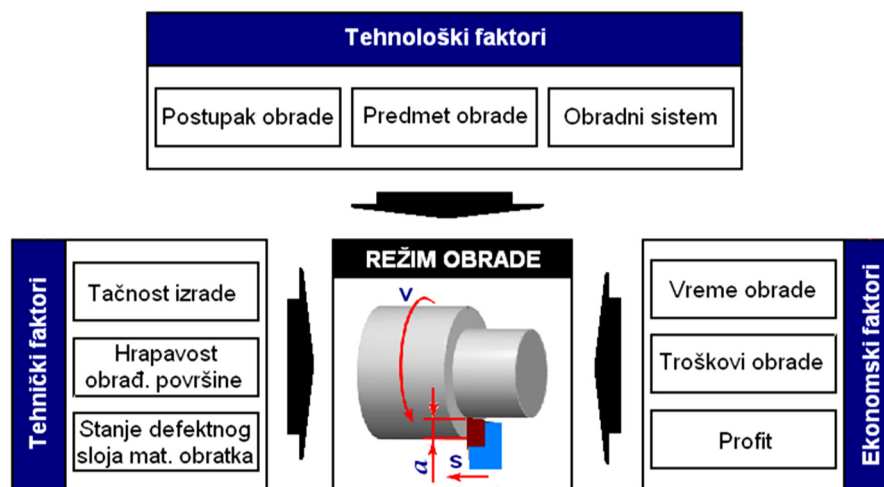
Izbor elemenata režima obrade, kao i svih drugih aktivnosti računarom integrisane proizvodnje, u direktnoj je sprezi sa industrijskim informacionim sistemom i njemu pripadajućom bazom podataka. U tom kontekstu, razvoj modula baze podataka o režima obrade, odnosno aplikacionih rešenja za upravljanje ovom bazom podataka, predstavlja ključno pitanje integrisane baze podataka [3,4]. Cilj ovog rada je da se projektuje baza elemenata režima obrade pri struganju i razvije aplikacija za modeliranje i izbor merodavnih režima obrade zasnovan na preporukama vodećih proizvođača alata, a upotrebom sistema za upravljanje bazama podataka.

2. REŽIM OBRADNE

Savremeni obradni sistemi, zavisno od niza uticajnih faktora proizvodnje, mogu da rade u širokom dijapazonu intenziteta, rentabiliteta i kvaliteta obrade. Pri tome se tehno-ekonomski efekti rada obradnog sistema najlakše regulišu izborom elemenata režima obrade, a saglasno: postupku obrade, mogućnostima mašine alatke, karakteristikama predmeta obrade, svojstvima alata i sl.

¹⁾ Prof. dr Marin Gostimirović (maring@uns.ac.rs), MSc Branko Pavkov (petar997@gmail.com), Doc. dr Dragan Rodić (rodicdr@uns.ac.rs), Prof. dr Milenko Sekulić (milenkos@uns.ac.rs), Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija

Režim obrade obuhvata osnovne parametre procesa obrade koji definišu međusobni položaj i relativno kretanje alata i obratka tokom odvijanja procesa [5]. Određuju se za svaki zahvat zavisno od postupka obrade. Kod postupaka obrade struganjem, gde glavno kružno kretanje izvodi obradak dok pomoćno pravolinijsko kretanje izvodi alat, elementi režima obrade su: dubina rezanja a , pomak s i brzina rezanja v . Pri tome, elementi režima obrade zavise od velikog broja faktora koji se mogu sistematizovati kao tehnički, tehnološki i ekonomski faktori, slika 1.



Slika 1. Struktura uticajnih faktora na elemente režima obrade

Pošto režim obrade ima direktni uticaj na rentabilnost i kvalitet obrade, određivanje elemenata režima obrade se može sprovesti samo na osnovu tehnološke i ekonomske analize svake operacije i zahvata postavljenog tehnološkog procesa. Pri tome se izabrane vrednosti nazivaju merodavni režim obrade, koji podrazumeva najbolje vrednosti koje se u datim uslovima mogu ostvariti. Za određivanje i izbor merodavnih elemenata režima obrade koristi se više postupaka koji su uglavnom zasnovani na bazi preporuka i proračuna [6].

3. KONCEPT BAZE ELEMENATA REŽIMA OBRADE

Baza podataka čini fundamentalnu suštinu informacionog sistema namenjenog za ažuriranje, procesiranje i generisanje informacionih resursa određenog realnog sistema. Pri tome baza podataka predstavlja integrisani skup podataka, procedura i aktivnosti koje omogućuju upravljanje podacima tako da se lako pronađu, obrade i prikažu u protumačenom obliku, tj. kao informacija. Shodno tome, modeliranje baze podataka se smatra najvažnijim segmentom dizajniranja informacionog sistema [7].

Proces modeliranja baze podataka sastoji se od tri osnovne grupe aktivnosti, a koje se praktično izvršavaju paralelno: formalno uređenje podataka, uvođenje sistema za upravljanje bazom podataka i dizajniranje korisnički orijentisanog programa [8]. Naime, kako se baza podataka projektuje da bi se koristila putem programske aplikacije, ona svojom organizacijom i strukturom mora da odgovara potrebama tog programa. S druge strane, sam aplikacioni program se dizajnira na osnovu rezultata snimanja i analiza zahteva korisnika, ali i na osnovu već oblikovane arhitekture baze podataka. Efikasan i automatizovan rad korisnika sa sadržajem baze podataka ostvaruje se programskim sistemom za upravljanje bazom podataka.

Savremena metodologija izgradnje i implementacije baze podataka oslanja se na niz faznih sekvenci koje se definišu kao životni ciklus razvoja baze podataka. Životni ciklus omogućuje pravilno planiranje, izvršavanje i nadzor razvoja baze podataka, kao i konzistentan i standardizovan razvoj svake pojedine faze. Pri tome, životni ciklus razvoja baze podataka obuhvata sledeće faze: istraživanje, analiziranje, oblikovanje, programiranje, implementacija i održavanje.

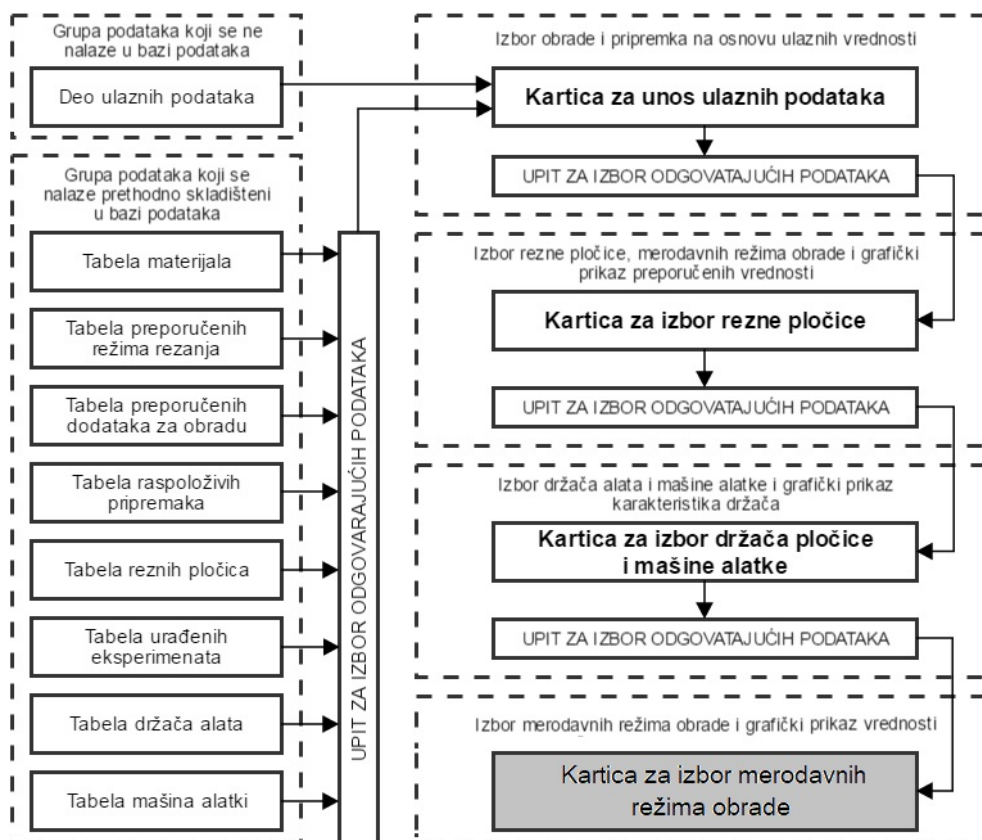
Shodno navedenom, projekat razvoja i dizajniranja baze elemenata režima obrade, u principu takođe mora da prođe kroz navedene faze da bi se na sistematičan način stvorila osnova za kvalitetno rešenje programske aplikacije za izbor merodavnih elemenata režima obrade [9].

3.1 Modeliranje logičke strukture baze podataka za izbor režima obrade

Prve aktivnosti koja se realizuju na početku razvoja svake baze podataka, vezane su pre svega za postavku konceptualnog modela logičkog opisa organizacije i strukture podataka. U tom kontekstu, modeliranje baze podataka za izbor elemenata režima obrade zahteva da se prvo sagleda postojeće realno stanje obradnog sistema radi identifikacije ciljeva, zahteva, problema i ograničenja. Analiza podataka i njihove strukture, tj. razumevanje

odnosa između entiteta i obeležja obradnog procesa je sledeći značajan preduslov za uspešnost modeliranja baze režima obrade. U okviru ove faze se analiziraju preporučene vrednosti i analitički proračuni elemenata režima obrade, pri čemu se sva neophodna znanja crpe iz osnova teorije obradnih procesa. U nastavku se potom sprovedi oblikovanje, odnosno modeliranje logičkog opisa baze podataka za izbor elemenata režim obrade.

Na slici 2 prikazana je šema globalne logičke strukture baze podataka za izbor merodavnih elemenata režima obrade pri struganju. Ovaj koncept polazi od pretpostavke da se posmatrani zahvat ili grupa sličnih zahvata definišu istim elementima režima obrade, kao i jednim matematičkim modelom opisa stanja procesa obrade. Konceptualni dizajn precizno definiše ulazne i izlazne podatke neophodne za efikasno funkcionisanje aplikacije. Ovde se pretpostavlja da se svi potrebni ulazni podaci definišu preko formulara za unos podataka, preko koga se zatim startuje algoritam za izbor elemenata režima obrade. Sledi provera dobijenih elemenata režima obrade, da bi potom svi izlazni rezultati prvo bili zapisani u datoteku sa izlaznim rezultatima, a potom po potrebi prikazani u odgovarajućem obliku.



Slika 2. Šema logičke strukture baze podataka za izbor merodavnih elemenata režima obrade

Struktura ulaznih podataka koji se koriste pri modeliranju baze podataka o elementima režima obrade, konkretno se definiše preko dve osnovne grupe podataka. Prvi su promenljivi podaci koji se ne mogu arhivirati u bazi podataka, odnosno koji se posebno definišu za svaki posmatrani zahvat obrade. Ovi podaci su relativno nezavisni od sredstava rada (mašine alatke, alata i materijala obratka) i u ovu grupu podataka su svrstani dimenzije predmeta obrade. Drugi su konstantni podaci koji su prethodno uskladišteni u bazi podataka (tabele navedene na slici 2), a biraju se preko padajuće liste.

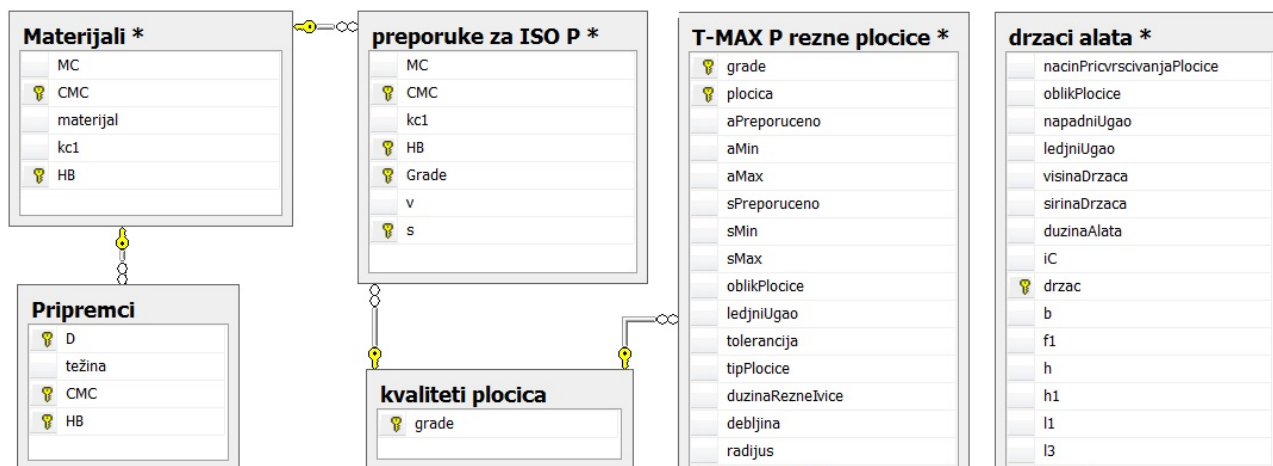
Nakon definisanja ulaznih podataka sledi izbor izmenljive rezne pločice sa tabelarnim i grafičkim prikazom preporučenih vrednosti režima obrade. U nastavku se nakon izbora rezne pločice i merodavnih režima obrade prelazi na izbor držača rezne pločice i izbor mašine alatke. Na kraju se daje mogućnost modeliranja obradnog procesa u cilju izbora merodavnih elemente režima obrade za date uslove obrade.

3.2 Programski dizajn izvršne verzije baze podataka za izbor režima obrade

Na osnovu prethodno definisanog modela logičke strukture baze podataka za izbor režima obrade sledi konkretno dizajniranje programskog rešenja. Ova aktivnost obuhvata definisanje strukture softverskog rešenja, generisanje izvršne verzije baze podataka i izradu korisničkih programskih aplikacija. Za programsku realizaciju baze podataka mogu se koristiti gotova ili sopstvena softverska rešenja. U ovom slučaju primenjena su gotova programska rešenja renomiranih proizvođača softvera, jer su ti pristupi efikasniji i jeftiniji. Programski dizajn

strukturu baze podataka sproveden je upotrebom savremenog sistema za upravljanje bazom podataka Microsoft SQL Server, dok su korisničke aplikacije realizovane pomoću programskog jezika Microsoft Visual C#. SQL je strukturni upitni jezik zasnovan na relacionoj algebri koji je namenjen za upravljanje relacionom bazom podataka, a omogućava kreiranje relacionih odnosa, unos podataka i prezentaciju informacija. Visual C# je objektno-orijentisan programski jezik primarno namenjen za vizuelni dizajn računarskih aplikacija.

Prvi korak programskog dizajna je organizovanje strukture ulaznih podataka svih entiteta (naziv, tip i opis polja), a koji se potom predstavljaju u vidu tabela koje sadrže niz slogova definisani preko atributa, domena i podataka. Nakon definisanja tabela sledi međusobno povezivanje odgovarajućih pola između pojedinih entiteta. Na slici 3 dat je primer šeme relacionog povezivanja tabela vezanih za izbor merodavnih režima obrade.



Slika 3. Primer šema povezivanja entiteta vezanih za izbor merodavnih režima obrade

U okviru programske realizacije baze podataka, pored definisanja tabela, kreira se upit za unos i izbor ulaznih podataka, formular namenjen za unos podataka i intuitivni oblik pretrage baze podataka, kao i izveštaj koji prikazuje rezultat obrade podataka. Takođe, realizuje se programiranje specifičnih procedura koje vrše proračun ili proveru postojanosti alata, snage mašine alatke, tehno-ekonomskih efekata procesa, pokazatelja ispunjenosti povoljnih uslova obrade i sl.

4. RAZVOJ APLIKACIJE ZA MODELIRANJE MERODAVNIH REŽIMA OBRAD

Aplikacija za modeliranje i izbor merodavnih elemenata režima obrade pri struganju predstavlja prevođenje projektovane baze podataka u korisničku formu. Pri tome, ostaje da je aplikacija u stvari baza podataka, ali pojednostavljena dodavanjem menija, okvira za dijalog i ostalih komponenti grafičkog korisničkog interfejsa, kako bi bila dostupna što širem krugu korisnika.

4.1 Unos i odabir ulaznih podataka

Posle pokretanja programa “Aplikacija za izbor režima rezanja” otvara se formular za definisanje tri grupe ulaznih podataka. Korisnik preko padajuće liste odabire vrstu obrade (spoljašnja ili unutrašnja), tip obrade (uzdužna, poprečna, profilna, čeona, usecanje ili odsecanje) i kvalitet obrade (N5 do N12). Selektuje materijal obratka iz tabele materijala, da bi se automatski postavile karakteristike materijala. Na kraju se unose karakteristike obratka (dužinu i prečnik) kako bi se na osnovu njih dobile vrednosti dodatka za obradu i dimenzije priprema. Izgled formulara sa unetim ulaznim podacima prikazan je na slici 4.

4.2 Izbor izmenljive rezne pločice i držača rezne pločice

Nakon izvršenog unosa ulaznih podataka prelazi se na formular za izbor izmenljive rezne pločice i njenog držača, a koji su uskladišteni u odgovarajućim tabelama. Pri tome, za postavljene uslove obrade prikazuju se lista odgovarajućih reznih pločica prema preporukama proizvođača alata. Za izabranu pločicu, zatim se može izvršiti izbor oblika rezne pločice, lednog ugla, tolerancije, geometrije i radijusa vrha alata. Nakon izbora rezne pločice moguće je videti i spektar mogućih vrednosti elementa režima rezanja (maksimalne, preporučene i minimalne), kao i grafički prikaz opsega ponuđenih vrednosti u funkciji brzine rezanja i proizvodnosti. Ekspertnim izborom merodavnog režima obrade otvara se formular izbora držača reznih pločica (dimenzije držača, način pričvršćivanja pločice, geometrija i dužina rezne ivice i smer rezanja). Na slici 5/gore prikazan je izgled formulara za izbor izmenljive rezne pločice i držača rezne pločice.

Izbor obrade

Vrsta obrade:

Tip obrade:

Kvalitet obrade:


Ra max: [µm]

Izbor materijala obratka

Materijal obratka:

Speifična sila rezanja: [N/cm²]

Tvrdoća po Brinellu: [HB]



Izbor obratka

Prečnik obratka: $\phi d = 200.0 \pm 0.05$ [mm]

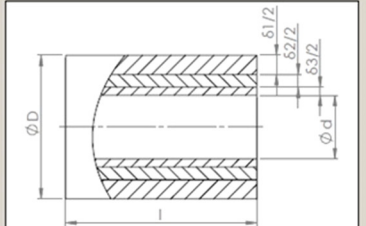
Dužina obrade: $l = 200.0 \pm 0.05$ [mm]

Dodatak za grubu obradu: $\delta 1 = 2.2$ [mm]

Dodatak za finu obradu: $\delta 2 = 1.3$ [mm]

Dodatak za obradu brušenjem: $\delta 3 = 0.5$ [mm]

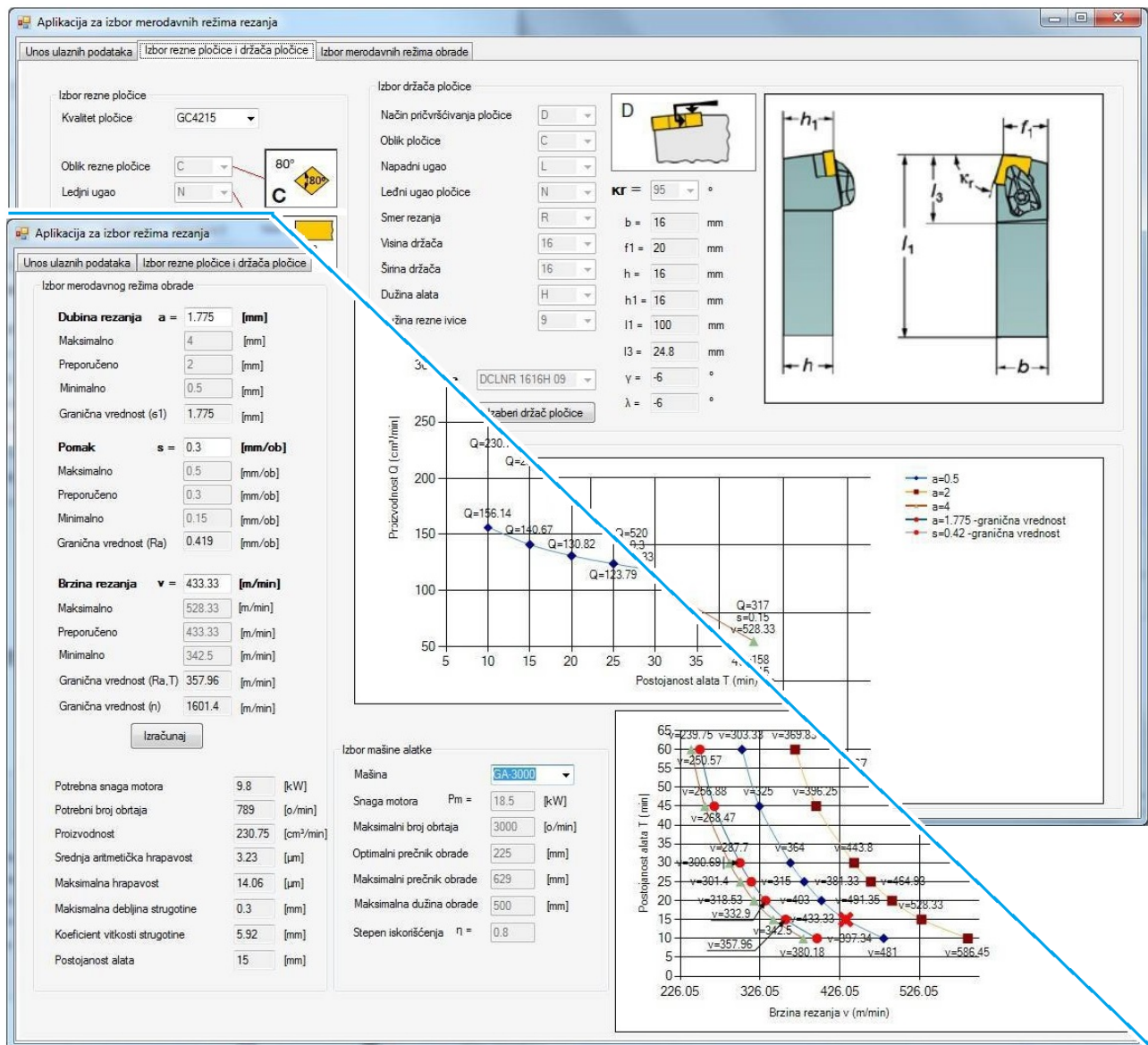
Prečnik priprema: $\phi D = 210$ [mm]



Slika 4. Izgled formulara za unos ulaznih podataka

4.3 Izbor merodavnih elemenata režima obrade

Nakon odabira izmenljive rezne pločice i njenog držača prelazi se na formular za modeliranje i izbor merodavnih elemenata režima obrade čiji je izgled prikazan na slici 5/dole. Folmular prikazuje preporučene i izračunate granične vrednosti režima obrade za postavljene ulazne podatke, kao i grafički prikaz zavisnosti brzine rezanja i proizvodnosti od postojanosti alata u opsegu mogućih vrednosti. Takođe se automatski izračunavaju vrednosti potrebnog broja obrtaja, snage mašine alatke, proizvodnosti, hrapavosti obrađene površine, debljine strugotine, koeficijenta vitkosti strugotine i postojanosti alata. Izborom mašine alatke iz selektovane liste, dobijaju se karakteristike mašine koje zadovoljava uslove obrade.



Slika 5. Izgled formulara za modeliranje i izbor merodavnih elemenata režima obrade

Korisnik u svakom momentu može da u opsegu graničnih vrednosti modelira vrednosti predloženog merodavnog režima obrade, promenom izračunatih izlaznih vrednosti procesa obrade ili direktnim pomeranjem "oznake X" koja na grafiku pokazuje položaj trenutno izabranih merodavnih elemenata režima obrade.

5. ZAKLJUČAK

Informacioni sistem sa pripadajućom bazom podataka predstavlja osnov efikasne komunikacije, organizacije i upravljanja svakog ciljno orijentisanog sistema. Informacioni sistem danas najznačajniju primenu ima kod savremenih privrednih struktura, gde pruža sistematsku podršku svim segmentima računarom integrisane proizvodnje. Pri tome, ključna uloga u samom procesu izrade delova i sklopova pripada obradnom procesu, posebno aktivnosti izbora merodavnih režima obrade radi obezbeđenja rentabilne i kvalitetne proizvodnje. Zbog toga je razvoj baze podataka za modeliranje i izbor merodavnih elemenata režima obrade od velikog značaja za unapređenje proizvodnje.

U tom kontekstu, projektovani modul baze podataka i implementacija razvijene aplikacije u proizvodni informacioni sistem predstavljaju osnovni preduslov za adekvatni izbor najpovoljnijih elemenata režima obrade. Za postavljene slove obrade odabire se odgovarajuća izmenljiva rezna pločica sa držačem, nakon čega se prikazuju preporučene i izračunate granične vrednosti režima obrade. Posredstvom grafičkih ilustracija međusobne zavisnosti brzine rezanja, proizvodnosti i postojanosti alata, korisnik u opsegu graničnih vrednosti može da modelira proces struganja i potom izabere merodavne elemente režima obrade.

Unapređenje razvijene aplikacije za modeliranje i izbor merodavnih režima obrade može se ostvariti unošenjem dodatnih funkcija obradljivosti i ograničenja, dodavanjem segmenta za modeliranje procesa obrade primenom višefaktornih eksperimentalnih planova, primenom on-line sistema za akviziciju podataka i veštačke inteligencije pri procesiranju informacionih resursa, kao i uvođenjem modela optimalnog određivanja elemenata režima obrade.

6. LITERATURA

- [1] Milikić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M.: *Osnove tehnologije obrade rezanjem*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [2] Globočki Lakić, G.: *Obrada metala rezanjem – teorija, modeliranje i simulacije*, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2010.
- [3] Rao, R.V.: *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes*, Springer, 2011.
- [4] Kovač, P., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B.: *A review of research related to advancing manufacturing technology*, Journal of Production Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 9-16, 2009.
- [5] Gostimirović, M., Milikić, D., Sekulić, M.: *Osnove tehnologije obrade skidanjem materijala*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
- [6] Čuš, F.: *Modeling and optimization of metal cutting*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2005.
- [7] Date, C.J.: *Database system*, Addison Wesley, 2003.
- [8] Gostimirović, M.: *Baza podataka obradnih procesa*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.
- [9] Tanović, Lj., Jurij, P.: *Teorija i simulacija procesa obrade*, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.

Gostimirović, M., Pavkov, B., Rodić, D., Sekulić, M.

APPLICATION FOR MODELING AND SELECTION OF RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS IN TURNING

Abstract: *In computer integrated manufacturing, the main problem in choosing the most suitable cutting conditions is that there are no reliable mathematical models that describe the techno-economic indicators of the cutting process. Therefore, very often the parameters of the cutting conditions are determined by using experience or recommendations of scientific institutions and cutting tool manufacturers, which are far from the best for the given set of conditions. In this context, this paper presents the design concept of database of the cutting conditions parameters in turning, as a possible integrated subsystem of a comprehensive information system. The implementation of the developed software application acquires the basic prerequisite for modeling and selection of the recommended parameters of the cutting conditions for the current situation.*

Key words: *Information system, Database, Machining process, Parameters of cutting conditions*



Jovančićević, L.¹⁾, Popović, M., Pjević, M., Tanović Lj.²⁾

EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UGLA ELASTIČNOG VRAĆANJA KOD ŠIREG SPEKTRA MATERIJALA

Rezime

Delovi dobijeni tehnologijom oblikovanja lima mogu se procentualno svrstati u najzastupljenije delove sklopova i pod-mehanizama mehanizama. Osnovi problem koji se javlja kod izrade delova od lima tehnologijom oblikovanja, jeste elastično vraćanja. Koeficijent elastičnog vraćanja koji se može koristiti kao korekcionni koeficijent pri procesu savijanja, neophodno je da se odredi za materijal koji se koristi, kao i za uslove obrade. U ovom radu, izvršena je eksperimentalna identifikacija koeficijenta elastičnog vraćanja za tri različita materijala (Al-legura, nelegirani čelik i nerđajući čelik). Eksperimenti su obuhvatali opseg ugla savijanja od 65° do 135°. Ustanovljeno je da u zavisnosti od tipa materijala i ugla savijanja, koeficijent elastičnog vraćanja može znatno varirati. Ispostavilo se takođe da na njegovu vrednost znatno utiče i geometrija gornjeg oblikača.

Ključne reči: tehnologija oblikovanja lima, tanki materijali, ugao elastičnog vraćanja, koeficijent elastičnog vraćanja

1. UVOD

Sa primetnim intenzivnim razvojem tehnika i tehnologija koje se koriste pri projektovanju novih proizvoda, neizostavan je termin „savremen način projektovanja“. To podrazumeva da proizvod koji se projektuje bude sastavljen od delova koji se dobijaju širokim spektrom raspoloživih proizvodnih tehnologija, počevši od: livenja, obrade plastike, rezanja, pa i tehnologije obrade lima.

Kada se govori eksplicitno o tehnologiji obrade lima, jasno se može zaključiti da ona spada u najprimenjenije tehnologije. Posmatrano procentualno, od računara, automobilske, avio industrije, ..., veliki procenat delova čine upravo delovi koji se dobijaju tehnologijom obrade lima.

Potpuno razumevanje ove tehnologije predstavlja osnov za njenu uspešnu primenu. Jedan od osnovnih problema koji se javlja kod ove tehnologije je elastično vraćanje koje je posledica fizičko/mehaničkih svojstava materijala koji se koriste [1, 2]. U cilju efikasnog prevazilaženja ovog problema, neophodno je izvršiti detaljna ispitivanja materijala koji se koriste, u cilju pravilnog propisivanja tehnologije oblikovanja lima, a koja se mogu svrstati u nekoliko pravaca. Prvi pravac predstavlja istraživanje elastičnog vraćanja korišćenjem specijalnih držača lima [3, 4]. Drugi pravac se odnosi na ispitivanje uticaja geometrije oblikača na efekat elastičnog vraćanja [5, 6]. Poslednja dva pravca se odnose na kompenzaciju ugla savijanja većim uglom savijanja [7, 8] i ispitivanje efekta toplog savijanja na ugao elastičnog vraćanja [9, 11].

2. DEFINICIJA PROBLEMA

Elastično vraćanje materijala nakon procesa savijanja lima predstavlja nezaobilazan fenomen koji je u funkciji vrste materijala koji se savija, vrednosti radijusa r_2 i debljine lima s . Njegova pojava uslovljena je postojanjem povratnih elastičnih i plastičnih deformacija u zoni savijanja. Kao posledica, nakon procesa

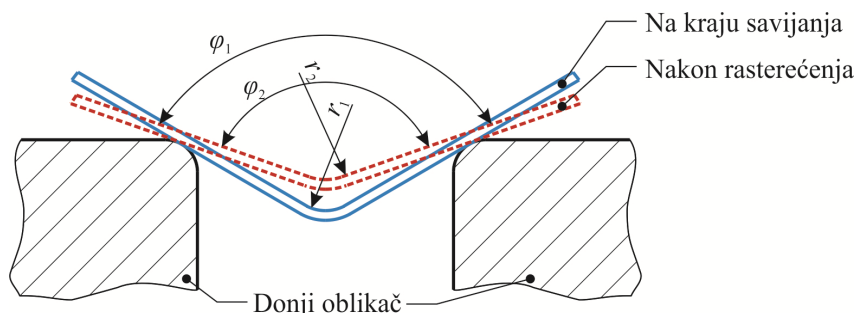
¹⁾ Luka Jovančićević, mast. inž. maš., (luka.jovancicevic@bosch.com), Robert Bosch DOO, Šimanovci

²⁾ Doc. dr Mihajlo Popović, dipl. inž. maš., (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, mast. inž. maš., (mpjevic@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

savijanja, javiće se znatno odstupanje izmerene geometrije dela od one koja se zahteva tehničkom dokumentacijom (slika 1).

Kako bi se izvršila kompenzacija ugla elastičnog vraćanja, neophodno je da se izvrši eksperimentalna identifikacija faktora elastičnog vraćanja K za željeni materijal, radijus svijanja i ugao savijanja, prema izrazu [12]:

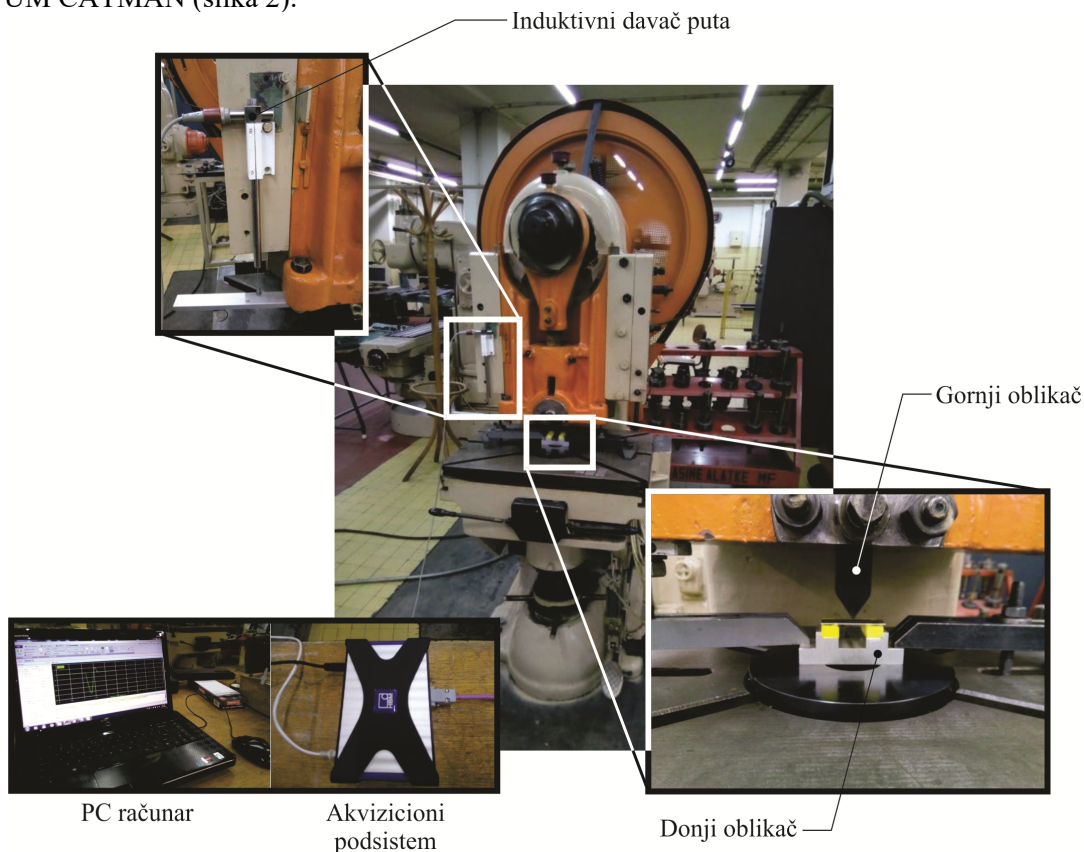
$$K = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (1)$$



Slika 1. Promena ugla savijanja usled elastičnog vraćanja.

3. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

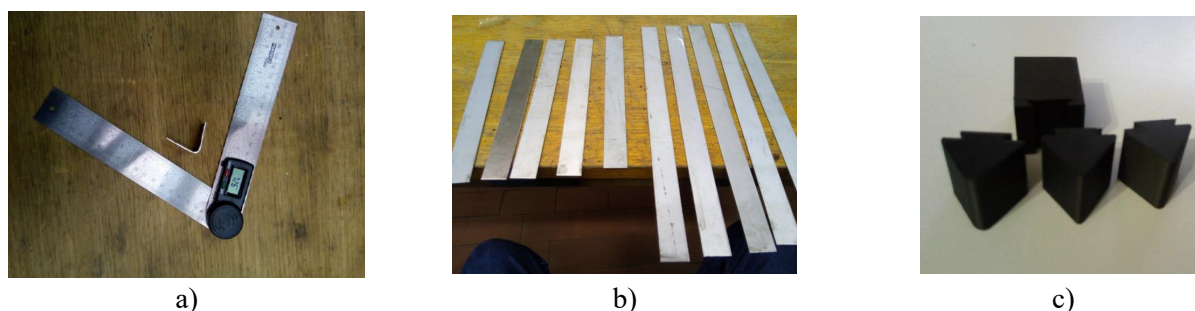
Eksperimenti savijanja lima, sprovedeni su na ekscentar presi ILR EP-P-50. Imajući u vidu da korišćena ekscentar presa pruža mogućnost definisanja dužine radnog hoda pritiskivača, za potrebe eksperimenata bilo je neophodno izvršiti identifikaciju stvarne dužine radnog hoda pritiskivača prese. Za to je korišćen senzor pomeraja baziran na principu induktivnog polumosta. Telo senzora čvrsto je vezano za stub prese, dok je pokretni deo senzora pričvršćen za pritiskivač. Akvizicioni podsistem sastojao se od univerzalnog četvorokanalnog pojačivača HBM Quantum MX440B uređaja koji je imao funkciju pojačanja signala, kao i njegove A/D konverzije, dok je za praćenje i zapisivanje izmerenih rezultata korišćen PC računar i softver QUANTUM CATMAN (slika 2).



Slika 2. Eksperimentalna postavka.

Alat koji se sastojao od gornjeg i donjeg oblikača, postavljen je i pričvršćen kako na radni sto, tako i na pritiskivač prese. U zavisnosti od željenog ugla savijanja lima, vršeno je podizanje/spuštanje radnog stola prese, odnosno donjeg oblikača. Ovim se ostvaruje precizno definisanje krajnje pozicije gornjeg oblikača u odnosu na donji na kraju radnog hoda pritiskivača prese.

Nakon procesa savijanja, korišćenjem digitalnog uglomera, vršeno je merenje ostvarenog ugla savijanja (slika 3a). Eksperimenti su sprovedeni na tri različita materijala (aluminijum EN 573-3, Č0545 i nerđajući čelik EN 1.4016) (slika 3b)., sa tri različita gornja oblikača čije vrednosti radijusa zaobljenja iznose R1, R3 i R4 mm (slika 3c), pri čemu je u svim slučajevima debljina lima iznosila $s=1,5$ mm. Eksperimenti su bazirani tako da ugao savijanja nije isti za sve eksperimente, već je on izveden na osnovu hoda gornjeg oblikača, kao i na osnovu početne pozicije gornjeg oblikača u odnosu na lim koji se savija. Sa ciljem dobijanja što preciznije slike o uglu elastičnog vraćanja, svi sprovedeni eksperimenti su ponovljeni tri puta.



Slika 3. Prikaz a) merenja ugla savijanja, b) korišćenog materiala i c) izmenljivih gornjih oblikača.

4. REZULTATI

U tabeli 1, prikazane su izmerene vrednosti savijanja lima φ_2 u odnosu na njegovu teoretsku vrednost φ_1 . Rezultati merenja se odnose na tri različita materijala.

Tabela 1. Izmerene vrednosti ugla savijanja φ_2 lima u odnosu na teoretsku vrednost φ_1 za tri različita materijala za tri merenja.

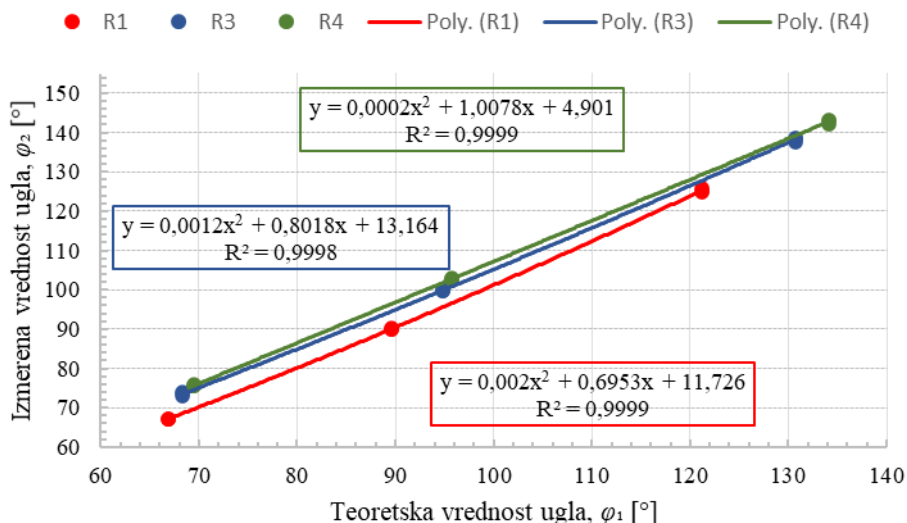
	aluminijum EN 573-3			Č0545			EN 1.4016		
	Merenje 1 φ_2 [°]	Merenje 2 φ_2 [°]	Merenje 3 φ_2 [°]	Merenje 1 φ_2 [°]	Merenje 2 φ_2 [°]	Merenje 3 φ_2 [°]	Merenje 1 φ_2 [°]	Merenje 2 φ_2 [°]	Merenje 3 φ_2 [°]
R1, $\varphi_1=66,9^\circ$	67,2	67,1	67,2	67,8	68,4	68,1	70,8	69,9	70
R3, $\varphi_1=68,37^\circ$	73,9	73,6	73,1	73	73,4	73,1	77	76,3	76,2
R4, $\varphi_1=69,49^\circ$	75,8	75,6	75,6	74,6	74,5	74,8	78,9	78,8	78,7
R1, $\varphi_1=89,6^\circ$	90,2	90,1	89,8	91,5	91,6	91,9	94,5	94,6	95
R3, $\varphi_1=94,82^\circ$	100,2	99,7	99,7	100,1	99,9	100,1	105,5	104,8	104,9
R4, $\varphi_1=95,76^\circ$	102,9	102,8	102,7	105,2	104,4	104,4	110	110,1	110,5
R1, $\varphi_1=121,24^\circ$	125	125,2	125,8	125,9	126	125,7	134	134,6	134,5
R3, $\varphi_1=130,72^\circ$	137,7	138,5	138,6	140,8	140,7	140,5	147,9	147,3	148,3
R4, $\varphi_1=134,06^\circ$	143	142	143,2	146	146	146,5	153,5	152,9	153,3

Analizom dijagrama prikazanog na slici 4, koji se odnosi na izmerenu vrednost ugla savijanja u odnosu na njegovu teoretsku vrednost za Aluminijum, može se ustanoviti da sa povećanjem radijusa zaobljenja na gornjem oblikaču, dolazi do smanjenja ugla elastičnog vraćanja. Njegova vrednost nije konstantna i zavisi od ugla savijanja lima, što se može zaključiti sa slike 7, na kojoj je prikazana vrednost ugla elastičnog vraćanja K .

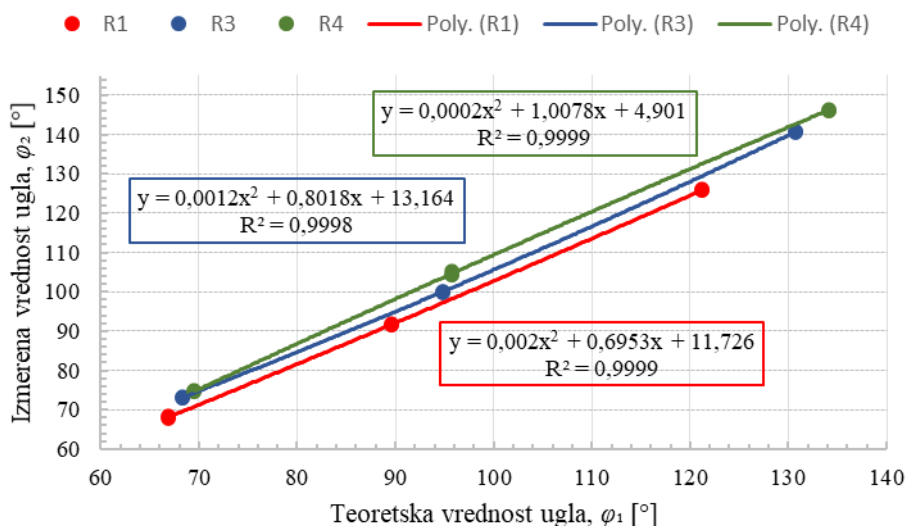
U poređenju sa aluminijumom, kod čelika je primetna veća razlika vrednosti ugla elastičnog vraćanja sa

promenom zaobljenja na gornjem oblikaču. Takođe, ugao elastičnog vraćanja ima veće vrednosti u odnosu na aluminijum u slučaju većih vrednosti ugla savijanja. Sa smanjenjem ugla savijanja, te vrednosti postaju skoro identične kod čelika i aluminijuma.

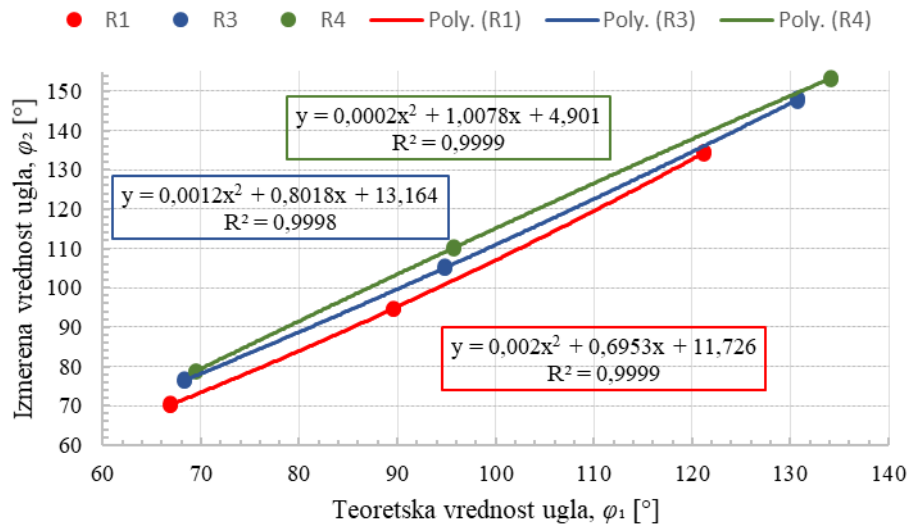
Ukoliko se uporedi nerđajući čelik sa prethodna dva materijala, on ima najveće vrednosti ugla elastičnog vraćanja. To se odnosi kako na velikim vrednostima ugla savijanja, tako i na manjim. Drugim rečima, u poređenju sa aluminijumom i čelikom, koeficijent ugla elastičnog vraćanja za nerđajući čelik ima veće vrednosti, pri čemu je primetan veći trend rasta sa povećanjem ugla savijanja u odnosu na prethodna dva materijala, slika 7.



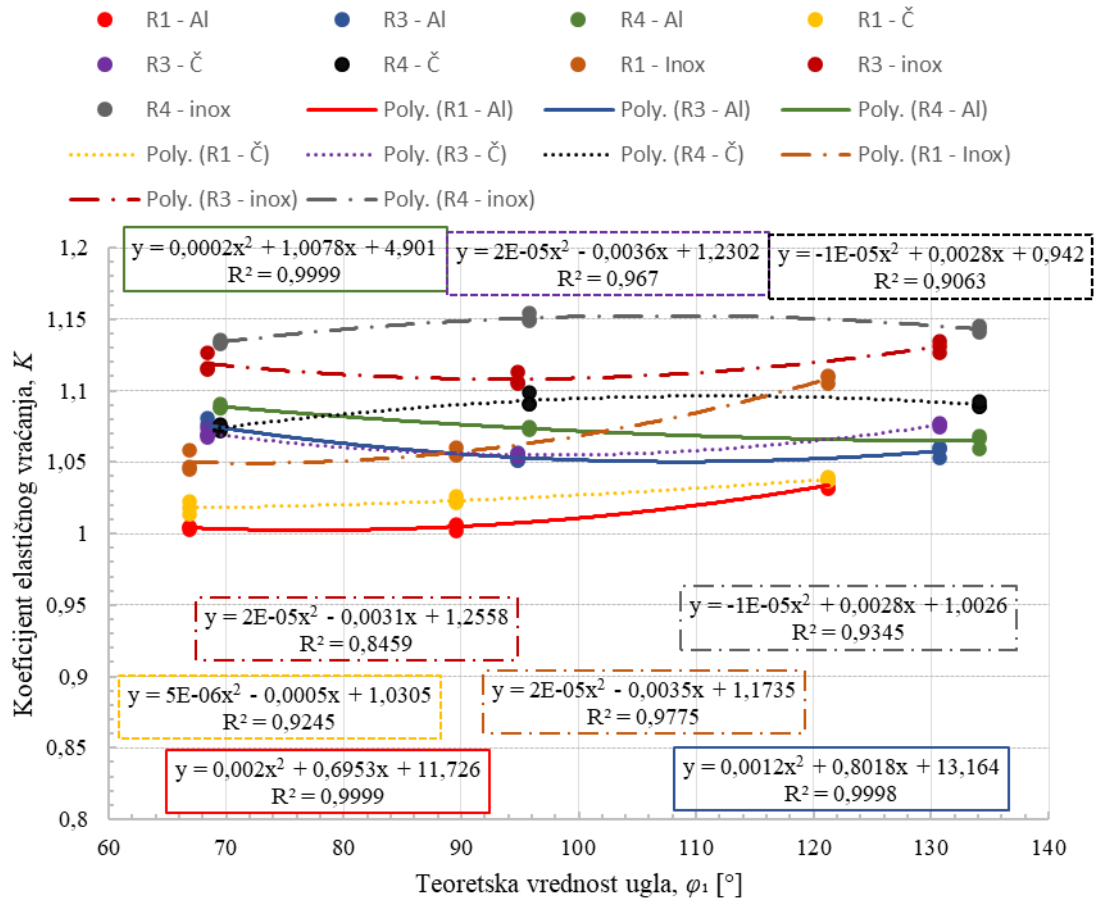
Slika 4. Odnos izmerenog ϕ_2 i teoretskog ϕ_1 ugla savijanja za aluminijum pri korišćenju oblikača sa radiusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.



Slika 5. Odnos izmerenog ϕ_2 i teoretskog ϕ_1 ugla savijanja za čelik pri korišćenju oblikača sa radiusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.



Slika 6. Odnos izmerenog φ_2 i teoretskog φ_1 ugla savijanja za nerđajući čelik pri korišćenju oblikača sa radijusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.



Slika 7. Vrednost koeficijenta elastičnog vraćanja za tri vrste materijala pri korišćenju oblikača sa radijusima zaobljena R1, R3 i R4 mm.

5. ZAKLJUČAK

1. U zavisnosti od tipa materijala koji se koristi, vrednosti koeficijenta elastičnog vraćanja može znatno varirati. Pored vrste materijala, na njegovu promeni utiče i ugao savijanja lima, kao i geometrija gornjeg oblikača.

2. Kod aluminijuma, vrednost koeficijenta elastičnog vraćanja ima znatno manju vrednosti u poređenju sa čelicima.
3. Kod aluminijuma i Č0545 na manjim uglovima savijanja lima, ugao elastičnog vraćanja ima približno konstantnu vrednost, dok je kod nerđajućeg čelika ta vrednost znatno veća i razlikuje se u celom opsegu ispitivanog ugla savijanja.
4. Sa poznavanjem vrednosti koeficijenta elastičnog vraćanja za tačno definisane uslove, moguće je izvršiti kompenzaciju ugla savijanja sa ciljem dobijanja željene geometrije dela.

6. LITERATURA

- [1] Ma, Rui, et al. "An iterative compensation algorithm for springback control in plane deformation and its application." *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 32.1 (2019): 1-12.
- [2] Gan, Wei, and R. H. Wagoner. "Die design method for sheet springback." *International Journal of Mechanical Sciences* 46.7 (2004): 1097-1113.
- [3] Fu, Zemin, et al. "Tool path correction algorithm for single-point incremental forming of sheet metal." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64.9-12 (2013): 1239-1248.
- [4] Ruffini, R., and J. Cao. "Using neural network for springback minimization in a channel forming process." *SAE transactions* (1998): 65-73.
- [5] Gu, Zhengwei, et al. "Stretch bending defects control of L-section aluminum components with variable curvatures." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85.5-8 (2016): 1053-1061.
- [6] Zhai, Ruixue, et al. "Stretch bending and springback of profile in the loading method of prebending and tension." *International Journal of Mechanical Sciences* 144 (2018): 746-764.
- [7] Verma, Rahul K., Kwansoo Chung, and Toshihiko Kuwabara. "Effect of pre-strain on anisotropic hardening and springback behavior of an ultra low carbon automotive steel." *ISIJ international* 51.3 (2011): 482-490.
- [8] Chongthairungruang, B., et al. "Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel." *Materials & Design* 39 (2012): 318-328.
- [9] Wang, Lifei, et al. "Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions." *Journal of Materials Processing Technology* 213.6 (2013): 844-850.
- [10] Zong, Yingying, et al. "Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76.1-4 (2015): 577-585.
- [11] Edwards, William L., et al. "Optimum process parameters for springback reduction of single point incrementally formed polycarbonate." *Procedia Manufacturing* 10 (2017): 329-338.
- [12] Milenko J., Tanović Lj., "Alati i pribori: Proračuni i konstrukcije alata za izradu delova od lima." *Mašinski fakultet, Beograd* (2007).

Jovančićević, L., Popović, M., Pjević, M.

Experimental identification of the elastic return angle in a wider range of materials

Abstract: *The parts obtained by sheet metal forming technology can be classified as the most common parts of assemblies of mechanisms. The basic problem that occurs when making sheet metal parts, is the elastic return. The coefficient of elastic return that can be used as a correction coefficient in the bending process, is necessary to be determined for the used material, as well as for the processing conditions. In this paper, the experimental identification of the coefficient of elastic return for three different materials (Aluminum, Steel, and Prochrome) was performed. The experiments covered a range of bending angles from about 65 ° to 135 °. It has been found that depending on the type of material and the bending angle, the coefficient of elastic return can vary considerably. It also turned out that its value is significantly influenced by the geometry of the upper shaper.*

Key words: *sheet metal forming technology, thin materials, elastic return angle, coefficient of elastic return*



Kalabić R.¹⁾, Popović M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović Lj.²⁾

ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA OBRADNE NA POKAZATELJE KVALITETA PRI OBRADI REZANJEM POLIMERA

Rezime

Kroz istoriju mašinstva kao nauke napisano je mnogo radova i priručnika koji se bave temom obrade rezanjem metalnih materijala. Sa druge strane o obradi rezanjem termoplasta, materijala nove generacije koji sve češće služe kao zamena metalnim materijalima i koji nalaze primenu u većini grana modernog mašinstva, može se naći mnogo manje podataka i eksperimentalno potvrđenih činjenica. S obzirom na nivo primene i značaj termoplasta kao i kroz praksu potvrđenu razliku u režimima obrade u odnosu na metalne materijale, potrebno je detaljnije istražiti, ustanoviti i dokumentovati režime obrade i alate pogodne za obradu termoplasta, što predstavlja temu ovog rada.

Ključne reči: termoplasti, obrada rezanjem, režimi obrade

1. UVOD

Pored metala sve češća je u industriji pojava upotrebe polimernih materijala za izradu konstrukcija različitih složenosti i namena. Na tržištu se pojavljuju različite vrste polimera koje su dostupne korisnicima za primenu u različitim granama mašinskog inženjerstva i industrije uopšte. Kada se govori o polimerima njihova klasifikacija se može izvršiti prema poreklu, strukturi, vrsti monomera, vrsti reakcije polimerizacije i vrsti molekularnih veza. Prema vrsti molekularnih veza možemo ih podeliti na elastomere, duroplaste, fibre i termoplaste [1].

Termoplasti kao polimeri koji se sastoje od dugih lanaca između kojih vladaju sekundarne Van der Valsove veze zbog koji se pri zagrevanju tope i očvršćavaju kada se hlade našli su najveću primenu u opštem mašinstvu. Bez obzira na osnovnu podelu polimera, zbog razlike u konstrukcionim, mehaničkim i termičkim svojstvima termoplasti se dele na podgrupe od kojih su najzastupljeniji poliamidi i poliacetali [1]. Od ostalih termoplasta poliacetal izdvaja dobra otpornost na habanje i toplotu, čvrstoća, krutost, anti frikciona svojstva, otpornost na puzanje i organske rastvarače. Poliamid je svoju primenu i zastupljenost u industriji našao zbog krutosti, hemijske rezistentnosti, otpornosti na habanje i puzanje, ali i zbog dobrih kliznih i izolatorskih svojstava [2].

Zbog razlike u konstrukcionim, mehaničkim i termičkim svojstvima kao i procesu dobijanja polufabrikata razlikuju se režimi obrade pri obradi rezanjem poliamida i poliacetala. Razliku u režimima obrade kao i kvalitetu obrađene površine poliamidnih i poliacetalnih materija treba ispitati, zabeležiti i dovesti na nivo saznanja kakav se danas poseduje kada se radi o obradi metalnih materijala.

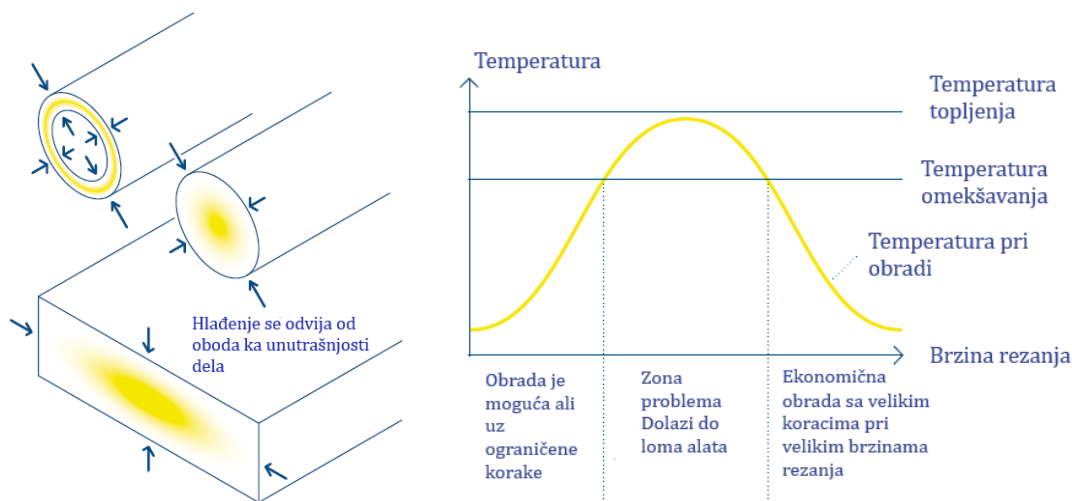
2. POSTAVKA ZADATKA

Procesi proizvodnje polufabrikata, posebno ekstrudiranje ima veliki uticaj na karakteristike materijala. Prilikom ekstrudiranja poluproizvoda dolazi do pojave unutrašnjih napona usled neravnornog hlađenja. Naime, nakon izlaska iz ekstrudera polufabrikat se hladi od oboda ka unutrašnjosti (slika 1), zbog čega se u sredini javljaju unutrašnji naponi. Postupci obrade rezanjem plastičnih delova su slični obradi rezanjem metala. Međutim, za obradu delova od polimera potrebno je koristiti velike brzine rezanja primenom mašina

¹⁾Ranka Kalabić, mast. inž. maš., Tehnika KB, Sektor projektovanja i konstrukcije, (konstrukcija@tehnika.com)

²⁾ Doc. dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Goran Mladenović, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

za obradu lakih metala i drveta, kako bi se postigla što ekonomičnija obrada. Kao što se na dijagramu prikazanom na slici 1 može videti, pri brzinama rezanja koje su adekvatne za obradu metala, u slučaju obrade termoplasta došlo bi do topljenja materijala. Preporuke proizvođača su da se za obradu plastičnih delova koriste rezni alati koji odgovaraju obradi aluminijumskih delova, iako je najbolje koristiti alate za obradu plastike sa oštrijim uglom reznog klina. Hlađenje vodom, emulzijom ili komprimovanim vazduhom je neophodno kako ne bi došlo do lepljenja termoplasta i dobijanja površine velike hrapavosti.



Slika 1. Prikaz procesa hlađenja ekstrudiranog dela (levo) i dijagram zavisnosti brzine rezanja i temperature pri obradi rezanjem (desno) [2]

Obrada rezanjem je širok pojam i obuhvata razne procese, a glodanje je među najzastupljenijim od njih. Obrada glodanjem plastičnih materijala, poliamida i poliacetala, može se pored CNC mašina izvoditi i na konvencionalnim mašinama alatkama. Pri obradi glodanjem preporučuju se visoke brzine rezanja i srednji koraci. Prilikom stezanja priprema u pomoćni pribor neophodno je osigurati pripremak od mogućnosti na izvijanje. Alati namenjeni za obradu glodanjem treba da budu izuzetno oštri zbog toga što veći kvalitet površine koja se obrađuje prouzrokuje težu obradu materijala.

S obzirom da se pri procesu glodanja generiše više toplote neophodno je direktno i redovno hlađenje alata kako bi se sprečilo topljenje materijala koji se obrađuje i nagomilavanje strugotine, a samim tim i pucanje alata ili priprema. Obradu je najbolje izvoditi istovremeno i jednako sa obe strane kako ne bi došlo do izvijanja. Ono što dodatno karakteriše obradu delova od plastike je da ivice nakon obrade ostaju veoma oštre, pa ih je neophodno naknadno obraditi [3].

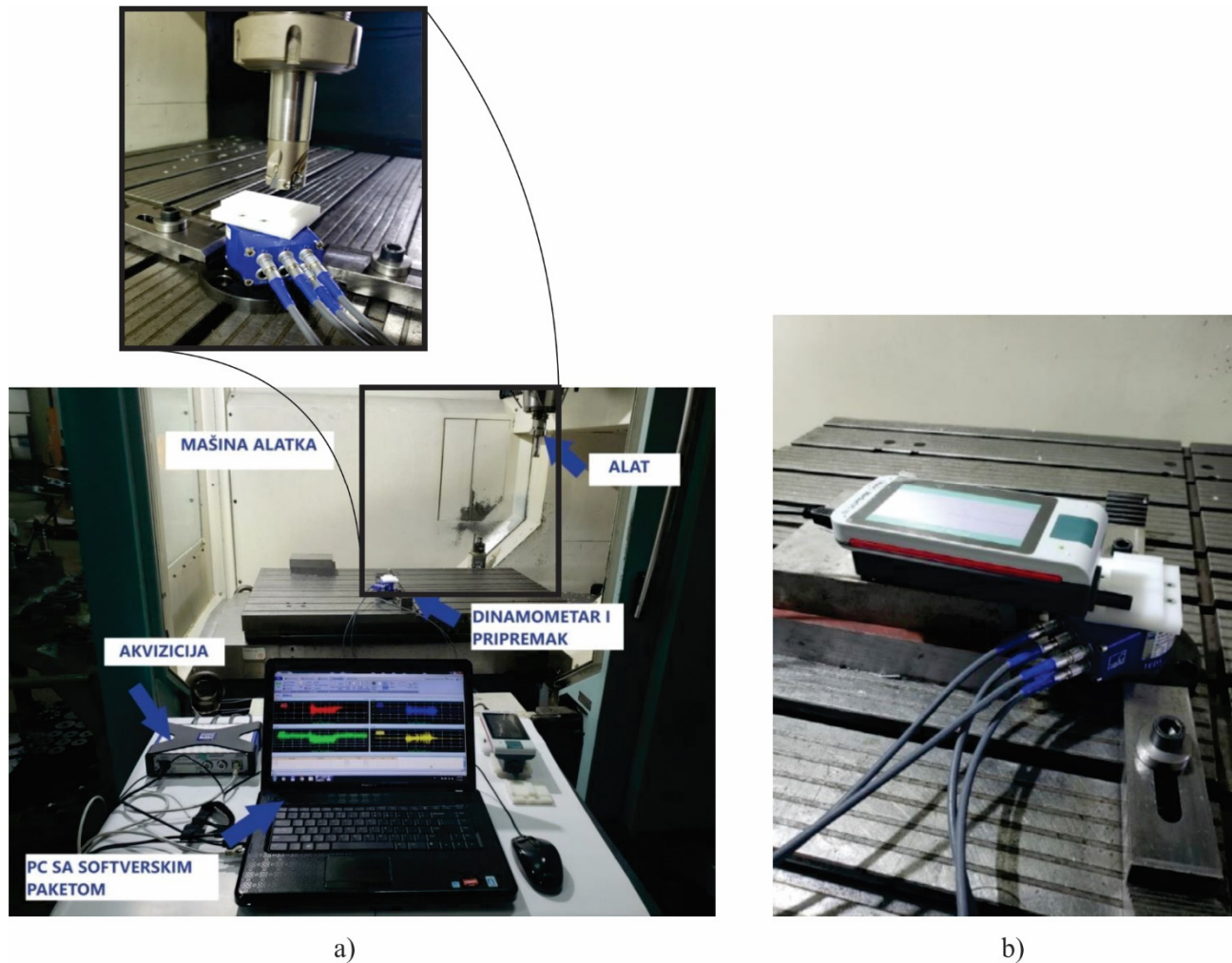
Tabela 1. Parametri pri obradi glodanjem inženjerskih plastika iz kategorije poliamida i poliacetala [2]

Termoplasti	Broj zuba z	Brzina rezanja v [m/min]	Korak po obrtu s [mm/o]
POM-C	Z2-Z4	300	0.15-0.5
PA6, PA6.6	Z2-Z4	250-500	0.1 – 0.45

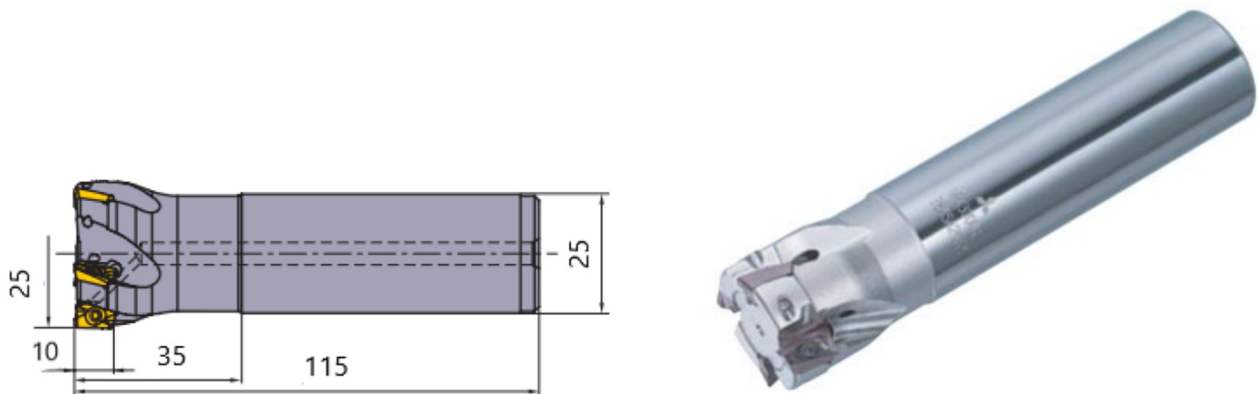
S obzirom na prethodno navedeno, cilj rada predstavlja eksperimentalnu identifikaciju uticaja parametara režima obrade na sile, moment rezanja i kvalitet obrađene površine kod obrade glodanjem. Ovim je izvršena analiza obradljivosti termoplasta konkretno poliamida i poliacetala. Vrednosti intenziteta sila rezanja koje se javljaju u toku procesa obrade su od izuzetne važnosti jer predstavljaju jedan od pokazatelja kvaliteta obrade, pri čemu se pomoću njih mogu predvideti izlazne karakteristike procesa obrade, koje su od za adekvatno propisivanje režima obrade kako bi se npr. povećala postojanost alata.

3. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA

U ovom eksperimentu kao ulazi eksperimentalnog ispitivanja postavljeni su brzina rezanja v i ugao zahvata ψ dok se parametri obradljivosti određuju u funkcijama F_x , F_y , F_z , M_z i R_a . Eksperimenti obrade polimera su izvršeni na mašini DECKEL MAHO DC 100V, korišćenjem četvorokomponentnog dinamometra HBM-K-MS10-005 i univerzalnog pojačivača HBM Quantum MX440B (slika 2a), dok je za potrebe merenja hrapavosti obrađenih površina korišćen uređaj MahrSurf PS10 (slika 2b). Proces obrade je sproveden korišćenjem alata APX3000R254WA25SA, prikazan na slici 3.



Slika 2. Eksperimentalna postavka za a) proces detekcije sila rezanja i b) merenje hrapavosti.



Slika 3. Alat korišćen tokom procesa obrade..

Vrednosti brzine rezanja v su varirane u granicama $v_{\min}=140,523$ m/min, $v_{sr}=234,206$ m/min i $v_{\max}=390,343$ m/min, a vrednosti ugla zahvata ψ u granicama $\psi_{\min}=78,7453$ °, $\psi_{sr}=106,722$ ° i $\psi_{\max}=180$ °.

Obrada je rađena pri konstantnom koraku koji je iznosio 0,2 mm/zubu.

Eksperimentalna ispitivanja su vršena na pripremcima od poliamida i poliacetala, prema matrici plana eksperimenta prikazanog u tabeli 2.

Pre samog sprovođenja eksperimenta izvršena su probna ispitivanja zbog podešavanja merno akvizicionog sistema.

Nakon sprovedenog eksperimenta u tabelu 2 uneseni su vrednosti podataka u kolonama F_1, F_2, F_3, M_z i R_a , koje predstavljaju zavisno promenljive. U poslednje četiri kolone upisani su prirodni logaritmi dobijenih vrednosti koji su u nastavku upotrebljeni za izračunavanje veličina b_0, b_1 i b_2 .

Tabela 2. Plan eksperimenta														
Redni broj eksperimenta	Plan eksperimenta													
	Plan matrica		Promenljivi faktor		Rezultati merenja									
	f_1	f_2	v [m/min]	ψ [°]	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]	M_z [N]	R_a [µm]	$y=\ln F_1$	$y=\ln F_2$	$y=\ln F_3$	$y=\ln M_z$	$y=\ln R_a$
1	1	-1	390.3429	78.74529	-19.5213	-20.3135	-4.6791	-0.689	0.612	2.971506	3.011286	1.543106	-0.37251	-0.49102
2	0	0	234.2057	106.7219	-38.2847	-21.0945	-9.0222	-0.2988	1.2195	3.64505	3.049012	2.199688	-1.20798	0.198441
3	1	1	390.3429	180	-51.7695	-4.3781	-18.1434	0.1925	1.237	3.946801	1.476615	2.898307	-1.64766	0.212689
4	0	0	234.2057	106.7219	-38.4663	-22.5011	-12.8644	-0.1949	1.5405	3.649783	3.113564	2.554464	-1.63527	0.432107
5	0	0	234.2057	106.7219	-38.0054	-20.9881	-9.0962	-0.1039	1.22	3.637728	3.043956	2.207857	-2.26433	0.198851
6	-1	-1	140.5234	78.74529	-21.347	-22.132	-4.5543	-0.7326	0.866	3.060911	3.097025	1.516072	-0.31116	-0.14387
7	0	0	234.2057	106.7219	-37.6106	-22.405	-14.3184	-0.796	0.983	3.627286	3.109284	2.661545	-0.22816	-0.01715
8	-1	1	140.5234	180	-63.4542	-7.0165	-18.5197	0.8451	1.0465	4.150318	1.948265	2.918835	-0.1683	0.045451

4. OBRADA REZULTATA

Funkcionalna zavisnost između ulaza eksperimentalnog ispitivanja i zavisno promenljive R pretpostavlja se prema

$$R = C * f_1^{p_1} * f_2^{p_2}, \quad (1)$$

gde je R - zavisno promenljiva, tj. izlaz eksperimentalnog ispitivanja, f_1 i f_2 nezavisno promenljive ili ulazi eksperimentalnog ispitivanja i C, p_1 i p_2 parametri obradljivosti.

Prema plan matrici sistem opštih jednačina je sledeći

$$b_0 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8), \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(y_1 + y_3 - y_6 - y_8), \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_3 - y_6 + y_8). \quad (4)$$

Konačne jednačine traženih vrednosti parametara obradljivosti u polaznoj funkciji obradljivosti (1) su

$$\ln C = b_0 + b_1 + b_2 - 2 * \left(b_1 \frac{\ln f_{1max}}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}} + b_2 \frac{\ln f_{2max}}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}} \right), \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}}, \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}}. \quad (7)$$

Primenom prirodnih logaritama zavisno promenljivih iz tabele 2 u formulama (2) - (4) dobijene su vrednosti b_0 , b_1 i b_2 . Dalje su izračunate vrednosti b_0 , b_1 i b_2 unesene u formule (5) – (7) gde su dobijene vrednosti $\ln C$, p_1 i p_2 koje su unošenjem u formulu (1) dale računске vrednosti zavisno promenljivih za poliamid. Izračunate vrednosti prikazane su u tabeli 3.

Na isti način, počevši od dobijanja prirodnih logaritama zavisno promenljivih dobijenih obradom glodanjem poliacetala, izračunate su računске vrednosti zavisno promenljivih za poliacetal. Izračunate vrednosti prikazane su u tabeli 4.

Tabela 3. Prikaz rezultata izmerenih i računski dobijenih vrednosti zavisno promenljivih F_x , F_y , F_z , F_o i R_a za poliamid

Promenljivi faktor		Stvarna vrednost					Računska vrednost				
v	ψ	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a
390,3429	78,74529	19.5213	20.3135	4.6791	28.17303	0.612	20.0207	26.41737	5.076488	28.23101	0.80751
234,2057	106,7129	38.2847	21.0945	9.0222	43.71151	1.2195	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
390,3429	180	51.7695	4.3781	18.1434	51.9543	1.237	56.21131	3.863805	20.15801	55.23984	1.262025
234,2057	106,7219	38.4663	22.5011	12.8644	44.56406	1.5405	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
234,2057	106,7219	38.0054	20.9881	9.0962	43.41556	1.22	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
150,5234	78,74529	21.347	22.132	4.5543	30.74931	0.866	23.17857	26.23635	5.060001	32.69387	0.883519
234,2507	106,7219	37.6106	22.405	14.3184	43.77832	0.983	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
140,5234	180	63.4542	7.0165	18.5197	63.84095	1.0465	65.07752	3.837328	20.09254	63.97234	1.380816

Tabela 4. Prikaz rezultata izmerenih i računski dobijenih vrednosti zavisno promenljivih F_x , F_y , F_z , F_o i R_a za poliacetal

Promenljivi faktor		Stvarna vrednost					Računska vrednost				
v	ψ	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a
390,3429	78,74529	19.5213	20.3135	4.6791	28.17303	0.612	20.0207	26.41737	5.076488	28.23101	0.80751
234,2057	106,7129	38.2847	21.0945	9.0222	43.71151	1.2195	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
390,3429	180	51.7695	4.3781	18.1434	51.9543	1.237	56.21131	3.863805	20.15801	55.23984	1.262025
234,2057	106,7219	38.4663	22.5011	12.8644	44.56406	1.5405	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
234,2057	106,7219	38.0054	20.9881	9.0962	43.41556	1.22	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
150,5234	78,74529	21.347	22.132	4.5543	30.74931	0.866	23.17857	26.23635	5.060001	32.69387	0.883519
234,2507	106,7219	37.6106	22.405	14.3184	43.77832	0.983	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
140,5234	180	63.4542	7.0165	18.5197	63.84095	1.0465	65.07752	3.837328	20.09254	63.97234	1.380816

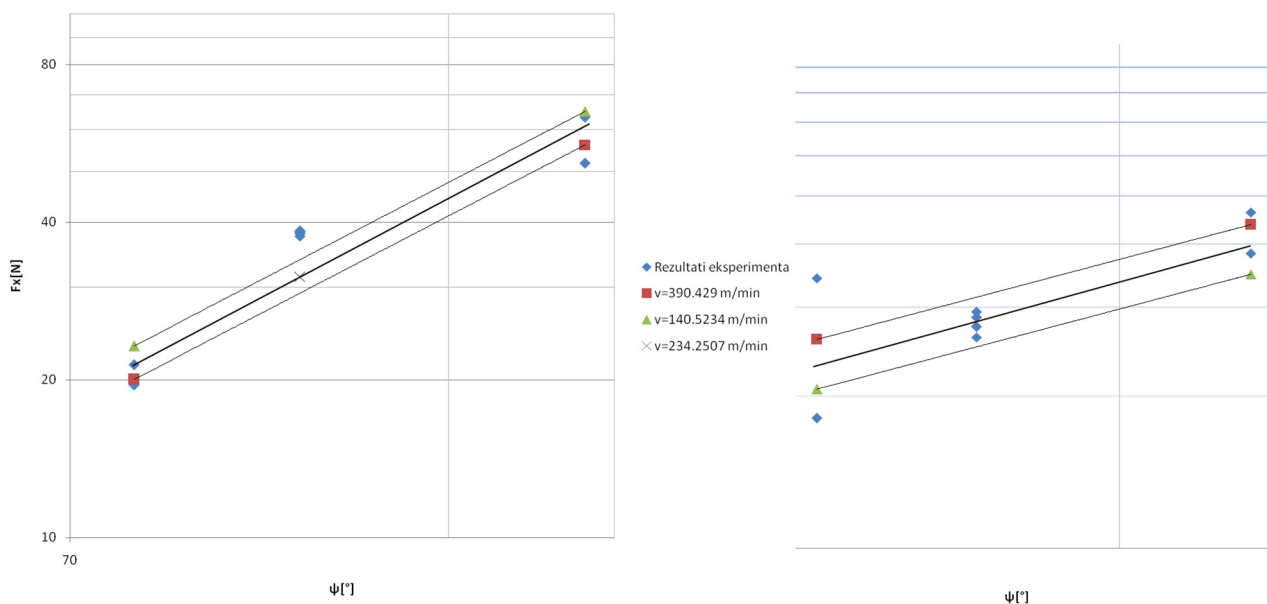
U nastavku su na slici 4 dati dijagrami računski dobijenih vrednosti sile F_x za poliamid (levo) i poliacetal (desno) zajedno sa tačkama eksperimentalnih rezultata. Teorijski dijagram zavisnosti F_x od brzine rezanja i ugla zahvata sa tačkama rezultata merenja pri obradi glodanjem poliamida i poliacetala prikazuje sila rezanja F_x raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja iako je u slučaju poliamida taj porast veći.

Na isti način su obrađeni podaci iz tabela 2 i 3 i za F_x , F_y , F_z , F_o i R_a . Obradom podataka došlo se do sledećih zaključaka:

1. Sila F_y opada sa porastom ugla zahvata i u slučaju poliamida i poliacetala, ali je pad veći kod poliacetala. Takođe, može se primetiti da je vrednost sile F_y veća pri obradi poliamida

za izabrane režime obrade. Kod obrade glodanjem poliamida sila F_y je najmanja pri brzini rezanja $v=390.3429$ m/min dok je poliacetala približno jednaka za sve tri vrednosti brzine i opada sa porastom ugla zahvata.

2. Sila F_z raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja iako je u slučaju poliamida taj porast veći. Takođe, može se primetiti da je vrednost sile F_z veća pri obradi poliamida za izabrane režime obrade, da je približno jednaka za sve tri vrednosti brzine rezanja dok se kod poliacetala njena vrednost menja u zavisnosti od brzine rezanja.
3. Sila F_o raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja.
4. Hrapavost R_a se smanjuje sa porastom ugla zahvata u oba slučaja. Takođe, može se primetiti da je vrednost hrapavosti neznatno manja pri obradi poliacetala za izabrane režime obrade.



Slika 4. Teorijski dijagram zavisnosti F_x od brzine rezanja i ugla zahvata sa tačkama rezultata merenja pri obradi glodanjem poliamida (levo) i poliacetala (desno).

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je da ukaže na kompleksnost pri izboru elemenata tehnologije obrade rezanjem poliamida i poliacetala kao najčešće upotrebljivanih inženjerskih plastika. Kako istraživanja pokazuju ova dva materijala se najviše koriste za izradu mašinskih delova te je njihova obrada rezanjem najzastupljenija u odnosu na ostale plastike. Sve obrade rezanjem se izvode na istim mašinama alatkama kao i kada je u pitanju metal, međutim alati za obradu plastike se razlikuju. Iako postoje i alati za obradu plastike u praksi se najčešće koriste alati za obradu aluminijuma.

Preporučeni režimi za obradu rezanjem poliamida i poliacetala su preuzeti od proizvođača korišćenih alata. Kako je pojam obrade rezanjem širok, u radu je najviše pažnje posvećeno obradi glodanjem i sticanju praktičnih znanja o njoj. Za razliku od obrade rezanjem metala, o obradi termoplasta postoji mnogo manje literature, kao i naučno dokazanih činjenica. Međutim, eksperimentalno je pokazano da režimi obrade pri obradi glodanjem za pojedine materijale, kao što su legure aluminijuma, mogu da se primene i za obradu poliamida i poliacetala.

Zaključak je svakako da se obrada glodanjem ovih termoplasta razlikuje od obrade metala, pored razlike u izboru alata i njihovih karakteristika, najviše u pogledu brzine rezanja.

5. LITERATURA

- [1] Društvo za plastiku i gumu, Polimeri, Zagreb 1980.
- [2] The Ensinger Group, Semi-finished Engineering Plastic products, <https://www.ensingerplastics.com/> [pristupljeno: jun 2019].
- [3] CNC-STEP, CNC Machining of plastic, <https://www.cnc-step.com/> [pristupljeno: jun 2019].



Mladenović, C., Zeljković, M.¹⁾, Košarac, A.²⁾

DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNOG SISTEMA PRIMENOM FREKVENTNE ANALIZE SIGNALA VIBRACIJA³

Rezime

Samopobudne vibracije predstavljaju jednu od najnepovoljnijih pojava u procesu rezanja, koje kao posledicu mogu imati ubrzano habanje ili lom alata, naglo pogoršanje kvaliteta obrađene površine, povećanje bučnosti, povećanje potrošnje energije, itd. U cilju izbegavanja navedenih negativnih uticaja, pri definisanju režima rezanja se primenjuju dijagrami koji, u zavisnosti od broja obrtaja glavnog vretena i dubine rezanja, prikazuju granicu između stabilnog i nestabilnog područja rada mašine alatke sa stanovišta samopobudnih vibracija. Ovi dijagrami, nazvani - karte stabilnosti mogu biti definisani primenom matematičkih modela (analitičkih, numeričkih, ...) ili eksperimentalnim ispitivanjima (metod tangenti, zvučno mapiranje,...).

U radu je prikazano definisanje karte stabilnosti obradnog sistema eksperimentalnom identifikacijom samopobudnih vibracija. Granične dubine rezanja, potrebne za definisanje karte stabilnosti, određene su metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija.

Predložena metoda je primenjena za određivanje graničnih dubina rezanja pri obradi glodanjem aluminijuma Al7075 na obradnom centru EMCO ConceptMill 450. Dobijeni rezultati su verifikovani poređenjem karata stabilnosti određenih primenom navedene i više matematičkih i eksperimentalnih metoda.

Ključne reči: dinamičko ponašanje obradnih sistema; samopobudne vibracije; frekventna analiza; karta stabilnosti;

1. UVOD

Samopobudne vibracije predstavljaju najnepovoljniji tip vibracija pri rezanju, koje energiju za svoj nastanak i rast amplitude crpe iz samog procesa obrade. Ove vibracije često dovode do nestabilnog rada mašine alatke, a za posledicu imaju smanjenje kvaliteta obrađene površine, pojavu buke, ubrzano trošenje alata i elemenata mašine alatke [1], itd.

U cilju izbegavanja navedenih negativnih uticaja, pri definisanju režima rezanja se primenjuju dijagrami koji, u zavisnosti od broja obrtaja glavnog vretena i dubine rezanja, prikazuju granicu između stabilnog i nestabilnog područja rada mašine alatke sa stanovišta samopobudnih vibracija. Ovi dijagrami, nazvani - karte stabilnosti mogu biti definisani primenom matematičkih modela (analitičkih, numeričkih, ...) ili eksperimentalnim ispitivanjima (metod tangenti, zvučno mapiranje,...).

Istraživanja o matematičkom modelovanju samopobudnih vibracija, među prvima su sprovedli Tobias [2] i Tlusty [3], koji su identifikovali regenerativni mehanizam nastanka samopobudnih vibracija, i koji su razvili matematički model za definisanje karte stabilnosti u obliku diferencijalnih jednačina sa kašnjenjem [4]. Pored prethodnog, drugi najčešće primenjivani metod za definisanje karte stabilnosti je predložen od strane Altintas-a i Budak-a [5]. Ovaj metod, nazvan aproksimacija nultog reda, zasniva se na predviđanju stabilnosti sistema primenom Furijeovog izraza nultog reda u cilju aproksimacije promene sile rezanja i formiranja karte stabilnosti za procese kod kojih sila rezanja varira relativno malo, npr. pri obradi ravnih površina čeonim glodalima.

Modelovanje dinamičkog ponašanja obradnog sistema je složen postupak, te je kao alternativa matematičkim metodama za definisanje karte stabilnosti, predložen pristup koji se zasniva na eksperimentalnim ispitivanjima. Ovim pristupom, definiše se tačnija karta stabilnosti jer se ne uzimaju u

¹ Cvjetin Mladenović, master inž. maš., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, mladja@uns.ac.rs, prof. dr Milan Zeljković, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, milanz@uns.ac.rs, Miloš Knežev, master inž. maš., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, knezev@uns.ac.rs.

² Doc. dr Aleksandar Košarac, dipl. ing., Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, akosarac@gmail.com

³ U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

obzir određene aproksimacije kao što je to slučaj pri modelovanju dinamičkog ponašanja sistema, ali je i ovaj pristup limitiran na samo posmatrani obradni sistem [4].

Eksperimentalna ispitivanja samopobudnih vibracija pri rezanju, među prvima su sprovedi Koenigsberger i Tlusty [6], koji su u definisali karte stabilnosti za obradu struganjem, i predložili odgovarajuću metodologiju eksperimentalnih ispitivanja.

Pored ovih autora, jedan od pionira u ovoj oblasti bio je i V.A. Kudinov, koji je [7] prikazao dimenzije i oblik radnog predmeta, kao i način njegovog stezanja, za ispitivanje dinamičkog ponašanja strugova u procesu obrade.

Razvojem računarskih tehnologija, omogućene su sofisticiranije metode ispitivanja i analize samopobudnih vibracija, a time i jednostavnije definisanje karte stabilnosti eksperimentalnim metodama. Tako je Quintana sa autorima [8] predložio metodu definisanja karte stabilnosti primenom tehnike zvučnog mapiranja (sound mapping). Autori su u svrhu definisanja karte stabilnosti sprovedi 600 eksperimenata, varirajući 30 različitih brojeva obrtaja i 20 dubina rezanja. Za svaki od ovih eksperimenata meren je nivo buke koji je unosen u 3D zvučnu mapu. Na osnovu ove mape i FFT analize zvučnog signala, autori su definisali kartu stabilnosti, koja je pokazala zadovoljavajuću tačnost u poređenju sa kartom stabilnosti definisanom analitičkim metodom.

U radu je prikazano definisanje karte stabilnosti obradnog sistema eksperimentalnom identifikacijom samopobudnih vibracija za proces glodanja. Granične dubine rezanja, potrebne za definisanje karte stabilnosti, određene su metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija.

Predložena metoda je primenjena za određivanje graničnih dubina rezanja pri obradi glodanjem aluminijuma Al7075 na obradnom centru EMCO ConceptMill 450, a dobijeni rezultati su verifikovani poređenjem karata stabilnosti određenih primenom navedene i više matematičkih i eksperimentalnih metoda.

2. ODREĐIVANJE GRANIČNIH DUBINA REZANJA METODOM DEKOMPONOVANJA SIGNALA VIBRACIJA

Samopobudne vibracije pri obradi rezanjem nastaju kada se frekvencija pobude (prinudne vibracije, varijacija intenziteta sile rezanja usled regenerativnog efekta, ili neki drugi vid eksterne pobude) poklopi sa sopstvenom frekvencijom tzv. kritičnog elementa obradnog sistema. Pri obradi robusnih obradaka, kritični element obradnog sistema je najčešće sklop alat – držač alata – glavno vreteno, dok je pri obradi tankozidnih obradaka, kritični element je radni predmet. Uzimajući u obzir prethodno, pri analizi samopobudnih vibracija je neophodno poznavati sopstvene frekvencije karakterističnih elemenata mašine alatke, koje se najčešće određuju eksperimentalnom modalnom analizom.

Eksperimentalno ispitivanje samopobudnih vibracija najčešće se izvodi obradom kontinualno promenljivom dubinom rezanja, pri čemu se odgovarajućim sensorima prikuplja signal vibracija u vremenskom domenu. Pri ovim ispitivanjima, obradak zahvaljujući svom zakošenom obliku, omogućava kontinualno povećanje dubine rezanja u pravcu brzine pomoćnog kretanja, dok se broj obrtaja glavnog vretena povećava svakim sledećim prolazom alata. Proces rezanja se zaustavlja u trenutku pojave samopobudnih vibracija, kako bi se sprečila oštećenja elemenata mašine alatke, a tačan trenutak nastanka samopobudnih vibracija se određuje na osnovu snimljenih signala. Signal samopobudnih vibracija u vremenskom domenu, snimljen pri eksperimentalnim ispitivanjima, ne daje mnogo informacija o karakteristikama vibracija, te ga je neophodno transformisati u frekventni domen primenom brze Furijeove transformacije.

Pri obradi sa kontinualno promenljivom dubinom rezanja, vremenski signal sadrži informacije o vibraciji alata za odgovarajući opseg dubina rezanja. Ukoliko se celokupan signal vibracija, od početka do kraja rezanja, transformiše u frekventni domen, moguće je uočiti frekvenciju samopobudnih vibracija, ali nije moguće detektovati dubinu na kojoj je došlo do njenog izdvajanja.

Da bi se dobile informacije o graničnoj dubini na kojoj dolazi do nastanka samopobudnih vibracija, ukupan vremenski signal je potrebno podeliti na određeni broj jednakih vremenskih delova koji, u zavisnosti od očekivane tačnosti, odgovaraju željenoj promeni dubine rezanja. Tačnost određivanja granične dubine rezanja direktno zavisi od inkrementa podele vremenskog signala, te treba težiti da taj inkrement bude što manji. Brzom Furijeovom transformacijom, svaki segment vremenskog signala se transformiše u frekventni domen, a u segmentu u kome se javi frekvencije samopobudnih vibracija, sa željenom tačnošću, određuje se granična dubina rezanja.

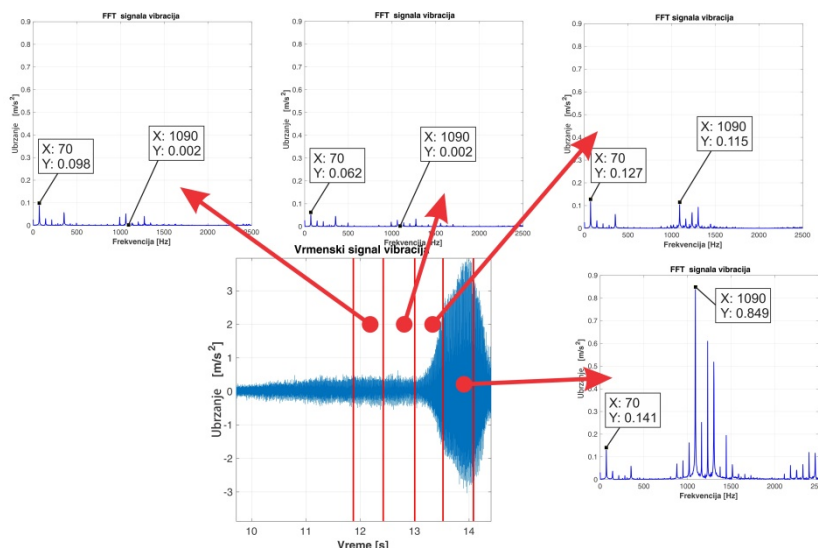
Granična dubina rezanja zavisi od brzine pomoćnog kretanja alata pri eksperimentu (v_p), ugla nagiba obratka (α_0) i trenutka nastanka samopobudnih vibracija (T_{spv}). Trenutak nastanka samopobudnih vibracija određuje se kao geometrijska sredina početnog i krajnjeg vremena segmenta signala u kome je došlo do

skoka amplitude samopobudnih vibracija, mereno od početka rezanja ($T_{poč}$) (1). Izračunavanje granične dubine rezanja vrši se prema izrazu (2).

$$T_{spv} = \sqrt{T_{seg_poč} \cdot T_{seg_kr}} - T_{poč} \quad (1)$$

$$b_{gr} = v_p \cdot tg\alpha_0 \cdot T_{spv} \quad (2)$$

Na slici 2 prikazan je primer vremenskog signala samopobudnih vibracija podeljen na četiri jednaka segmenta. Na svakom od ta četiri segmenta signala sprovedena je brza Furijeova transformacija i dobijeni su odgovarajući dijagrami, takođe prikazani na slici 2. Na prve dve slike, koje odgovaraju stabilnom delu signala, izdvaja se osnovna frekvencija obrtanja sklopa glavno vreteno – držač alata – alat, na 70 [Hz] (≈ 4250 [°/min]) i njeni harmonici. Na preostale dve slike pojavljuje se i frekvencija bliska sopstvenoj frekvenciji sklopa glavno vreteno – držač alata – alat (≈ 1090 [Hz]), koja predstavlja frekvenciju samopobudnih vibracija. Pored toga, poredeći signale u frekventnom domenu sa signalom u vremenskom domenu, jasno je uočljivo da sa porastom amplitude vremenskog signala raste i amplituda frekvencije samopobudnih vibracija. Analizom slike 2, zaključuje se da su samopobudne vibracije nastale u trećem segmentu vremenskog signala, čije je početno vreme $T_{seg_poč}=13$ [s], a krajnje $T_{seg_kr}=13,5$ [s]. Uzimajući u obzir brzinu pomoćnog kretanja pri eksperimentalnom ispitivanju ($v_p=336$ [mm/min]), ugao nagiba obratka ($\alpha_0=11^\circ$), kao i vreme početka rezanja ($T_{poč}=10,1$ [s]), primenom izraza 1 i 2, određena je dubina rezanja za konkretan slučaj koja iznosi $b_{gr}=3,42$ [mm]. Pored toga, analizom četvrtog segmenta vremenskog signala može se potvrditi da je amplituda samopobudnih vibracija u ovom segmentu najveća, te da su ove vibracije nastale ranije, tj. u trećem segmentu.



Slika 2. FFT segmenata signala vibracija pri obradi sa kontinualnom promenom dubine rezanja

3. EKSPERIMENTALNO DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNOG CENTRA EMCO ConceptMill450

Eksperimentalno definisanje karte stabilnosti sprovedeno je metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija, na obradnom centru EMCO ConceptMill450 (Slika 3a), pri glodanju radnog predmeta od aluminijuma Al7075 sa zakošenom gornjom površinom (Slika 3b), vretenastim glodalom od brzoreznoog čelika prečnika $\phi 10$ [mm].



Slika 3 a) Obradni centar EMCO Concept Mill 450; b) pripremak od aluminijuma Al7075; c) pozicija senzora ubrzanja pri eksperimentalnom ispitivanju samopobudnih vibracija

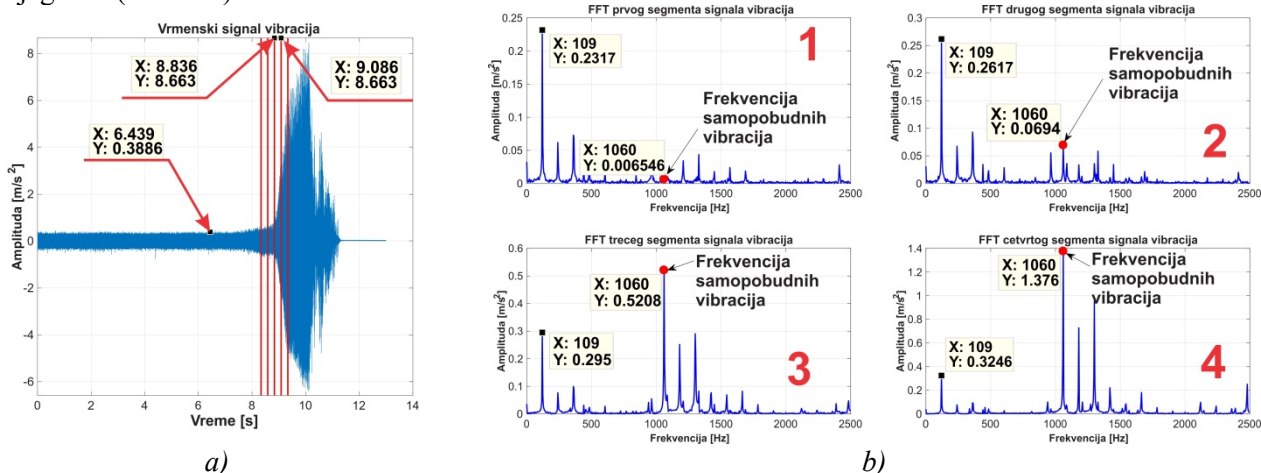
Osnovni cilj ovog eksperimentalnog ispitivanja je analiza primenljivosti određivanja graničnih dubina rezanja predloženom metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija. U tu svrhu, sproveden je niz eksperimenata pri kojima je variran broj obrtaja glavnog vretena u rasponu od 3000 [o/min] do 10000 [o/min], dok je pomak po zubu bio konstantan i iznosio je 0,02 [mm/z]. Obradak, zahvaljujući svom zakošenom obliku, omogućava kontinualno povećanje dubine rezanja u pravcu brzine pomoćnog kretanja (Y osa mašine alatke), dok se broj obrtaja glavnog vretena povećava svakim sledećim prolazom alata. Inkrement povećanja brojeva obrtaja iznosio je 250 [o/min]. U trenutku nastanka samopobudnih vibracija, pomoćno kretanje se zaustavlja, alat se pomera u pravcu X ose mašine i eksperiment se ponavlja za sledeći broj obrtaja glavnog vretena. Tokom svakog eksperimenta snimane su vibracije glavnog vretena pomoću dijagnostičke instrumentacije, koja se sastoji od senzora ubrzanja (akcelerometra) PCB 352C33 i A/D kartice *National Instruments* USB-4432. Da bi što bolje bio detektovan nastanak samopobudnih vibracija, senzor ubrzanja se postavlja što bliže zoni rezanja, te je u ovom slučaju on fiksiran na spoljašnju čauru glavnog vretena obradnog centra (Slika 3c). Signal sa senzora ubrzanja se pomoću A/D kartice prikazuje u vremenskom domenu i snima u memoriju računara u matricnom obliku.

U cilju sprečavanja oštećenja elemenata obradnog centra, maksimalna dubina rezanja je ograničena na 8 [mm]. Zbog toga, za neke vrednosti brojeva obrtaja glavnog vretena nije moguće odrediti tačnu vrednost granične dubine rezanja ukoliko je ona veća od 8 [mm].

Vremenski signal vibracija, snimljen pri obradi kontinualno promenljivom dubinom rezanja, sadrži informacije o vibraciji alata za odgovarajući opseg dubina rezanja, odnosno od početka do kraja rezanja. Da bi se dobile informacije o graničnoj dubini na kojoj dolazi do nastanka samopobudnih vibracija, vremenski signal za svaki izvedeni eksperiment je podeljen na n jednakih delova sa inkrementom 0,25 [s], a zatim je svaki od tih delova transformisan u frekventni domen, primenom brze Furijeove transformacije. Na ovaj način, za svaki definisani vremenski opseg posmatraju se frekvencije vibracija, te je moguće detektovati nastanak i porast amplitude frekvencije samopobudnih vibracija.

Kao što je već napomenuto, samopobudne vibracije se javljaju na frekvenciji bliskoj sopstvenoj frekvenciji kritičnog elementa (sklopa) obradnog sistema. Stoga, neophodno je napomenuti da je u prethodnim istraživanjima određena sopstvena frekvencija sklopa alat-držać alata-glavno vreteno obradnog centra EMCO ConceptMill 450, i da ona iznosi 1038 [Hz].

Na slici 5a je prikazan vremenski signal vibracija pri obradi sa 6500 [o/min] glavnog vretena, gde je, radi preglednosti dijagrama, izdvojeno samo četiri segmenta u području naglog skoka amplitude vibracija. Na svakom od ta četiri segmenta signala sprovedena je brza Furijeova transformacija i dobijeni su odgovarajući dijagrami (Slika 5b).



Slika 5a) Vremenski signal vibracija za obradu sa 6500 [o/min] sa izdvojenim segmentima; b) FFT izdvojenih segmenata signala vibracija

Na prva dva dijagrama slike 5b, koje su definisani primenom brze Furijeove transformacije na prva dva segmenta signala vibracija, izdvaja se osnovna frekvencija obrtanja alata na 109 [Hz] (≈ 6500 [o/min]) i njeni harmonici. Na preostala dva dijagrama, pored osnovne frekvencije obrtanja alata, pojavljuje se i frekvencija bliska sopstvenoj frekvenciji alata, koja predstavlja i frekvenciju samopobudnih vibracija (≈ 1060 [Hz]). Analizom amplituda na frekvenciji od 1060 [Hz], može se zaključiti da samopobudne vibracije nastaju u trećem izdvojenom segmentu vremenskog signala vibracija. Trenutak nastanka vibracija određuje se iz izraza (1) i (2), na bazi poznatog vremena početka ($T_{seg_poč}=8,836[s]$) i kraja ($T_{seg_kr}=9,086[s]$) trećeg izdvojenog

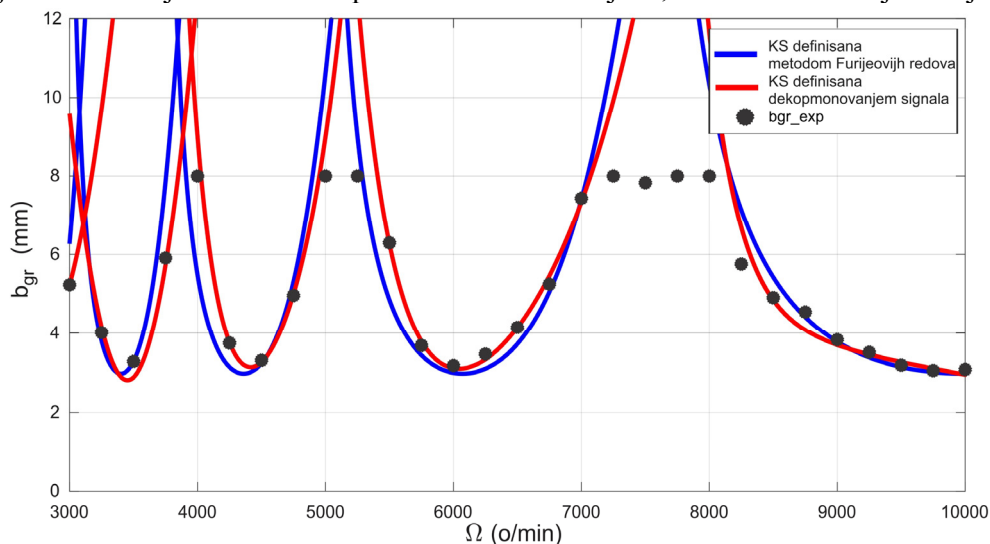
segmenta vibracija, uzimajući u obzir poznato vreme početka rezanja ($T_{poč}=6,439[s]$), brzinu pomoćnog kretanja pri obradi (v_p) i ugao nagiba kose površine obratka (α_0).

Na isti način analizirani su vremenski signali vibracija za sve izvedene eksperimente, a rezultati su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1 Eksperimentalne granične dubine rezanja određene metodom dekomponovanja signala vibracija

Redni broj	Broj obrtaja glavnog vretena [o/min]	Brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	Granična dubina rezanja [mm]	Redni broj	Broj obrtaja glavnog vretena [o/min]	Brzina pomoćnog kretanja [mm/min]	Granična dubina rezanja [mm]
1	3000	240	5,23	16	6750	540	5,25
2	3250	260	4,01	17	7000	560	7,43
3	3500	280	3,28	18	7250	580	8
4	3750	300	5,91	19	7500	600	7,83
5	4000	320	8	20	7750	620	8
6	4250	340	3,75	21	8000	640	8
7	4500	360	3,31	22	8250	660	5,75
8	4750	380	4,96	23	8500	680	4,9
9	5000	400	8	24	8750	700	4,54
10	5250	420	8	25	9000	720	3,83
11	5500	440	6,3	26	9250	740	3,51
12	5750	460	3,67	27	9500	760	3,18
13	6000	480	3,17	28	9750	780	3,04
14	6250	500	3,47	29	10000	800	3,07
15	6500	520	4,15				

Da bi se definisala karta stabilnosti na bazi eksperimentalnih vrednosti dobijenih metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija, potrebno je definisati aproksimativnu krivu kroz vrednosti prikazane u tabeli 1 polinomom trećeg stepena. Aproksimacija, tj. fitovanje krive linije, izvršeno je kreiranjem algoritma u *Matlab* softverskom okruženju, čime je definisana karta stabilnosti prikazana crvenom bojom na slici 7. U cilju verifikacije predložene eksperimentalne metode, na slici 7 je plavom bojom prikazana i matematički definisana karta stabilnosti primenom metode Furijeovih redova [5]. Metoda Furijeovih redova je analizirana u prethodnim istraživanjima, te u ovom radu nije detaljnije opisana.



Slika 7 Karta stabilnosti definisana metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano definisanje karte stabilnosti obradnog sistema eksperimentalnom identifikacijom samopobudnih vibracija. Granične dubine rezanja, potrebne za definisanje karte stabilnosti, određene su metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija.

Predloženom metodom, određene su granične dubina rezanja pri obradi glodanjem aluminijuma Al7075 na obradnom centru EMCO ConceptMill 450, i definisana je karta stabilnosti ovog obradnog sistema.

Verifikacija karte stabilnosti dobijene metodom dekomponovanja vremenskog signala samopobudnih vibracija sprovedena je njenim poređenjem sa matematički definisanom kartom stabilnosti, primenom metode Furijeovih redova. Na bazi ove verifikacije, zaključeno je da metoda dekomponovanja signala samopobudnih vibracija daje vrlo dobre rezultate pri eksperimentalnom određivanju graničnih dubina rezanja, i da se efikasno može primenjivati za verifikaciju matematičkih modela za predikciju nastanka samopobudnih vibracija.

Pored toga, da bi metodologija eksperimentalnog definisanja karte stabilnosti obradnog sistema, prikazana u ovom radu, bila potpuna, potrebno je dobijene rezultate uporediti sa drugim eksperimentalnim metodama definisanja karte stabilnosti obradnog sistema (analiza hrapavosti obrađene površine, metoda tangenti...), što predstavlja pravac budućih istraživanja u okviru analize stabilnosti procesa obrade glodanjem.

5. LITERATURA

- [1.] Quintana, G., Ciurana, J.: Chatter in machining processes: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011. 51(5): pp. 363-376.
- [2.] Tobias, S., Fishwick, W.: Theory of regenerative machine tool chatter, *The engineer*, 1958. 205(7): pp. 199-203.
- [3.] Tlusty, J., Polacek, M.: The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining, *International research in production engineering*, 1963. 1(1): pp. 465-474.
- [4.] Mladenović, C., Košarac, A., Zeljković, M., Knežev, M.: Experimental Definition Of Machining Systems Stability Lobe Diagram, in XIII International Scientific Conference MMA 2018 – Flexible Technologies 2018. Novi Sad, Srbija: University of Novi Sad, pp. 95-98.
- [5.] Altıntaş, Y., Budak, E.: Analytical prediction of stability lobes in milling, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1995. 44(1): pp. 357-362.
- [6.] Koenigsberger, F., Tlusty, J.: *Machine Tool Structures*. Vol. 1. 1970: Pergamon Press. 528.
- [7.] Kudinov, V.A., ed.: *Dinamika stankov*. 1967, Mašinstroenie, Moskva.
- [8.] Quintana, G., Ciurana, J., Ferrer, I., Rodríguez, C.A.: Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes, *International journal of machine tools and manufacture*, 2009. 49(3): pp. 203-211.
- [9.] Zhu, L., Liu, C.: Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020. 143: pp. 106840.
- [10.] Košarac, A., Šikuljak, L., Obradović, Č., Mladenović, C., Zeljković, M.: Cutting parameters influence on surface roughness in AL 7075 milling, in 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 2020. Jahorina, East Sarajevo, Bosnia and Hercegovina: IEEE. pp. 1-6.
- [11.] Košarac, A., Šikuljak, L., Šalipurević, M., Mladenović, C., Zeljković, M.: Prediction of self-excited vibrations occurrence during aluminium alloy AL 7075 milling, in 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 2019. Jahorina, East Sarajevo, Bosnia and Hercegovina: IEEE. pp. 1-6.
- [12.] Košarac, A., Mladenović, C., Zeljković, M., Šikuljak, L.: Experimental method for defining the stability lobe diagram in milling Č4732 (42CRMO4) steel, *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 2019. 12(2): pp. 31-34.

Mladenović, C., Zeljković, M., Košarac, A.

DEFINING THE STABILITY LOBE DIAGRAM OF THE MACHINING SYSTEM USING VIBRATION SIGNALS FREQUENCY ANALYSIS

Abstract: *Self-excited vibrations are one of the most unfavorable phenomena in the cutting process, which can result in accelerated wear or breakage of the tool, a sharp deterioration in the quality of the machined surface, increased noise, increased energy consumption, etc.*

To avoid these negative influences, special diagrams are used to define the cutting regimes, which, depending on the main spindle RPMs and depth of cut, show the boundary between a stable and unstable working area of the machine tool from the self-excitation vibrations point of view. These diagrams, called - stability lobe diagrams, can be defined by applying mathematical models (analytical, numerical ...) or experimental tests (tangent method, sound mapping ...)

The paper presents the definition of the machining system stability lobe diagram by experimental identification of self-excited vibrations. Limit depths of cut required to define the stability map were determined by the self-excited vibration time signal decomposition method.

The proposed method was used for the determination of the limit depth of cut for milling of aluminum Al7075 on the machining center EMCO Concept Mill 450. The obtained results were verified by comparing the stability lobes determined by the proposed method and several mathematical and experimental methods.

Key words: *dynamic behavior of machining systems; self-excited vibrations; frequency analysis; stability lobe diagram;*



Stefanović, Lj., Milutinović, M., Movrin, D., Skakun P., Vilović, M.,¹ Randelović, S.²

PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U IZRADI MALOSERIJSKIH ALATA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE

Sve izraženiji zahtevi za individualizacijom proizvoda i proizvodnjom delova u malim serijama primoravaju proizvođače širom sveta da menjaju svoje proizvodne strategije i da uvode nove visoko fleksibilne postupke koji omogućavaju značajano smanjenje troškova i vremena proizvodnje. U tom pogledu primena postupaka baziranih na aditivnim tehnologijama pruža velike mogućnosti. Danas se aditivne tehnologije koriste ne samo za izradu fizičkih modela/prototipova već i za dobijanje finalnih proizvoda, izradu alata, medicinskih pomagala itd. U ovom radu razmatrana je problematika primene aditivnih tehnologija u proizvodnji kalupnih formi od plastike za proces injekcionog presovanja. Radi boljeg sagledavanja mogućnosti primene aditivnih tehnologija u proizvodnji kalupa za injekciono presovanje sprovedena je tehno-ekonomska analiza pojedinih postupaka brze izrade alata.

Ključne reči: aditivna proizvodnja, brza izrada alata, injekciono presovanje

1. UVOD

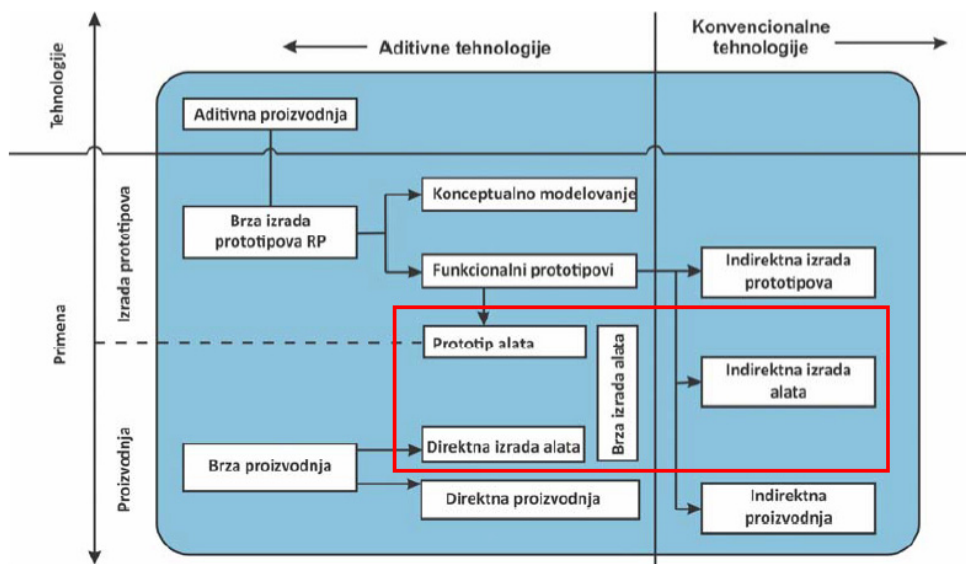
Aditivne tehnologije (AT) predstavljaju grupu različitih tehnoloških postupaka koji omogućavaju generisanje fizičkih trodimenzionalnih objekata na osnovu digitalnog 3D modela, dodavanjem materijala sloj-po-sloj. Reč je o veoma fleksibilnim postupcima jer za izradu fizičkih modela/delova nisu potrebni alati i pribori kao u slučaju konvencionalnih tehnologija, zbog čega i ne postoje ograničenja u pogledu geometrije proizvedenih delova. Pored toga, pri izradi delova različitih geometrijskih karakteristika nije neophodna posebna priprema uređaja i opreme, a u nekim slučajevima moguće je na jednom uređaju izraditi više različitih komponenti istovremeno. Osim pojedinačnih komponenti, primenom aditivnih tehnologija direktno se mogu izrađivati i funkcionalni sklopovi. Ono što takođe karakteriše ove tehnologije jeste i veliki izbor materijala, odnosno mogućnost izrade delova od različitih klasa materijala (polimera, metala, keramike, kompozita kao i njihovih kombinacija) uz minimalne gubitke materijala. Glavni nedostaci postupaka na bazi aditivnih tehnologija su dugo vreme procesa, ograničenja u pogledu dimenzija delova i relativno visoka cena finalnog proizvoda koja zavisi od vremena izrade, cene opreme koja je potrebna za odvijanje procesa i cene korišćenih materijala [1]. Na početku aditivne tehnologije su primenjivane isključivo za brzu izradu fizičkih modela i prototipova (Rapid Prototyping), a kasnije, sa razvojem postupaka i materijala, ove tehnologije su evoluirale do stepena koji omogućava izradu završnih, funkcionalnih proizvoda (Additive Manufacturing - AM) [2] ili alata (Rapid Tooling - RT) [3,4]. S obzirom na fleksibilnost i tehno-ekonomske prednosti, AM tehnologije su našle široku primenu u svim granama industrije, obrazovanju, medicini, arhitekturi itd.

Pojam brza izrada alata (RT) obuhvata sve procedure bazirane na AM tehnikama koje služe za izradu alata, elemenata alata (kalupne forme, jezgra, umeci, izbacivači, klizači itd.), kao i modela na osnovu kojih se generiše kalupna šupljina. Ovim tehnologijama se najčešće izrađuju kalupi za brizganje plastike, alati za deformisanje i kalupi za livenje. Postoje dva nivoa primene AM tehnologija u izradi alata, koji su definisani na osnovu kvaliteta tj. eksploatacionih karakteristika alata (sl.1). Prvi nivo odnosi se na izradu potpuno funkcionalnih alata za proizvodnju delova u velikim serijama direktno na bazi CAD modela nekom od AM tehnologija (Direct Tooling - DT). Direktna izrada alata ne znači da je ceo alat (sklop) napravljen na AM uređaju, već se pomoću AM tehnologija proizvode samo neke (nestandardne) komponente alata, poput

¹ MSc Ljiljana Stefanović (ljiljanastefanovic@uns.ac.rs), prof. dr Mladomir Milutinović (mladomil@uns.ac.rs), doc dr Dejan Movrin (movrin@uns.ac.rs), doc dr Plavka Skakun, (plavkasl@uns.ac.rs), prof. dr Marko Vilović (markovil@uns.ac.rs), Fakultet tehničkih nauka Novi Sad

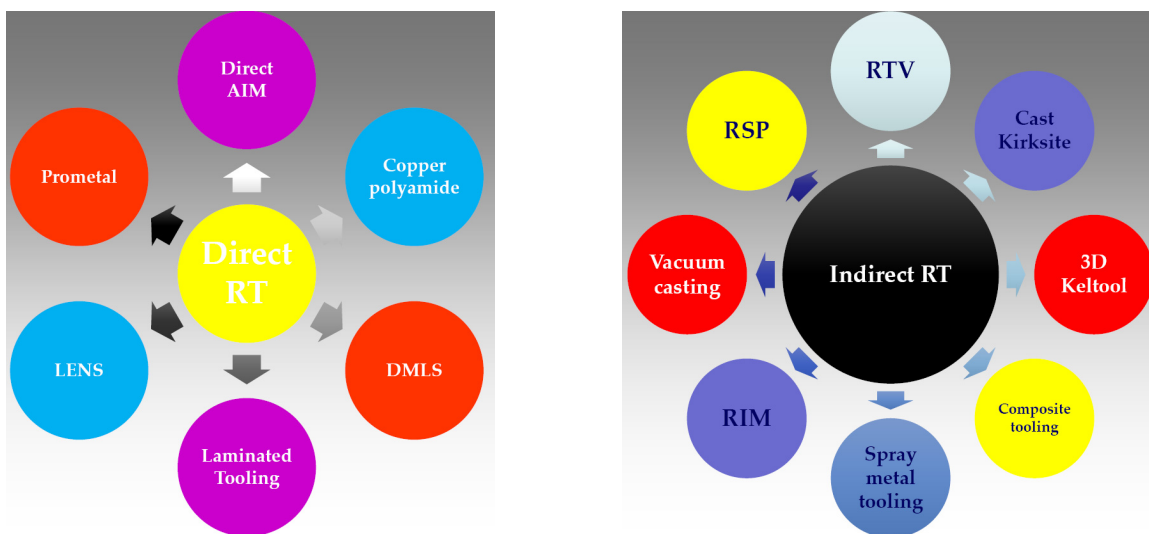
² prof. dr Saša Randelović (sassa@masfak.ni.ac.rs), Mašinski fakultet Niš,

kalupnih formi, koji se onda kombinuju sa drugim elementima alata u cilju formiranja funkcionalnog sklopa. Drugi nivo čine tzv. prototipni alati (Prototype Tooling - PT) koji se primenjuju u pojedinačnoj ili malo-serijskoj proizvodnji, odnosno kada primena kalupa serijskog kvaliteta nije racionalna zbog cene i dugog vremena izrade. Naime, ako je potrebno izraditi samo nekoliko delova ili ako se geometrija delova često menja, obično je dovoljan privremeni kalup napravljen od zamenskog materijala. Ova vrsta kalupa poseduje kvalitet funkcionalnih prototipova, ali ispunjava, doduše delimično, i nivo primene direktnih alata tako da predstavljaju granicu između oblasti prototipova i finalnih (gotovih) proizvoda. Pojedini autori [5] definišu PT alate kao podgrupu DT alata, i često ih nazivaju prelaznim alatima (Bridge Tools - BT). Kvalitet alata proizvedenih direktnim AM metodama varira u zavisnosti od materijala alata i korišćenog RT postupka.



Slika 1. Nivoi primene aditivnih tehnologija u izradi alata [6]

AM tehnologije se koriste i za dobijanje master modela koji služe kao šabloni (negativi) na osnovu kojih se onda izrađuju odgovarajući kalupi/alati, obično za malo-serijsku i srednje-serijsku proizvodnju, primenom konvencionalnih tehnologija. Drugim rečima, primenom AM tehnologija se indirektno kreira alat zbog čega se postupak klasifikuje kao indirektna izrada alata (Indirect Tooling - IT). Indirektni postupci izrade alata uspešno se koriste već dugi niz godina u praksi, a modeli dobijeni AM tehnologijama najčešće se primenjuju u izradi kalupa za precizno livenje, livenje sa isparljivim modelom, izradu silikonskih kalupa itd. Neke od AM tehnologije koje se koriste za izradu alata direktnim i indirektnim postupcima prikazane su na slici 2. U nastavku rada ukazaće se na specifičnosti primene aditivnih tehnologija u izradi kalupa/alata za injeksiono presovanje od polimernih materijala.



Slika 2. Direktni i indirektni postupci na bazi AM tehnologija za izradu alata [7]

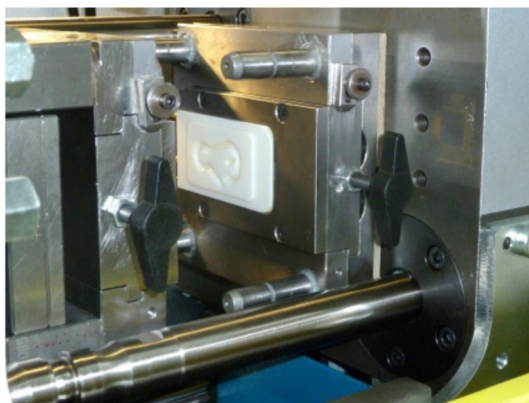
2. BENEFITI PRIMENE AM TEHNOLOGIJA U IZRADI ALATA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE

Konvencionalna izrada alata/kalupa za injekciono presovanje je skupa, dugotrajna i dovodi do nastajanja veće količine otpada. Izrada alata zahteva visoko kvalifikovanu radnu snagu, često se izrada vrši dalje od mesta gde su namenjeni da budu upotrebljeni, pa se zahteva skup i dug transport. Prilikom razvoja proizvoda u ranim fazama izrade može doći do promene dizajna. Ove promene mogu nastati zbog modifikacija u obliku proizvoda sa ciljem što boljeg zadovoljenja željenih specifikacija proizvoda. Bez obzira na razlog promene, svaka modifikacija zahteva dugotrajno i skupo prerađivanje kalupa, a u nekim slučajevima kalup se mora izraditi iz početka [8]. Primenom AM tehnologija povećava se fleksibilnost proizvodnje i time značajno smanjiti vreme i ukupni troškovi razvoja i izrade alata za injekciono presovanje (50-70%). Takođe, AM tehnologije omogućavaju inovativni dizajn proizvoda od plastike jer dozvoljavaju izradu kalupnih formi kompleksne geometrije koje se ne mogu dobiti konvencionalnim metodama. Jedan od najvećih benefita primene AM tehnologija pri izradi kalupa za injekciono presovanje jeste mogućnost direktne izrade unutrašnjih šupljih struktura, tj. kanala za hlađenje koji prate složenu konturu kalupne šupljine (conformal cooling) i ne podležu ograničenjima u pogledu geometrije poprečnog preseka i pozicije u kalupu. Sa druge strane, kod konvencionalnih metoda izrade kalup, kanali za hlađenje se formiraju naknadno mašinskom obradom bušenjem što ograničava njihovu geometriju na kombinaciju pravih linija. Primenom konformnih kanala za hlađenje bitno se poboljšavaju uslovi odvođenja toplote (efikasnije hlađenje), a rezultat toga je manje termičko opterećenje alata, skraćanje radnog ciklusa, odnosno, povećanje produktivnosti, smanjenje škarta i generalno niži troškovi po jedinici proizvoda. Pored toga, primenom AM tehnologija kanali za hlađenje i grejanje mogu se dizajnirati na način da se formira integrisani sistem za temperiranje alata, i time poboljša efikasnost alata.

Kalupi sa 3D štampanim elementima najčešće se sreću u proizvodnji medicinske opreme (npr. za izradu hirurških delova koji podležu vrlo strogim propisima) i automobilske industriji (npr. za izradu pneumatika, gumenih elemenata i drugih delova automobila), mada bilo koji sektor u kojem je potrebna fleksibilnost u procesu je potencijalni korisnik ovih alata. Međutim, i pored niza prednosti primena AM tehnologije u izradi alata za injekciono presovanje je ograničena [9]. Razloga za to ima više, najveći broj je tehničko-finansijske prirode, ali svakako jedan od bitnijih je nedovoljna diseminacija rezultata istraživanja vezana za ovu problematiku.

3. KALUPI ZA INJEKCIONO PRESOVANJE OD POLIMERA

Generalno, svi elementi alata za injekciono presovanje izrađeni direktnim AM tehnologijama mogu se svrstati u jednu od dve kategorije: one na bazi metalnih materijala (nivo primene DT – serijski alati) ili one izrađene od polimera/plastike (nivo primene PT – prototipni alati). Metalne komponente alata najčešće se izrađuju metodama selektivnog laserskog topljenja (Selective Laser Melting - SLM) i direktnog laserskog sinterovanja metala (Direct Metal Laser Sintering - DMLS), dok se polimerne komponente pretežno dobijaju postupcima baziranim na metodi stereolitografije (Stereolithography - SLA), direktne 3D štampe (PolyJet – sl.3) i Selektivnog laserskog topljenja (Selective lasersintering – SLS). Izrada kalupa AM tehnologijama, osim poznavanja RT postupka zahteva i dobro poznavanje postupka injekcionog presovanja. Zbog velikih mehaničkih i termo-dinamičkih opterećenja alata u toku procesa injekcionog presovanja ispred RT postupka i samih alata se postavljaju mnogo strožiji zahtevi nego kod standardnih RP procedura.



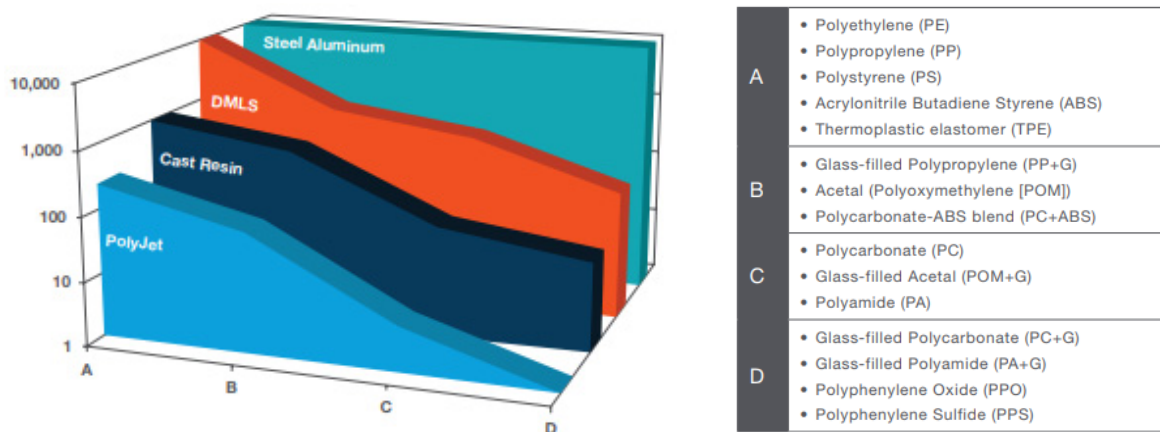
Slika 3. Sklop alat za injekciono presovanje sa kalupom od ABS [10]

Ključni izazov pri projektovanju AM procesa za izradu komponenti alata za injekciono presovanje na bazi polimera je izbor materijala koji će obezbediti odgovarajuće mehaničke karakteristike potrebne za proces injekcionog presovanja. Na primer, plastične kalupne forme (kalupi) izrađene od različitih materijala različito se ponašaju pri zagrevanju i to se mora uzeti u obzir pri projektovanju tehnološkog postupka u cilju izbegavanja krivljenja/vitoperenja radnog komada. Dalje, plastični kalupi zahtevaju duži ciklus hlađenja nakon upotrebe (idealno vazduhom), što mora biti uračunato pri planiranju proizvodnje. Takođe, radni vek ovih alata je znatno kraći nego u slučaju klasičnih metalnih kalupa. Koliki broj ciklusa injekcionog presovanja će izdržati plastični kalup zavisi od niza faktora, poput materijal alata, složenosti geometrije alata/obratka, materijala obratka (rastopljenog polimera), parametri procesa, habanja itd. Na slici 4 dat je grafički prikaz broja ciklusa alata izrađenih klasičnim i AM tehnologijama u funkciji materijala otpreska. Treba naglasiti da razvoj novih tehnika 3D štampe metala (poput DMLS) omogućava da se metalne kalupne forme mogu štampati/izraditi po istim, strogim, standardima kao u slučaju konvencionalnih tehnologija.

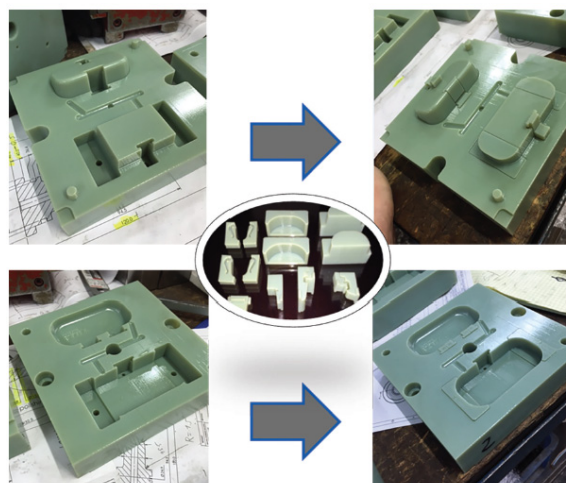
Pored navedenih nedostataka, kalupne forme od plastike imaju i određene prednosti u odnosu na metalne i to:

- smanjena je sila zatvaranja,
- kalupne forme od plastike su mekše nego metalne tako da se već pri malim silama zatvaranja deformišu i sprečavaju prodor vazduha,
- efikasnije ozračivanje kalupne šupljine i time njena bolja popuna.

Uslovi ventiliranja kalupne šupljine dodatno se poboljšavaju primenom višedelnih kalupa (sl.5), čime se istovremeno produžava radni vek alata [11]. Višedelni kalupi se preporučuje kod alata kompleksne geometrije gde postoji opasnost od oštećena pojedinih segmenata usled malih preseka i oštih prelaza. Još jedna prednost je mogućnost izrade većeg broja kalupa i ukoliko dođe do njihovog pucanja ili deformisanja brzo se mogu zameniti.



Slika 4. Broj izrađenih delova u alatu u zavisnosti od vrste materijala otpreska [11]



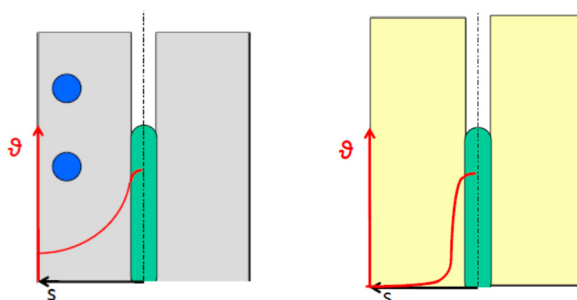
Slika 5. Primeri višedelnih kalupa dobijenih PolyJet postupkom [11]

Mehaničke karakteristika tehničkih plastika i kalupa znatno su niže u odnosu na metalne kalupa i ova se činjenica mora uzeti u obzir pri projektovanju tehnološkog procesa injekcionog presovanja. Da bi poboljšale eksploatacione karakteristike alata za injekciono presovanje sa plastičnim kalupnim formama i produžio njegov radni vek posebnu pažnju treba posvetiti izboru parametara procesa, a pre svega temperature, pritiska i vremena ciklusa. Drugim rečima potrebno je izvršiti modifikacije parametara procesa koje se primenjuju u slučaju konvencionalnih alata i definisati njihove gornje granice pri kojima ne dolazi do oštećenja alata.

Pritisak ubrizgavanja zavisi od vrste materijala (rastopa), temperature rastopa, viskoznosti, temperature kalupa i geometrije kalupne šupljine. Ukoliko bi se primenila standardna procedura podešavanja pritiska ubrizgavanja što podrazumeva nagli skok pritiska do maksimalne vrednosti, može doći do smicanja i savijanje pojedinih segmenata na alatu, odnosno do neželjenih deformacija kalupa i nepravilnog funkcionisanja alata. Zbog toga, pri korišćenju kalupnih formi od plastike pritisak ubrizgava treba postepeno povećavati, i generalno treba ga održavati što nižim. Slične preporuke važe kada je u pitanju i naknadni pritisak. S obzirom da brzina ubrizgavanja utiče na veličinu pritiska ubrizgavanja preporuka je da se ona ograniči na 50% od kapaciteta mašine.

Temperatura kalupa zavisi od vrste materijala kalupa, ali i geometrije dela. Proizvođači materijala određuju temperaturu kalupa koja je idealna za dati materijal. Postoje preporučene granice do kojih se 3D štampani kalupi mogu koristiti. Polimeri sa visokom temperaturom obrade (preko 250 °C) i delovi sa kompleksnom geometrijom kao što su izuzetno tanki delovi ili suviše sitni detalji dovode do skraćivanja radnog veka umetka [12]. U slučaju izrade tankozidnih delova zbog otežanog tečenja materijala zahtevaju se nešto više radne temperature i materijali veće viskoznosti. Kod debelozidnih delova i delova jednostavnije geometrije mogu se primeniti niže temperature. Niže temperature dovode do pojačanog trenja u alatu što rezultira skokom pritiska i povećanim habanjem.

Kao što je ranije naglašeno zbog lošije toplotne povodljivosti materijala vreme hlađenja alata sa plastičnim kalupnim formama mora biti znatno duže u odnosu na metalne kako bi se sprečila termička oštećenja kalupa. Vreme i brzina hlađenja kalupa/dela takođe definišu i stepen kristalizacije materijala otpreska čime direktno utiču na čvrstoću dela, dimenzije i estetski izgled. Na slici 6-levo prikazana je promena temperature po preseku alata kod klasičnih alata od čeličnih. Ovi alati imaju kanale za hlađenje vodom što obezbeđuje dobro odvođenje toplote i dug radni vek alata. Sa druge strane u slučaju primene kalupa od plastike nema kanala za hlađenje vodom (hlađenje vodom nije moguće), a površine alata hlade se pomoću vazduha pod pritiskom (površinsko hlađenje). Zbog loše toplotne povodljivosti materijala toplota ostaje na podeonoj ravni (sl. 6-desno) što negativno utiče na radni vek alata (velika termička opterećenja površine alata), ali olakšava tečenje rastopa i bolje popunjavanje kalupne šupljine. Da bi se smanjilo habanje kalupa potrebno je produžiti fazu hlađenja kalupa nakon izbacivanja dela, minimizirati fazu hlađenja dela i ukoliko je moguće smanjiti debljinu zida.



Slika 6. Profil temperaturnog polja kod čeličnog (levo) i polimernog (desno) kalupa [10]

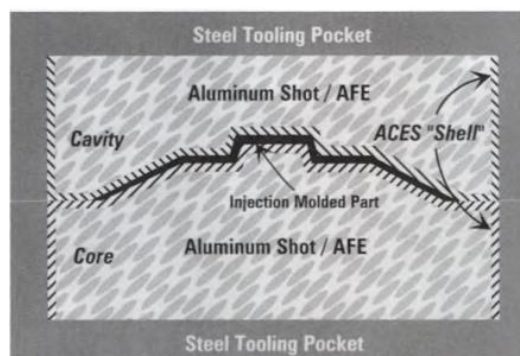
Proces hlađenja uzrokuje skupljanje dela što može dovesti do lomljenja tankih elemenata na alatu. Što je manje skupljanje, manji je pritisak na kalup. Kako bi se sprečilo lepljenje materijala na površinu kalupa potrebno je posle svakog ciklusa injekcionog presovanja kalup ohladiti pomoću vazduha pod pritiskom. Takođe, mogu se koristiti i određeni premazi radi lakšeg skidanja otpreska sa alata. Prilikom izbacivanja dela iz kalupa treba voditi računa o sledećem:

- ukoliko je moguće potrebno je koristiti samo jedan centralni izbacivač, dodatni izbacivači zahtevaju korekcije na glavnom alatu,
- izbacivači koji prolaze kroz kalup moraju biti što finije obrađeni, kako ne bi došlo do oštećenja kalup nakon izbacivanja,
- centralni izbacivač zahteva stabilan presek kako bi se omogućilo pravilno izbacivanje dela iz kalupa

Stereolitografija (SLA) spada među najzastupljenije AM tehnologije, a uspešno se koristi kako za izradu prototipova tako i funkcionalnih (gotovih) proizvoda. Međutim, kada je u pitanju primena SLA u izradi kalupa za plastiku u početku je bilo dosta problema u eksploataciji ovih alata, najviše zbog lošeg odvođenja toplote (provodljivost SLA materijala je oko 300 puta manja u odnosu na čelik), nestacionarnosti dimenzija kalupa usled cikličnog zagrevanja, kao i fizičkih oštećenja kalupa usled niskih mehaničkih karakteristika materijala [9]. Iz tog razloga pristupilo se modifikaciji i razvijeni su novi postupci na bazi SLA tehnologije za izradu kalupa za injekciono presovanje poput Accurate Clear Epoxy Solid (ACES) metode. Kod ACES postupka umesto konvencijalnih fotopolimera koriste se rastvori bazirani na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama, otporni na visoke temperature (200-300°C). Povećanja toplotna otpornost ovih materijala povoljno utiče na eksploatacione karakteristike kalupa i omogućava njegov duži rad vek. Na slici 7. prikazan je kalup za injekciono presovanje izrađen ACES postupkom.



Slika 7. Kalupi sa metalnim umecima izrađeni ACES postupkom [13]



Slika 8. Poprečni presek kalupa izrađenog ACES postupkom

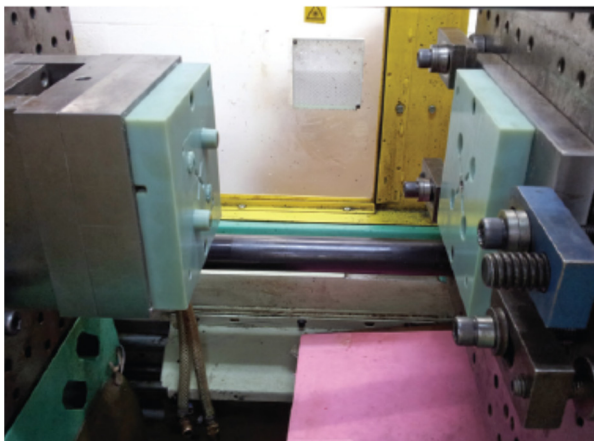
ACES postupak za izradu kalupa za injekciono presovanje sastoji se od nekoliko faza. U prvoj fazi na SLA uređaju se izrađuje školjka kalupa (shelling) debljine zida 2-3mm. Nakon toga u školju kalupa se dodaju se bakarne cevi za vodeno hlađenje kalupa što obezbeđuje dobro odvođenje toplote sa kalupa i skraćuje radnog ciklusa. Na kraju, zadnja strana kalupa se puni smešom sastavljenom od 30% aluminijumskog granulata i 70% epoksidne smole [14]. Za popunu kalupu mogu se koristiti i termoplasti, keramika i metali sa niskom tačkom topljenja. Poprečni presek jednog takvog kalupa može se videti na slici 8. Predviđeno je da se površina kalupa dodatno hladi vazduhom nakon izbacivanja otpreska iz kalupne šupljine. Radni vek ovih kalupa zavisi od oblika i veličine otpreska, materijala koji se ubrizgava u kalupnu šupjinu, ali i od veštine operatera mašine koji mora da proceni kad da prekine ciklus brizganja kako bi se kalup dodatno ohladio. Vreme trajanja ciklusa je 3-5 min, a sa jednim kalupom može se izraditi 20 do 200 komada [9]. Parametri procesa injekcionog presovanja, kao i vreme ciklusa za različite termoplastike dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametara procesa injekcionog presovanja pri korišćenju kalupa izrađenih ACES postupkom

Parametar	LDPE	HDPE	PS	PP	ABS
Pritisak (MPa)	11,0	15,8	16,5	13,1	22,0
Temperatura (°C)	180	220	200	205	240
Vreme ciklusa (min)	3,5	4,5	4,0	4,0	5,0

Primena PolyJet štampanih kalupa ili umetaka koji se koriste u procesu injekcionog presovanja je najprikladnija kada se koriste termoplastični materijali koji imaju nisku do umerenu tačku topljenja < 300 °C i dobru tečljivost [11]. Ovim alatima se mogu procesirati i transparentni materijali, međutim pošto ti materijali obično zahtevaju visoko polirane šupljine i preciznu kontrolu temperature, rezultati u pogledu kvaliteta dela (transparentnosti) biće niži nego u slučaju primene tradicionalnih metalnih alata. Najveća trajnost kalupa napravljenih PolyJet imaju oni napravljeni od akrilonitril butadien stirena (ABS). Ovaj materijal ima dobre mehaničke osobine i pogodan je za oblikovanje delova složene geometrije na višim temperaturama. Zbog toplotnih karakteristika polyjet kalupa, sistemi za hlađenje neće značajno uticati na vreme ciklusa oblikovanja ili na kvalitet delova. Međutim, sistem za hlađenje može da poveća životni vek alata za 20% [15].

PolyJet kalupne forme se postavljaju na kalupne ploče tako što se pričvršćuju vijcima (sl.9) Vijke ne treba jako stezati kako ne bi došlo do pucanja. Parametre procesa inekcionog presovanja pri korišćenju kalupa dobijenih PolyJet tehnologijom potrebno je pažljivo podesiti. Obično je potrebno nekoliko iteracija dok se ne dobije deo željenog kvaliteta. Pošto su PolyJet kalupi loši toplotni provodnici radnim komadima potrebno je dodatno vreme da očvrstnu. Da bi se postiglo potpuno očvršćavanje dela, potrebno je produžiti trajanje ciklusa hlađenja, ali tako da se alat ne ohladi previše jer u tom slučaju dolazi do povećanog skupljanja alata.



Slika 9. Vezivanje kalupa dobijenog PolyJet postupkom kalune ploče [15]

ZAKLJUČAK

Primena AM tehnologija u svrhu izrade modela, prototipova, funkcionalnih delova ili alata relativno je skorog datuma. Međutim, zbog fleksibilnosti postupaka i mogućnosti brze i jeftine izrade komponenti bez obzira na složenost njihove geometrije ove tehnologije koriste se u sve većem broju industrija i u sve većem obimu.

U oblasti proizvodnje delova inekcionim presovanjem zadnjih godina povećani su zahtevi za individualizacijom proizvoda ili proizvodnjom u malim serijama što proizvođačima stvara velike probleme zbog visokih troškova alata i dugog vremena razvoja istih. Stoga se nametnula potreba za razvojem i proizvodnjom kalupa za inekciono presovanje na način kojim se premošćuje cenovni nesklad između izrade prototipova, proizvodnje malog i velikog obima. Ovo se može uspešno rešiti upravo primenom različitih RT postupaka zasnovanih na AM tehnologija koji omogućavaju izradu alata/kalupa kako za velike serije (Direct Tooling), tako i za maloserijsku proizvodnju (Prototype Tooling) po znatno nižim cenama i za veoma kratko vreme.

Prototipni kalupi za inekciono presovanje mogu se primeniti za probnu proizvodnju, zatim kod izrade funkcionalnih delova u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji, ili za početno pokretanje proizvodnje za vreme dok se standardni metalni kalup izrađuje. Na primer, AM tehnologije zasnovane na SLA mogu zameniti alate od aluminijuma koji su donedavno bili jedina opcija proizvođača da sprovedu dizajnerska i funkcionalna ispitivanja kalupa. Proizvodnja epoksidnih ili kompozitnih aluminijum-epoksidnih kalupa je znatno brža i jeftinija u poređenju sa konvencionalnim kalupima. Nove epoksidne smole obezbeđuju mnogo veću čvrstoću/tvrdoću kalupa i otpornost na toplotu. Ako su kalupi pravilno dizajnirani, mogu izdržati velike pritiske ubrizgavanja. Radni vek ovih alata u najvećoj meri zavisi od materijala kalupa, karakteristika termoplastike koja se ubrizgava u kalup i složenosti dela. Pored brze i jednostavne izrade i malih troškova izrade u poređenju sa čeličnim ili aluminijumskim alatima, primena RT ima još jednu bitnu prednost, a to je da su izmene u dizajnu ostvarive u najkraćem mogućem vremenu.

5. LITERATURA

- [1] Pilipović A. (2012) *Aditivna proizvodnja*, Polimeri 33 3-4, 134-135
- [2] Gibson I, Rosen DW., Stucker B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer

- [3] Marciniec A, Markowski T, Budzik G, Trytek A, Kozik B, Bernaczek J, Pacana J, Matysiak H, Banaś A (2010) *Application of ZP131 powder for manufacture of casting molds using ZCast technology for Al-alloys castings*. Archives of foundry engineering, 83(1), 423–426
- [4] Zhou JG, Kokkengada M, He Z, Kim YS, Tseng A (2004) *Low temperature polymer infiltration for rapid tooling*. Materials and Design, 25, 145–154
- [5] Jacobs, P. F., Hilton, P. D. (2000). *Direct AIM Rapid Bridge Tooling*. In Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications, New York: Marcel Dekker.
- [6] Gebhardt A. (2011) *Understanding Additive Technology, Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. Hanser Publisher, Munich
- [7] <https://www.slideshare.net/SachinHariprasad/rapid-tooling-rt>. 18.09.2020
- [8] Nagahanumaiah, K. Subburaj, B. Ravi (2008): *Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development*, Computers in Industry 59(2-3), 262-276
- [9] Derrick S (2013) : *Use of Polymer Rapid Tools as Functional Injection Mold Tooling*, Master's Theses.
- [10] <https://docplayer.org/77824598-Spritzgiessen-mit-3d-gedruckten-werkzeugeinsaetzen.html>. 20.09.2020
- [11] https://www.alphacam.ch/fileadmin/user_upload/Applikationen/PDFs/Technical_Application_Guide_-_Injection_Molding_-_PolyJet_For_Injection_Molding_-_English_A4_Web.pdf 15.09.2020
- [12] <https://www.hunold-knoop.de/kunststoffwissen/kunststoff-blog/details/in-5-schritten-perfekte-kunststoffteile-herstellen>. 20.09.2020
- [13] Rahmati S.(2014) Direct Rapid Tooling Comprehensive Materials Processing, 10, 303-344
- [14] Harini N. (2016) A Study Report on Rapid Tooling Process, International Journal of Innovations in Engineering and Technology, 299-307
- [15] https://www.alphacam.ch/fileadmin/user_upload/Applikationen/PDFs/Technical_Application_Guide_-_Injection_Molding_-_PolyJet_For_Injection_Molding_-_English_A4_Web.pdf. 18.09.2020
- [15] Bagalkot A., Pons D., Glucas D., Symons D. (2019) *A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts*, Rapid Prototyping Journal, 25/9, 1493-1505

Stefanović, Lj., Milutinović, M., Movrin, D., Vilotić, M., Skakun P., Vilotić, M., N. Randelović, S.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR MOLD MANUFACTURING IN CASE N OF SMALL-BATCH INJECTION MOLDING

Abstract: *Increasing demands for custom made and production in small batches are forcing manufacturers around the world to change their production strategies and to introduce new highly flexible procedures that allow a significant reduction in costs and production time. In this regard, the application of procedures based on additive manufacturing technologies provides great opportunities. Today, additive technologies are used not only for production of physical models and prototypes, but also for obtaining functional parts, production of tools, medical devices, etc. This paper deals with additive manufacturing technologies to manufacture plastic mold inserts for injection molding. A brief techno-economical analysis of additive manufacturing procedures for rapid tooling is given in order to recognize the potential of AM technologies in the field of mold's production.*

Key words: *additive manufacturing, rapid tooling, injection molding*

Tabaković, S., Zeljković, M., Hadžistević, M.¹**ODREĐIVANJE GREŠAKA POZICIONIRANJA
NUMERIČKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI
PRIMENOM KRUŽNOG TESTA PREMA ISO230-4²***Rezime*

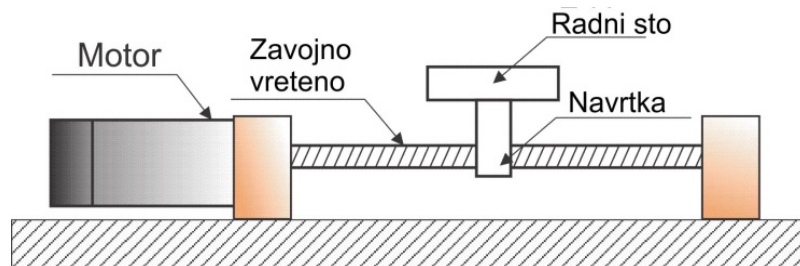
Ispitivanje sistematskih grešaka prisutnih na podsistemu pomoćnog kretanja predstavlja važan korak u prediktivnom održavanju i kalibraciji numerički upravljanih mašina alatki. U cilju unifikacije procedura ispitivanja, više nacionalnih i internacionalnih organizacija za standardizaciju je formiralo grupe standarda u preporuka vezanih za ucnutivanje tačnosti mašina alatki. Jedna od najvažnijih, metoda koja obezbeđuje ispitivanja stanja mašine u radioničkim uslovima u vremenski kratkom periodu, predstavlja kružni test primenom tzv. ballbar metode. U radu se prikazuje deo istraživanja sprovedenih sa ciljem utvrđivanja mogućnosti primene kružnog testa prema ISO 230-4 u procesu definisanja pojedinih sistematskih grešaka na dve numerički upravljane ose istovremeno.

¶

Ključne reči: ISO230-4, ballbar, tačnost pozicioniranja, sistematske greške NUMA

1. UVOD

Mašine alatke sa numeričkim upravljanjem spadaju u grupu najsloženijih mehatroničkih sistema u savremenoj industrijskoj proizvodnji. Od karakteristika i trenutnog stanja pojedinih elemenata tog sistema u najvećoj meri zavisi i tačnost izradaka [1]. Za pravilnu eksploataciju i održavanje numerički upravljanih mašina alatki veliki značaj imaju postupci ispitivanja definisani grupom standarda ISO 230, kojima se definišu sredstva i metode za određivanje karakterističnih grešaka nastalih koncepcionim i konstrukcionim rešenjem, procesom montaže i eksploatacijom. Greške koje se javljaju prilikom kretanja elemenata mašine se mogu kategorisati u sistematske i slučajne pri čemu najizraženije i za dalju upotrebu mašine najvažnije obuhvataju oštećenja nastala na sistemu pomoćnog kretanja usled neravnomerne i neadekvatne eksploatacije [2]. Na slici 1 je prikazan najčešći koncept podsistema za pomoćno kretanje kod numerički upravljanih mašina alatki.



Slika 1. Podsystem za pomoćno kretanje mašine alatke

¹ prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, tabak@uns.ac.rs, prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, milany@uns.ac.rs, Fakultet tehničkih nauka, prof. dr Miodrag Hadžistević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, miodrags@uns.ac.rs

² Rad predstavlja prezentuje deo istraživanja sprovedenih na projektu: Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN, podržanom od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije

Greške koje se javljaju na podsistemu za pomoćno kretanje nastale usled eksploatacije obuhvataju:

- oštećenja na kliznim površinama,
- oštećenja na površinama zavojnog vretena,
- zazor u sklopu za pretvaranje kružnog u pravolinijsko kretanje,
- termičke dilatacije
- greške montaže,
- ...

Prisustvo ovih mehaničkih nedostataka ima za posledicu stvaranje grešaka u pozicioniranju elemenata podsistema pomoćnog kretanja, vibracije, lokalni porast temperature i povišenu buku na pokretnim elementima. Savremeni upravljački sistemi za mašine alatke omogućavaju numeričko kompenzovanje pomenutih sistemskih grešaka ukoliko su njihove vrednosti takve da ne ugrožavaju dalju eksploataciju mašine i ne zahtevaju zamenu elemenata podsistema za pomoćno kretanje [3].

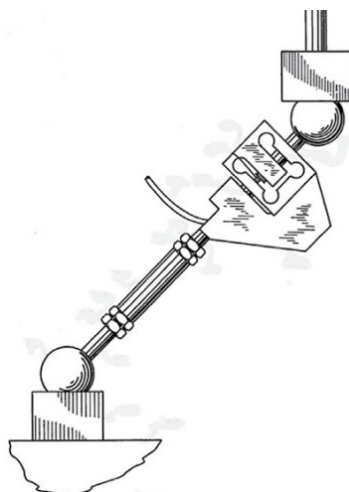
Pojedina ispitivanja kojima se kvantitativno vrši određivanje grešaka a koji su obuhvaćeni grupom standarda ISO 230 [4] zahtevaju dugotrajnu proceduru pripreme i analize mašina kao i obrade rezultata merenja u cilju definisanja parametara kompenzacije.

U radu se opisuje deo istraživanja sprovedenih u cilju kvantitativnog određivanja pojedinih grešaka podsistema pomoćnog kretanja na osnovu rezultata ispitivanja numerički upravljanih mašina alatki metodom kružnog testa prema ISO 230-4 standardu.

2. METODE

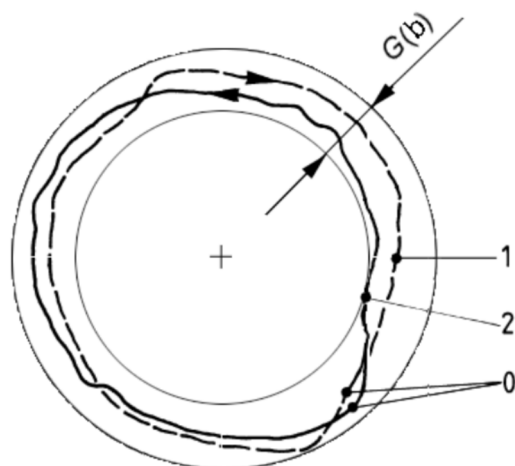
2.1 Ispitivanje mašina alatki metodom kružnog testa

Pored ispitivanja pojedinačnih osa mašine, standardom ISO 230 su obuhvaćena i ispitivanja numerički upravljanih mašina alatki koja obuhvataju analizu kretanja elemenata mašine u nekoj od programskih ravni (XY, XZ ili YZ). To podrazumeva istovremeno angažovanje podsistema pomoćnog kretanja za dve ose. Osnovno, standardom (ISO 230-4) [5] obuhvaćeno ispitivanje mašine alatke ovog tipa se naziva „kružni test” za mašine alatke. Postupak ispitivanja je baziran na patentu iz 1984 godine [6] (slika 2) koji podrazumeva upotrebu teleskopske sonde kojom se određuju odstupanja od poluprečnika prilikom kretanja dve upravne ose mašine alatke po kružnoj putanji.



Slika 2. Kružni test za mašine alatke [6]

Prilikom kružnog kretanja jednog kraja merne sonde u odnosu na drugi konstantnom brzinom, brzina kretanja jedne ose u odnosu na drugu se konstantno menja čime se trenutna vrednost ostvarenog poluprečnika putanje u zavisnosti od stanja elemenata pojedine ose odstupa od programirane (Slika 3). Analizom odstupanja je moguće izvesti zaključke o stanju svake ose kao i njihovoj sinhronizaciji.



Slika 3. Analiza rezultata odstupanja od poluprečnika kružne putanje

Zbog uticaja koje na dobijene vrednosti imaju uslovi okoline, sva merenja se realizuju sa kompenzovanjem uticaja koje na elemente opreme i mašine imaju temperatura, atmosferski pritisak i vlažnost.

U cilju potpunije analize stanja klizača i detekcije većeg broja uticajnih faktora, merenje se vrši za oba smera kretanja (u smeru kazaljke sata i suprotno od njega).

2.2 Određivanje karakterističnih grešaka prema ISO 230-4

Standardom ISO 230-4 su obuhvaćene metode ispitivanja kružnim testom kao i vrednovanja rezultata na osnovu merenja izvedenih iz odstupanja od poluprečnika kružne putanje. Standardom definisani rezultati ispitivanja nastaju sakupljanjem podataka o odstupanju od nazivnog poluprečnika sonde prilikom kretanja u smeru kazaljke na satu i suprotno od smera kazaljke na satu. Standard obuhvata merenje tokom kretanja duž jedne kružnice u jednom i drugom smeru iako proizvođači opreme procedurom definišu merenja duž dve kružne putanje pri čemu se na osnovu rezultata merenja izdvaja reprezentativni uzorak za po jednu kružnicu.

Vrednovanje rezultata se vrši na osnovu analize četiri statistička parametra koji se dobijaju obradom razlike između programiranog i ostvarenog prečnika tokom ispitivanja. To su:

1. dvosmerno odstupanje od kružne putanje,
2. odstupanje od kružne putanje,
3. radijalno odstupanje od kružne putanje i
4. srednje dvosmerno radijalno odstupanje.

Navedeni rezultati omogućuju ispitivaču da stvori odgovarajuću sliku o stanju podsistema za pomoćno kretanje. Ipak, dobijene vrednosti standardom obuhvaćenog ispitivanja ne omogućavaju diferencijaciju rezultata na osnovu karaktera grešaka i nisu prilagođene za podešavanje mašine.

2.3 Proširena analiza promene poluprečnika pri kružnom testu

Kao što je prethodno rečeno ISO 230-4 standardom kojim je regulisano ispitivanje numerički upravljanih mašina alatki kružnim testom, kao i drugim nacionalnim standardima u ovoj oblasti (JIS B 6190-4, GB/T 17421.4, ASME B5.54 [7]) nije predviđena detaljnija diferencijacija grešaka prema karakteru i lokaciji pojavljivanja. Ipak, sakupljeni podaci u zavisnosti od parametara ispitivanja i osetljivosti merne opreme sadrže više hiljada tačaka u ravni sa informacijama o odstupanju od kružne putanje. Analizom dobijenih podataka prilikom ispitivanja većeg broja mašina alatki metodom kružnog testa uočeno je nekoliko činjenica:

- Merenjem odstupanja prečnika od nominalne vrednosti prilikom promene smera kretanja moguće je odrediti zazor u navrtci zavojnog vretena za obe merene ose,
- Analizom odstupanja od nazivnog poluprečnika po pozicijama moguće je odrediti pozicije na

numerički upravljanim osama sa izraženom greškom tačnosti pozicioniranja.

Zazor u navrtci zavojnog vretena se javlja prilikom promene smera kretanja vretena i predstavlja jedan od najizraženijih mehaničkih nedostataka koji utiču na grešku mašine alatke. Analizom rezultata ispitivanja metodom kružnog testa moguće je odrediti zazor primenom izraza 1.

$$b_i = \overline{\Delta R_{l,a}} \quad (1)$$

gde je:

- ΔR Promena dužine merne sonde
- i osa za koju se određuje zazor u zavojnom vretenu
- a ugao kružnice u kome je prisutna komponenta promene prečnika samo u pravcu ose za koju se meri zazor ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, zavisno od osa)

Odstupanja od zadate vrednosti pozicioniranja u pravcu pojedinačnih osa je moguće razložiti na dve greške i to:

- Jednosmerna sistematska greška pozicioniranja po osi
- Dvosmerna sistematska greška pozicioniranja po osi

Jednosmerna sistematska greška pozicioniranja po osi predstavlja odstupanje između zadate i izmerene vrednosti pozicije dobijene projekcijom izmerenog radijusa sonde na određenu osu koja se obračunava u pozitivnom i negativnom smeru kretanja. Izrazima 2 i 3 su opisane jednačine za izračunavanje jednosmerne systemske greške za osu "x".

$$E_i \uparrow = \max|\Delta R_x \uparrow| - \min|\Delta R_x \uparrow| \quad (2)$$

i

$$E_i \downarrow = \max|\Delta R_x \downarrow| - \min|\Delta R_x \downarrow| \quad (3)$$

gde je

- ΔR_x – odstupanje od nazivnog radijusa sonde u pravcu ose "x"
- i osa za koju se određuje zazor u zavojnom vretenu

Dvosmerna sistematska greška pozicioniranja po osi predstavlja ukupan raspon odstupanja dobijen kretanjem u pozitivnom i negativnom smeru. Vrednost se izračunava na osnovu - E

$$E_i = \max|\Delta R_x \uparrow; \Delta R_x \downarrow| - \min|\Delta R_x \uparrow; \Delta R_x \downarrow| \quad (4)$$

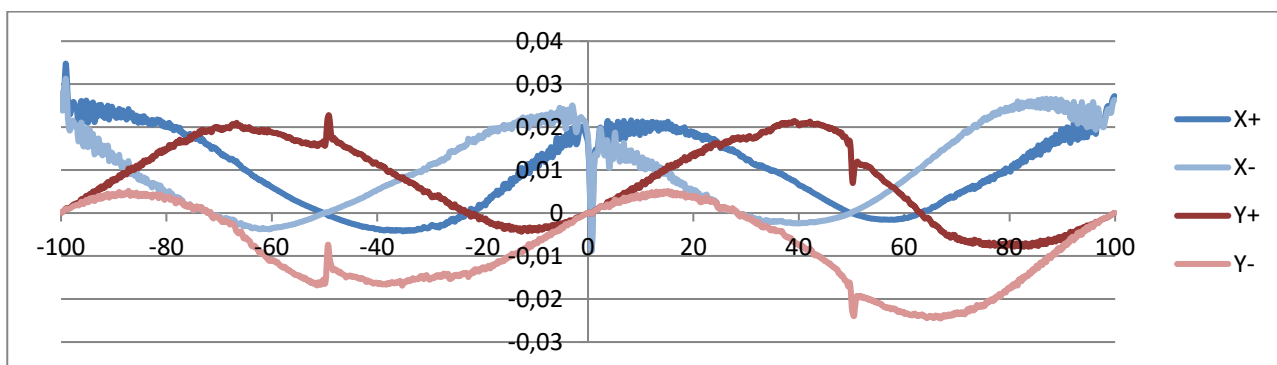
Pored vrednosti kojima se određuju odstupanja duž cele kružne putanje u oba smera moguće je izraziti odstupanja po merenim osama za svaku tačku ponaosob kao i dijagram odstupanja duž celokupnog mernog područja.

3. REZULTATI

U cilju provere validnosti postavljenih hipoteza izvršeno je ispitivanje troosnog obradnog centra H&H FM38. Prilikom ispitivanja je korišćena merna oprema Ballbar QC10 proizvođača Renishaw, a ispitivanje je realizovano primenom metodologije određene standardom ISO 230-4, brzinom pomoćnog kretanja od 1000 mm/min uz kompenzaciju uslova okoline. Kao rezultat za ostvarena kretanja po kružnici poluprečnika 100mm i to dva kruga u smeru kazaljke na satu i dva suprotno od smera kretanja kazaljke na satu je dobijen niz od 3150 vrednosti. U tabeli 1 su prikazani dobijeni rezultati.

Tabela 1: Rezultati ispitivanja					
Osa	$b_i \uparrow$ [mm]	$b_i \downarrow$ [mm]	$E_i \uparrow$ [mm]	$E_i \downarrow$ [mm]	E_i [mm]
x	0.0284	0.0307	0.0433	0.0401	0.0436
y	0.0176	-0.0138	0.0306	0.0296	0.0473

Na slici 4 je prikazan grafik sa vrednostima odstupanja od nominalne vrednosti radijusa projektovanog na "x" i "y" osu.



Slika 4. Grafički prikaz rezultata ispitivanja

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Istraživanjem čiji je deo prikazan u radu su postavljene hipoteze koje ukazuju na mogućnost detaljne analize jedne obradne ravni (dve numerički upravljane ose) mašine alatke sa numeričkim upravljanjem. Modifikovanjem izraza za utvrđivanje ključnih parametara definisanih standardom ISO 230-2 (Određivanje tačnosti i ponovljivosti pozicioniranja numerički upravljanih osa) i njihovom primenom na vrednosti dobijene kružnim testom prema ISO 230-4 stvorene su mogućnosti da se izvrši analiza stanja elemenata mašine alatke. Ispitivanje kružnim testom čija je osnovna namena utvrđivanje opšteg stanja mašine u veoma kratkom vremenu (oko 30 min sa pripremom merenja) primenom prezentovane metode omogućava dobijanje vrednosti koje omogućuju određivanje sistematskih grešaka pozicioniranja.

Uvidom u rezultate ispitivanja i dobijeni rezultati ukazuju na činjenicu da je primenom navedenih jednačina moguće dobiti željene rezultate. Pri tome se moraju uzeti u obzir sledeće činjenice:

Metodologija ispitivanja mašina alatki kružnim testom primenjena u istraživanju podrazumeva kretanje po kružnoj putanji u dva ciklusa koja sadrže dve kružnice u smeru kazaljke na satu i dve kružnice suprotno od kazaljke na satu. Time se dobija statistički nedovoljan broj podataka za dobijanje merodavnih podataka o tačnosti mašine. Pored toga, na dobijene rezultate značajan uticaj ima promenljivost brzine duž pojedine ose (kreće se od nulte vrednosti do brzine definisane ispitivanjem) što ima nepovoljan uticaj na određivanje karakteristika ispitivanih tačaka (različiti su uslovi za određivanje greške) što ukazuje na činjenicu da dobijeni rezultati po korišćenju metodologiji nisu konzistentni.

Na osnovu opisanog može se zaključiti da primena metodologije kružnog testa uz određene modifikacije koje se odnose pre svega na veći broj kružnica i kontrolisanu brzinu kretanja pri ispitivanju omogućava sprovođenje analize numerički upravljane mašine alatke u cilju određivanja određenih sistematskih grešaka koje obuhvataju zazor u sklopu zavojnog vretena, oštećenja na zavojnom vretenu, habanje na kliznim površinama, kao i nedostatke u podešavanju međusobno upravniha osa prilikom montaže. Ipak, dobijene vrednosti se zbog manje osetljivosti opreme u odnosu na lasersku interferometriju i uslova ispitivanja ne mogu smatrati merodavnim za kalibrisanje savremenih mašina alatki.

5. LITERATURA

- [1] ISO 230-2:1997, Test code for machine tools — Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools, International Standard Organisation –ISO, 1997
- [2] Lacalle, N., Mentxaka, A.: Machine Tools for High Performance Machining, Springer Science & Business Media, 2008, ISBN: 1848003803
- [3] Liu, D., Tang, S., Xu, G., Luo, A., Wang, X.: Research on data acquisition and analysis of circular tests on numerical control machine tools based on NC system, Proceedings of the 2011 2nd

- International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2011, art. no. 6052069, pp. 952-955, 2011
- [4] Tabaković, S, Zeljković, M.: Prediction Of Positioning Accuracy Parameters, XIV skup DEMI, Banja Luka, Mašinski fakultet Banja Luka, Str. 389-394, 2019
- [5] ISO 230-1:2012, Test code for machine tools —Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, International Standard Organisation –ISO, 2012
- [6] ISO 230-4:2005, Test code for machine tools — Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools, International Standard Organisation –ISO, 2005
- [7] Bryan, J.: Telescoping magnetic ball bar test gage, United States Patent, US4435905A, 1984
- [8] ANSI/ASME B5.54-1992, Methods for Performance, Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers

Tabaković, S., Zeljković, M., Hadžistević, M

DETERMINATION OF POSITIONING ERRORS OF NUMERICALLY CONTROLLED TOOL MACHINES USING A CIRCULAR TEST ACCORDING TO ISO230-4

***Abstract:** Testing of systematic errors present on feedrate subsystem is an important step in the predictive maintenance and calibration processes of numerically controlled machine tools. In order to unify the testing procedures of machine tools, a number of national and international standardization organizations have formed groups of standards and recommendations for their implementation. One of the most important, the method that provides testing of the condition of the machine in workshop conditions in a short period of time, is a circular test using the so-called. ballbar method. The paper presents a part of the research conducted with the aim of determining the possibility of applying the circular test according to ISO 230-4 in the process of defining individual systematic errors on two numerically controlled axes simultaneously.*

***Key words:** ISO230-4, ballbar, accuracy of positioning, systematic errors of CNC machine tools*



Tešić, S., Zeljković, M., Mladenović, C., Grujić, J. ¹⁾

UTICAJ REŽIMA REZANJA NA POSTOJANOST ALATA KOD GLODANJA BOKOMPATIBILNOG ČELIKA 316LVM ²⁾

Rezime

U prikazanom radu cilj je identifikovanje optimalnih režima obrade sa ciljem postizanja maksimalne postojanosti alata kod glodanja biokompatibilnog čelika 316LVM. Postojanost alata je definisana u efikasnom prijednom putu glodala u procesu obade. Posmatrani režimi obrade su dubina rezanja, brzina rezanja i pomak po zubu. Eksperiment je izveden u uslovima suvog rezanja. Uticaj i optimizacija režima glodanja urađena je korištenjem Tagučijevih tehnika. Ekperiment je planiran i izveden po Tagučejevom L9 ortogonalnom nizu. ANOVA analiza je korištena kako bi se definisalo koji parametar rezanja ima najveći uticaj na posmatranu izlaznu karakteristiku. Analiza rezultata je pokazala da su sva tri posmatrana parametra signifikantna na postojanost alata. Najveći uticaj ima brzina rezanja. Postupkom optimizacije je ostvareno poboljšanje za postojanost alata od 10.95%.

Ključne reči: glodanje, postojanost alata, optimizacija

1. UVOD

U oblasti nauke, biomaterijali su definisani kao bilo koji biokompatibilni materijali, prirodni ili vještački, koji se koriste za zamjenu ili za pomoć dijela organa ili tkiva [1, 2, 3]. Često se može sresti i definicija koja definiše biomaterijale kao supstancu koja je napravljena da se, sama ili kao dio složenog sistema, koristi za bilo koje terapijske ili dijagnostičke procedure u medicini [2]. Na osnovu ovih definicija, jasno se uočava da su biomaterijali predviđeni za neposredan kontakt sa živim tkivima ljudskog organizma, što pred ove materijale stavlja zahtjev visoke biokompatibilnosti. Sam pojam biokompatibilnosti predstavlja izjavu o tome koliko dobro tkivo ljudskog organizma djeluje sa materijalom i koliko ova interakcija zadovoljava planirana očekivanja za određenu svrhu implantacije [3]. Materijali, da bi zadovoljili zahtjev biokompatibilnosti, moraju imati biološke osobine, otpornost na koroziju i otpornost na oslobađanje jona, odnosno povoljan biološki efekat oslobođenih jona [1, 2].

Zbog prethodno pomenutih osobina, specifični metalni biomaterijali su napravljeni od kobaltnih legura, titanijumovih legura ili nerđajućeg čelika. Sa stanovišta obrade, zajedničko za ove materijale jeste da spadaju u teškoobradive materijale. Zbog toga je urađen veliki broj istraživanja na polju obradivosti ovih materijala kako bi se ostvario napredak u tom pravcu. Pored toga što su ovi materijali biokompatibilni, oni su zbog svojih dobrih karakteristika našli veliku primjenu i u prehrambenoj i avioindustriji, pa je to dodatni razlog zašto su prisutna velika istraživanja na ovom polju.

Prilikom istraživanja na polju obradivosti ovih materijala, najviše pažnje se posvećuje pronalasku optimalne tehnologije izrade i optimalnih režima obrade. E.O. Ezegwu i Rachid su dali pregled dosadašnjih istraživanja u obradi rezanjem titanijumovih legura gdje su sumirani mnogi rezultati o obradivosti ovih legura [4, 5]. Eyup B. je ispitivao optimalne režime obrade, kao što su dubina rezanja, brzina rezanja i pomak na hrapavost obrađene površine kod čeonog glodanja kobaltnih legura [6]. Efekat režima obrade kod superlegura na silu rezanja, habanje alata i oblik strugotine je ispitao u okviru svojih istraživanja Seref A. [7]. Kod nerđajućeg čelika dosta istraživanja je urađeno za čelik AISI 316L. Maurotto A. je ispitivao uticaj brzine

¹⁾ Saša Tešić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (sasa94tesic@hotmail.com), prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milanz@uns.ac.rs), Cvijetin Mladenović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (mldadja@uns.ac.rs), dr Jovan Grujić, DOO Grujić&Грујић, Novi Sad (grujici@grujicns@gmail.com)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

rezanja, dubine obrade i pomaka na kvalitet obrađene površine [8]. Za ovaj materijal rađena su i eksperimentalna istraživanja za ispitivanje sila rezanja i temperatura u procesu obrade glodanjem [9]. Ispitivanje habanja alata prilikom obrade ovog materijala je uradio Saketi S. [10]. Abdel-Ali sa saradnicima je istraživao obradivost X2CrNiMo18-9 (AISI 304L) nerđajućeg čelika kod čeonog glodanja sa karbidnim alatima. Oni su analizirali hrapavost obrađene površine, silu i snagu rezanja i proizvodnost. Međutim, veoma malo istraživanja je rađeno na polju obradivosti biokompatibilnog čelika AISI 316LVM što je i bio motiv ovog istraživanja.

Cilj ovog istraživanja je utvrđivanje uticaja režima rezanja i optimizacija istih na postojanost alata kod glodanja biokompatibilnog čelika 316LVM. Postojanost alata će biti definisana na osnovu dužine efektivnog prijednog puta alata u procesu obrade rezanjem. Posmatrani parametri rezanja su dubina rezanja, brzina rezanja i pomak po zubu. Za planiranje eksperimenta i optimizaciju parametara rezanja će biti korištene Tagučijeve tehnike.

2. TAGUČI METOD I PLANIRANJE EKSPERIMENTA

Tagučijeva metoda je statistička metoda koju je razvio Tagučijev [12]. Osnovna uloga ove metode je planiranje eksperimenta. Za prevazilaženje problema složenosti eksperimenta sa povećanjem broja faktora, Tagučijev je razvio specijalno dizajniranu metodu nazvanu ortogonalni niz (*Orthogonal Array*) ili ortogonalno planiranje eksperimenta gdje se omogućuje proučavanje čitavog parametarskog procesa uz manji broj eksperimanata. U okviru ove metode, Tagučijev predlaže upotrebu funkcije gubitka kvaliteta koja povezuje odstupanje karakteristika od ciljne vrijednosti. Vrijednost ove funkcije gubitka kvaliteta se dalje transformiše u odnos signal/šum (S/N). Na osnovu ovog odnosa se može procijeniti uticaj promjene određenog parametra procesa na performanse procesa. Postoje tri kategorije karakteristika kvaliteta za analizu odnosa S/N, a to su: definisana fiksna vrijednost je najbolja (*Nominal-the-best*) - obrazac 1, što manja vrijednost to bolja (*Smaller-the-better*) - obrazac 2, što veća vrijednost to bolja (*Larger-the-better*) - obrazac 3.

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

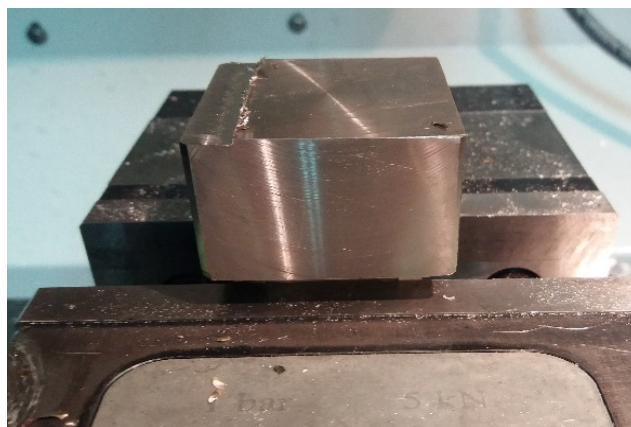
$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

Analiza dobijenih rezultata se obično radi preko ANOVA analize, koja predstavlja analizu varijacije. ANOVA je statistička metoda koja se koristi za određivanje pojedinačnih veza i odnosa svih kontrolnih faktora iz eksperimenta.

U ovom radu planiranje eksperimenta je izvršeno po prethodno opisanoj metodi. Izabran je Tagučijev L_9 (3^3) ortogonalni niz, iz čega slijedi da su varirana tri kontrolna faktora na 3 nivoa, tabela 3. Analiziran je proces obrade glodanjem, a varirani kontrolni faktori su dubina glodanja, brzina glodanja i pomak, tabela 1.

Tabela 1. Faktori i nivoi variranja				
FAKTOR	OZNAKA	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
Dubina [mm]	A	0.9	1.2	1.6
Brzina [m/min]	B	68	86	109
Pomak [mm/z]	C	0.08	0.12	0.18

Eksperiment je izveden na troosnom obradnom centru za glodanje EMCO Concept Mill 450 sa SIEMENS Sinumerik 840D upravljačkom jedinicom. Glavno vreteno obradnog centra raspolaže sa snagom od 11kW, brojem obrtaja u rasponu od 50 do 12000 o/min i standardnim prihvatom alata ISO 40. Operacija obrade glodanjem je izvršena vretenastim glodalom, prečnika 16mm sa dvije izmjenjive pločice proizvođača SANDVIK. Glodalo je sa oznakom R390-016B16-11L, a pločice su od tvrdog metala i sa oznakom R390-11 T3 08M-PM 1130. Pripremak je bio od biokompatibilnog čelika 316LVM, dimenzija 47 × 47 × 40 mm. U procesu obrade glodanjem, korištene su tri različite brzine rezanja (68, 86 i 109 m/min), tri različite vrijednosti pomaka (0.08, 0.12 i 0.18 mm/z) i tri različite dubine glodanja (0.9, 1.2 i 1.6). Obradak nakon samo jednog prolaza je prikazan na slici 1.



Slika 1. Obradak

Kao izlazna vrijednost eksperimenta posmatrana je postojanost alata. Postojanost alata je definisana na osnovu efektivnog prijednog puta alata. Širina pojasa habanja na lednoj površini je najčešće upotrebljen parametar za određivanje veličine habanja. Razlog tome je što ova vrijednost direktno utiče na hrapavost obrađene površine, a takođe ima uticaj i na vrijednost sile rezanja. Iz ovih razloga u ovom radu je VB uzet za parametar pohabanosti alata. Za gornju granicu pohabanosti alata usvojena je vrijednost $VB = 0.3$ mm. Vrijednost VB je mjerena pomoću alatnog mikroskopa Mitutoyo TM-505 opremljenog sa MOTICAM 5 kamerom visoke rezolucije i spojen sa PC računarnom uz pomoć softvera Motic Images Plus 2.0.

3. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

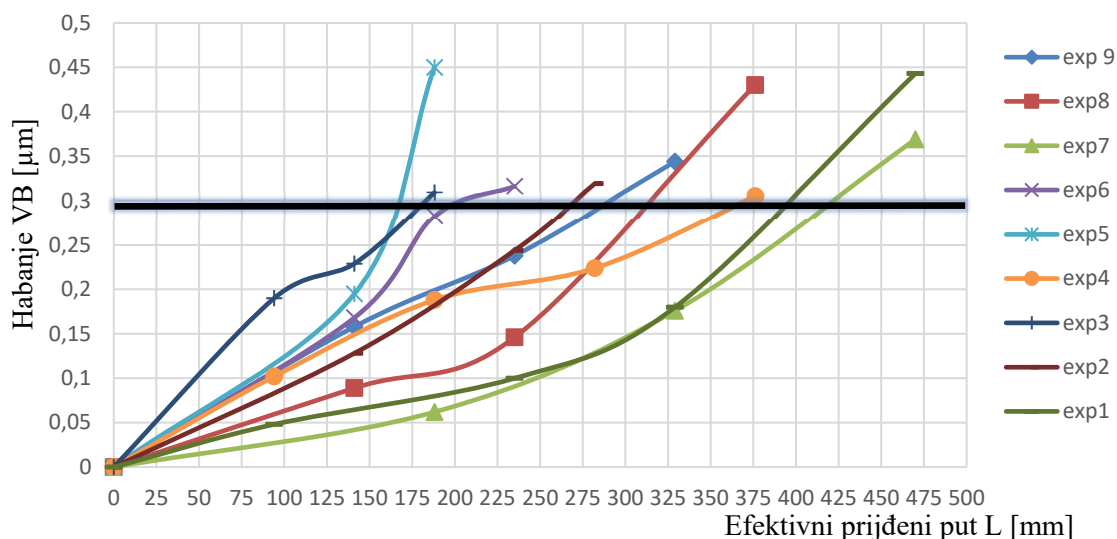
U tabeli 2 je dat prikaz eksperimentalnih rezultata. Analiza rezultata je izvršena pomoću softvera Minitab 2018. Ova analiza rezultata je podrazumijevala analizu uticaja ulaznih faktora na postojanost alata.

Tabela 2: Rezultati eksperimenta

Redni broj	Plan eksperimenta			Režimi			Izmjerena vrednost	S/N odnos [dB]
	A	B	C	Dubina rezanja [mm]	Broj obrtaja [o/min]	Pomak [mm/min]	Postojanost L [mm]	
1	1	1	1	0.9	1352	216	397	51.9758
2	1	2	2	0.9	1710	410	271	48.6594
3	1	3	3	0.9	2168	780	182	45.2014
4	2	1	2	1.2	1352	324	369	51.3405
5	2	2	3	1.2	1710	615	168	44.5062
6	2	3	1	1.2	2168	346	201	46.0639
7	3	1	3	1.6	1352	486	420	52.4650
8	3	2	1	1.6	1710	273	312	49.8831
9	3	3	2	1.6	2168	520	290	49.2480

Postupak određivanja postojanosti alata je zasnovan na postavljanju granične vrijednosti širine pojasa habanja, a ta granična vrijednost iznosi 0.3 mm. Nakon dostizanja ove granične vrijednosti pohabanosti pločica, alat više nije za upotrebu. U toku eksploatacije alata, mjerenje pohabanosti alata se vrši više puta, na osnovu čega dobijemo krive habanja za svaki od eksperimenata. Krive habanja alata su prikazane na grafikonu sa slike 2.

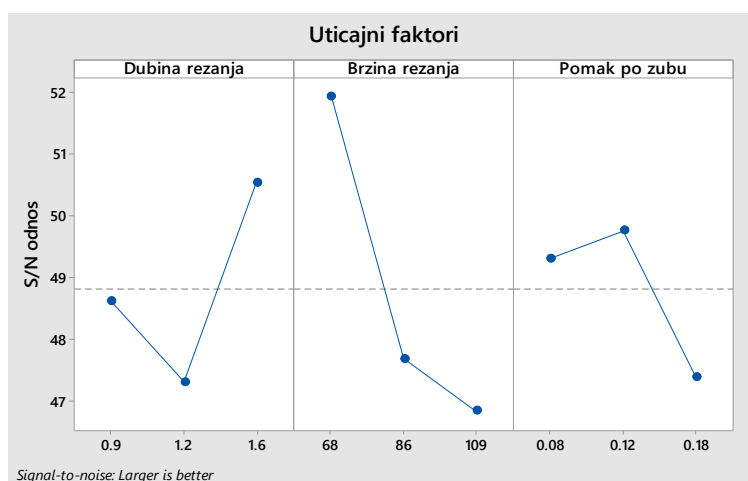
Kod analize postojanosti alata potrebno je izvršiti analizu uticaja dubine glodanja, brzine rezanja i pomaka na postojanost alata. S obzirom da je cijena alata velika, kako bi se obezbijedila ekonomična proizvodnja, zadatak je pronaći što veću postojanos alata. Iz ovog se jasno zaključuje da se kod postojanosti alata funkcija cilja mora postaviti kao: "što veća vrijednost to bolja (*Larger-the-better*". Vrijednosti S/N za svaki eksperiment su prikazani u tabeli 2. S/N odziv za svaki uticajni faktor je prikazan u tabeli 9, a odziv postojanosti alata za svaki uticajni faktor je prikazan u tabeli 10.



Slika 2. Krive habanja alata

Tabela 3. S/N odziv na postojanost alata			
Nivo	Dubina rezanja [mm]	Brzina rezanja [m/min]	Pomak po zubu [mm/z]
1	48.61	51.93	49.31
2	47.30	47.68	49.75
3	50.53	46.84	47.39
Razlika	3.23	5.09	2.36
Rang	2	1	3

Tabela 4. Srednji idziv postojanosti alata po uticajnim faktorima			
Nivo	Dubina rezanja [mm]	Brzina rezanja [m/min]	Pomak po zubu [mm/z]
1	283.3	395.3	303.3
2	246	250.3	310
3	340.7	224.3	256.7
Razlika	94.7	171	53.3
Rang	2	1	3



Slika 3. S/N odziv za postojanost alata

Iz analize S/N odnosa lako se može utvrditi koji faktor od poređena tri faktora ima najveći uticaj na postojanost alata pri završnom glodanju biokompatibilnog čelika 316LVM. Iz tabele 3, na osnovu ranga uticaja, i slike 3 dobijamo da najveći uticaj na postojanost alata ima brzina rezanja. Sa druge strane, najmanji uticaj ima pomak po zubu. Dakle, najveća faktorna zavisnost za postojanost alata je za S/N sa najvećim nagibom grafikona.

Iz tebele 3 i grafikona sa slike 3, takođe vidimo i optimalne režime obrade u okviru ponuđenih nivoa faktora, s obzirom na kriterijum za funkciju cilja "što veća vrijednost to bolja". Optimalna kombinacija izabranih faktora je dubina na nivou 3, brzina na nivou 1 i pomak na nivou 2.

Da bi se determinisala statistička značajnost brzine, dubine i pomaka na postojanost alata vrši se analiza varijanse. Rezultati analize varijanse su prikazani u tabeli 4. Analiza je sprovedena sa nivoom pouzdanosti od 95%.

Faktori	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% učešće
Dubina	2	13642.7	6821.3	53.99	0.018	19.52
Brzina	2	50942	25471	201.62	0.005	72.87
Pomak po zubu	2	5066.7	2533.3	20.05	0.047	7.25
Greška	2	252.7	126.3			0.36
Ukupno	8	69904				100

Vrijednost F testa određuje koji od posmatranih faktora je signifikantan na izlaz i u kojoj mjeri. Granična vrijednost F za slučaj nivoa povjerenja od 95%, 3 nivoa variranja i 9 eksperimenata iznosi $F_{0.05,2,8} = 4.46$. Faktori čija je F vrijednost manja od navedene vrijednosti nisu signifikantni na posmatrani izlaz. Signifikantnost posmatranih faktora takođe možemo odrediti preko p vrijednosti. Za nivo pouzdanosti od 95%, svaki faktor čija je p vrijednost manja od 0.05 je signifikantan faktor. Iz ovoga slijedi da su svi posmatrani faktori signifikantni na postojanost alata, odnosno, njihov uticaj na postojanost alata je značajan. Najveća vrijednost F pokazuje da je taj faktor sa najvećim uticajem na izlaz, iz čega zaključujemo da najveći uticaj na habanje alata ima brzina rezanja. Isto vidimo i iz rezultata P vrijednosti. Što je manja P vrijednost to je veći uticaj tog faktora na posmatranu izlaznu karakteristiku. Takođe uočavamo da pomak po zubu od posmatranih faktora ima najmanji uticaj na habanje alata. Po procentualnom učešću, dubina rezanja na postojanost alata utiče sa 19.52 procenta, brzina rezanja sa 72.87 procenata, dok pomak na habanje alata utiče sa 7.25 procenata. Ostatak od 0.36 procenata otpada na grešku eksperimenta, odnosno na uticaj drugih faktora. Kako je greška eksperimenta veoma mala, iz ovoga slijedi da je eksperiment odlično postavljen i da nema značajnih uticaja drugih faktora na postojanost alata u posmatranom slučaju.

Na osnovu prethodno obrađenih podataka, može se predvidjeti optimalna postojanost alata. Korištenjem podataka iz tabele 4 dobijamo predviđenu optimalnu postojanost alata na sledeći način:

$$L_{opt,pred.} = A_3 + B_1 + C_2 - 2x(Y)$$

$$L_{opt,pred.} = 340.7 + 395.3 + 310 - 2*290 = 466 \text{ mm} \quad (4)$$

Sa ovim predviđanjem se može zaključiti da će najveća postojanost alata u okviru ponuđenih režima obrade biti 466 mm. U tabeli 5 je prikazano koliko je poboljšanje ostvareno u odnosu na najbolju vrijednost postojanosti dobijenu eksperimentom. Iz ovog poređenja se uočava da je sa postupkom ove optimizacije ostvareno poboljšanje od 10.95%.

	Inicijalni	Predviđeni optimalni	Procentualno poboljšanje
NIVOI	A3B1C3	A3B1C2	10.95 %
POSTOJANOST [mm]	420	466	

4. ZAKLJUČAK

U ovo radu je analiziran uticaj dubine rezanja, brzine rezanja i pomaka po zubu na postojanost alata pri završnom glodanju biokompatibilnog čelika 316 LVM. Eksperiment je izveden po Tagučijevom L9 ortogonalnom nizu. Tagučijeve tehnike su korištene u procesu optimizacije, a ANOVA analiza je korištena za definisanje nivoa uticaja parametara rezanja na postojanost alata. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Na osnovu S/N analize optimalni parametri za postizanje maksimalne postojanosti alata su dubina rezanja od 1.6 mm, brzina rezanja od 68 m/min, i pomak po zubu od 0.12 mm/z (A3B1C2).
- Analiza varijanse je pokazala da je brzina rezanja najuticajniji parametar na postojanost alata kod završnog glodanja biokompatibilnog čelika 316LVM sa 72.87%.

- Prateći rezultate ANOVA analize vidimo da na grešku eksperimenata otpada 0.36%. Ova vrijednost greške eksperimenata je jako mala i na osnovu ovoga zaključujemo da je eksperiment veoma uspješno izveden.
- Na kraju primjećujemo da je proces optimizacije uspješno izvršen. Sa ovim postupkom optimizacije dobili smo poboljšanje za 10.95% u odnosu na najbolji rezultat postignut tokom izvedenih eksperimenata.

5. LITERATURA

- [1] Manam N.S., Harun W.S.W., Shri D.N.A, Ghani S.A.C., Kurniawan T., Ismail M.H., Ibrahim M.H.I., "Study of Corrosion in Biocompatible Metals for Implants: A Review," Journal of Alloys and Compounds, vol. 701, pp. 698-715, 2017.
- [2] Dorozhkin S. V., "Bioceramics of calcium orthophosphates," Biomaterials, vol. 31, pp. 1465-1485, 2010.
- [3] Qizhi C., George A. T., "Metallic implant biomaterials," Materials Science and Engineering R, vol. 87, pp. 1-57, 2015.
- [4] M'Saoubi R., Dragos A., Leung S.S., Christoph N., Helmi A., Gregor K., Sarafettin E., Wei-Ming S., "High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vols. CIRP-1400, pp. 1-24, 2015.
- [5] Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y., "An overview of machinability of aeroengine alloys," Journal of Materials Processing Technology, vol. 134, pp. 233-253, 2003.
- [6] Eyup B., Aykut S., "A study of taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 29, no. 9-10, pp. 940-947, 2006.
- [7] Seref A., Eyup B., Kentil A., Osman Y., "Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool," Materials and Design, vol. 28, pp. 1880-1888, 2007.
- [8] Maurotto A., Tsivoulas D., Gu Y., Burke M.G., "Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L stainless steel," International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 151, pp. 35-44, 2017.
- [9] San-Juan M., Martin O., M. del P. de Tiedra, Santos F.J., Lopez R., Cebrian J.A., "Study of Cutting Forces and Temperatures in Milling of AISI 316L," Procedia Engineering, vol. 132, pp. 500-506, 2015.
- [10] Saketi S., Ostby J., Olsson M., "Influence of tool surface topography on the material transfer tendency and tool wear in the turning of 316L stainless steel," International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear, Vols. 368-369, pp. 239-252, 2016.
- [11] Abdel-Ali S., Mohamed A.Y., Hamza B., IKhlas M., Raid K., Tarek M., "Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel using RMS and desirability approach," Measurement, vol. 107, pp. 53-67, 2017.
- [12] Taguchi, G., Introduction to quality engineering, McGraw-Hill, 1990.

Tešić, S., Zeljković, M., Mladenović, C., Grujić, J.

INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE TOOL LIFE WHEN MILLING BIOCOMPATIBLE STEEL 316LVM

Abstract: In this paper, the aim is to identify optimal cutting parameters in order to achieve maximum tool life when milling biocompatible steel 316LVM. Tool life is defined in the effective cutting length by the milling cutter in the machining process. The observed cutting parameters are depth of cut, cutting speed and feed rate. Experiments were carried out in dry condition as per Taguchi's L9 orthogonal array. The cutting parameters were optimized using signal-to-noise ratio, whereas analysis of variance was employed to determine the significance of the process parameters influencing the tool life. The analysis of the results showed that all three observed parameters were significant on the tool life. The cutting speed is the most significant parameter on the tool life. The optimization process was achieved an improvement for the tool life of 10.95%.



Baltić, M., Peković, O., Svorcan, J., Kovačević, A. ¹⁾

METODE PROIZVODNJE KOMPOZITNIH LOPATICA VETROTURBINA SA HORIZONTALNOM OSOM OBR TANJA ²⁾

Rezime: *Vetroturbina sa horizontalnom osom obrtanja (HAWT) najviše je korišćen tip vetroturbina kada je u pitanju eksploatacija energije vetra. Lopatice ove vrste vetrogeneratora njihovi su najopterećeniji elementi. Za njihovu izradu se zato uglavnom koriste kompozitni materijali koji svojim mehaničkim karakteristikama mogu da odgovore na visoko zadate projektne zahteve. U ovom radu predstavljene su neke od metoda proizvodnje kompozitnih lopatica vetroturbina tipa HAWT, a to su: Hand lay-up, Vacuum infusion, Resin transfer molding i Prepreg. Ove metode su analizirane sa nekoliko aspekata. Date su njihove prednosti i nedostaci kao i primena u današnjoj industriji energije vetra.*

Ključne reči: Proizvodne metode, Lopatice vetroturbina, Kompozitni materijali

1. UVOD

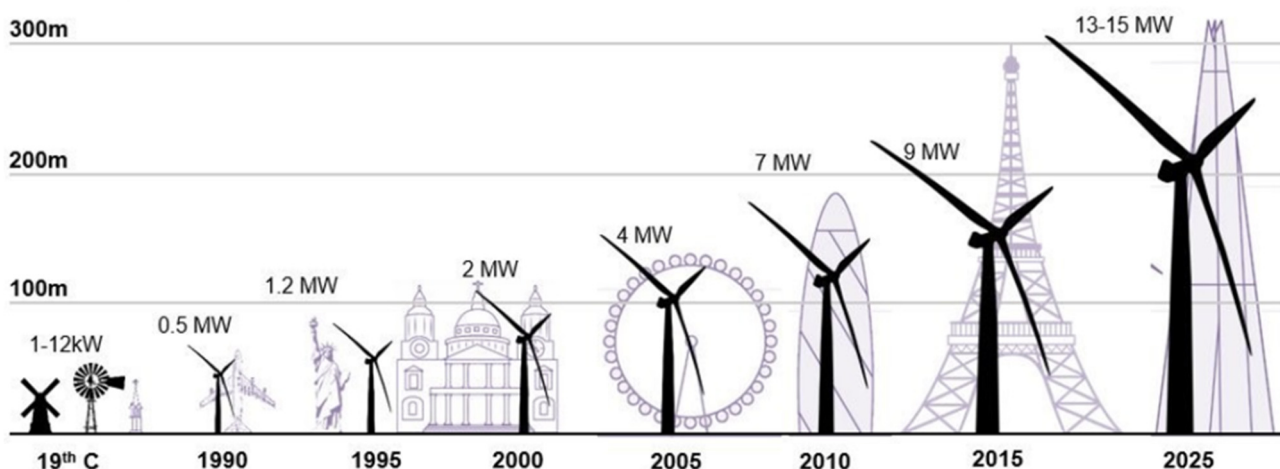
Potrošnja električne energije na globalnom nivou povećana je više od dva puta u periodu od 1990. do 2017. godine. Tokom celog ovog perioda najveći procenat proizveden je upotrebom fosilnih goriva. Ova činjenica za posledicu ima ubrzanje procesa globalnog zagrevanja. Prosečna temperatura zemljine atmosfere povećana je za 0,8°C od početka 20. veka [1]. Imajući u vidu procene da će se do 2035. godine potrošnja električne energije povećati duplo u odnosu na 2008. godinu [2] i uzimajući u obzir težnju da se kontroliše porast prosečne globalne temperature sledi zaključak da je neophodno smanjiti upotrebu fosilnih goriva. Procentualni udeo obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije na globalnom nivou smanjen je sa 79,98% na 74,74% posmatrajući početnu i završnu godinu prethodno pomenutog vremenskog perioda, pri čemu ovaj udeo nije imao kontinuiran opadajući trend [3]. U istom periodu usledio je i porast udela obnovljivih izvora sa 19,86% na 25,12%. Najznačajniji predstavnici su hidroenergija i energija vetra. Iako je hidroenergija najzastupljenija kada je reč o obnovljivim izvorima, njena eksploatacija opada dok s druge strane iskorišćenje potencijala vetra ima veoma veliki rast naročito u poslednje dve decenije. U poređenju sa svim ostalim izvorima, prednosti eksploatacije energije vetra osim ekoloških su relativno kratko vreme izgradnje vetroparkova, mali troškovi održavanja, smanjenje zavisnosti energetskog sistema od fosilnih goriva kao i mogućnost iskorišćenja prostora oko vetrogeneratora u poljoprivredne svrhe [4].

Vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja glavni su transformatori kinetičke energije vetra u električnu energiju, a lopatice njihovih rotora najkompleksniji elementi. Osim visokih zahteva u pogledu aerodinamičke efikasnosti, lopatice čije se dužine danas kreću i do 100 m moraju imati i jako dobre strukturalne karakteristike zbog uticaja raznih opterećenja. Upotreba kompozitnih materijala postala je neizbežna u njihovoj proizvodnji. Proces proizvodnje kompozitnih struktura ima značajan uticaj na njihov kvalitet pa je tokom vremena razvijeno nekoliko proizvodnih tehnologija. Prilikom proizvodnje lopatica vetroturbina pored izbora odgovarajuće vrste kompozitnog materijala i njegove orijentacije veoma je važan pravilan odabir proizvodne metode. Proizvodna tehnologija može uticati na masu proizvoda, njegov kvalitet i cenu izrade. U ovom radu su predstavljene neke od proizvodnih tehnika koje su danas aktuelne u ovoj vrsti industrije. Izožene su njihove prednosti i nedostaci, zastupljenost i ograničenja pri upotrebi u industriji energije vetra danas. Dat je kratak osvrt na vetroturbine i njihov razvoj kao i pregled kompozitnih materijala.

¹⁾ dr Marija Baltić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mbaltic@mas.bg.ac.rs),
dr Ognjen Peković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (opekovic@mas.bg.ac.rs),
dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs),
Aleksandar Kovačević, doktorand, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (akovacevic@mas.bg.ac.rs),
²⁾ Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

2. VETROTUBINE SA HORIZONTALNOM OSOM OBRRTANJA

Ova vrsta vetroturbina najviše se danas koristi i njena upotreba ima veliki trend rasta u cilju što veće eksploatacije energije vetra. Ukupni instalirani kapacitet vetroturbina na globalnom nivou 1990. godine iznosio 1,94 GW dok je 2019. godine iznosio 650,8 GW [5]. Glavne prednosti u odnosu na one sa vertikalnom osom obrtanja su veliki kapacitet i efikasnost. Da bi se ostvarili ovi benefiti potrebno je postavljanje rotora na visinama na kojima je brzina vetra značajno veća u odnosu na brzinu iznad same površine tla i primena rotora velikog prečnika [6]. Trenutno najveći vetrogenerator kapaciteta 12 MW, prečnika rotora 220 m i visine glave rotora 260 m proizvod je kompanije General Electric i instaliran je u Roterdamu 2019. godine [7]. Ilustrovani prikaz razvoja vetroturbina sa horizontalnom osom obrtanja tokom vremena dat je na slici 1 [27]. Tokom prikazanog perioda na slici 1 postojale su razne konstrukcijske izvedbe, međutim najzastupljeniji je Danski koncept vetroturbine. Glavne karakteristike ovog koncepta su rotor sa tri lopatice koji je usmeren suprotno kretanju vetra i mogućnost okretanja glave rotora oko vertikalne ose u cilju prilagođavanja njegove ose pravcu kretanja vetra [8].



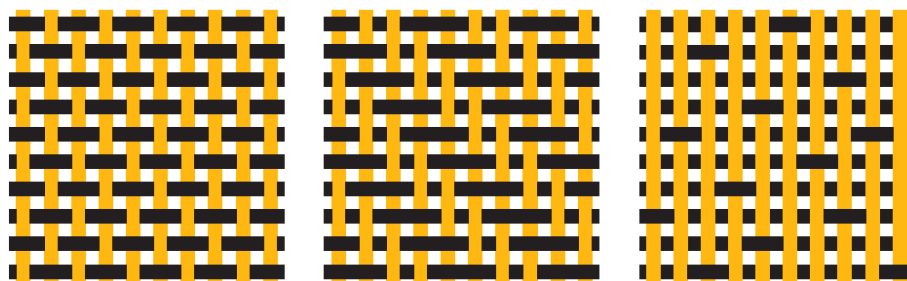
Slika 1. Razvoj vetroturbina sa horizontalnom osom obrtanja tokom vremena

Pored rotora i sistema za okretanje glave rotora oko vertikalne ose, osnovne elemente vetroturbine ovog tipa čine toranj, generator električne energije, reduktor i kočnica za zaustavljanje rotora usled prevelike brzine vetra. Lopatice rotora najsloženije su njene komponente. Glavni zadatak prilikom njihovog projektovanja je da budu aerodinamički efikasne kako bi se energija vetra iskoristila u što većoj meri kao i da imaju zadovoljavajuće strukturalne karakteristike koje su neophodne zbog izloženosti raznim vrstama opterećenja tokom eksploatacije. Veoma važna karakteristika im je i otpornost na zamor kako bi imale što duži radni vek. Troškovi njihove proizvodnje treba da budu što manji zbog konkurencije na tržištu [9]. Prečnik vetroturbine prosečne vetroturbine u 2019. godine iznosio je 129 m, odnosno dužina lopatica oko 60 m [10]. Svi prethodno navedeni složeni zahtevi i kompromisi koji moraju biti postignuti, ali i pomenute dimenzije čine da njihova izrada iznosi oko 25% ukupne cene proizvodnje jedne vetroturbine [11]. U nastavku su predstavljeni kompozitni materijali i četiri najzastupljenije metode za iradu lopatica vetroturbina.

3. KOMPOZITNI MATERIJALI ZA IZRADU LOPATICA VETROTURBINA

Jedan od glavnih zahteva prilikom izbora materijala za izradu lopatica vetroturbina je čvrstoća. Ova karakteristika je značajna iz razloga što lopatice treba da se suprotstave opterećenjima koja trpe tokom rada. Velika krutost obezbeđuje da lopatica zadrži projektovani oblik dok je što manja gustina materijala poželjna je u pogledu smanjenja njene mase što za posledicu ima manje gravitaciono opterećenje [12]. U cilju povećanja radnog veka lopatica bitno je da materijal poseduje veliku otpornost na zamor, a zbog eksploatacije u raznim meteorološkim uslovima bitna je i otpornost na koroziju. Kompozitni materijali predstavljaju kompromis prethodno navedenih zahteva i u današnjoj proizvodnji lopatica vetroturbina ne postoji adekvatniji izbor materijala. Osim što imaju zadovoljavajuće mehaničke sposobnosti, kompozitni materijali pružaju mogućnost izrade različitim metodama. Iako imaju značajnu ulogu u izradi lopatica mogu se koristiti i za proizvodnju tornjeva vetroturbina [13]. Što se tiče vrste kompozitnih materijala, u ovoj grani industrije uglavnom se koriste platna sa staklenim, karbonskim, aramidnim ali i hibridnim vlaknima [14].

Hibridna vlakna podrazumevaju kombinaciju bilo koja dva od prethodno navedenih vrsta vlakana (staklo/karbon, staklo/aramid, itd.). Platna se mogu razlikovati u odnosu na raspored vlakana u njima ali i načinu pletenja. Tako postoje unidirekciona, biaksijalna, triaksijalna i multiaksijalna platna, dok su najčešći tipovi pletenja prikazani na slici 2. Kada su u pitanju matrice, najzastupljeniji su termoseti koje čine epoksidna, poliesterska i vinilester smola. Upotreba termoplastičnih matrica u proizvodnji lopatica vetroturbina je mala jer zahtevaju relativno visoku temperaturu u procesu polimerizacije [15]. Mehaničke karakteristike najčešće korišćenih vlakana, matrica i ispuna u industriji energije vetra date su u tabeli 1.



Slika 2. Najčešći tipovi pletenja platna

Platna i matrice koriste se za izradu gornjake i donjake lopatice. Za izradu ramenjače koriste se razne vrste ispuna koje prekrivene slojevima platna čine takozvanu senvič strukturu. Ispune koje se najčešće koriste su PVC pena i aramidno saće [16]. Za spajanje gornjake, donjake i ramenjače najčešće se koriste epoksidni, poliuretanski, vinilesterski adhezivi kao i metil metakrilat adheziv[17].

Tabela 1. Mehaničke karakteristike kompozitnih materijala [18], [19]

	Gustina (kg/m ³)	Modul elastičnosti (GPa)	Modul smicanja (GPa)	Zatezna čvrsoća (MPa)	Pritisna čvrsoća (MPa)
“E” tip staklena vlakna	2600	74	30	2500	-
Karbonska vlakna	1750	230	50	3200	-
Aramidna vlakna	1450	130	12	2900	-
Epoksidna smola	1200	4,5	1,6	130	-
Poliesterska smola	1200	4	1,4	80	-
Vinilesterska smola	1150	3,3	-	75	-
Aramidna ispuna	25-50	-	0,01-0,04	-	0,2-0,5
PVC ispuna	100	0,12	0,048	-	1,7

4. METODE PROIZVODNJE KOMPOZITNIH STRUKTURA

Činjenica da kvalitet kompozitne strukture pored mehaničkih karakteristika vlakana i njihove orijentacije umnogome zavisi i od samog procesa izrade rezultovalo je time da od početka primene kompozitnih materijala do danas bude razvijeno nekoliko proizvodnih tehnika. Kada je reč o i kompozitnim lopaticama vetrogeneratora danas su u upotrebi sledeće proizvodne metode:

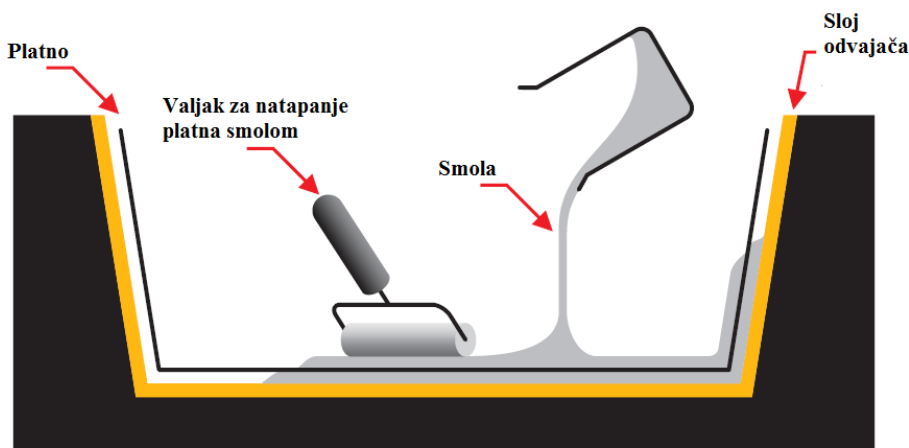
- Metod ručne laminacije (Hand Lay Up)
- Metod ubrizgavanja smole u zatvoreni kalup (Resin Transfer Molding)
- Metod ubrizgavanja smole pomoću vakuuma (Vaccum Infusion)

- Metod laminacije preimpregniranim platnom (Prepreg Technology)
- Metod namotavanja preimpregniranih vlakana na kalup (Filament Winding)

Pravilan izbor proizvodnog procesa posebno je važan kod izrade velikih modela kao što su lopatice vetrogeneratora jer mogu uticati na smanjenje težine, ali i mehanička svojstva. Takođe se primenom određene metode može skratiti vreme izrade što direktno utiče na cenu samog proizvoda. Prve četiri prethodno navedene tehnologije imaju značajnu ulogu u industriji energije vetra i one su u nastavku detaljno analizirane.

4.1 Metod ručne laminacije (Hand Lay Up)

Tehnika ručne laminacije najstariji je i najjednostavniji proces proizvodnje kompozitnih struktura. Ovaj postupak, prikazan na slici 3, podrazumeva polaganje platna u kalup i ručno natapanje smolom. U toku procesa uglavnom se koriste četke i valjci kako bi se obezbedilo dobro natapanje platna smolom. Samim tim što ne zahteva korišćenje kompleksne opreme predstavlja ekonomski isplativ način proizvodnje kompozitnih struktura. S druge strane, upravo nedostatak određene vrste automatizacije procesa predstavlja problem jer kvalitet proizvoda onda zavisi od sposobnosti osobe koja obavlja proces laminacije. Nepreciznost u orijentaciji platna i količini primenjene smole može dovesti do smanjenja mehaničkih karakteristika i povećanja mase lopatice u odnosu na projektovane vrednosti. Naknadnim vakuumiranjem moguće je odstraniti višak smole odnosno povećati procentualni udeo platna u laminatu [20]. Takođe, jedan od nedostataka je i prilično zagađeno radno okruženje zbog isparenja smole.



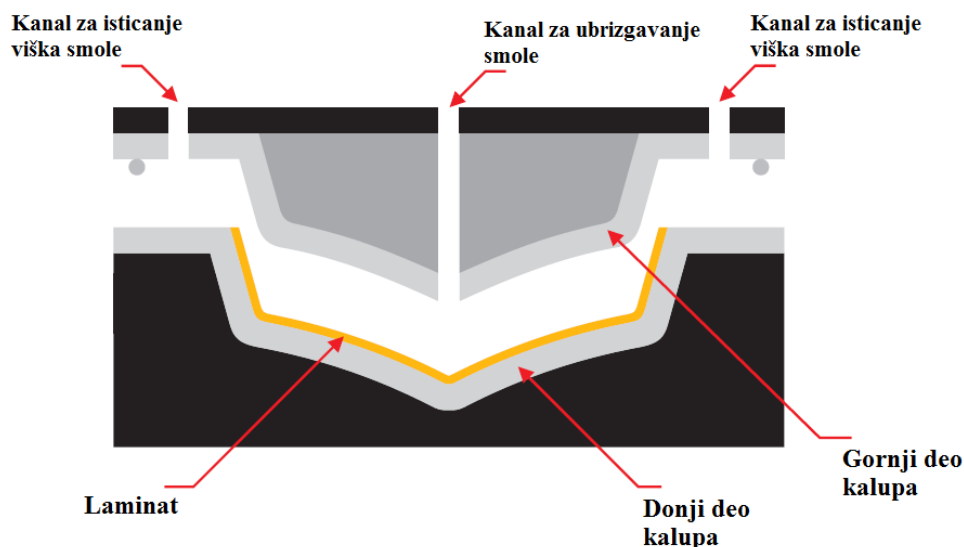
Slika 3. Metod ručne laminacije

Tehnologija ručne laminacije danas se zbog svojih nedostataka uglavnom koristi za proizvodnju lopatica manjih vetroturbin. Ipak zbog nerazvijenosti tehnologije kompozitnih materijala, 70-ih godina prošlog veka, lopatice dužine 27 m vetroturbine Tvind u Danskoj proizvedene su korišćenjem ove metode [21].

4.2 Metod ubrizgavanja smole u zatvoreni kalup (Resin Transfer Molding)

Proizvodna tehnologija ubrizgavanja smole u odnosu na ručnu laminaciju znatno je kompleksniji ali zauzvrat se mogu dobiti visokokvalitetni proizvodi. Proces počinje nanošenjem tankog filma odvajača na površinu kalupa koji obezbeđuje kasnije nesmetano vađenje laminiranog dela. Potom sledi pozicioniranje platna bez premazivanja smolom. Kada su sva platna nanesena kalup se zatvara svojim pozitivom nakon čega sledi proces ubrizgavanja smole. Ubrizgavanje se vrši pod pritiskom sa ili bez pomoćnog vakuuma koji pomaže proces odstranjivanja viška smole. Po završenom postupku ubrizgavanja moguće je primeniti polimerizacioni proces na određenoj temperaturi u zavisnosti od tipa smole koja je nanešena. Postupak je prikazan na slici 4. Kalup se otvara nakon završenog procesa polimerizacije i sledi vađenje iz kalupa. Ova tehnologija je nastala kao posledica razvoja proizvodnje kompozitnih struktura. Njene prednosti su upravo ono što su nedostaci tehnike ručne laminacije. Skraćeno je vreme proizvodnje. Primenom istih parametara ubrizgavanja smole, iz istog kalupa se dobijaju strukture istih karakteristika.

Međutim, iako ima prednosti u odnosu na ručnu laminaciju, ubrizgavanje smole ima i dosta svojih nedostataka. Velika početna ulaganja u pogledu izrade kalupa za ovu namenu glavni je problem sa kojim se suočava ova metoda. Na ovaj nedostatak znatno utiče to što kalupi najčešće moraju biti metalni da ne bi došlo do njihovog oštećenja tokom ubrizgavanja smole.

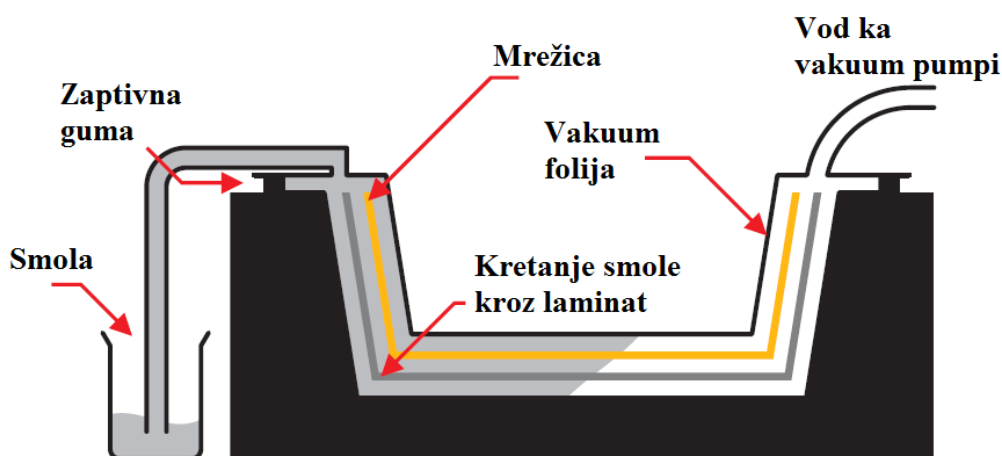


Slika 3. Metod ubrizgavanja smole u zatvoreni kalup

Zbog prirode samog procesa nije moguće pratiti kretanje smole što dovodi do zaključka da se nepravilnosti mogu uočiti tek nakon vađenja iz kalupa i u tom slučaju struktura se može samo škartirati [22]. Smanjenje cene kalupa može se postići primenom kompozitnih kalupa. Iako ovaj način izrade kompozitnih struktura nije našao veliku primenu u proizvodnji lopatica vetroturbina, danas se u toj vrsti industrije koristi metoda "One Shot technology" [23]. Ima dosta sličnosti sa tehnologijom ubrizgavanja smole u zatvoreni kalup ali sama metoda podrazumeva izradu lopatica u jednom koraku (bez spajanja gornjake i donjake). Da bi to bilo izvodljivo sama anatomija lopatice je nekonvencionalna (bez ramenjače) što ovu tehnologiju čini jedinstvenom.

4.3 Metod ubrizgavanja smole pomoću vakuuma (Vaccum Infusion)

Iako ima dosta sličnosti sa prethodno analiziranom tehnikom ova metoda ipak ima i mnogo prednosti u odnosu na nju. Postupak pripreme kalupa i formiranje laminata isti je kao kod RTM metode ali nanošenje smole se ovde vrši posredstvom prethodno formiranog vakuuma, a ne pomoću pritiska.



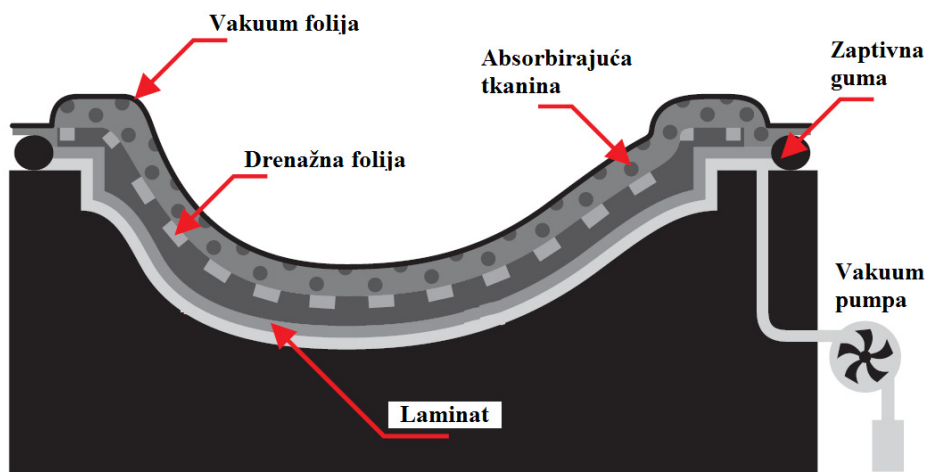
Slika 4. Metod ubrizgavanja smole pomoću vakuuma

Naime, preko poslednjeg sloja postavlja se mrežica koja pravi dovoljnu distancu između platna i vakuum folije i time obezbeđuje prostor za kretanje smole. Smole koje se koriste u ovom procesu moraju imati malu viskoznost [24]. Po obodu kalupa postavlja se spirala u obliku creva čiji je zadatak da pokupi višak smole. Spiralno crevo povezano je sa običnim crevom koje vodi ka drenažnoj posudi iz koje dalje nastavlja ka vakuum pumpi. S druge strane, crevo iz posude sa smolom vodi do samog laminata. Protok smole je sprečen sve do momenta dok se iznad laminata ne istisne sav vazduh. Kada je to ostvareno, protok smole je omogućen uz dalji rad vakuum pumpe koja održava razliku pritiska između posude sa smolom i površine kalupa. Protok smole kroz drenažni vod označava da je platno natopljeno smolom ukoliko nije došlo do nekih smetnji u pojedinim delovima kalupa. Sada se odvod smole iz kalupa zatvara a odmah nakon toga i dovod. Proveravaju se spojevi vakuum folije sa kalupom da bi se izbeglo eventualno curenje vazduha u laminat. Posle toga sledi proces polimerizacije na određenoj temperaturi.

Ova tehnika proizvodnje kompozitnih struktura veoma je zastupljena u industriji energije vetra. Odlikuju je mnoge prednosti u odnosu na druge tehnike, pre svega ostvarivanje projektovanog zapreminskog odnosa platna i smole što za posledicu ima željene mehaničke karakteristike strukture. Mogućnost praćenja smole tokom procesa omogućava da se izbegne nepravilna raspoređenost iste po kalupu. Tokom samog procesa nema zagađenja radnog okruženja ili eventualnog prljanja radne površine što je takođe značajno. Primena ove metode je povoljna i sa ekonomskog aspekta uzimajući u obzir da ne zahteva kompleksnu opremu. Najznačajniji nedostatak je to što može doći do oštećenja vakuuma nakon završenog ubrizgavanja smole. Neprimetni otvor na vakuum foliji može propustiti dovoljnu količinu vazduha u laminat što bi imalo štetne posledice na kvalitet proizvoda.

4.4 Metod laminacije preimpregniranim platnom (Prepreg Technology)

Primena ove metode, kao što se vidi i iz njenog naziva, podrazumeva upotrebu platana koje je već impregnirano smolom. Platna impregnirana smolom mogu biti delimično polimerizovana ili nepolimerizovana. Postupak laminacije podrazumeva nanošenje platna na površinu kalupa. Kada je proces laminacije završen sledi polimerizacija koja uglavnom treba biti izvršna pod pritiskom. Pritisak podrazumeva upotrebu autoklava ili alternativno vakuuma. Temperature tokom polimerizacionog procesa kreću se u opsegu 80°C - 120 °C. Način primene ove tehnologije u kombinaciji sa vakuumom prikazana je na slici 5.



Slika 4. Metod laminacije preimpregniranim platnom

Obzirom da je tehnologija prevashodno korišćena u avio industriji za izradu visokokvalitetnih delova korišćen je autoklav u procesu polimerizacije. To je činilo veoma skupom uzimajući u obzir visoku cenu opreme koja je bila potrebna, posebno za izradu delova velikih dimenzija. Kada je primena proširena na ostale vrste industrije, a visok kvalitet nije igrao veliku ulogu, ova metoda se počela primenjivati sa klasičnim vakuum sistemom. Proces laminacije preimpregniranim platnom odlikuje unapred poznat i nepromenljiv zapreminski odnos smole i platna, što je važno sa stanovišta projektovanja nosećih elemenata. U radu sa preimpregniranim platnom ne stvara se mnogo otpada i prljavštine u radnom prostoru što je od velikog značaja za osobu koja obavlja proces laminacije. Glavni nedostatak je visoka cena materijala što uglavnom utiče da se kompanije odlučuju za neke alternativne metode. Alati odnosno kalupi moraju biti

postojani na temperaturama na kojima se odvija proces polimerizacije. U industriji energije vetra ima značajnu ulogu i koristi se za izradu lopatica nekih od najvećih vetrogeneratora danas.

5. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu da je industrija energije vetra u velikom usponu, a samim tim broj konkurentskih kompanija postaje sve veći, veoma je značajan kompromis cene i kvaliteta. Ranije je napomenuto da lopatice čine 25% ukupne cene vetroturbine što znači da je ekonomska isplativost izabrane metode veoma važna. Naspram cene, odgovor na konkurenciju može dati i kvalitet vetroturbine. Pouzdanost i dug radni vek lopatica pored aerodinamičke efikasnosti dva su najznačajnija faktora u pogledu kvaliteta vetrogeneratora. Sumirajući prethodno rečeno i osvrćući se na četiri analizirane metode možemo zaključiti da tehnologija ručne laminacije i metoda ubrizgavanja smole u zatvoreni kalup nisu dovoljno adekvatni da odgovore na zahteve današnje idustrije energije vetra. To potvrđuje i podatak da neki od najvećih svetskih proizvođača vetrogeneratora i njihovih lopatica kao što su Vestas i Simens Gamesa koriste prepreg tehnologiju [25], dok TPI Composites i LM Wind Power primenjuju metodu infuzije smole pomoću vakuuma [26]. Razvoj ove dve popularne proizvodne tehnologije tekao je različito. Prepreg je preuzet iz avio industrije dok je metod infuzije plod dugogodišnjeg razvoja u okviru industrije energije vetra. Ipak, obe daju zadovoljavajući odnos cene i kvaliteta te samim tim njihovi korisnici imaju veliki uspeh na globalnom nivou.

U ovom radu izvršen je kratak pregled stanja i razvoja kompozitne tehnologije sa primenom u industriji vetra. Na osnovu ove analize ali i predviđenog velikog rasta u eksploataciji energije vetra tokom vremena postoji mogućnost pojave nekih novih proizvodnih metoda kompozitnih lopatica vetroturbin.

6. LITERATURA

- [1.] Our World in Data, Dostupno na: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Pristupljeno April 21, 2020.
- [2.] Saeidi, D., Sedaghat, A., Alamdari, P., & Alemrajabi, A. A. (2013). Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines. *Applied energy*, 101, 765-775.
- [3.] IEA – International Energy Agency, Dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20energy%20source>. Pristupljeno April 18, 2020.
- [4.] Tiwari, P. K., Goswami, A. K., Singh, A. K., & Panda, R. (2019). Wind power: Existing status, achievements and government's initiative towards renewable power dominating India. *Energy Strategy Reviews*, 23, 178-199.
- [5.] World Wind Energy Association, Dostupno na: <https://library.wwindea.org/global-statistics/>. Pristupljeno April 16, 2020.
- [6.] Enevoldsen, P., & Xydis, G. (2019). Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components. *Energy for sustainable development*, 50, 18-26.
- [7.] GE Renewable Energy, Dostupno na: <https://www.ge.com/renewableenergy/windenergy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>. Pristupljeno April 12, 2020.
- [8.] Gasch, R., & Twele, J. (Eds.). (2011). *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. Springer Science & Business Media.
- [9.] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- [10.] Statista, Dostupno na: <https://www.statista.com/statistics/263901/changes-in-the-size-of-wind-turbines/>. Pristupljeno April 23, 2020.
- [11.] Krohn, S., Morthorst, P. E., & Awerbuch, S. (2009). The economics of wind energy. *European Wind Energy Association*, 28-29.
- [12.] MANDRI, G. (2016). Blade Manufacturing of Small Wind Turbine within the Moroccan Context.
- [13.] Marsh, G. (2014). Greater role for composites in wind energy. *Reinforced Plastics*, 58(1), 20-24.

- [14.] Mishnaevsky Jr, L., & Favorsky, O. (2011). Composite materials in wind energy technology. *Thermal to Mechanical Energy Conversion: Engines and Requirements*, EOLSS Publishers: Oxford, UK.
- [15.] Aymerich, F. (2012). Composite materials for wind turbine blades: issues and challenges. *SYSWIND Summer school*.
- [16.] Thomsen, O. T. (2009). Sandwich materials for wind turbine blades—present and future. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(1), 7-26.
- [17.] Jørgensen, J. B. (2017). *Adhesive Joints in Wind Turbine Blades* (Doctoral dissertation, DTU Wind Energy).
- [18.] Gay, D. (2014). *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- [19.] Gdoutos, E. E., Daniel, I. M., & Wang, K. A. (2003). Compression facing wrinkling of composite sandwich structures. *Mechanics of materials*, 35(3-6), 511-522.
- [20.] Det Norske Veritas, R. (2002). Guidelines for design of wind turbines.
- [21.] Brøndsted, P., Lilholt, H., & Lystrup, A. (2005). Composite materials for wind power turbine blades. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 35, 505-538.
- [22.] Cairns, D., Skramstad, J., & Ashwill, T. (2000). Resin transfer molding and wind turbine blade construction. *Sandia National Laboratories Technical Report, SAND99-3047*.
- [23.] Damiano, M., & D'Ettore, A. (2018, June). Structural design of a multi-megawatt wind turbine blade with ONE SHOT BLADE® Technology. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 4, p. 042002). IOP Publishing.
- [24.] Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: an overview. *Materials*, 10(11), 1285.
- [25.] Cairns, D. S., Riddle, T., & Nelson, J. (2011). Wind turbine composite blade manufacturing: The need for understanding defect origins, prevalence, implications and reliability. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico*, 87185.
- [26.] Stewart, R. (2012). Wind turbine blade production—new products keep pace as scale increases. *Reinforced Plastics*, 56(1), 18-25.
- [27.] IEEFA.org, Dostupno na: <https://ieefa.org/ieefa-update-cracks-war-wind/evolution-of-wind-turbine/>. Pristupljeno April 9, 2020.

Marija Baltić, Ognjen Peković, Jelena Svorcan, Aleksandar Kovačević

MANUFACTURING METHODS OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE COMPOSITE BLADES

Abstract: *The horizontal axis wind turbine (HAWT) is the most used type of wind turbine when it comes to the exploitation of wind energy. The blades of this type of wind turbine are their most loaded elements. For their production, therefore, generally use composite materials whose mechanical properties can meet the high requirements of the given project. This paper shows some of the production methods for composite blades of HAWT type wind turbines, namely: Hand lay-up, Vacuum infusion, Resin transfer molding, and Prepreg. These methods are analyzed from several aspects. Their advantages and disadvantages are given as well as their application in today's wind energy industry.*

Key words: *Manufacturing methods, Wind turbine blades, Composite materials*



Kurbegović, R., Janjić, M., Vukčević, M., Đurović, D. ¹⁾

UTICAJ PARAMETARA OBRADNE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM NA ODSUPANJE PREDNJE LINIJE REZA ²⁾

Rezime

Obrada abrazivnim vodenim mlazom je jedna od nekonvencionalnih proizvodnih tehnologija koja se sve više koristi u industriji. Međutim, da bi se unaprijedile njene performanse, neophodno je bolje razumjevanje brojnih ulaznih i izlaznih parametara ove obrade i njihova međusobna zavisnost. Cilj ovog istraživanja je određivanje uticaja ulaznih parametara obrade (radnog pritiska, brzine kretanja rezne glave, protoka abraziva i rastojanja rezne glave od predmeta obrade) na odstupanje prednje linije reza od svoje upravne linije. Sva saznanja do kojih se došlo ukazuju da primjenjeni parametri obrade utiču na odsupanje prednje linije reza od svoje idealne upravne linije.

Ključne reči: Obrada abrazivnim vodenim mlazom, Obrada materijala, Odstupanje prednje linije reza

1. UVOD

Mehanizam na kom se zasniva postupak obrade abrazivnim vodenim mlazom je erozija. Neki autori objašnjavaju proces erozije kao vrstu abrazivnog habanja, pri kojem abrazivne čestice i vodeni mlaz uzastopno vrše udare na površinu, što rezultira ispiranjem materijala sa te površine [1,2].

Postoji nekoliko radova koji se bave geometrijom reza i faktorima koji utiču na njegov konačan izgled. Uglavnom na geometriju reza koji je obrađen abrazivnim vodenim mlazom utiču parametri obrade kao što su radni pritisak, brzina kretanja rezne glave, protok abraziva i rastojanja rezne glave od predmeta obrade [1,3].

Definisanje geometrije reza je zapravo utvrđivanje odstupanja - zaostajanja, Y_{lag} , abrazivnog vodenog mlaza od svoje vertikalne linije. Linija koja opisuje zaostajanje abrazivnog vodenog mlaza, Zeng i ostali [4] su definisali kao parabolu.

Cilj ovog rada je odrediti uticaj parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom, kao što su radni pritisak, p , rastojanje rezne glave od predmeta obrade, x , brzina kretanja, v_c i protok abraziva, m_a , na zaostajanje abrazivnog vodenog mlaza.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Analiziran je uticaj radnog pritiska, brzine kretanja rezne glave, protoka abraziva i rastojanja rezne glave od predmeta obrade na zaostajanje abrazivnog vodenog mlaza. Istraživanje je obavljeno na mašini za obradu abrazivnim vodenim mlazom proizvođača WJS, Švedska, model NCX 4020. Korišteni prečnik vodene mlaznice je 0,254 mm, a abrazivne (fokusirajuće cijevi) 0,768 mm (ROCTEC 100). U svim eksperimentima korišten je garnet # 80.




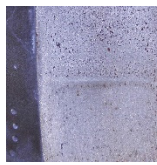

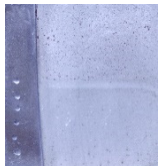
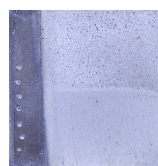


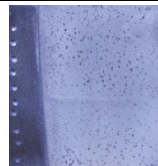
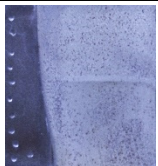
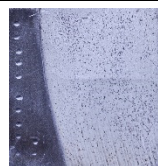



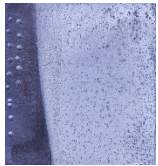
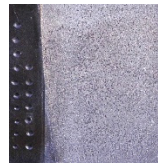
Kao materijal na kom je vršeno istraživanje je brzorezni alatni čelik EN HS6-5-2 (JUS č.7680, AISI M2), proizveden EPT (Elektro pretapanje pod slojem troske) metodom u kalupu okruglog oblika, normalizvan, mašinski rezan na ploče debljine 42 mm, zatim mašinski obrađen na mjeru $40 \pm 0,05$ mm. Iz diskova su abrazivnim vodenim mlazom dobijeni uzorci dimenzija $40 \times 40 \times 110 \pm 0,05$ mm. Strana koja je obrađena abrazivnim vodenim mlazom mašinski je obrađena na $38 \pm 0,1$ mm za potrebe razlikovanja.

Uzorci su rasijecani do dužine od 30 mm. Na toj dužini reza zaustavljan je dotok abraziva, a odmah zatim

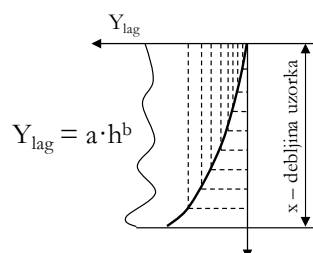
¹⁾ mr Ramiz Kurbegović, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, (rkurbeg@gmail.com), prof. dr Mileta Janjić, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, (mileta@ucg.ac.me), prof. dr Milan Vukčević, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, (milanvu@ucg.ac.me), Dušan Đurović, AD Mehanizacija i programat, (admip@t-com.me)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovede na projektu doktorskog istraživanja „Istraživanje parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom“ koji finansijski podržava Ministarstvo nauke Crne Gore

i mašina. Na taj način je ocrтана linija koja pokazuje putanju po kojoj se kretao abrazivni vodeni mlaz. Nakon toga, uzorci su do kraja rasijecani erozimatom. Napravljeno je sedamnaest uzoraka. Dobijeni uzorci i korišteni parametri obrade prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Uzorci rezanja i korišteni parametri					
I					
	$p_1 = 199,9 \text{ MPa}$	$p_2 = 251,7 \text{ MPa}$	$p_3 = 299,9 \text{ MPa}$	$p_4 = 351,6 \text{ MPa}$	$p_5 = 413,7 \text{ MPa}$
Rastojanje rezne glave od obradnog materijala $x = 2 \text{ mm}$ Brzina kretanja rezne glave $v_c = 20 \text{ mm/min}$ Protok abraziva $m_a = 395 \text{ g/min}$					
II					
	$x_1 = 3 \text{ mm}$	$x_2 = 4 \text{ mm}$	$x_3 = 6 \text{ mm}$		
Radni pritisak $p = 413,7 \text{ MPa}$ Brzina kretanja rezne glave $v_c = 20 \text{ mm/min}$ Protok abraziva $m_a = 395 \text{ g/min}$					
III					
	$v_{c1} = 5 \text{ mm/min}$	$v_{c2} = 10 \text{ mm/min}$	$v_{c3} = 30 \text{ mm/min}$	$v_{c4} = 40 \text{ mm/min}$	$v_{c5} = 60 \text{ mm/min}$
Radni pritisak $p = 413,7 \text{ MPa}$ Rastojanje rezne glave od obradnog materijala $x = 2 \text{ mm}$ Protok abraziva $m_a = 395 \text{ g/min}$					
IV					
	$m_{a1} = 166,5 \text{ g/min}$	$m_{a2} = 229 \text{ g/min}$	$m_{a3} = 274,5 \text{ g/min}$	$m_{a4} = 331,5 \text{ g/min}$	
Radni pritisak $p = 413,7 \text{ MPa}$ Rastojanje rezne glave od obradnog materijala $x = 2 \text{ mm}$ Brzina kretanja rezne glave $v_c = 20 \text{ mm/min}$					

Kako bi se odredila linija reza, uzorci su istraženi uz pomoć optičkog mikroskopa, a odstupanje mjereno na dvadeset mjesta po dubini reza. Princip mjerenja odstupanja abrazivnog vodenog mlaza je prikazan na slici 1.



Slika 1. Mjerenje odstupanja abrazivnog vodenog mlaza [5]

3. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

U tabelama 2, 3, 4 i 5 su date izmjerene vrijednosti odstupanja prednje linije reza od svoje idealne upravne linije, a u zavisnosti od promjene parametara procesa obrade (radnog pritiska, p , brzine kretanja rezne glave, v_c , protoka abraziva, m_a i rastojanja rezne glave od obradnog materijala, x).

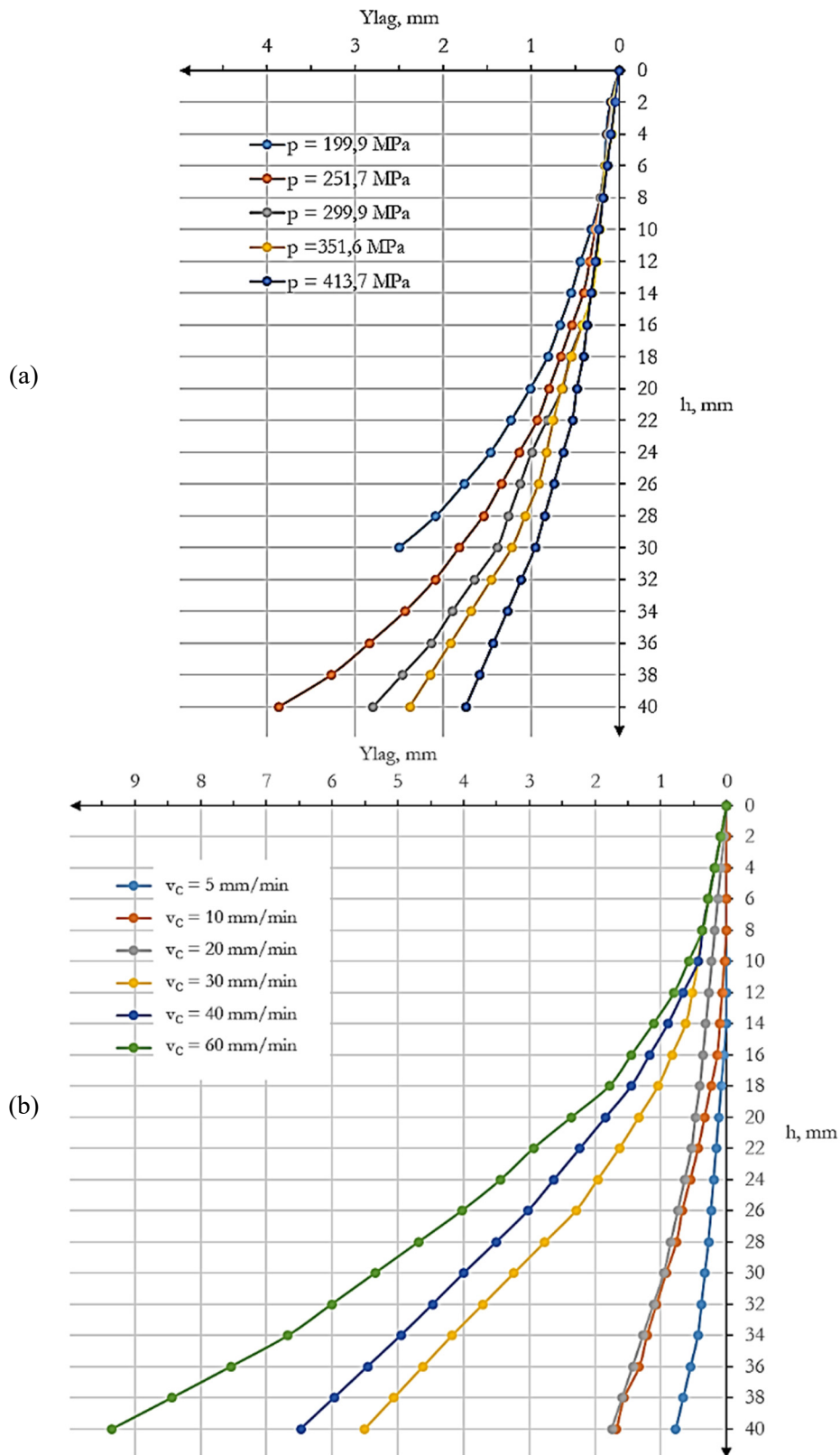
Tabela 2. Izmjerene vrijednosti Y_{lac} u zavisnosti od p					
	Uzorak				
p, Mpa	1	2	3	4	5
h, mm	199,9	251,7	299,9	351,6	413,7
	Y_{lac}, mm				
0	0	0	0	0	0
2	0,0978	0,0774	0,0693	0,0590	0,0453
4	0,1473	0,1294	0,1277	0,0804	0,0906
6	0,1554	0,1534	0,1661	0,1531	0,1359
8	0,2108	0,2133	0,2104	0,1865	0,1811
10	0,3152	0,2726	0,2436	0,2198	0,2264
12	0,4381	0,3314	0,2608	0,2537	0,2717
14	0,5450	0,4058	0,3066	0,3042	0,3170
16	0,6765	0,5350	0,4178	0,4162	0,3623
18	0,8117	0,6642	0,5569	0,5385	0,4076
20	1,0111	0,7969	0,6451	0,6536	0,4786
22	1,2282	0,9297	0,8191	0,7461	0,5329
24	1,4628	1,1341	0,9932	0,8241	0,6382
26	1,7640	1,3384	1,1247	0,9159	0,7434
28	2,0834	1,5427	1,2561	1,0661	0,8487
30	2,5039	1,8170	1,3876	1,2163	0,9539
32	-	2,0914	1,6424	1,4484	1,1120
34	-	2,4332	1,8973	1,6805	1,2701
36	-	2,8380	2,1376	1,9127	1,4282
38	-	3,2731	2,4666	2,1448	1,5863
40	-	3,8638	2,7958	2,3769	1,7445

Tabela 3. Izmjerene vrijednosti Y_{lac} u zavisnosti od v_c						
	Uzorak					
v_c, mm/min	9	10	5	11	12	13
h, mm	5	10	20	30	40	60
	Y_{lac}, mm					
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,0453	0,0926	0,0926	0,0926
4	0	0	0,0906	0,1852	0,1852	0,1852
6	0	0	0,1359	0,2777	0,2777	0,2777
8	0	0	0,1811	0,3703	0,3703	0,3703
10	0	0,0329	0,2264	0,4351	0,4351	0,5809
12	0	0,0658	0,2717	0,5232	0,6626	0,7997
14	0	0,1023	0,3170	0,6245	0,8925	1,1137
16	0,0393	0,1389	0,3623	0,8342	1,1718	1,4497
18	0,0786	0,2365	0,4076	1,0439	1,4512	1,7856
20	0,1179	0,3342	0,4786	1,3387	1,8412	2,3621
22	0,1572	0,4319	0,5329	1,6336	2,2312	2,9387
24	0,1965	0,5532	0,6382	1,9633	2,6259	3,4368
26	0,2359	0,6744	0,7434	2,2930	3,0207	4,0273
28	0,2752	0,7631	0,8487	2,7636	3,5046	4,6854
30	0,3289	0,9202	0,9539	3,2342	3,9984	5,3470
32	0,3826	1,0672	1,1120	3,7047	4,4723	6,0086
34	0,4363	1,2141	1,2701	4,1753	4,9562	6,6703
36	0,5485	1,3298	1,4282	4,6183	5,4635	7,5399
38	0,6608	1,5612	1,5863	5,0612	5,9708	8,4366
40	0,7730	1,6769	1,7445	5,5042	6,4779	9,3471

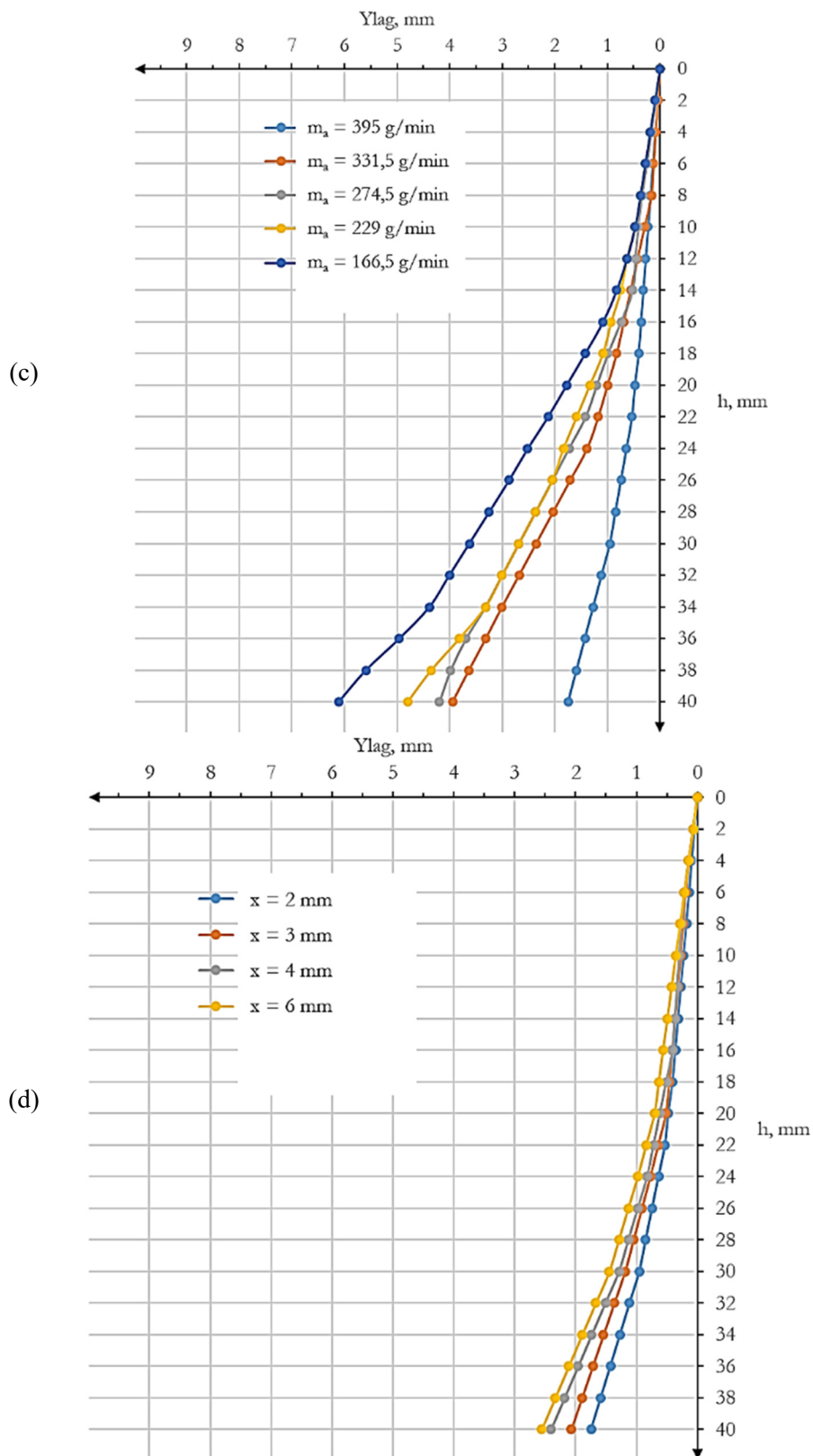
Tabela 4. Izmjerene vrijednosti Y_{lag} u zavisnosti od m_a					
	Uzorak				
	14	15	16	17	5
m_a, g/min	166,5	229	274,5	331,5	395
h, mm	Y_{lag}, mm				
0	0	0	0	0	0
2	0,0926	0,0926	0,0834	0,0410	0,0453
4	0,1852	0,1852	0,1668	0,0820	0,0906
6	0,2777	0,2777	0,2503	0,1229	0,1359
8	0,3703	0,3703	0,3439	0,1639	0,1811
10	0,4715	0,4715	0,4175	0,2962	0,2264
12	0,6278	0,6278	0,4691	0,4284	0,2717
14	0,8224	0,7458	0,5187	0,5606	0,3170
16	1,0830	0,9277	0,7437	0,6928	0,3623
18	1,4235	1,0865	0,9907	0,8251	0,4076
20	1,7762	1,3359	1,2030	0,9999	0,4786
22	2,1288	1,5853	1,4153	1,1748	0,5329
24	2,5145	1,8378	1,7352	1,3876	0,6382
26	2,8689	2,0485	2,0485	1,7095	0,7434
28	3,2476	2,3667	2,3667	2,0332	0,8487
30	3,6263	2,6848	2,6848	2,3569	0,9539
32	4,0051	3,0029	3,0029	2,6806	1,1120
34	4,3838	3,321	3,3210	3,0043	1,2701
36	4,9571	3,8172	3,6890	3,3133	1,4282
38	5,5929	4,3531	3,9815	3,6340	1,5863
40	6,1071	4,8004	4,1935	3,9440	1,7445

Tabela 5. Izmjerene vrijednosti Y_{lag} u zavisnosti od x				
	Uzorak			
	5	6	7	8
x, mm	2	3	4	6
h, mm	Y_{lag}, mm			
0	0	0	0	0
2	0,0453	0,0651	0,0709	0,0703
4	0,0906	0,1303	0,1418	0,1407
6	0,1359	0,1954	0,2126	0,2110
8	0,1811	0,2309	0,2571	0,2813
10	0,2264	0,2754	0,3016	0,3517
12	0,2717	0,3198	0,3329	0,4220
14	0,3170	0,3643	0,3708	0,4923
16	0,3623	0,4087	0,4087	0,5627
18	0,4076	0,4624	0,5130	0,6330
20	0,4786	0,5160	0,6173	0,7033
22	0,5329	0,6443	0,7217	0,8407
24	0,6382	0,7726	0,8260	0,9782
26	0,7434	0,9107	0,9803	1,1337
28	0,8487	1,0489	1,1346	1,2892
30	0,9539	1,1871	1,2890	1,4448
32	1,1120	1,3642	1,5121	1,6671
34	1,2701	1,5414	1,7351	1,8894
36	1,4282	1,7185	1,9582	2,1116
38	1,5863	1,8957	2,1813	2,3339
40	1,7445	2,0729	2,4045	2,5563

Na osnovu ovih rezultata su nacrtani dijagrami koji pokazuju na slici 2. uticaj promjene režima rezanja i dubine rezanja na odstupanje prednje linije reza od svoje idealne linije, odnosno realan izgled prednje linije reza.



Slika 2 . Uticaj parametara procesa obrade abrazivnim vodenim mlazom na odstupanje prednje linije reza od svoje idealne upravne linije: (a) p , (b) v_c , (c) m_a i (d) x .



Slika 2 (nastavak). Uticaj parametara procesa obrade abrazivnim vodenim mlazom na odstupanje prednje linije reza od svoje idealne upravne linije: (a) p , (b) v_C , (c) m_a i (d) x .

4. ZAKLJUČAK

Sa dijagrama se uočava da sa porastom dubine rezanja raste i odstupanje prednje linije reza od svoje idealne linije. Takođe, porast brzine kretanja rezne glave i rastojanja rezne glave od obradnog materijala ima za posljedicu povećanje odstupanja prednje linije reza od idealne. Sa povećanjem vrijednosti parametara obrade

protoka abraziva i radnog pritiska, odstupanje prednje linije reza od idealne se smanjuje.

Ovim se jasno dokazuje jaka korelacija između odstupanje prednje linije reza od svoje idealne linije i primjenjenih parametara obrade.

Ekspерimenti su izvršeni samo za jedan materijal, brzorezni alatni čelik EN HS6-5-2 (JUS č.7680, AISI M2), tako da je potrebno odraditi dodatna istraživanja na drugim materijalima kako bi se odredio uticaj mehaničkih karakteristika materijala na odstupanje prednje linije reza u odnosu na svoju idealnu liniju.

Takođe, istraživanje ovog odstupanja na materijalima sa različitim debljinama i drugim mehaničkim karakteristikama (modul elastičnosti, tvrdoća) može se istražiti ovaj fenomen i njegove zavisnosti od parametara obrade abrazivnim vodenim mlazom.

5. LITERATURA

- [1] Mombar, A.W., Kovačević, R.: *Principles of abrasive water jet machining*. Springer, London, 1998.
- [2] Arola, D., Ramulu, M.: *Mechanism of material removal in abrasive waterjet machining*, Proceedings of the 7th Water Jet Conference, Washington, pp. 46-64, 1993.
- [3] Hasish, M.: *A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets*, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, pp. 88-100, 1984.
- [4] Zeng, J., Heines, R., Kim T.J.: *Characterization of energy dissipation phenomena in abrasive water jet cutting*, Proceedings of the 6th American Water Jet Conference, St. Louis, pp. 163-177, 1991.
- [5] Marušić, V., Baralić, J., Nedić, B. i ostali: *Effect of machining parameters on jet lagging in abrasive water jet cutting*. Technical Gazette, Vol. 20, No. 4, pp. 677-682, 2013.

Kurbegović, R., Janjić, M., Vukčević, M., Đurović, D.

EFFECT OF ABRASIVE WATER JET MACHINING PROCESS PARAMETERS ON JET LAGGING

Abstract: *Abrasive water jet processing is one of the unconventional production technologies that is increasingly used in the industry. However, in order to improve its performance, it is necessary to better understand the numerous input and output parameters of this process and their interdependence. The aim of this paper is to determine the influence of input processing parameters (working pressure, traverse speed, abrasive flow rate, and stand-off distance) on jet lag, or the deviation of the cutting front line from its ideal, perpendicular line. All the findings indicate that the applied machining parameters affect the jet lagging.*

Key words: *Abrasive Water Jet Machining, Material Processing, Jet lagging*

Lazarević, D.¹⁾, Nedić, B.²⁾, Mišić M.³⁾, Šarkoćević Ž.⁴⁾, Čamagić, I.⁵⁾

TAČNOST OBRADE VREtenASTIM GLODALOM U FUNKCIJI ŠIRINE REZANJA

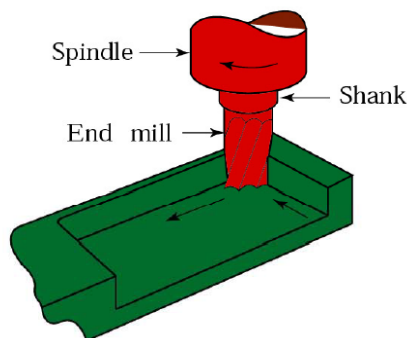
Rezime

Predviđanje tačnosti obrade glodanjem podrazumeva predviđanje sile rezanja. Na sile rezanja najveći uticaj imaju: materijal predmeta obrade, geometrija alata i parametri uslova obrade (režimi rezanja). Sile rezanja dovode do defleksije alata koja proizvodi dimenzionalne greške na predmetu obrade, posebno kada se koriste alati kao što je vretenasto glodalo. U radu je pokazana sprovedena analiza obrade glodanjem sa aspekta uticaja širine glodanja na defleksiju alata i dimenziona odstupanja na predmetu obrade kod suprotnosmernog i istosmernog postupka glodanja.

Ključne reči: glodanje, sile rezanja, defleksija, istosmerno i suprotnosmerno glodanje

1. UVOD

CNC proces obrade glodanje je proces izrade ravnih i složenih oblika upotrebom višesečnog reznog alata - glodala. Osa rotacije reznog alata je upravna na pravac pomoćnog kretanja kod obrade vretenastim glodalom, slika 1. Glodanje je periodična (ciklična) operacija rezanja: zubi glodala ulaze u zahvat i izlaze tokom svakog okreta pri čemu su zubi podvrgnuti cikličnim opterećenjima [1].



Slika 1. Operacija obrade vretenastim glodalom

S obzirom na smer obrtanja glodala i smer kretanja radnog stola sa predmetom obrade, glodanje može biti suprotnosmerno i istosmerno.

Kod suprotnosmernog (tzv. konvencionalnog) glodanja, smer koraka suprotan je od smera rotacije glodala (slika 2a). Zubi glodala počinju rezanje sa minimalnom (nultom) debljinom strugotine koja dostiže maksimalnu vrednost kada zub napusta zahvat. Tokom zahvata srazmerno raste i sila rezanja, čija jedna komponenta deluje težeći da radni komad odvoji od površine oslanjanja.

U slučaju kada se smerovi brzine rezanja i kretanja predmeta obrade poklapaju, glodanje je istosmerno (slika 2b). Pri istosmernom glodanju debljina strugotine najveća je na početku rezanja, a najmanja pri kraju. Osim toga jedna komponenta sile rezanja povećava pritisak radnog predmeta na površinu oslanjanja.

¹⁾ Doc. dr Dragan Lazarević, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, (dragan.lazarevic@pr.ac.rs),

²⁾ Prof. dr Bogdan Nedić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, (nedic@kg.ac.rs)

³⁾ Prof. dr Milan Mišić, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Zvečan, (m.misic@vts-zvecan.edu.rs)

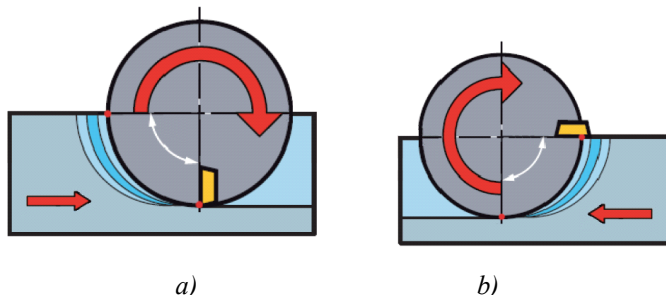
⁴⁾ Doc. dr Živče Šarkoćević, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, (zivcesarkocevic@yahoo.com)

⁵⁾ Prof. dr Ivica Čamagić, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, (ivica.camagic@pr.ac.rs)

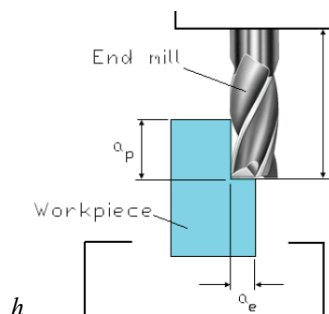
Osnovnim parametrima koji utiču na ponašanje obradnog procesa pripadaju: brzina rezanja, brzina pomoćnog kretanja (ili korak) i dubina i širina rezanja.

Dubina rezanja (a_e) ili radijalna dubina, predstavlja debljinu sloja koji se uklanja u procesu rezanja i određena je rastojanjem vrha zuba glodala od površine koja se obrađuje (slika 3). Maksimalna dubina rezanja može biti jednaka prečniku glodala.

Širina rezanja (b) ili aksijalna dubina (a_p) (u literaturi često koristi i ovaj termin), predstavlja maksimalnu dužinu zahvata obima glodala na obrađivanoj površini materijala (slika 3).



Slika 2. a) suprotnosmerno i b) istosmerno glodanje



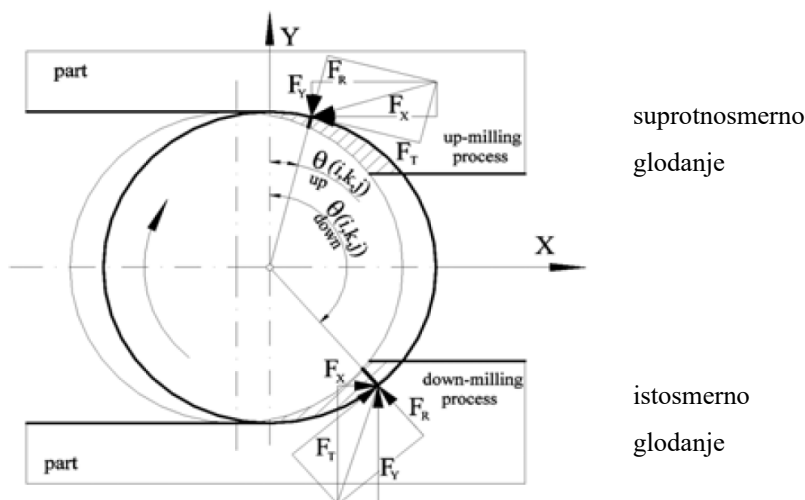
Slika 3. Osnovni parametri glodanja [2]

U ovom radu je analiziran uticaj ugiba (defleksije) alata na dimenzionalne nepravilnosti obrade kod suprotnosmernog i istosmernog glodanja vretenastim glodalom.

2. OTPORI REZANJA I DEFLEKSIJA

Da bi se predvidela greška tačnosti izrade dela u fazi planiranja procesa obrade, potrebno je predvideti otpore rezanja i ugibe alata prouzrokovane otporima rezanja. Faktori koji utiču na otpore rezanja su materijal predmeta obrade, geometrija alata i režimi rezanja. Dimenzione greške i greške oblika nastale pri obradi glodanjem su određene defleksijom alata normalno na površinu koja se obrađuje.

Rezultujući otpor rezanja i njegove komponente u pravcima x , y i z ose se mogu dobiti poznavanjem svih inkrementalnih tangencijalnih, radijalnih i aksijalnih sila koje deluju na rezni alat pri određenom uglu rotacije θ [4]. Specifičnosti procesa stvaranja strugotine kod istosmernog i suprotnosmernog glodanja odražavaju se na pravac i veličinu otpora rezanja u ravni upravnoj na osu glodala (slika 4). Otpor rezanja F_y upravan na pravac pomoćnog kretanja izaziva radijalno odstupanje reznog alata (defleksiju) u procesu glodanja koje direktno utiče na tačnost obrade. Kod istosmernog glodanja otpor rezanja F_y je veći nego ekvivalentni otpor kod suprotnosmernog glodanja [3].



Slika 4. Otpori rezanja kod suprotnosmernog i istosmernog glodanja [3]

Otpori rezanja koji deluju u x i y pravcu kod suprotnosmernog i istosmernog glodanja, ako se zanemari komponenta po z osi, (odnosno usvoji se da je ugao zavojnice glodala $\omega=0^\circ$) mogu se izraziti kao [5]:

- za suprotnosmerno glodanje:

$$F_x = F_t \cos(\theta_i) + F_r \sin(\theta_i)$$

$$F_y = F_t \sin(\theta_i) - F_r \cos(\theta_i)$$

- za istosmerno glodanje:

$$F_x = -F_t \cos(\theta_i) - F_r \sin(\theta_i)$$

$$F_y = F_t \sin(\theta_i) + F_r \cos(\theta_i)$$

Iz prethodnih jednačina se vidi da je u slučaju suprotnosmernog glodanja komponenta F_x veća, dok je kod istosmernog glodanja veća komponenta otpora F_y , koji zapravo i izaziva defleksiju, odnosno grešku obrade površine.

Defleksija alata koja se javlja u toku obrade, a posebno kada se koristi vretenasto glodalo manjeg prečnika, može da dovede do dimenzionalnih grešaka na predmetu obrade [6]. Defleksija reznog alata rezultira direktno od otpora rezanja [4]. Alat, odnosno vretenasto glodalo se može predstaviti statičkim modelom kao konzola (slika 5). Opšti slučaj dual-mode defleksije reznog alata je korišćen od strane velikog broja drugih istraživača [7, 2]. U ovom slučaju, devijacija reznog alata na udaljenosti h od mesta uklještenja duž ose z , usled dejstva radialnog otpora rezanja F , predstavlja zbir ugiba drške (cilindričnog dela) δ_s , ugiba ožlebljenog dela reznog alata δ_t i odstupanje na mestu h ugiba drške alata definisano uglom θ_s :

$$\delta(h) = \delta_s + \theta_s(h) + \delta_t(h)$$

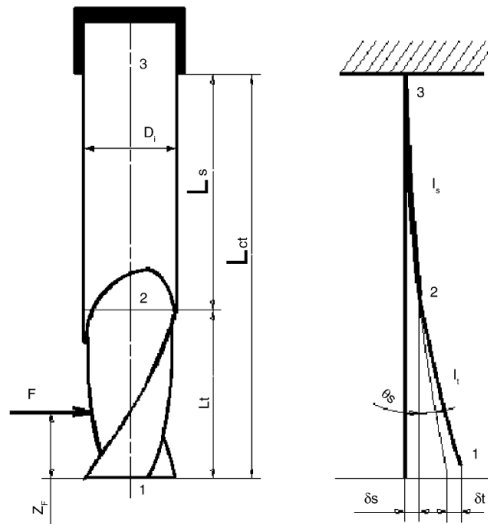
$$\delta_s = \frac{F}{6EI_s} \left[-(L_{ct} - L_t)^3 + 3(L_{ct} - L_t)^2(L_{ct} - z_F) \right]$$

$$\theta_s(h) = \frac{F}{2EI_s} \left[-(L_{ct} - L_t)^2 + 2(L_{ct} - L_t)(L_{ct} - z_F) \right] (L_t - h)$$

$$\delta_t(h) = \frac{F}{6EI_{ts}} \left[(\max(0, z_F - h))^3 - (L_t - h)^3 + 3(L_t - h)^2(L_t - z_F) \right]$$

U izrazima su:

- E - Young-ov modul elastičnosti,
- I_s i I_{ts} - momenti inercije poprečnog preseka drške i ožlebljenog dela glodala.

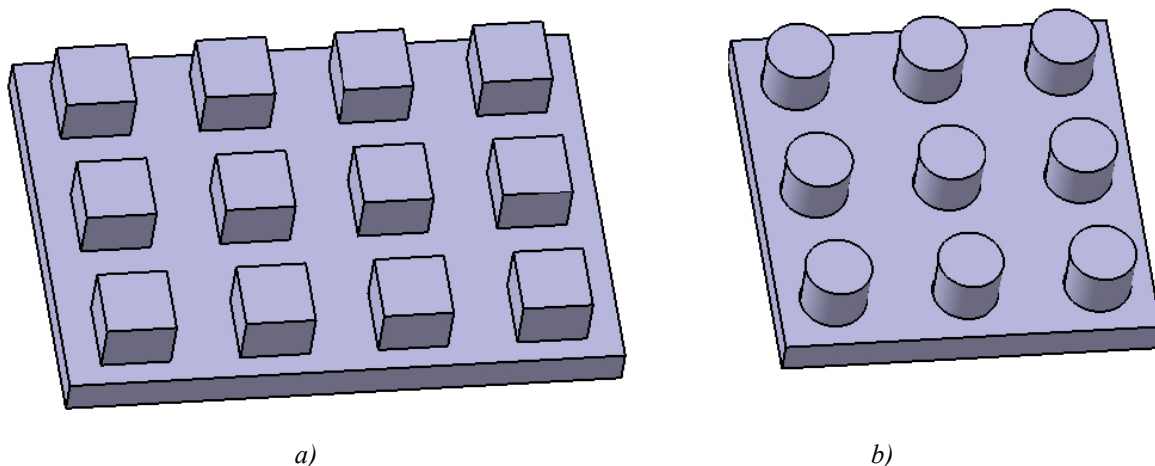


Slika 5. Rezni alat kao dvodelna cilindrična greda [4]

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

U ovom radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja koja su vršena na troosnoj vertikalnoj glodalici MIKRON VCP1350 sa tri CNC kontrolisane ose. Alat je ravno vretenasto glodalo Atorn VHM W45 DIN6535: prečnik 8 mm, dužina ožlebljenog dela 21 mm, dužina prepusta 25 mm, ukupna dužina 63 mm, ugao zavojnice 45° , broj zuba 4.

Predmet obrade su bile prizmatične ploče dimenzija 135x100x25 mm na kojima su sa jedne strane izrađeni prizmatični izdanci (slika 6a) dimenzija 20x20x12 mm. Drugi pripremljeni su bili dimenzija 95x95x25 mm, sa izrađenim cilindričnim izdancima dimenzija $\varnothing 20 \times 8$ mm (slika 6b). Prethodna izrada izdanaka je vršena sa vretenstvim glodalom prečnika 20 mm (velike krutosti) sa većim brojem prolaza. Na taj način su dobijeni izdanci tačnih dimenzija bez odstupanja usled moguće defleksije alata.



Slika 6. Modeli uzoraka na kojima je vršena obrada

Materijal predmeta obrade je duraluminijum (AlCuMg). Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHP) koristila se emulzija mineralnog emulgirajućeg ulja koncentracije 4%.

Dobijeni delovi su mereni na koordinatnoj mernoj mašini TESA Micro-Hite 3D Manual Machine Version 454 na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu.

Eksperimenti su izvedeni tako da je vršena njihova obrada sa dimenzija 20x20 visine 12 mm na dimenzije 15x15 mm sa različitim širinama glodanja (od 0.2 do 12 mm), slika 7.

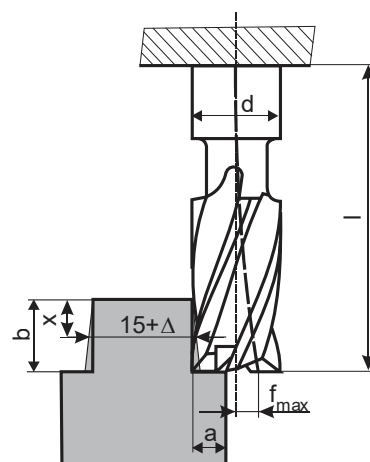
Isti eksperiment je urađen i sa cilindričnim izdancima dimenzija $\varnothing 20 \times 12$ mm. Ovi izdanci su obrađeni sa dubinom rezanja 2.5 mm sa prečnika 20 mm na prečnik 15 mm, sa različitim širinama rezanja u opsegu od 0.2 do 12 mm.

Eksperimenti su vršeni sa istosmernim i sa suprotnosmernim glodanjem.

Uslovi izvođenja eksperimenata su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Uslovi eksperimentalnih ispitivanja

Parametar	Prizmatični deo	Cilindrični deo
Broj obrtaja n , o/mon	3000	
Brzina pomoćnog kretanja f , mm/min	1000	
Korak po zubu, mm/zubu	0,08	
Broj zuba alata z	4	
Dubina rezanja a_e , mm	2,5	
Širina rezanja b (ili a_p), mm	12; 6; 4; 3; 2; 1,5; 1; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,2	12; 6; 4; 3; 2,5; 2; 0,8; 0,5; 0,2
Ugao kontakta ψ , °	8,10	



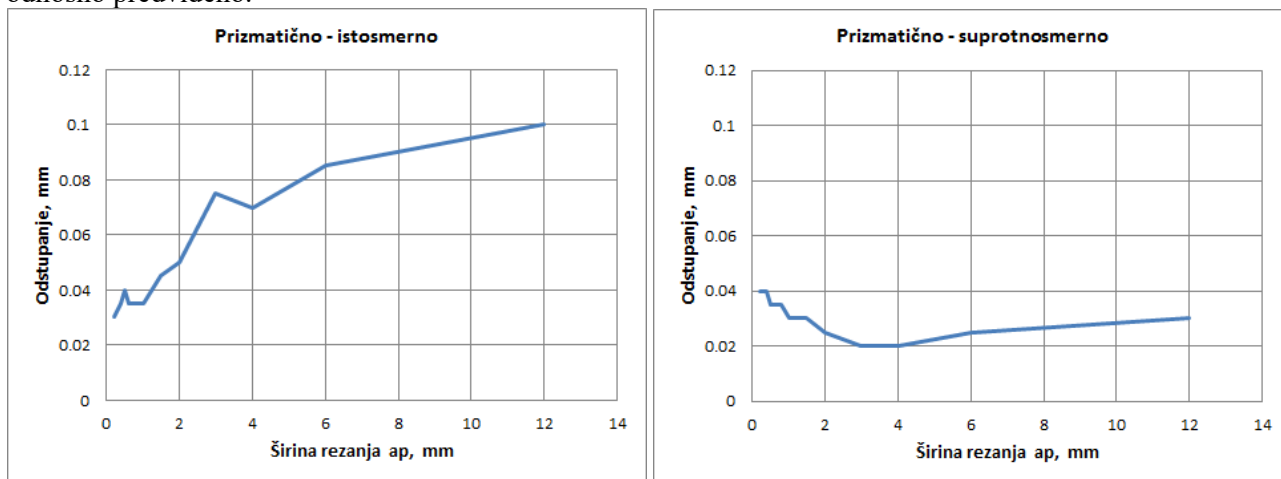
Slika 7. Širina obrade

Mernim pipkom koordinatne merne mašine je merena dimenzija izdanka tačno na polovini širine glodanja. Merenje je vršeno na većem broju mesta po dužini izdanka i kao rezultat korišćene su dobijene srednje vrednosti izmerenih.

4. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja odstupanja dimenzija izdanaka od očekivanih i CNC programom zadatih su prikazani na slikama 8 i 9.

Sa slike 8 se može uočiti da se kod istosmernog glodanja sa povećanjem širine rezanja povećava i odstupanje od nominalne mere, dok za suprotnosmerno glodanje važi obrnuto. Ovo se može objasniti time što kod istosmernog glodanja vretenasto glodalo sa povećanjem širine rezanja sve više teži da „pobegne“ (odbije se) od obrađivanog dela, dok kod suprotnosmernog glodanja alat sa povećanjem širine rezanja teži da privuče predmet obrade ka sebi. Na taj način zahvata se više materijala nego što je postupkom potrebno, odnosno predviđeno.

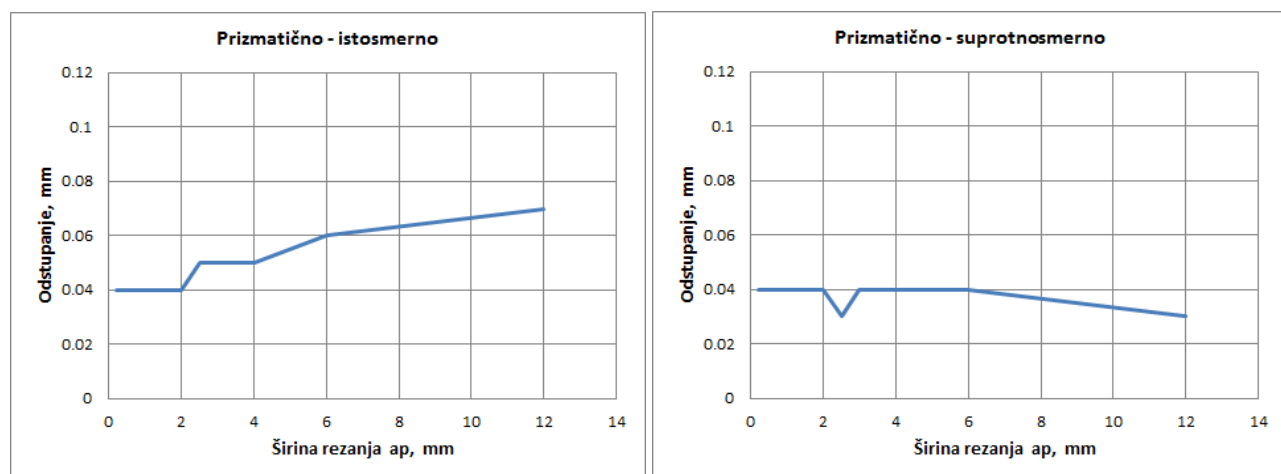


Merenje 1 (Δ_1)

Merenje 2 (Δ_2)

Slika 8. Dijagrami odstupanja za deo sa prizmatičnim izdancima

Za slike 9 isto važi kao i za prethodni slučaj. Takođe se može zaključiti da putanja (krivolinijska ili kružna) nema veliki uticaj na tačnost, već isključivo smer glodanja, dubina (aksijalna) i širina (radijalna) rezanja. Jedan od razloga da se istosmerno glodanje više primenjuje nego suprotnosmerno je što se alat odbija od konture, pa operater/programer uvek ima sigurnost da alat neće povrediti obrađivanu površinu, odnosno željenu meru napraviti manjom i da uvek može kompenzovati greške nastale u procesu glodanja.



Merenje 3 (Δ_3)

Merenje 4 (Δ_4)

Slika 9. Dijagrami odstupanja za deo sa cilindričnim izdancima

5. ZAKLJUČAK

Eksperimentalnim ispitivanjima je potvrđena zavisnost tačnosti obrade od uslova, odnosno od širine glodanja. Na osnovu izmerenih odstupanja formirane su korelativne zavisnosti odstupanja od širine glodanja.

Konstatovano je da su odstupanja kod istosmernog glodanja veća u odnosu na odstupanja dobijena pri suprotnosmernom glodanju pri istim ostalim uslovima rezanja.

Kod suprotnosmernog glodanja, sa povećanjem širine rezanja, alat ima težnju da zahvati veću materijala i deo približi sebi. To uzrokuje često manji ugib alata, a takođe dimenzija gotovog dela može biti manja od željene. Ovakva ispitivanja je potrebno vršiti i na čeliku, odstupanja su tada znatno veća, kao i habanje alata. Pored toga i druga slična ispitivanja se moraju vršiti radi uspostavljanja korelacije parametara rezanja i tačnosti obrade, a sve sa ciljem povećanja kvaliteta izrade programa za CNC mašinu.

6. LITERATURA

1. Dhiman V., Gupta D.: *A Review on Optimization of Process Parameters for Material Removal Rate and Surface Roughness for SS 202 Material During Face Milling Operation*, International Journal for Innovative Research in Science & Technology, Volume 1, Issue 11, pp. 377-381, 2015.
2. Gere J., Timoshenko S.: *Mechanics of Materials*, third ed., Chapman and Hall, 1995.
3. Dotcheva M., Dotchev K., Popov I.: *Modelling and Optimisation of Up-and Down-Milling Processes for a Representative Pocket Feature*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing, Vol. 14, No. 5, pp. 703-708, 2013.
4. Dotcheva M., Millward H.: *The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation*, Journal of Materials Processing Technology, No.170, pp. 284–297, 2005.
5. Alauddin M., Mazid M.A., El Baradi M.A., Hashmi M.S.J., *Cutting forces in the end milling of Inconel 718*, Journal of Materials Processing Technology, No. 77, pp. 153–159, 1998.
6. Depince P., Hascoet J.: *Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 1. Prediction of milled surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 46, pp. 937–944, 2006.
7. Xu A.P., Qu Y.X., Zhang D.W., Huang T.: *Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 43, pp. 283–292, 2003.

Lazarević, D., Nedić, B., Mišić M., Šarkoćević Ž., Čamagić, I.

INFLUENCE OF AXIAL DEPTH ON MACHINING ACCURACY OF END MILL MACHINING

Abstract: To predict a machining accuracy on a work piece, it's needed to predict the cutting forces. Factors that influence the cutting forces are materials of a working piece, geometry of a tool and cutting parameters. Cutting forces bring to deflections of tools that products dimensional errors on working pieces, especially when using flexible tools like end mill. This paper gives description of the milling operation through the cutting parameters, cutting forces and tool deflection, over the up and down milling. Results of the experiment are the dimensional errors caused by deflection at two described operations of milling for different values of axial depth and it is then discussed.

Key words: milling, cutting forces, deflection, up, down

ACKNOWLEDGEMENT

This paper is part of project TR35034 The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia.



N. Lukić, P. B. Petrović, L. Matijašević¹⁾

KONCEPTUALNI ASPEKTI KRUTOSTI NULE KONFIGURACIONOG PROSTORA RELEVANTNI ZA PROCES ROBOTIZOVANOG SPAJANJA ²⁾

Rezime

U radu su predstavljeni konceptualni aspekti upravljanja kretanja redundantne antropomorfne robotske ruke sa 7 stepeni slobode u konfiguracionom prostoru nule, sa ciljem postizanja svojstva generalizovane krutosti vrha robota koja su konzistentna sa osnovnim zahtevima procesa robotizovanog spajanja krutih delova. Teorijska istraživanja su bazirana na sintezi prostora nule pripadajuće Jakobijanove matrice i njenog komplementarnog projektora primenom metode redukovane stepenaste forme linearnog preslikavanja. Simulacioni eksperimenti potvrdili su očekivanu konvergentnost, stabilnost i efikasno dejstvo predloženog komplementarnog projektora na svojstva generisane generalizovane krutosti. Fizičkim eksperimentom demonstrirana je eksperimentalna procedura za pobudu i merenje ostvarenog kinetostatičkog ponašanja. Praktična demonstracija ostvarena je na kinematski redundantnoj robotskoj ruci Yaskawa SIA 10F sa upravljačkom platformom otvorene arhitekture, baziranoj na FS100 upravljačkom sistemu i MotoPlus SDK razvojnom sistemu.

Ključne reči: Kinematska redundansa, Krutost konfiguracionog prostora nule, Robotizovano spajanje

1. UVOD

U okviru ovog rada razmatraju se neki aspekti upravljanja krutosti (ili popustljivosti) mehanizma robotske ruke kao procesne veličine, što se sreće u širokoj klasi industrijskih zadataka, pre svega kod spajanja delova [1] koji se izdvaja svojom izuzetnom kompleksnošću, ali takođe i poliranje, mašinska obrada i slično.

U kontekstu robotizovane montaže, kada robot kao univerzalni manipulacioni sistem izvodi i proces spajanja delova, primena teorije popustljivo oslonjenih krutih delova [2] polazi od pretpostavke da je mehanizam robotske ruke beskonačno krut sistem. Ova pretpostavka je neodrživa, jer svaki od zglobova robota poseduje određenu popustljivost, pa odatle sledi i ukupna popustljivost robotske ruke posmatrano u odnosu na prostor radnog zadatka. Ovaj problem je davno prepoznat, kao i njegove konsekvence [3]. Međutim, mehanizam robotske ruke, umesto izvora popustljivosti nepoznatog karaktera koji narušava ukupno kinetostatičko ponašanje sistema za montažu, možemo posmatrati kao izvor popustljivosti programabilnih karakteristika, na čemu je fokus u ovom radu. Prethodno navedeno, otvara dva osnovna pitanja: 1) Zadatak produkcije željene ukupne krutosti kao programabilne procesne veličine, i 2) Pitanje potencijalnog konflikta zadatka upravljanja kretanjem i zadatka upravljanja popustljivošću, odnosno ostvarivanje komplementarnosti primarnog i sekundarnog zadatka iz kojih se sastoji zadatak spajanja. Potencijalni odgovor na ova pitanja autori rada traže u primeni kinematski redundantne robotske ruke, gde postoji mogućnost izvođenja unutrašnjih kretanja koja ne utiču na položaj karakteristične tačke vrha robota (TCP). Na taj način, potencijalno se stvara mogućnost istovremenog izvršavanja više zadataka. Teorijski okvir za upravljanje kinematskom redundansom bazira se na odlično fundiranom aparatu linearne algebre [4].

Rad je organizovan u četiri poglavlja. Nakon uvodnog dela u drugom poglavlju izložena je analiza svojstava krutosti u robotizovanom spajanju i analitička formulacija modela upravljanja. Rezultati praktične verifikacije prikazani su u trećem poglavlju. Četvrto poglavlje obuhvata zaključak i moguće pravce za dalja istraživanja.

¹⁾ Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Laboratorija za kibernetiku i mehatronske sisteme, doktorant Nikola Lukić, istraživač saradnik, (nlukic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Petar B. Petrović, (pbpetrovic@mas.bg.ac.rs), doktorant Lazar Matijašević, istraživač pripravnik (lmaticjasevic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu tehnološkog razvoja: TR35007 - Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju i na projektu bilateralne saradnje sa Kinom: Next generation technology for ubiquitous collaborative robotics – UbiCbot, koje finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj

2. KRUTOST KONFIGURACIONOG PROSTORA NULE

2.1 Osnovni zahtevi svojstava krutosti za proces spajanja delova

Proces spajanja delova je u osnovi kontaktni proces. Kod visoko preciznih spojeva sa zazorom vrednost zazora je reda veličine 0.01 mm, što je najmanje za red veličine manja vrednost od tačnosti pozicioniranja i sleđenja programirane trajektorije industrijskog robota (tipično oko 0.10 mm ili lošije), pa je kolizija nužna. Istovremeno, kod preciznih metalnih sklopova kod kojih sastavni delovi najčešće imaju visoku krutost i površinsku tvrdoću, kontaktne sile su velikog intenziteta sa izrazitom dinamičkom komponentom, podjednako u ortogonalnoj i tangencijalnoj ravni. Posebno su kritične pojave neregularnih stanja u procesu spajanja: zaglavljivanje i zaklinjavanje [2]. U opštem slučaju popustljivost proizvoljnih svojstava nema tendenciju da robotski sistem izvede iz neregularnog stanja. Suština je u tome da pasivna popustljiva jedinica (RCC) poseduje svojstvo mehaničke izotropnosti. RCC jedinica navedena svojstva popustljivog oslanjanja ostvaruje u fiktivnoj tački u prostoru, centru popustljivosti, čija je lokacija određena usvojenim parametrima njene mehaničke strukture. Odavde proizilaze osnovni zahtevi za svojstva popustljivosti, odnosno krutosti, robotske ruke relevantna za proces spajanja, pa se istraživanje dalje usmerava ka potencijalnom ostvarivanju ovih svojstava kao upravljive veličine u robotskim sistemima za montažu.

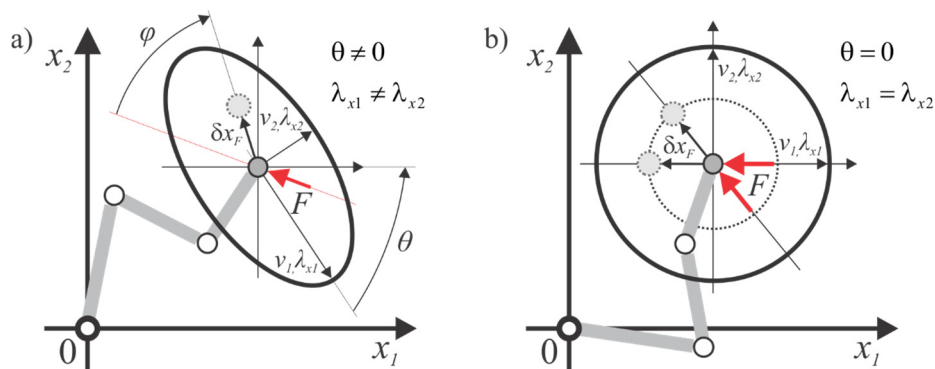
2.2 Kongruentne transformacije i karakterizacija matrice krutosti robotske ruke

Polaznu osnovu za analizu kinetostatičkog ponašanja sistema popustljivog oslanjanja predstavlja relacija $F=K_x\delta x$ koja povezuje vektor sile pobude $F\in R^m$ sa odzivom, pomerajem, $\delta x\in R^m$, gde je $K_x\in R^{m\times m}$ matricna funkcija preslikavanja, odnosno generalizovana krutost vrha robota, a m broj stepeni slobode u prostoru radnog zadatka $X\in R^{m\times m}$. Međutim, nije moguće direktno oblikovanje matrice K_x , jer je on rezultujuća veličina, već je to moguće posredno oblikovanjem matrice aktuacione krutosti $K_q\in R^{n\times n}$, gde je n broj stepeni slobode robota. Primenom kongruentne transformacije [5, 6] zadata forma matrice K_x se nakon preslikavanja u konfiguracioni prostor prevodi u matricu K_q čiji su nedijagonalni članovi u opštem slučaju različiti od nule. Problem nastaje kada je potrebno fizički realizovati matricu K_q takvog oblika [7]. Rešavanje ovog problema ovde se zasniva na kinematskoj redundansi robotskog mehanizma, sa ciljem da se sintetiše odgovarajući upravljački algoritam koji će omogućiti da se izabere konfiguracija koja je konzistentna sa dijagonalnim oblikom matrice K_q .

Željeni oblik matrice generalizovane krutosti $K_{x,d}$ prema zahtevima relevantnim za proces spajanja ima dijagonalnu formu. Na taj način se postiže da vektor odziva robotske ruke, pomeraj δx , bude kodirekcionalan sa pravcem dejstva vektora pobudne sile F . Karakter kinetostatičkog ponašanja vrha robotske ruke reprezentuje se elipsoidom krutosti u 3D, ili elipsom krutosti u 2D prostoru. Elipsoid se konstruiše na osnovu izračunatih sopstvenih vektora v i sopstvenih vrednosti λ matrice K_x , čime se određuje orijentacija glavne ose elipsoida i vrednost njegovih poluprečnika. Relacija matrice $K_x\in R^{m\times m}$ sa elementima sopstvenog sistema je sledeća:

$$K_x v_i = \lambda_{xi} v_i \rightarrow \begin{bmatrix} k_{x11} & \cdots & k_{x1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{xm1} & \cdots & k_{xmm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1i} \\ \vdots \\ v_{mi} \end{bmatrix} = \lambda_{xi} \begin{bmatrix} v_{1i} \\ \vdots \\ v_{mi} \end{bmatrix}, \quad i = 1, m \quad (1)$$

Dva karakteristična slučaja kinetostatičkog ponašanja reprezentovana elipsom krutosti, za ravanski model mehanizma robotske ruke ($q\in R^3, x\in R^2$), prikazana su grafički na slici 1, gde je θ ugao između glavne ose elipse i koordinatnog sistema radnog zadatka, a φ ugao kodirekcionalnosti pobude F i odziva δx .



Slika 1. Karakter kinetostatičkog ponašanja TCP robotske ruke ($q\in R^3, x\in R^2$) predstavljen elipsom krutosti: a) generalni slučaj, b) slučaj izotropnosti - idealno sa aspekta procesa spajanja (ponašanje RCC u lateralnoj ravni).

2.3 Analitička formulacija konfiguracionog prostora nule

Inverzno preslikavanje se kod kinematski redundantnih robota, prema instrumentarijumu linearne algebre [4, 8], sastoji iz dve komponente prirasta unutrašnjih koordinata, i to: 1) onih koje produkuju korespondentno kretanje TCP robota u radnom prostoru, koje nazivamo partikularnom komponentom δq_p i 2) takozvane homogene komponente δq_N koja produkuje nulti pomeraj TCP, odnosno kretanje mehanizma robotske ruke u konfiguracionom prostoru nule. Prethodno se analitički formuliše kao generalizovani model pomeraja [7, 9]:

$$\delta q = \delta q_p + \delta q_N = J^+(q)\delta x + P^c \delta q_0 \quad (2)$$

U izrazu (2) $J^+(q) \in R^{n \times m}$ predstavlja pseudoinverziju Jakobijan matrice $J(q) \in R^{m \times n}$, a δq_0 u opštem slučaju predstavlja proizvoljan vektor prirasta unutrašnjih koordinata razmatranog mehanizma robotske ruke, dok član P^c predstavlja komplementarni projektor koji vektor δq_0 projektuje u prostor nule. Prisustvo homogenog člana δq_N u relaciji (2) omogućuje izvođenje unutrašnjih kretanja koja ne utiču na sleđenje zadate trajektorije TCP robotske ruke. U slučaju procesa spajanja delova ovakvim kretanjima moguće je ostvariti sekundarni zadatak željenog kinetostatičkog ponašanja TCP kroz sintezu komplementarnog projektora $P^c \delta q_0$ za generisanje stanja mehaničke izotropnosti ili kompromisno rešenje kroz relaksaciju zahteva. Ovo predstavlja osnovu za povezivanje konfiguracionog prostora nule i generalizovane krutosti mehanizma redundantne robotske ruke.

U matematičkom smislu potrebno je prvo analitički formulisati prostor nule, gde se u ovde uvodi i koristi metod redukovane stepenaste forme linearnog preslikavanja Jakobijanove pravougaone matrice. Postupkom Gausove eliminacije generiše se matrica redukovane stepenaste forme J_R koja sadrži dva bloka: 1) podmatricu identiteta dimenzija $m \times m$, koja je korespondentna slici prostora radnog zadatka i 2) podmatricu koeficijenata linearno zavisnih vektora j_{Rmr} dimenzija $m \times r$, gde je $r = n - m$, koja je korespondentna nuli konfiguracionog prostora. Za ostvarivanje kretanja u prostoru nule potrebno je formulisati zavisnost komponenta infinitezimalnog vektora priraštaja unutrašnjih koordinata mehanizma robotske ruke δq , takvih da produkuju nulto kretanje u radnom prostoru $\delta x = 0$. Eksplicitnim oblikom ove zavisnosti u matricnom zapisu definiše se prostor nule N_J , odakle dalje može da se formuliše komplementarni projektor P^c u matematičkom smislu:

$$\begin{bmatrix} \delta q_1 \\ \vdots \\ \delta q_m \\ \delta q_{m+1} \\ \vdots \\ \delta q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta q_{m+1} \cdot j_{R11} \dots - \delta q_n \cdot j_{R1r} \\ \vdots \\ -\delta q_{m+1} \cdot j_{Rm1} \dots - \delta q_n \cdot j_{Rmr} \\ \delta q_{m+1} \\ \vdots \\ \delta q_n \end{bmatrix} = \delta q_{m+1} \begin{bmatrix} -j_{R11} \\ \vdots \\ -j_{Rm1} \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \dots + \delta q_n \begin{bmatrix} -j_{R1r} \\ \vdots \\ -j_{Rmr} \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow N_J = \begin{bmatrix} -j_{R11} & \dots & -j_{R1r} \\ \vdots & & \vdots \\ -j_{Rm1} & \dots & -j_{Rmr} \\ 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P^c = N_J (N_J^T N_J)^{-1} N_J^T = N_J N_J^+ \quad (4)$$

2.4 Sinteza optimalnog komplementarnog projektora

Analizom preslikavanja krutosti iz radnog u konfiguracioni prostor može se uvideti da je matrica K_q funkcija unutrašnjih koordinata, pa svako kretanje u konfiguracionom prostoru nule implicitno ima uticaj na promenu vrednosti članova matrice generalizovane krutosti K_x kroz inverznu kongruentnu transformaciju [7]:

$$K_x(q, K_q) = J^{+T}(q) K_q J^+(q), \quad K_x \in R^{m \times m} \quad (5)$$

Uspostavljanjem odgovarajućeg kriterijuma $u = u(q, K_q(K_{xd}))$ i njegovog gradijentnog vektora $\delta q_c = \nabla(u)$, može da se sintetiše komplementarni projektor koji će produkovati dijagonalnu formu matrice aktuacione krutosti nekonfliktnu sa realizacijom primarnog zadatka ostvarivanja zadate trajektorije vrha robotske ruke. Sledstveno, kriterijumska funkcija za posrednu minimizaciju odstupanja stvarne od željene generalizovane krutosti robotske ruke, definiše se normom nedijagonalnih članova matrice aktuacione krutosti K_q [6]:

$$u(q, K_{xd}) = \left\| k_{q-ij}(q, K_{xd}) \right\|_{\substack{n(n-1) \\ 2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^n (k_{q-ij}(K_{xd}, q))^2} \quad (6)$$

Primenom gradijentnog metoda nad kriterijumskom funkcijom (6) generiše se vektor priraštaja $\delta q_0 = \delta q_c$, i na osnovu (4) sintetiše optimalni komplementarni projektor izotropne popustljivosti redundantne robotske ruke kao homogeni član modela generalizovanog pomeraja (2):

$$P_{IC}^c(q) = \delta q_N = P^c(q) \cdot \delta q_c = N_J N_J^+ \left(\frac{\partial}{\partial q} u(q) \right) \quad (7)$$

Za ostvarivanje kinematske konzistentnosti primarnog i sekundarnog zadatka ovde se uvodi kategoričko ograničenje δq_{Nmax} homogene komponente kao maksimalna dozvoljena norma vektora prirasta δq_N .

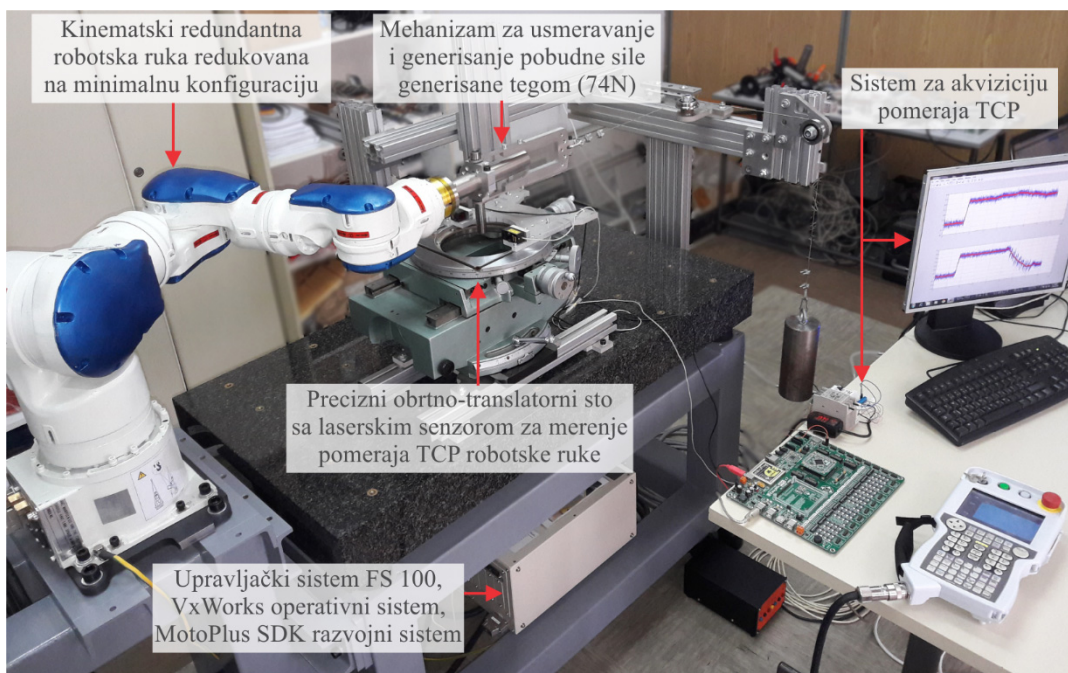
3. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Verifikacija sintetisanog projektora (7) je sprovedena na redundantnom robotu minimalne konfiguracije ($m=2 \rightarrow x \in R^2$; $n=3 \rightarrow q \in R^3$), gde se kinetostatičko ponašanje reprezentuje sa matricama $K_x \in R^{2 \times 2}$ i $K_q \in R^{3 \times 3}$. Verifikacija je izvedena simulaciono i fizički, sa sledećom strukturom radnog zadatka: 1) Primarni zadatak: održavanje zadate inicijalne pozicije TCP, odnosno $x(t) = x_d \in R^2 = const$; 2) Sekundarni zadatak: dostizanje željenih karakteristika popustljivosti $K_x(t) \rightarrow K_{xd} \in R^{2 \times 2}$. Prema modelu pomeraja (2), sledi da se u ovom slučaju priraštaj unutrašnjih koordinata degeneriše na homogenu komponentu, odnosno $\delta q = \delta q_N = P_{IC}^c(q)$. Ovakvom kompozicijom radnog zadatka stvaraju se specifični uslovi u ukupnom konfiguracionom prostoru robota koji omogućavaju praćenje ponašanja sistema samo pod uticajem sintetisanog komplementarnog projektora izotropne popustljivosti (7).

3.1 Postavka simulacionog i fizičkog eksperimenta

Verifikacija je izvedena za sledeće parametre primarnog i sekundarnog zadatka: $x_d = [0.734, -0.090](m)$; $q_{in} = [0.60, -1.70, 1.20](rad)$; $\delta q_{Nmax} = 0.01(rad)$; $K_{xd} = diag [0.1, 0.1](N/m)$; $F_{x1} = [74, 0]$ i $F_{x2} = [74, 0](N)$; gde q_{in} predstavlja inicijalnu konfiguraciju a F_{x1} i F_{x2} pobudne sile u dva međusobno ortogonalna pravca. Dužine segmenata su usvojene tako da su identične robotskoj ruci Yaskawa SIA10F u ravanskoj konfiguraciji: $l1=l2=0.36m$, $l3=0.275m$, čime se postiže uporedivost rezultata simulacione i fizičke verifikacije.

Eksperimentalna platforma za fizičku verifikaciju komplementarnog projektora (7) sastoji se od sledećih modula (slika 2): 1) Industrijski robot Yaskawa SIA10F; 2) Upravljačka platforma otvorene arhitekture: FS100 sistem nadograđen bibliotekama MotoPlus SDK; 3) Modul za merenje pomeraja TCP robotske ruke (laserski senzor Omron ZX-LT010 postavljen na precizni obrtno-translatorni sto); 4) Modul za generisanje i usmeravanje pobudne sile TCP robota; 5) Modul za akviziciju pomeraja TCP robotske ruke.

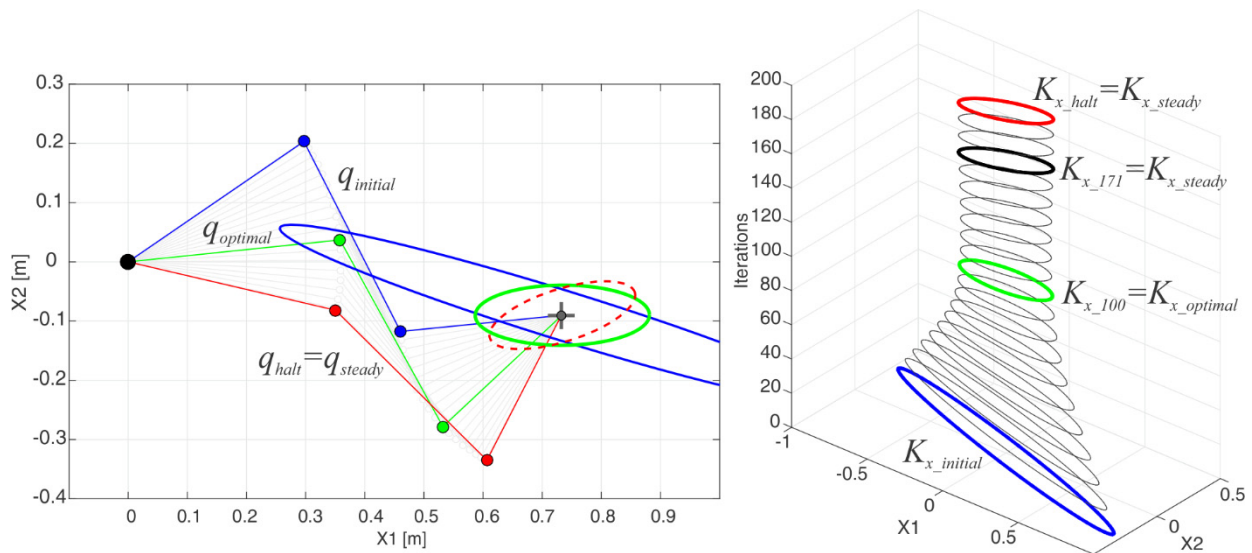


Slika 2. Eksperimentalna platforma za fizičku verifikaciju predloženog koncepta upravljanja kinetostatičkim svojstvima zglobnog mehanizma robotske ruke Yaskawa SIA 10F na bazi komplementarnog projektora izotropne popustljivosti (7)

3.2 Rezultati

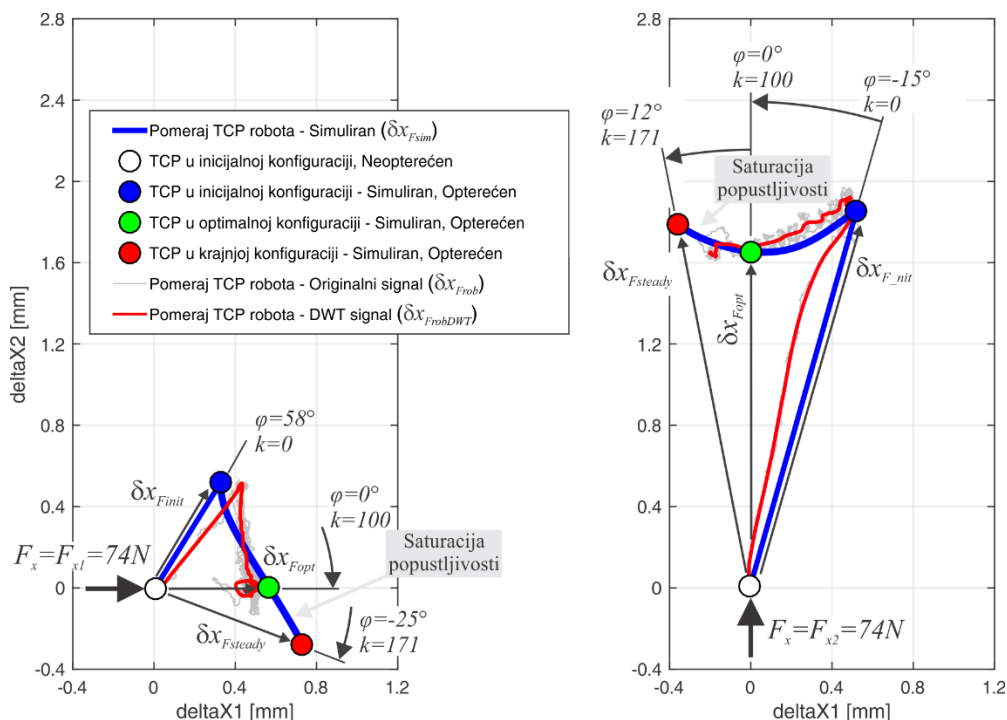
Izvođenjem simulacionog eksperimenta prema prikazanoj postavci oblikuje se matrica generalizovane krutosti K_x , tako da se inicijalno stanje dovodi u optimalno pod dejstvom projektora (7). U skladu sa teorijskim postavkama, prema izrazu (1), kinetostatička svojstva u prostoru radnog zadatka mogu se reprezentovati na osnovu elemenata sopstvenog sistema matrice K_x . U razmatranom slučaju postoje dve sopstvene vrednosti, λ_{x1} i λ_{x2} , sa pripadajućim sopstvenim vektorima, v_1 i v_2 , odakle je moguće formirati jednačinu elipse [10].

Na slici 3 su prikazani rezultati simulacionog eksperimenta koji je izveden u $k=200$ iteracija. Inicijalna konfiguracija $q_{initial}$ i pripadajuća svojstva krutosti robotske ruke prikazana su plavom bojom, stabilno stanje koje je ujedno i krajnje $q_{steady}=q_{halt}$ crnom i crvenom, respektivno, a optimalno $q_{optimal}$ zelenom bojom. Prikazane elipse su normirane prema najvećoj sopstvenoj vrednosti $\lambda_{x_{max}}$ u kompletном eksperimentu.



Slika 3. Kretanje robotske ruke u konfiguracionom prostoru nule i korespondentna evolucija elipse krutosti

Fizička verifikacija je izvedena na eksperimentalnoj robotskoj platformi prikazanoj na slici 2, u svemu ekvivalentnoj simulacionom eksperimentu. Identifikacija kinetostatičkih svojstava tokom generisanog kretanja sprovedena je indirektno, merenjem pomeraja TCP robota, δx_F , kao odziva na eksternu pobudu silom F_x . Poređenje simulacionih i fizičkih rezultata δx_{Fsim} i δx_{Frob} prikazano je na slici 4, uz obradu i aproksimaciju originalnog signala multirezolucijskom dekompozicijom (DWT), $\delta x_{FrobDWT}$.



Slika 4. Verifikacija komplementarnog projektora (7) – komparativni prikaz simulacionog i fizički ostvareno pomeraja

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu su predstavljeni rezultati teorijskih i eksperimentalnih istraživanja upravljanja kinetostatičkim ponašanjem kinematski redundantne robotske ruke relevantnim za proces robotizovanog spajanja delova visoke geometrijske preciznosti. U skladu sa identifikovanim osnovnim zahtevima za svojstva krutosti, koja garantuju uspešan tok procesa spajanja, sintetisan je komplementarni projektor za upravljanje krutošću konfiguracionog prostora nule. Ponašanje sintetisanog komplementarnog projektora izotropne popustljivosti (7) prvo je verifikovano simulacijom, a zatim i fizičkim eksperimentima, njegovom implementacijom na redundantnom antropomorfnom robotu Yaskawa SIA10F opremljenom upravljačkim sistemom otvorene arhitekture i sistemom za generisanje mehaničke pobude i merenje odziva TCP robota. Eksperimentalni rezultati ukazuju na moguću primenljivost postavljenog koncepta u fizičkom okruženju, pri čemu je ostvarena visoka korelacija između simulacionih i eksperimentalnih rezultata. Takođe, uočljivi su i određeni nedostaci i ograničenja, čiji uzrok su pre svega nesavršenosti aktacionog mehanizma robotske ruke (nelinearnosti tipa zazora i trenja, kao i pojava zasićenja popustljivosti zglobova robotske ruke). Pored prethodnog, ostaje niz otvorenih pitanja vezanih za izbegavanje singulariteta, dinamičku konzistentnost, i takođe određivanje potrebne dimenzije konfiguracionog prostora nule, odnosno stepena kinematske redundanse ($r=n-m$) i njegove implikacije na performanse sekundarnog zadatka.

5. LITERATURA

- [1] H. Chen, J. Wang, G. Zhang, T. Fuhlbrigge, and Kock S.: *High-precision assembly automation based on robot compliance*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 9-10, pp. 999–1006, 2009.
- [2] D.E. Whitney: *Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 104, No. 1, pp. 65–77, 1982.
- [3] T.L. De Fazio, D.S. Seltzer, and D.E. Whitney: *The instrumented remote center compliance*, Industrial Robot, Vol. 11, No. 4, pp. 238–242, 1984.
- [4] H. Yanai, K. Takeuchi, and Y. Takane: *Projection Matrices, Generalizes Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition*. Springer, New York, 2011.
- [5] J. Salisbury: *Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates*, 19th IEEE International Conference on Decision and Control, pp. 95–100. Albuquerque, NM, USA, IEEE, 10-12 Dec., 1980.
- [6] Petar B. Petrovic, Nikola Lukic: *Configuration-based compliance control of kinematically redundant robot arm, part I - theoretical framework*, FME, Vol. 45, No. 4, pp. 468–474, 2017. ISSN 2406-128X.
- [7] Nikola Lukic, Petar B. Petrovic: *Complementary projector for null-space stiffness control of redundant assembly robot arm*, Assembly Automation, Vol. 39, No. 4, 696–714, 2019.
- [8] Gilbert Strang: *Linear Algebra and Its Applications*. Thomson, Brooks/Cole, USA, 4th edition, 2005.
- [9] B. Siciliano and J. J. Slotine. *A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems*, In Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics, pp. 1211–1216., Pisa, Italy, IEEE, 19-22 June, 1991.
- [10] E.H. Lockwood: *A Book of Curves*. The Syndics of the Cambridge University Press, London, 1961.

N. Lukić, P. B. Petrović, L. Matijašević

CONCEPTUAL ASPECTS OF NULLSPACE STIFFNESS RELEVANT TO ROBOTIC PART MATING

Abstract: *This paper presents the conceptual aspects of nullspace motion control of a redundant anthropomorphic robotic arm with 7 degrees of freedom, with the goal of achieving generalized stiffness properties of the robot TCP that are consistent with the basic requirements of the robotic part mating process of rigid parts. Theoretical research is based on the nullspace formulation of the Jacobian matrix and its corresponding complementary projector using the method of reduced row echelon form of linear mapping. Simulation experiments showed the convergence, stability and efficient influence of the proposed complementary projector on the generalized stiffness properties of the robot arm. A physical experiment demonstrated an experimental procedure for excitation and measurement of realized kinetostatic behavior. The practical demonstration was realized on a kinematically redundant robotic arm Yaskawa SIA 10F with an open architecture control platform, based on the FS100 control system and MotoPlus SDK development system.*

Key words: *Kinematic Redundancy, Nullspace Stiffness, Robotic Part Mating*



PODAKTUIRANI SISTEMI ZA ROBOTSKO HVATANJE I MANIPULACIJU OBJEKTIMA U TEHNOLOGIJI ROBOTSKE MONTAŽE – RAZVOJ CMSysLab ROBOTSKE ŠAKE²⁾

Rezime

Postojeći sistemi za automatsku montažu bazirani su na vrlo jednostavnim sistemima za hvatanje i manipulaciju objektima. Nova proizvodna paradigma kastomizovane montaže nameće potrebu za razvojem bitno fleksibilnijih rešenja, sa ugrađenim visokim stepenom fleksibilnosti, do tog nivoa da se u nekim aspektima približavaju tehnološkim sposobnostima same ljudske šake. Po pitanju mehaničke kompleksnosti, gabarita, upravljanja, i posebno cene, podaktuirani sistemi se izdvajaju kao dobar kompromis. U ovom radu je predstavljen konceptualni okvir za razvoj višeprstog podaktuiranog sistema za hvatanje i manipulaciju objektima – CMSysLab robotska šaka. Navodi se analiza kontaktnih sila, odnosno slika sila hvatanja podaktuiranog robotskog prsta sa fokusom na njihovu distribuciju na falange i uticaja na optimizaciju kinematske konfiguracije i konstrukcije prsta, kao i njegovog sistema akcije.

Ključne reči: Robotska montaža, Robotska šaka, Podaktuirana struktura

1. LJUDSKA ŠAKA KAO INSPIRACIJA

Moderni industrijski robotski sistemi za manipulaciju objektima, robotske ruke, prevazilaze u mnogim aspektima mogućnosti ljudske ruke. Robotske ruke su sposobne da podižu neuporedivo veće terete, brži su od čoveka i ponovljivost pozicioniranja im je veća. Uprkos svemu pomenutom, kada analiziramo postupak samog hvatanja objekta manipulacije, situacija je potpuno drugačija. Ljudska šaka je u tom smislu još uvek nedostižna.

Ljudska šaka je standardna inspiracija istraživačima u oblasti robotike već decenijama. Više je razloga za to. Prvo, jedna od glavnih karakteristika ljudske šake jeste njena fleksibilnost, a to je karakteristika koju istraživači teže da implementiraju u što je većoj meri moguće na robotske sisteme za hvatanje i manipulaciju objektima. Drugo, ako posmatramo objekte manipulacije, lako se dolazi do zaključka da je većina objekata u okruženju projektovana i napravljena tako da odgovara proporcijama i mogućnostima ljudske šake i stoga, imitacija ljudske šake, predstavlja logičan izbor prilikom projektovanja ovakvih sistema. Treće, ova oblast robotike je usko povezana sa oblašću protetike i ljudskih pomagala, i zbog toga su proporcije ljudske šake prosto jedan od funkcionalnih zahteva prilikom projektovanja različitih sistema za hvatanje. Iako su lako shvatljivi razlozi zbog kojih je imitacija ljudske šake poželjna, taj zadatak nije nimalo jednostavan.

Sa mehaničke strane, ljudska šaka je jedan izuzetno kompleksan sistem. Ona sadrži dvadeset i dva zgloba koji su aktuirani uz pomoć skoro trideset mišića i kompleksne mreže tetiva [1]. Cela šaka je prekrivena kožom, organom koji ima veštruku ulogu u samom funkcionisanju šake [2]. Koža šake ima zadatak da zaštiti unutrašnjost šake i zbog te uloge ona je prilično zadebljala na strani dlana. To daje ljudskoj šaci prilično veliku robusnost. Da bi pomogla prilikom procesa hvatanja objekta, koža dlana je fleksibilna dovoljno da se oblikuje objektu manipulacije, na sebi ima ispupčenja koja omogućuju bolje prijanjanje između kože i objekta manipulacije i na kraju na koži dlana se nalazi veliki broj receptora, koji koži daju veliki stepen senzitivnosti koji omogućava šaci, zajedno sa ostalim karakteristikama, da uvek ostvari stabilno hvatanje. Čovek ima mogućnost da obavlja različite poslove kada je u pitanju hvatanje i manipulacija objektima koristeći šake. Raspon poslova koje može da obavlja, sa istim alatom, šakama, seže od najosetljivijih radnji (operacije na

¹⁾ doktorand Lazar Matijašević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (lmaticasevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Petar B. Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (pbpetrovic@mas.bg.ac.rs), doktorand Nikola Lukić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (nlukic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu tehnološkog razvoja TR35007 - Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju i projektu bilateralne saradnje sa Kinom „Next generation technology for ubiquitous collaborative robotics – UbiCbot“, koje finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj

mozgu) do izuzetno grubih radnji kao što su manipulacija teškim teretom u skladištima. Takav stepen fleksibilnosti mehaničkih sistema još nije dostignut.

Sa druge strane, potpuno razumevanje i implementacija kognitivnih aspekata hvatanja objekata, kod čoveka, predstavlja ozbiljnu prepreku u razvoju robotskih sistema za hvatanje i manipulaciju. Proces hvatanja i manipulacije, kod ljudi, predstavlja potpunu sinergiju motoričkih i kognitivnih sposobnosti čoveka. To je izuzetno kompleksan proces i teško ga je softverski reprodukovati [3]. Sam proces se oslanja na planiranje toka hvatanja i manipulacije koje je bazirano na prethodnim iskustvima i na motoričke sposobnosti šake da manipulise objektom. Sam postupak planiranja toka hvatanja kod čoveka je izuzetno kompleksan.

Razlog zbog kog je izuzetno teško softverski (matematički) opisati postupak hvatanja [3], leži u tome što se ti procesi u većini slučajeva dešavaju podsvesno i spadaju u niže kognitivne funkcije, funkcije organizma koje su usađene u sam sistem funkcionisanja tela. Više kognitivne funkcije, npr. igranje šaha, je jednostavnije automatizovati i mnogi istraživači su složni u oceni da je to posledica evolucije odnosno toga da su se lokomotorne sposobnosti čoveka razvile mnogo pre sposobnosti za apstraktnim razmišljanjem. To dovodi to paradoksa da su procesi koje čovek smatra trivijalnim, npr. manipulacija mehanim objektima (tkaninom), za robota izuzetno teški, a apstraktne procese, tipa planiranja svih poteza u partiji šaha, mašina može da obavi bez većih problema.

Kod planiranja toka hvatanja, čovek se najviše oslanja na vizuelnu povratnu spregu, koja ima veliku ulogu, posebno u samom postupku učenja postupka hvatanja (kod dece). Pored vizuelnih stimulansa, osetljivost nervnog sistema čoveka, na taktilni stimulans preko kože šake, je takodje od velikog značaja za sam proces hvatanja i u nekim slučajevima može potpuno i uspešno odmeniti potrebu za vizuelnom povratnom spregom. Dodirivanjem objekata se može dobiti informacija o gabaritima, čvrstoći, težini pa čak i o materijalu objekta.

Trenutno stanje tehnologije ne omogućava da se ispune svi gore pomenuti zahtevi da bi se projektovala robotska šaka koja u potpunosti može odmeniti ljudsku šaku u rešavanju izazova koje postavlja tehnologija robotske montaže. Ovo istraživanje ima za cilj projektovanje i razvoj sistema za robotsko hvatanje koji je primenjiv u industrijskim uslovima i shodno tome, sistem mora biti prihvatljiv sa aspekta troškova i mora biti izuzetno robustan. Približavanjem karakteristika robotskog hvatača karakteristikama ljudske šake, sistem postaje kompleksniji, a što je mehanički sistem kompleksniji, to je skuplji i manje robustan. To dovodi do pojave čitave lepeze postojećih rešenja sistema za hvatanje koji se primenjuju u industriji za rešavanje različitih zadataka koje iziskuje tehnologija robotske montaže.

2. OKVIRI TEHNOLOGIJE ROBOTSKOG HVATANJA

Postojeći sistemi za robotsko hvatanje i manipulaciju, koji se koriste u industriji su relativno jednostavni mehanizmi koji se projektuju za konkretne zadatke. Takvi sistemi su cenovno dostupniji i robusni su, što primena u industrijskim uslovima i zahteva. Kada se uzme u obzir da se odabir robotskog hvatača vrši na osnovu zadatka koji treba da izvrši, na osnovu oblika objekta kojim se manipuliše, težine i mnogih drugih faktora, lako se dolazi do zaključka da tako odabrani sistemi nisu fleksibilni, u dovoljnoj meri.

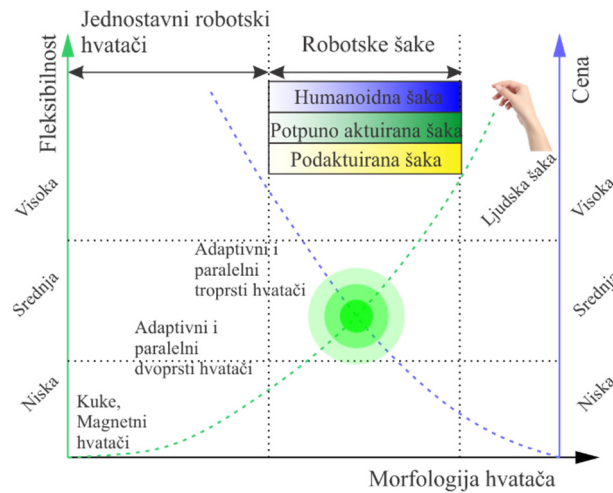
Nova proizvodna paradigma kastomizovane montaže nameće potrebu za razvojem bitno fleksibilnijih rešenja, sa ugrađenim visokim stepenom fleksibilnosti, do tog nivoa da se u nekim aspektima približavaju tehnološkim sposobnostima same ljudske šake. Zbog svega pomenutog, situacija je takva da postoji mnogo različitih tipova robotskih hvatača i potrebno ih je klasifikovati. Klasifikacija robotskih hvatača [4] se može izvršiti po više osnova: prema morfologiji hvatača, prema veličini, prema tipu akcije, prema krutosti samog hvatača kao i prema okruženju u kome treba da izvršava svoj zadatak. Za potrebe ovog rada biće prikazana samo klasifikacija prema morfologiji robotskih hvatača.

2.1 Podela robotskih hvatača prema morfologiji

Prema morfologiji, robotski hvatači se mogu podeliti u dve osnovne grupe: jednostavne robotske hvatače i robotske šake, što je prikazano na slici 1 [5]. Pored mehaničkih karakteristika, glavna razlika između ove dve grupe robotskih hvatača je u nivou fleksibilnosti unutar same šake[6]. Fleksibilnost u ovom smislu, kod robotskih hvatača se ogleda u mogućnosti da se izvrši manipulacija nad objektom unutar samog hvatača, nakon što se objekat uhvati. Ekvivalent kod ljudske šake jeste mogućnost pomeranja olovke u šaci prilikom pisanja.

Jednostavni robotski hvatači, su relativno jednostavni mehanizmi koji funkcionišu prema prostim principima i ne mogu vršiti manipulaciju objektom unutar samog hvatača. Karakteristični primeri robotskih hvatača iz ove grupe se kreću od jednostavnih kuka, pneumatskih hvatača za lake fleksibilne materijale, magnetnih hvatača za objekte od feromagnetnih materijala, do hvatača sa dva ili tri prsta. Robotski hvatači sa dva ili tri prsta mogu biti paralelni ili adaptivni. Kao što je već rečeno, fleksibilnost ovih hvatača je izuzetno ograničena. Robotske šake se mogu podeliti u tri podgrupe. To su: podaktuirane robotske šake (kod kojih je

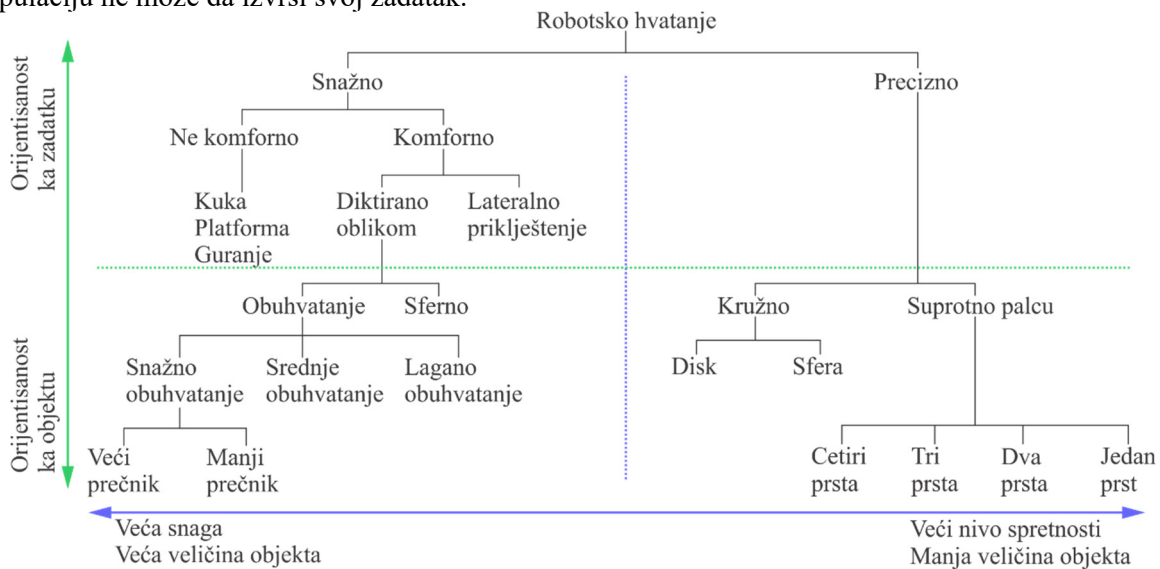
broj stepeni slobode prsta veći od broja aktuatora prsta), potpuno aktuirane robotske šake (kod kojih je broj stepeni slobode prsta jednak broju aktuatora prsta) i humanoidne robotske šake. Kod humanoidnih robotskih šaka teži se potpunoj rekonstrukciji karakteristika ljudske šake. To ovaj tip robotskih šaka čini izuzetno kompleksnim i skupim te još uvek nisu tema razvoja, kada se priča o industrijskoj primeni.



Slika 1. Grafički prikaz klasifikacije robotskih hvatača, od jednostavnih kuka do ljudske šake, u zavisnosti od njihove morfologije, fleksibilnosti i cene.

Da bi se generisalo optimalno rešenje robotskog sistema za hvatanje i manipulaciju, koji je primenjiv u industrijskim uslovima, mora se napraviti kompromis između cene i željene fleksibilnosti i na slici 1 je to predstavljeno grafički. Zona označena zelenim krugovima, označava zonu u kojoj je dovoljno da se nađu karakteristike sistema za hvatanje i manipulaciju, da bi on bio industrijski prihvatljiv. Kako je prostor robotskog hvatanja multidimenzioni, koji se proteže od mehaničkih karakteristika, preko kompleksnosti upravljanja, pa sve do kognicije, evidentno je da slika 1 ne prikazuje taj kompletan prostor.

Robotske šake moraju da daju mogućnost potpunom robotskom sistemu da izvrši razne tipove hvatanja [2], koji su grafički prikazani na slici 2. Bez mogućnosti da se prilagodi objektu, kompletan robotski sistem za manipulaciju ne može da izvrši svoj zadatak.



Slika 2. Klasifikacija zadataka hvatanja.

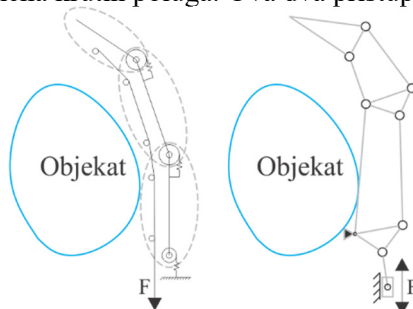
Kao što se vidi sa slike 2, različite vrste hvatanja mogu biti posmatrane sa aspekta zadatka i sa aspekta objekta. Jedan zadatak, posmatrano sa aspekta objekta, može da se izvrši na jedan način, a posmatrano sa aspekta zadatka, na više načina. Shodno tome, projektovani sistem za robotsko hvatanje mora posedovati upravljački podsistem koji može u realnom vremenu da analizira različite moguće načine rešavanja datog zadatka i da pronade optimalno rešenje. Sa mehaničke strane, projektovani sistem mora imati ugrađenu fleksibilnost dovoljnu da izvrši kretanje koje se pokaže optimalnim. Potpuno aktuirane robotske šake, posmatrano kinematski, na prvi pogled se pokazuju kao pravo rešenje za sistem robotskog hvatanja, međutim to nije u potpunosti tačno. Trenutno stanje tehnologije dovodi do toga da je kompletan sistem za aktuaciju

potpuno aktuiranih robotskih šaka, gabaritno preveliki, pretežak i skup. Upravo karakteristike koje nisu prihvatljive u industrijskoj primeni. Stoga, podaktuirane robotske šake, predstavljaju pravi kompromis između cene, robusnosti i fleksibilnosti i predstavljaju optimalno rešenje za većinu funkcionalnih zahteva u oblasti tehnologije robotizovane montaže.

2.2 Podaktuirani sistemi

Pojam podaktuiranih sistema je relativno star koncept u robotici. Praktično on predstavlja karakteristiku sistema da poseduje manje aktuatora nego što ima stepeni slobode. Kod robotskih hvatača, to znači da se generiše sistem kojim je jednostavnije upravljati i sistem koji se mehanički prilagođava objektu manipulacije, što je jedna od karakteristika podaktuiranih struktura [7].

Dva najpopularnija i veoma korišćena pristupa, kada se govori o podaktuiranim višerprstim robotskim hvatačima, jesu primena tetiva i primena krutih poluga. Ova dva pristupa su prikazani na slici 3.



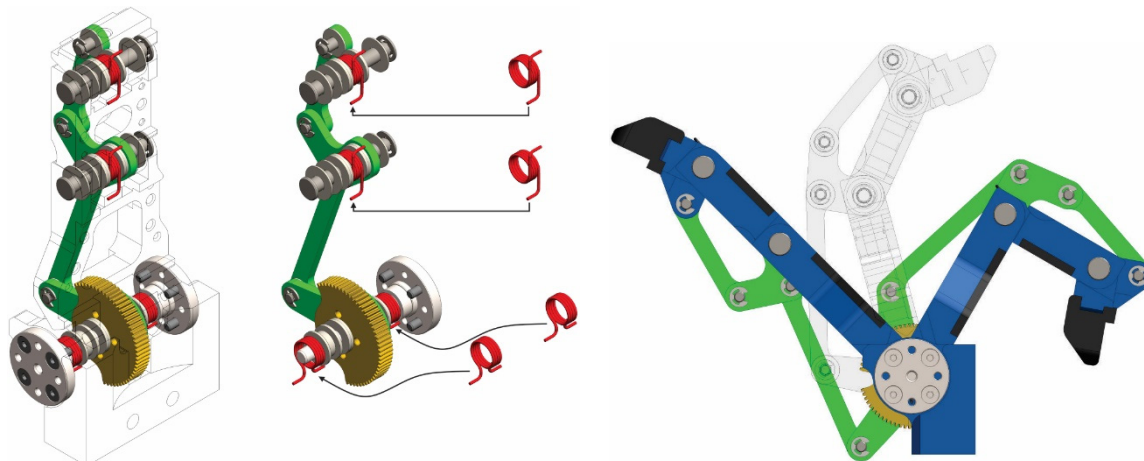
Slika 3. Podaktuirani robotski prsti sa tetivama (levo) i krutim polugama (desno).

Ova dva pristupa omogućavaju relativno jednostavnu i kompaktnu konstrukciju, a i omogućavaju da se aktuatori izmeste van robotske šake. Za industrijsku primenu, sistem podaktuacije primenom krutih poluga je adekvatniji. On omogućuje stabilnije i kontrolisanije kretanje prsta i ovaj koncept će se analizirati dalje u radu. Da bi robotski prst, sa sistemom podaktuacije mogao pravilno da funkcioniše, u samoj konstrukciji moraju postojati pasivni elementi, opruge, koje sprečavaju sva neželjena kretanja prstiju, usled inercije i slično.

Kod podaktuiranih robotskih prstiju, postoji pojava predformiranja hvata, upravo kao posledica postojanja ovih pasivnih elemenata, opruga. Promenom krutosti opruga, moguće je kontrolisati način predformiranja hvata, odnosno zatvaranja robotske šake. Kao što je već napomenuto, za projektovanje sistema za robotsko hvatanje, CMSysLab robotske šake, odabran je princip podaktuacije krutim polugama, uz postojanje pasivnih elemenata, opruga, u zglobovima.

3. CMSYSLAB ROBOTSKA ŠAKA

Sistem CMSysLab robotska šaka, čija je konstrukcija prsta prikazana na slici 4, predstavlja polaznu fazu izgradnje fizičke platforme za eksperimentisanje u laboratorijskim, a kasnije i u industrijskim uslovima, sa izvođenjem realnih zadataka, precizne i visokofleksibilne manipulacije realnim mehaničkim delovima u sektorima srednjegabaritne proizvodnje mehaničkih sklopova, poput onih u automobilskoj industriji i elektronici.



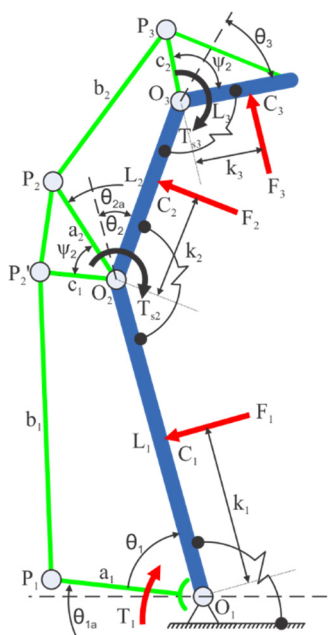
Slika 4. Prikaz konstrukcije i funkcije prsta robotskog sistema za hvatanje CMSysLab.

Višegodišnji razvoj ovog sistema je započet kao deo istraživanja koja se sprovode na projektu tehnološkog razvoja TR35007 - Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju, a nastavljen je u sklopu istraživanja na projektu bilateralne saradnje sa Kinom „Next generation technology for ubiquitous collaborative robotics – UbiCbot“, koje finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj i bilateralnom projektu sa Italijom, PGR00221 “Human-Robot Co-Working as a Key Enabling Technology for the Factories of Future”.

Konstrukcija CMSysLab robotske šake je takva da omogućava laku ugradnju različitih senzora i omogućava sastavljanje različitih konfiguracija višeprstih robotskih šaka, što čini ovaj sistem za robotsko hvatanje optimalnim sistemom za širok spektar laboratorijskih istraživanja. Sastoji se od tri falange, proksimalne, medijalne i distalne, i shodno tome ima 3 stepena slobode. Proporcije CMSysLab robotskog prsta odgovaraju proporcijama ljudskog prsta. Na slici 4 je prikazano da su u svaki od zglobova ugrađene opruge koje sprečavaju da u toku rada dođe do neželjenih pomeranja falangi usled inercije. Na slici 4 je prikazan i prenosni mehanizam prsta koji se sastoji od dva četvorozglobna mehanizma međusobno povezana sa krutim trougaonim elementima, rokerima. Ovaj mehanizam omogućava podaktuaciju kompletnog prsta, i iz tog razloga je jako bitno ustanoviti na koji način se prenosi ulazni aktuacioni moment na falange, a preko njih na objekat. Dakle, potrebno je uraditi analizu sila podaktuiranog robotskog prsta.

4. ANALIZA SILA PODAKTUIRANOG ROBOTSKOG PRSTA

U ovom delu rada biće prikazana analiza sila podaktuiranog robotskog prsta, predstavljena u [9]. Obzirom da je prenosni mehanizam, četvorozglobni mehanizam, primenom Kenedijeve teoreme moguće je dobiti vezu između aktuacionog momenta i kontaktnih sila. U okviru ovog proračuna, objekat se smatra fiksnim u prostoru.



Slika 5. Prikaz geometrijskih parametara i parametara sile kod robotskog prsta.

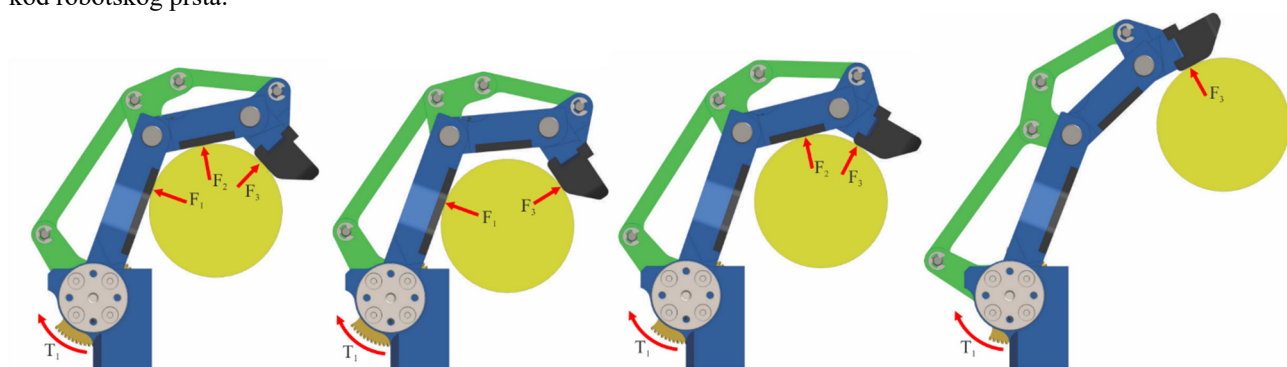
U ovom kvazistatičkom proračunu, izjednačujemo ulazne i izlazne snage $T^T \omega_\alpha = F^T v$, gde T predstavlja vector ulaznog momenta i momenata od opruga, ω_α je odgovarajući vector ugaonih brzina, F predstavlja vector kontaktnih sila i v predstavlja vektor projekcija brzina u kontaktnim tačkama. Primenom Kenedijeve teoreme, dobija se veza između ulaznog momenta i kontaktnih sila.

$$F = J_T^{-T} J_\alpha^{-T} T \quad (1)$$

Daljim proračunom, dobija se:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

i uz pomoć (2) moguće je izračunati kontaktne sile u funkciji ulaznog momenta i položaja kontaktne tačke na falangi. Problem nastaje kada je broj kontaktnih tačaka manji od broja falangi robotskog prsta, odnosno objekat je u kontaktu sa manje od n falangi. Ti analizirani slučajevi su prikazani na slici 6.



Slika 6. Analizirani slučajevi mogućih kontakata cilindričnog objekta i falangi robotskog prsta.

Za poseban slučaj kada je broj kontaktnih tačaka manji od broja falangi, neki od parametara k je jednak nuli. U tom slučaju je potrebno razviti sistem kojim je moguće izračunati kontaktne sile samo na falangama koje su u kontaktu sa objektom. Razvijeni algoritam je detaljno predstavljen u [9]. Primenom tog algoritma, omogućeno je da se zanemaruju redovi i kolone matrica koje odgovaraju parametrima k koji su jednaki nuli.

Ovakva analiza sila kod robotskog prsta je od velike važnosti kada se govori o projektovanju robusnog robotskog prsta, koji može da osigura stabilno hvatanje, svaki put, u industrijskom okruženju. Ova analiza, takođe omogućava da se izvrši pravilna optimizacija prenosnog mehanizma prsta, što je predstavljeno u [10].

9. ZAKLJUČAK

U okviru ovog istraživanja, predstavljen je tok projektovanja robotskog sistema za hvatanje i manipulaciju objektima, CMSysLab robotska šaka. Ukratko su predstavljene osnove robotskog hvatanja i predstavljeni su izazovi koje je potrebno prevazići kako bi se generisao robusan sistem za hvatanje i manipulaciju objektima u industrijskim uslovima. Na kraju je pokazana analiza sila kao neophodna analiza za dalji tok istraživanja.

10. LITERATURA

- [1] Baksa G., Mandl P., Benis S., Patonay L., Balint G.P., Balint P.V. (2018) *Gross Anatomy of the Human Hand*. In: Balint P., Mandl P. (eds) *Ultrasonography of the Hand in Rheumatology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74207-6_2
- [2] Agrawal, S. *Hands: Human to Robotic*; Technical Report January; University of Pennsylvania: Philadelphia, PA, USA, 1991.
- [3] Rotenberg, V., S.: Moravec's paradox: *Consideration in the context of two brain hemisphere functions*, *Activitas Nervosa Superior*, Vol.3, No. 55, pp. 108-111, 2013.
- [4] Samadikhoshkho, Z., Zareinia, K., Janabi-Sharifi, F.: *A Brief Review on Robotic Grippers Classifications*, 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE), str. 1-4, Edmonton, AB, Canada, Canada, IEEE, Edmonton, 5-8 May, 2019.
- [5] Matijasevic, L., Milivojevic, M., Petrovic, P.: *Multifingered under-actuated hands in robotic assembly*, 13th international scientific conference MMA 2018, Novi Sad, str. 91-94, Faculty of technical sciences Novi Sad, Novi Sad, Septembar 28-29, 2018.
- [6] Long, W., et al.: *A highly-under-actuated robotic hand with force and joint angle sensors*, *Intelligent Robots and Systems*, pp. 25-27, California, IEEE, San Francisco, 25-30 September 2011.
- [7] Liarokapis, M., Dollar, A.: *Deriving dexterous, inhand manipulation primitives for adaptive robot hands*, *Intelligent Robots and Systems*, pp. 25-27, Canada, IEEE, Vancouver, 24-28 September 2017.
- [8] Birglen, L., et al.: *Under-actuated Robotic Hands*, Springer, Berlin, 2008.
- [9] Matijasevic, L., Petrovic, P.: *Underactuated finger design for flexible grasping in robotic assembly*, 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2019, str. 730-735, Srebrno jezero, Društvo za ETRAN, Beograd, 03-06 Jun 2019.
- [10] Matijasevic, L., Petrovic, P.: *Four-bar Linkage Mechanism Optimization for Linkage Driven Underactuated Robotic Finger*, 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020, Beograd, Društvo za ETRAN, Beograd, 28-30 Septembar 2020.

Matijašević, L., Petrović, P., Lukić, N.

Underactuated systems for grasping and object manipulation in robotic assembly – Development of CMSysLab robotic hand

Abstract: Existing robotic assembly systems are based on very simple mechanisms for grasping and manipulating objects. The new production paradigm of customized assembly imposes the need to develop significantly more flexible solutions, with a built-in high degree of dexterity, to the level that in some aspects they approach the technological capabilities of the human hand itself. In terms of mechanical complexity, size, handling, and especially price, underactuated systems stand out as a good compromise. This paper presents a conceptual framework for the development of a multifinger underactuated system for grasping and manipulating objects - CMSysLab robotic hand. The analysis of contact forces of a underactuated robotic finger is shown, with a focus on their distribution on the phalanges and the influence on the optimization of the kinematic configuration and construction of the finger, as well as its activation system.

Key words: Robotic assembly, Robotic hand, Underactuated structure



Vasilić, G., Živanović, S.¹⁾

UTICAJ REZOLUCIJE RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA NA TAČNOST KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE ZA PROCES OBRADJE SEČENJA ŽICOM ²⁾

Rezime

U okviru ovoga rada je predstavljena kompleksna višeosna mašina alatka koja je namenjena za proces obrade sečenja žicom. Kompleksnu mašinu alatku čine dva dvoosna rekonfigurabilna paralelna mehanizma spojenih žicom koja u ovom slučaju predstavlja alat same mašine. Rezolucija paralelnih mehanizama nije konstantna unutar celog radnog prostora pa i greške pozicioniranja platforme imaju različite vrednosti u različitim delovima radnog prostora. Ove greške se odražavaju na greške obrade kompleksne višeosne mašine a u ovom radu je prikazana analiza koja dovodi u vezu greške pozicioniranja platformi paralelnih mehanizama sa greškama obrade. Takođe, razmotra se i mogućnost umanjenja greške obrade rekonfigurisanjem paralelnih mehanizama od kojih je napravljena kompleksna višeosna mašina namenjena za proces obrade sečenja žicom.

Ključne reči: Inverzni i direktni kinematski problem, Ravanski paralelni mehanizam, Kompleksna mašina alatka, Sečenje žicom

1. UVOD

Proces obrade sečenja žicom je metoda koja je veoma zastupljena u privredi i koristi se sa sečenje različitih materijal poput metala WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) metodom, sečenja penastih materijala usijanom žicom, sečenja elektro neprovodnih materijala poput kamena i betona nazubljenom žicom. Za sečenje navedenih materijala, do sada su prodložene različite konfiguracije mašina alatki i industrijskih robota koji realizuju relativno kretanje alata (žice) u odnosu na pripremak čime se realizuje proces sečenja. Tako, za sečenje kamena je predložen industrijski robot RDWC (Robotic Diamond Wire cutting) sa dijamantskom nazubljenom žicom [1]. Za sečenje penastih materijala su prikazani industrijski robot RHWC (Robotic Hot Wire Cutting) [2,3]. Sečenje penastih materijala usijanom žicom je korišteno za oblikovanje laminiranih slojeva čijim se kasnijim spajanjem izrađuju brzi prototipovi [4]. U radovima [5] i [6] su takođe predložene neke konfiguracija mašina alatki i industrijskih robota namenjenih za sečenje penastih materijala usijanom žicom. WEDM metoda koja se koristi za sečenje metala je i najzastupljenija metoda koja koristi žicu za sečenje. Za WEDM metodu se koriste tradicionalne dvoosne [7] i višeosne mašine alatke [8,9]. Navedena rešenja predlažu mašine alatke i industrijske robote koji se baziraju na serijskim mehanizmima.

Mnoga istraživanja su pokazala da paralelni mehanizmi poseduju izvesne prednosti u odnosu na serijske mehanizme poput: i)veće krutosti, ii)manje mase pokretnih delova, iii)bolju pokretljivost, iv)manju grešku pozicioniranja, i to sve u zavisnosti od konfiguracije i geometrije mehanizma [10,11]. Takođe, paralelni mehanizmi poseduju izvesne nedostatke kao što su: i)radni prostori nepravilnog oblika, ii)postojanje singulariteta, iii)složenost jednačina koje predstavljaju rešenja kinematskih problema [10,11]. Kako bi se izbegli nedostaci paralelnih mehanizama a istovremeno zadržale prednosti koje pružaju, paralelni mehanizmi su korišteni za gradnju mašina alatki sa hibridnim mehanizmom (mehanizmi koji predstavljaju kombinaciju paralelnih i serijskih mehanizama) namenjenih za različite proizvodne procese. Tako su paralelni mehanizmi

¹⁾ Goran Vasilić, student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (goran.v.vasilic@gmail.com), Prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105, od 24.01.2020. godine.

korišteni za gradnju vertikalne [12] i horizontalne [13] troosne glodalice. Takođe, paralelni mehanizmi se mogu prepoznati i kod mašina alatki namenjenih za druge proizvodne procese poput mašine alatke za zavarivanje [14] ili kod manipulatora [15]. Znatno složeniji mehanizmi su mehanizmi sačinjeni od dva paralelna mehanizma i mogu se uočiti kod industrijskih robota namenjenih za pick-and-place operacije [16,17]. Kod ovih složenih hibridnih mehanizama, jedan paralelni mehanizam nosi drugi paralelni mehanizam i na ovaj način je ostvarena serijska veza dva paralelna mehanizma pa se celokupni mehanizam može svrstati u klasu hibridnih mehanizama.

Od svih do sada navedenih mašina alatki i industrijskih robota, kompleksna mašina alatka koja se razmatra u ovom radu se prvenstveno razlikuje po konfiguraciji a potom i po nameni. Mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom koja se razmatra u ovom radu je sačinjena od dva nezavisna dvoosna paralelna mehanizma MOMA (MODularna Mašina Alatka). Platforme ravanskih paralelnih mehanizama MOMA su međusobno povezani žicom. Kretanja platformi ravanskih paralelnih mehanizama MOMA obezbeđuju željena kretanja žice koja vrši obradu. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je do sada bio predmet više istraživanja [18-22] čiji rezultati su od značaja za analize u ovom radu. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je rokonfigurabilni mehanizam koji se prema programu gradnje [23] može rekonfigurisati na 33 različita načina što i celokupnu kompleksnu mašinu alatku za sečenje žicom svrstava u grupu rekonfigurabilnih mašina alatki. Kako je razmatrana mašina alatka sačinjena od dva ravanska paralelna mehanizma MOMA i namenjena je za proces obrade sečenja žicom, prema [24,25] kompleksnoj višeosnoj mašini alatki je dodeljen naziv MOMA-W (Wire).

Za višeosnu mašinu alatku MOMA-W u okviru ovoga rada, nakon prikazanog koncepta prikazan je kinematski model mašine alatke na osnovu koga su izvedene jednačine koje predstavljaju rešenja kinematskih problema kompleksne mašine alatke MOMA-W. Rešenja kinematskih problema su generalizovana i u opštem obliku. Uopštene jednačine kinematskih problema će biti korištene za analize različitih konfiguracija kompleksne višeosne mašine MOMA-W. Kako se uz izvesne nadogradnje kompleksna višeosna mašina alatka MOMA-W može koristiti i za sečenje metala WEDM metodom koja zahteva visoku tačnost obrade, u zasebnom poglavlju je analizirana tačnost obrade višeosne mašine. Kako tačnost obrade zavisi od parcijalnih grešaka pozicioniranja platformi upotrebljenih ravanskih paralelnih mehanizama.

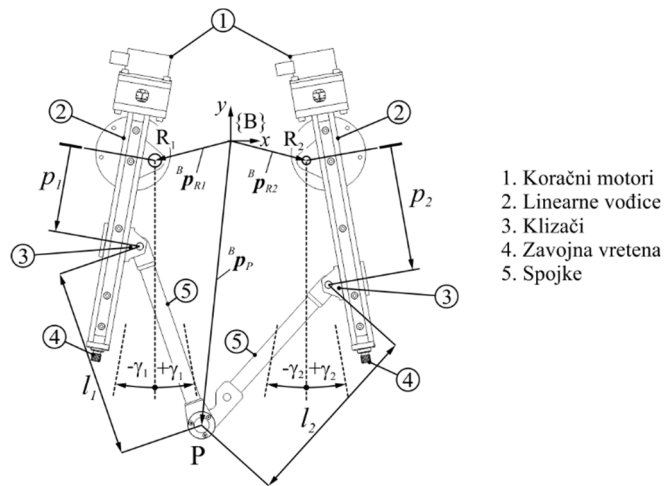
2. KONFIGURACIJA KOMPLEKSNE VIŠEOSNE MAŠINE

Kao što je već rečeno, višeosnu mašinu alatku MOMA-W čine dva dvoosna ravanska paralelna mehanizma MOMA. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je prikazan na slici 1. dok je CAD model višeosne mašine alatke MOMA-W je prikazan na slici 2. Ravanski paralelni mehanizam MOMA čine dve identične pogonske ose. Svaka od pogonskih osa poseduje koračni motor (Slika 1-①) koji svoje obrtno kretanje preko zavojnog vretena (Slika 1-④) prenosi na klizača (Slika 1-③). Sprega zavojnog vretena i klizača omogućava linearno kretanje klizača duž vođice (Slika 1-②). Za klizače je zglobnom vezom povezan po jedan kraj od dve spojke (Slika 1-⑤). Spojke su takođe međusobno povezane zglobnom vezom i ova zglobna veza između spojki čini platformu ravanskog paralelnog mehanizma MOMA. Pozicija klizača na vođicama je definisana skalarnim veličinama p_1 i p_2 i njihova vrednost se kontroliše koračnim motorima a određuje se na osnovu željene pozicije platforme paralelnog mehanizma. Pozicija platforme paralelnog mehanizma se posmatra u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$ a definisana je vektorom položaja ${}^B p_P$. Veličine p_1 i p_2 predstavljaju unutrašnje koordinate paralelnog mehanizma dok su spoljašnje koordinate određene projekcijama vektora ${}^B p_P$ na ose nepokretnog koordinatnog sistema $\{B\}$ odnosno ${}^B p_P = [x_p \ y_p]^T$.

Konfiguracija ravanskog paralelnog mehanizma MOMA je određena sledećim geometrijskim veličinama:

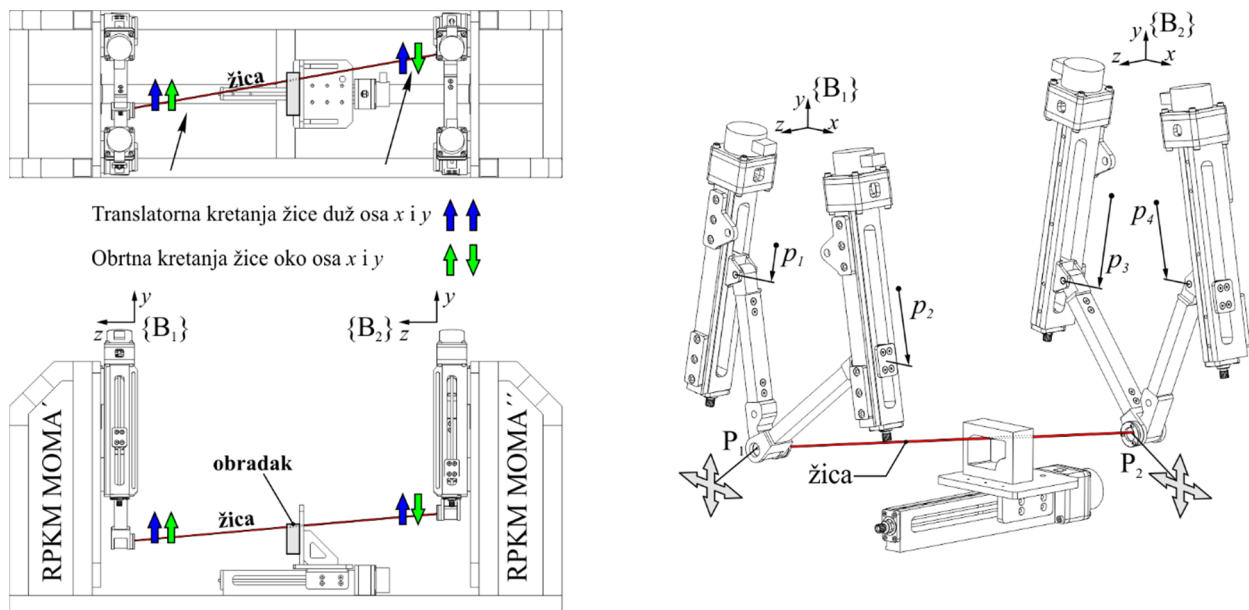
- Pozicijom referentnih tačaka R_1 i R_2 u koordinatnom sistemu $\{B\}$ odnosno vektorima ${}^B p_{R1}$ i ${}^B p_{R2}$. U referentnim tačkama unutrašnje koordinate imaju vrednost $p_1=p_2=0$;
- Uglovima orijentacije pogonskih osa g_1 i g_2 ;
- Dužinama spojki definisanih veličinama l_1 i l_2 .

Konfiguracije paralelnih mehanizama MOMA se mogu menjati promenom ugla orijentacije pogonskih osa g_i i/ili promenom dužina spojki l_i [18-25] a prema programu gradnje definisano je pet tipova mehanizma MOMA (M1, M2, M3, M4, M5). Navedene mogućnosti ravanski paralelni mehanizam MOMA svrstavaju u klasu rekonfigurabilnih mehanizama.



Slika 1. Dvoosni ravanski paralelni mehanizam MOMA

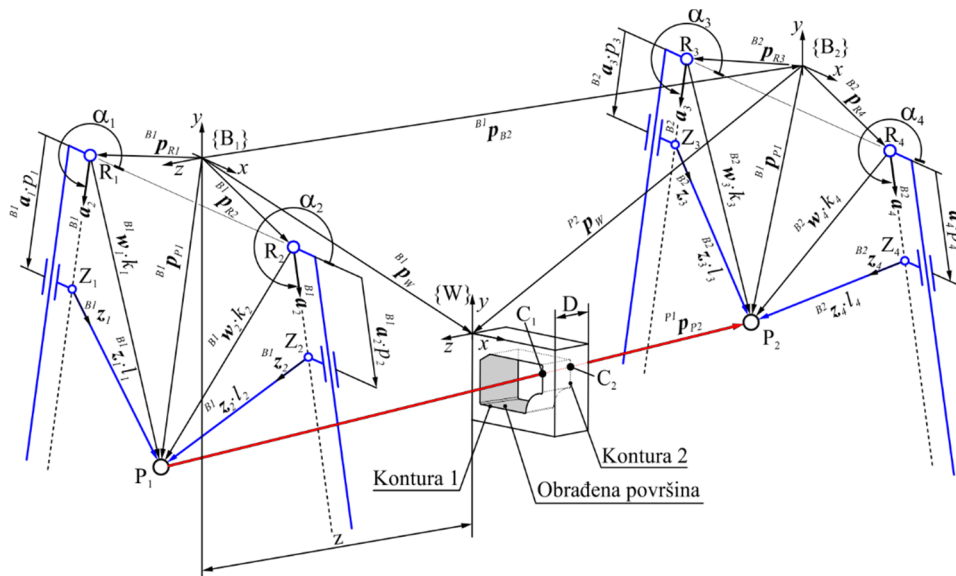
Dva ravanska paralelna mehanizma mašine alatke MOMA-W su međusobno povezani žicom (slika 2). U nastavku teksta, za ravanske paralelne mehanizme će se koristiti nazivi RPK-MOMA' i RPK-MOMA'' kao i u već objavljenim radovima [24,25]. Svaki od paralelnih mehanizama RPK-MOMA' poseduje sopstveni nepokretni koordinatni sistem $\{B_i\}$, $i=(1,2)$ a spajanjem dva dvoosna paralelna mehanizma u jednu celinu se dobija mašina alatka sa ukupno četiri stepena slobode koja se ogledaju u unutašnjim koordinatama p_1, p_2, p_3 i p_4 . Iz istog razloga se kod višeosne mašine alatke MOMA-W broj ostalih geometrijski veličina duplira. Svaka od platformi P_1 i P_2 višeosne mašine alatke MOMA-W nosi po jedan kraj žice i ima mogućnost translatornog kretanja u pravcu osa x i y . Slaganjem ovih kretanja platformi, omogućuje se translatorno kretanje žice duž osa x i y ali i obrtanje žice oko istih osa. Tokom obrade, dužina žice između platformi mehanizama RPK-MOMA' i RPK-MOMA'' je promenljiva te se u poređenju sa troosnim i višeosnim paralelnim mehanizmima slične konfiguracije žica ne može smatrati platformom višeosne mašine MOMA-W pa se i sama mašina alatka ne može okarakterisati kao mašina alatka sa potpuno paralelnim mehanizmom. Pošto su upotrebljeni ravanski paralelni mehanizmi MOMA međusobno nezavisni odnosno kretanje platforme mehanizma RPK-MOMA' ne utiče na kretanje mehanizma RPK-MOMA'' kao što je slučaj u radovima [16,17], ne može se tvrditi da žica predstavlja serijsku vezu dva paralelna mehanizma. Uzimajući u obzir prethodno navedene činjenice, višeosna mašina alatka MOMA-W se svrstava u klasu kompleksnih mašina alatki.



Slika 2. CAD model kompleksne mašine alatke MOMA-W

3. REŠENJA KINEMATSKIH PROBLEMA KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE MOMA-W

Prema geometrijskom modelu kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W, formiran je njen geometrijski model (slika 3.) na kome su prikazani vektori neophodni za rešavanje kinematskih problema mašine alatke MOMA-W. Osim već definisanih koordinatnih sistema $\{B_j\}$, uveden je i koordinatni sistem $\{W\}$ vezan za obradak i u kome se vrši programiranje mašine alatke. Prema standardu ISO-6983 (G-code), kod mašina alatki za proces obrade sečenja žicom relativno kretanje alata u odnosu na obradak je određeno nizom tačaka koje formiraju dve konture a obrada se vrši istovremenim kretanjem žice po obe konture. Koordinate tačaka obe konture su definisane u koordinatnom sistemu $\{W\}$ i nose oznaku x_w i y_w (koordinate tačaka prve konture) dok su tačke druge konture definisane koordinatama u_w i v_w .



Slika 3. Geometrijski model višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W

Geometrijske veličine i vektori prikazani na slici 3. predstavljaju:

- α_i Uglovi orijentacije pogonskih osa koji imaju vrednost $\alpha_i = 3\pi/2 \pm \gamma_i$;
- \mathbf{a}_i Jedinični vektori orijentacija pogonskih osa i definisani su uglovima orijentacije α_i ;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_{R_i}$ Vektori položaja referentnih tačaka R_i u nepokretnim koordinatnim sistemima $\{B_j\}$;
- ${}^{B_j}\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}_i$ Vektori unutrašnjih koordinata definisani skalarnim vrednostima p_i i vektorima orijentacija pogonskih osa \mathbf{a}_i ;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_{P_j}$ Vektori položaja platformi P_1 u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_j\}$;
- ${}^{P_2}\mathbf{p}_{P_1}$ Vektor položaja platforme P_2 u odnosu na koordinatne sisteme P_1 ;
- ${}^{B_2}\mathbf{p}_{B_1}$ Vektor položaja koordinatnog sistema $\{B_2\}$ u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_1\}$;
- ${}^{B_j}\mathbf{z}_i \cdot l_i$ Vektori spojki određeni dužinama spojki l_i i jediničnim vektorima ${}^{B_j}\mathbf{z}_i$;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_W$ Pozicije koordinatnog sistema $\{W\}$ u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_j\}$.

Koordinate tačaka C_1 i C_2 u koordinatnom sistemu $\{W\}$ pripadaju dvema konturama i definišu trenutnu poziciju i orijentaciju žice su poznate. Prema geometrijskom modelu kompleksne mašine alatke MOMA-W, koordinate tačaka C_1 i C_2 u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ u $\{B_2\}$ se određuje vektorskim jednačinama (1) i imaju koordinate ${}^{B_j}\mathbf{p}_{C_1} = [{}^j x_{C_1} \quad {}^j y_{C_1} \quad {}^j z_{C_1}]^T$ i ${}^{B_j}\mathbf{p}_{C_2} = [{}^j x_{C_2} \quad {}^j y_{C_2} \quad {}^j z_{C_2}]^T$

$$\begin{aligned} {}^{B_j}\mathbf{p}_{C_1} &= {}^{B_j}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_{C_1} \\ {}^{B_j}\mathbf{p}_{C_2} &= {}^{B_j}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_{C_2} \end{aligned} \quad (1)$$

Koristeći prethodne jednačine, uzimajući u obzir da tokom obrade žica u svakom trenutku prolazi kroz određeni par tačaka, na osnovu grupe jednačina (2) se dobijaju pozicije platformi P_1 i P_2 u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$.

$$\begin{aligned}
{}^{Bj}x_{Pj} &= \frac{-{}^jz_{C1}}{{}^jz_{C2} - {}^jz_{C1}} ({}^jx_{C2} - {}^jx_{C1}) + {}^jx_{C1} \\
{}^{Bj}y_{Pj} &= \frac{-{}^jz_{C1}}{{}^jz_{C2} - {}^jz_{C1}} ({}^jy_{C2} - {}^jy_{C1}) + {}^jy_{C1}
\end{aligned} \tag{2}$$

Takođe, na osnovu geometrijskog modela kompleksne mašine alatke MOMA-W i već definisanih vektora se može napisati sledeća vektorska jednačina:

$$l_i \cdot {}^{Bj}\mathbf{z}_i = {}^{Bj}\mathbf{p}_{Pj} - {}^{Bj}\mathbf{p}_{Ri} - p_i \cdot {}^{Bj}\mathbf{a}_i \tag{3}$$

čijim se sređivanjem nakon kvadriranja dobija jednačina (4) koja predstavlja polaznu jednačinu za rešavanje kinematskih problema kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W.

$$p_i^2 - 2p_i({}^{Bj}\mathbf{a}_i \cdot k_i {}^{Bj}\mathbf{w}_i) + (k_i {}^{Bj}\mathbf{w}_i)^2 - l_i^2 = 0 \tag{4}$$

U prethodnim jednačinama indeks i može imati vrednosti $i=1,2,3,4$ i svaka veličina sa navedenim indeksom se vezuje za određenu pogonsku osu kompleksne kompleksne mašine alatke MOMA-W. Indeks j može imati vrednosti $j=1,2$ a veličine sa ovim indeksom se vezuju za mehanizme RPKM-MOMA' i RPKM-MOMA'' respektivno. Indeksi i i j su međusobno povezani tako da su geometrijske veličine jednog paralelnog mehanizma odvojene od veličine drugog paralelnog mehanizma što u stvari znači da uz indeks $j=1$ indeks i može imati vrednosti $i=1,2$ dok uz indeks $j=2$ indeks i može imati vrednosti $i=3,4$.

3.1 Inverzni kinematski problem kompleksne mašine alatke MOMA-W

Rešavanjem jednačine (4) po unutrašnjim koordinatama p_i , dobija se grupa jednačina (5) koje predstavljaju rešenje inverznog kinematskog problema kompleksne mašine alatke MOMA-W.

$$\begin{aligned}
p_i &= \frac{a_{xi}(x_{Pj} - x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - y_{Ri}) \pm}{\pm \sqrt{(a_{xi}(x_{Pj} - x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - y_{Ri}))^2 - (x_{Pj} - x_{Ri})^2 - (y_{Pj} - y_{Ri})^2 + l_i^2}}
\end{aligned} \tag{5}$$

Jednačine (5) su u skraćenom obliku a tek nakon uvrštavanja koordinata platformi x_{Pj} i y_{Pj} definisanih jednačinama (2) se dobija konačan oblik jednačina koje predstavljaju rešenja inverznog kinematskog problema. Veličine a_{xi} i a_{yi} predstavljaju projekcije jediničnih vektora orijentacije osa \mathbf{a}_i i određeni su uglovima α_i .

3.2 Direktni kinematski problem kompleksne mašine alatke MOMA-W

Radi uopštavanja rešenja direktnog kinematskog problema kompleksne mašine alatke MOMA-W, vrednosti za indeksa $i=2$ i $i=4$ se eliminišu tako da u smenama datih jednačinama (6) indeks i može imati vrednosti $i=1,3$ a eliminisane vrednosti se nadomešćuju vrednostima $i+1$. Veza između indeksa i i j i dalje važi.

$$\begin{aligned}
{}^j t_1 &= 2(p_i \cdot a_{xi} + x_{Ri}) ; \quad {}^j t_2 = 2(p_i \cdot a_{yi} + y_{Ri}) \\
{}^j t_3 &= p_i^2 + 2p_i(a_{xi} \cdot x_{Ri} + a_{yi} \cdot y_{Ri}) + x_{Ri}^2 + y_{Ri}^2 - l_i^2 \\
{}^j t_4 &= 2(p_{i+1} \cdot a_{xi+1} + x_{Ri+1}) ; \quad {}^j t_5 = 2(p_{i+1} \cdot a_{yi+1} + y_{Ri+1}) \\
{}^j t_6 &= p_{i+1}^2 + 2p_{i+1}(a_{xi+1} \cdot x_{Ri+1} + a_{yi+1} \cdot y_{Ri+1}) + x_{Ri+1}^2 + y_{Ri+1}^2 - l_{i+1}^2 \\
{}^j t_7 &= \frac{{}^j t_6 - {}^j t_3}{{}^j t_4 - {}^j t_1} ; \quad {}^j t_8 = \frac{{}^j t_2 - {}^j t_5}{{}^j t_4 - {}^j t_1} ; \quad {}^j t_9 = \frac{{}^j t_2 + {}^j t_4 - {}^j t_1 + {}^j t_5}{{}^j t_4 - {}^j t_1} \\
{}^j t_{10} &= 2 \cdot {}^j t_7 \cdot {}^j t_8 - {}^j t_1 \cdot {}^j t_8 + {}^j t_2 ; \quad {}^j t_{11} = {}^j t_7^2 - {}^j t_1 \cdot {}^j t_7 + {}^j t_3
\end{aligned} \tag{6}$$

Koristeći prethodne smene i rešavajući jednačinu (4) po koordinatama platformi x_P i y_P u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$, dobija se zavisnost pozicija platformi od unutrašnjih koordinata p_i i data jednačinama

(7) koje predstavljaju rešenja direktnih kinematskih problema paralelnih mehanizama RPKM-MOMA' i RPKM-MOMA''.

$$y_{Pj} = \frac{-j_{t_{10}} \pm \sqrt{j_{t_{10}}^2 - 4 \cdot j_{t_9} \cdot j_{t_{11}}}}{2 \cdot j_{t_9}} \quad (7)$$

$$x_{Pj} = j_{t_7} + j_{t_8} \cdot y_{Pj}$$

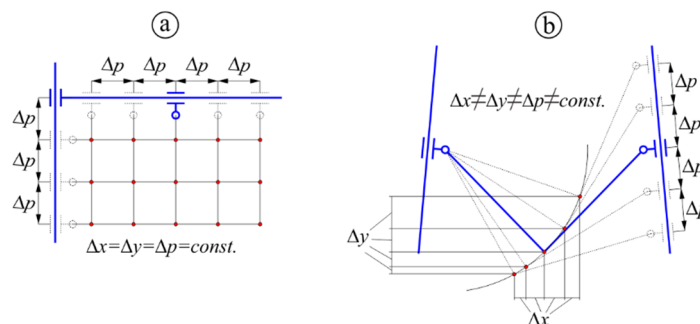
Kombinujući jednačine (2) sa jednačinama (7), dobijaju se jednačine (8) koje predstavljaju rešenje direktnog kinematskog problema kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W odnosno zavisnost koordinata tačaka C_1 i C_2 (tačke koje pripadaju programiranim konturama) od unutrašnjih koordinata p_i .

$$x_{C,k} = \frac{j_{Z_{C,k}} - j_{Z_{P1}}}{j_{Z_{P2}} - j_{Z_{P1}}} (j_{x_{P2}} - j_{x_{P1}}) + j_{x_{P1}}$$

$$y_{C,k} = \frac{j_{Z_{C,k}} - j_{Z_{P1}}}{j_{Z_{P2}} - j_{Z_{P1}}} (j_{y_{P2}} - j_{y_{P1}}) + j_{y_{P1}} \quad (7)$$

4. REZOLUCIJA RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

Rezolucija bilo kog mehanizma je definisana kao minimalni pomeraj završnog uređaja mehanizma u određenom pravcu i prvenstveno zavisi od konstrukcije pogonskih osa a potom i od konfiguracije samog mehanizma. Konvencionalne mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja žicom se zasnovanju na serijskom dvoosnom mehanizmu kod kojih je rezolucija konstantna u celom dostizivom radnom prostoru (slika 4.a). Za razliku od konvencionalnih mašina alatki, kod kompleksne mašine alatke MOMA-W, rezolucija upotrebljenih dvoosnih paralelnih mehanizma je promenljiva zbog same konstrukcije mehanizma (slika 4.b). Naime, linearno kretanje jednog klizača duž vođice za vrednost Δp uzrokuje kretanje platforme paralelnog mehanizma po kružnom luku pa samim time i pomeraji Δx i Δy zavise od trenutne pozicije platforme.

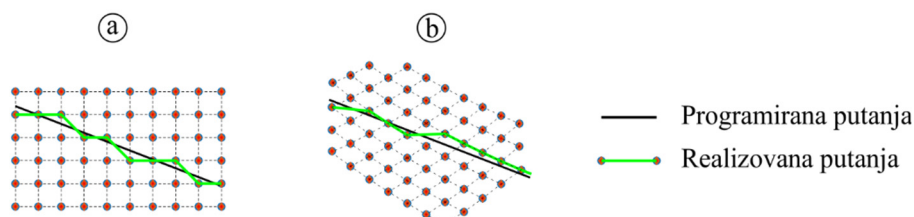


Slika 4. Raspodela rezolucije: a) Serijskih dvoosnih ravanskih mehanizama; b) Paralelnih dvoosnih ravanskih mehanizama

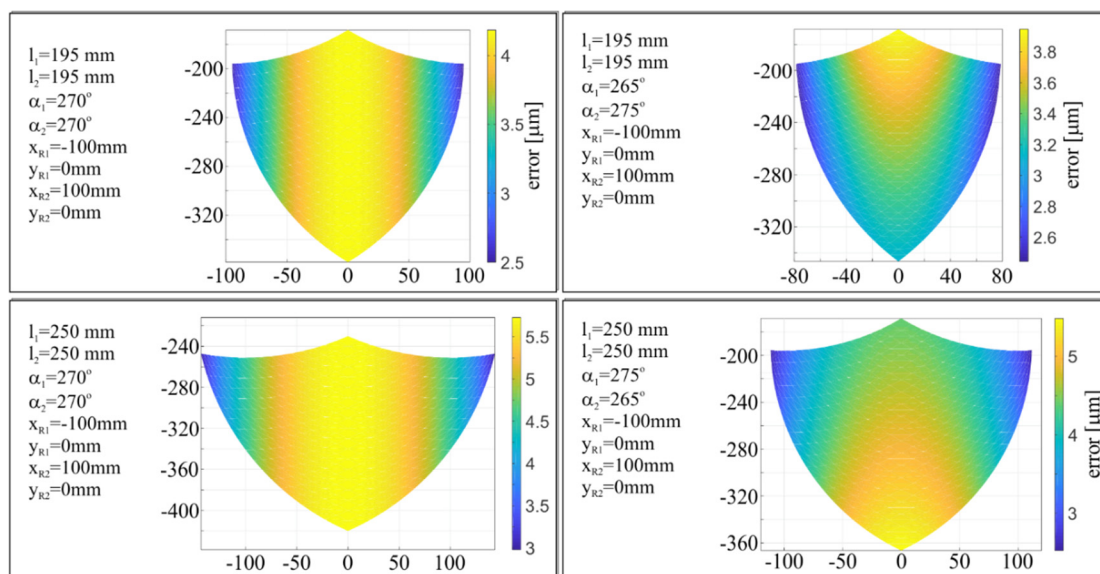
Veličina Δp predstavlja rezoluciju pogonske ose a njena vrednost zavisi minimalnog ugla zaokreta koračnog motora α_{sm} pogonske ose i od koraka zavojnog vretena s koje obrtno kretanje koračnog motora pretvara u translatorno kretanje klizača duž vođice. Uzimajući u obzir način rada koračnih motora, jasno je da će mehanizmi bilo serijski ili paralelni praviti grešku tokom rada to jest odstupanje realizovane od programirane putanje što je i prikazano na slici 5. Kao što se vidi na slici, na celoj putanji postoji izvesna greška i njena maksimalna vrednost može iznositi polovini rastojanja između dve susedne tačke radnog prostora.

Uzimajući uobičajenu vrednost ugla zaokreta koračnog motora $\alpha_{sm}=1.8^\circ$ koja odgovara zaokretu rotora za jedan dovedeni impuls na kalemove motora i korak zavojnog vretena $s=1\text{mm}$, dobija se rezolucija pogonske ose $\Delta p = \alpha_{sm} \cdot s / 360 = 5\mu\text{m}$. Ova vrednost rezolucije pogonske ose je korištena za analizu greške pozicioniranje platforme različitih konfiguracija ravanskog paralelnog. Koristeći jednačine (6) i (7) za samo jedan ravanski paralelni mehanizam MOMA, za vrednosti unutrašnjih koordinata su uzimane vrednosti $p_i=0$ do $p_i=200\text{mm}$ sa korakom $\Delta p = 0.005\text{mm}$. Za svaku izračunatu poziciju platforme definisanu koordinatama x_p i y_p , izračunate su koordinate osam susednih tačaka pri čemu se važećim unutrašnjim koordinatama dodavana ili oduzimate vrednosti Δp a potom i rastojanje između tekuće pozicije platforme i osam susednih tačaka. Za

grešku pozicioniranja je uzeta polovina najveće vrednosti od osam izračunatih rastojanja između tekuće pozicije platforme i susjednih tačaka. Rezultati analize različitih konfiguracija ravnaskog paralelnog mehanizma su prikazani na slici 6.



Slika 5. Odstupanje realizovane od programirane putanje: a) Serijskih mehanizama; b) Paralelnih mehanizama



Slika 6. Raspodela rezolucije različitih konfiguracija ravnaskog paralelnog mehanizma MOMA

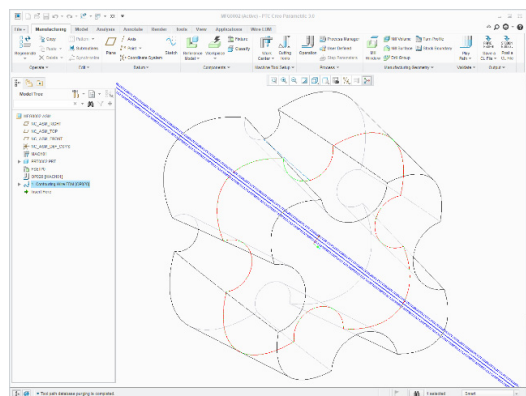
Prikazane raspodele grešaka predstavljaju samo potencijalnu grešku koju mehanizam može napraviti u određenom delu radnog prostora a stvarna greška koja će se napraviti tokom rada mehanizma zavisi od programirane putanje platforme mehanizma i ne može biti veća od grešaka dobijenih prethodnom analizom.

3. ANALIZE GREŠAKA RAZLIČITIH KONFIGURACIJA MAŠINE ALATKE MOMA-W

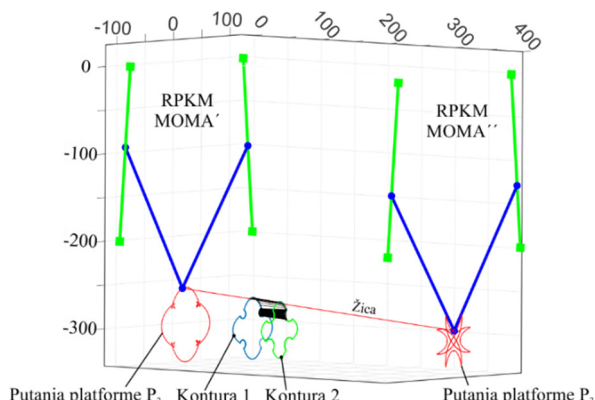
U svrhu verifikacije izvedenih jednačina, formiran je 3D model dela za koji je pomoću CAD/CAM sistema PTC Creo Parametric 3.0 definisana strategija obrade *Contouring Wire EDM* (Slika 7.a). Odgovarajućim postprocesorom je formiran G-kôd na osnovu koga su vršene analize različitih konfiguracija kompleksne višeosne mašine MOMA-W. Za analizu je korišten MatLAB kôd u kome su implementirane prethodno izvedene jednačine. Simulacija rada mašine alatke MOMA-W na osnovu izvedenih jednačina i definisane geometrije, prikazana je na slici 7.b. Tokom analiza za isti G-kôd u MatLAB kôd-u su menjani parametri koji definišu geometriju kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W tako da je analizirano pet različitih konfiguracija. Geometrijski parametri različitih konfiguracija kompleksne mašine alatke MOMA-W su dati u tabelama 1.a i 1.b.

Tabela 1.a Geometrijski parametri višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W									
	x_{R1}	y_{R1}	x_{R2}	y_{R2}	α_1	α_2	l_1	l_2	${}^{BI}p_W$
K1	-100	0	100	0	0	0	195	195	$[0 \ -250 \ 100]^T$
K2	-100	0	100	0	0	0	250	250	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K3	-100	0	100	0	265	275	180	180	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K4	-100	0	100	0	275	265	195	195	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K5	-200	0	200	0	155	205	450	450	$[0 \ -500 \ 100]^T$

Tabela 1.b Geometrijski parametri višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W									
	X_{R3}	Y_{R3}	X_{R4}	Y_{R4}	α_3	α_4	l_3	l_4	${}^{B1}p_{B2}$
K1	-100	0	100	0	0	0	195	195	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K2	-100	0	100	0	0	0	250	250	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K3	-100	0	100	0	265	275	180	180	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K4	-100	0	100	0	275	265	180	180	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K5	-150	50	150	50	155	205	400	400	$[0 \ 0 \ 400]^T$



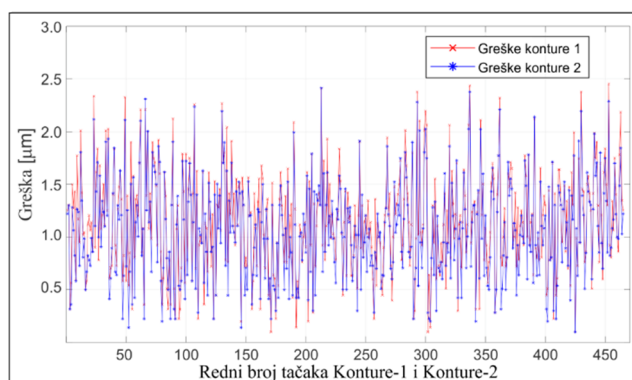
a)



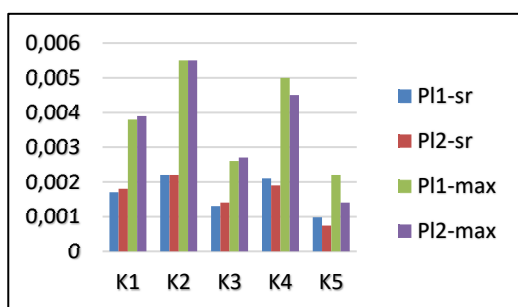
b)

Slika 7. Simulacija obrade: a) Definisanom strategijom Contouring Wire EDM; b) Simulacija rada mašine alatke MOMA-W konfiguracije K3 u MatLAB okruženju

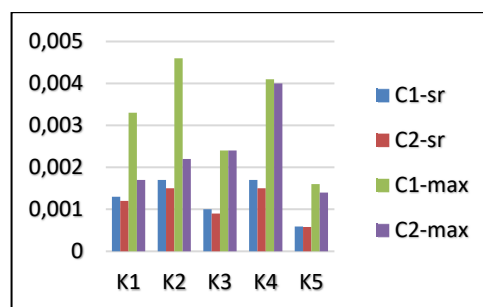
Kao što je već rečeno, tokom rada mašina pravi manju ili veću grešku. Upoređivanjem programiranih koordinata tačaka dve konture sa koordinatama tačaka koje su stvarno realizovane, dobija se greška obrade kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W. Na slici 8 su prikazane greške realizovanja programiranih kontura za konfiguraciju K3 mašine alatke MOMA-W dok je na slici 9 prikazan uporedni prikaz srednjih i maksimalnih grešaka pozicioniranja platformi P_1 i P_2 kao i srednje i maksimalne greške realizovanih pozicija tačaka C_1 i C_2 .



Slika 7. Greške obrade kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W konfiguracije K3



a)



b)

Slika 7. Uporedni prikaz grešaka različitih konfiguracija mašine alatke MOMA-W: a) Greške pozicioniranja platformi paralelnih mehanizama; b) Greške realizovanja programiranih tačaka Konture-1 i Konture-2

9. ZAKLJUČAK

U okviru rada je analizirana jedna kompleksna višeosna mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom. Koncept mašine alatke se bitno razlikuje od postojećih mašina alatki namenjenih za isti proces obrade po tome što je sačinjena od dva ravanska rekonfigurabilna paralelna mehanizma. Cilj rada je bio da pokaže opravdanost gradnje a potom i upotrebe prikazane mašine alatke. Kroz prikazane analize razmatrao se uticaj promenljive rezolucije upotrebljenih paralelnih mehanizama na tačnost obrade. Na osnovu dobijenih rezultata je ustanovljeno da bilo kakve promene konfiguracije mašine bitno utiču na krajnji rezultat obrade. Tako su neke od analiziranih konfiguracija pravile velike greške dok su se neke od konfiguracija pokazale kao izuzetno dobre i pravile grešku višestruko manju od rezolucije pogonskih osa. Na osnovu sprovedenih analiza, može se potvrditi opravdanost upotrebe predložena konfiguracija kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W za proces obrade sečenja žicom.

Istraživanja vezana za ovaj rad osim što su ostvarila postavljen cilj, postavila su i teme za buduća istraživanja vezana za prikazanu mašinu alatku. Dalja istraživanja će biti usmerena ka određivanju optimalne konfiguracije za unapred definisanu veličinu radnog prostora pri čemu će se uzimati u obzir i neuobičajene konfiguracije paralelnih mehanizama MOMA poput konfiguracija sa različitim dužinama spojki, sa spojkama koje imaju prepust, sa nesimetričnim uglovima orijentacije pogonskih osa itd. i očekuje se da se postignu bolji rezultati od rezultata prikazanih u ovome radu.

10. LITERATURA

- [1] McGee W., Feringa J., Sndergaard A.: *Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, Springer, Vienna, 2013. DOI: [10.1007/978-3-7091-1465-0_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0_5)
- [2] Søndergaard A., et al.: *Robotic hot-blade cutting*, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Springer, Cham, 2016, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_11
- [3] Jovanovic M., Rakovic M., Tepavcevic B., et al.: *Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels*, *Automation in Construction* Vol. 74, pp. 28–38, 2017. DOI: [10.1016/j.autcon.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.003)
- [4] Lee S.H., Ahn D.G., Yang D.Y.: *Calculation and verification of rotation angle of a four-axis hotwire cutter for transfer-type variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 22, pp. 175–183, 2003. DOI: [10.1007/s00170-002-1456-2](https://doi.org/10.1007/s00170-002-1456-2)
- [5] Brooks H., Aitchison D.: *A review of state of the art large sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies*, *Rapid Prototyping Journal* Vol. 16, pp. 318–327, 2010. DOI: [10.1108/13552541011065713](https://doi.org/10.1108/13552541011065713)
- [6] Hamade R., Zeineddine F., Akle B., Smaili A.: *Modelangelo: A subtractive 5-axis robotic arm for rapid prototyping*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol. 21, No. 2, pp. 133–144, 2005. DOI: [10.1016/j.rcim.2004.06.004](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.06.004)
- [7] Zivanovic S., Puzovic R., *Off-line programming and simulation for 2-axis wire-edm*, *FME Transactions* Vol. 43, No. 2, pp. 138–143, 2015. DOI: [10.5937/fmet1502138Z](https://doi.org/10.5937/fmet1502138Z)
- [8] Pandit P.L., Patil S.A., *Effect of wedm parameters on MRR of carbide austempered ductile iron*, *International Journal of Science and Research* Vol. 6, pp. 384–387, 2015. ISSN (Online): 2319-7064
- [9] Cheng X., Wang Z.G., Kobayashi S., Nakamoto K., Yamazaki K.: *Development of a six-axis wire electrical discharge machine for the fabrication of micro end mills*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol. 223, No. 2, pp. 121–131, 2009. DOI: [10.1243/09544054JEM1299](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1299)
- [10] Tanev T.K.: *Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator*, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 35, No. 9, pp. 1183–1196, 2000. DOI: [10.1016/S0094-114X\(99\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00073-7)
- [11] Wu J., Wang J., Li T., Wang L.: *Dynamic analysis of the 2DOF planar parallel manipulator of a heavy duty hybrid machine tool*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 413–420, 2007. DOI: [10.1007/s00170-006-0605-4](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0605-4)
- [12] Wu J., Li T., Liu X., et al.: *Optimal kinematic design of a 2-DOF planar parallel manipulator*, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 269–275, 2007. DOI: [10.1016/S1007-0214\(07\)70040-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70040-8)
- [13] Wu J., Wang J., Li T., Wang L.: *Analysis and application of a 2-DOF planar parallel mechanism*, *ASME Journal of Mechanical Design* Vol. 129, No. 4, pp. 434–437, 2007. DOI: [10.1115/1.2437800](https://doi.org/10.1115/1.2437800)
- [14] Sun T., WU H., Lian B., et al.: *Stiffness modeling, analysis and evaluation of a 5 degree of freedom hybrid manipulator for friction stir welding*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 331, No.13, pp. 4441–4456,2016. DOI: [10.1177/0954406216668911](https://doi.org/10.1177/0954406216668911)

- [15] Huang T., Li Z., Li M., et al.: Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 2-dof translational parallel robot for pick-and-place operations, ASME Journal of Mechanical Design Vol. 126, No. 3, pp. 449–455, 2004. DOI: [10.1115/1.1711822](https://doi.org/10.1115/1.1711822)
- [16] Zheng X.Z., Bin H.Z., Luo Y.G.: *Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, No. 11–12, pp. 925–930, 2004. DOI: [10.1007/s00170-003-1782-z](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1782-z)
- [17] Romdhane L.: *Design and analysis of a hybrid serial manipulator*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 34, No. 7, pp. 1037–1055, 1999. DOI: [10.1016/S0094-114X\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(98)00079-2)
- [18] Vasilic G., Živanović S., Kokotović B., Glavonjić M.: *Optimizacija dužina spojki dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma - MOMA*, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.28-3.35, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [19] Vasilic G., Živanović S.: *Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo, Broj 1, str. 57-63, 2016. DOI: [10.5937/tehnika1601057V](https://doi.org/10.5937/tehnika1601057V)
- [20] Vasilic G., Živanović S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*, 40. Jupiter konferencija, 36. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-893-2, str. 3.47-3.54, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Maj 2016.
- [21] 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.
- [22] Živanović S., Dimić Z., Vasilic G., Kokotović B.: *Konfigurisanje virtuelne rekonfigurabilne dvoosne mašine sa paralelnom kinematikom integrisane sa CNC sistemom otvorene arhitekture na bazi EMC2 softvera*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo, Vol. 67, No. 4, pp. 519-526, 2018. DOI: [10.5937/tehnika1804519Z](https://doi.org/10.5937/tehnika1804519Z)
- [23] Živanović S., Vasilic G., *Variants of configuring the 2-axis reconfigurable parallel mechanism - MOMA*, Proceedings of 2nd International Scientific Conference Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2014, pp.33-40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, B&H, Republic of Srpska, 2-5. December 2014.
- [24] Vasilic G., Živanović S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog četvoosnog mehanizma sa hibridnom kinematikom sa proces obrade sečenja žicom*, 41. Jupiter konferencija, 37. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-978-6, str. 3.45-3.53, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Jun 2018.
- [25] Vasilic G., Živanović S.: *Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 147, pp. 103833, 2020. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833)

Vasilic, G., Živanović, S

INFLUENCE OF RESOLUTION OF PLANAR PARALLEL MECHANISM ON THE ACCURACY OF A COMPLEX MACHINE TOOL FOR THE WIRE CUTTING PROCESS

Abstract: Within this paper, a complex multi - axis machine tool is presented, which is intended for the wire cutting processing. The complex machine tool consists of two two-axis reconfigurable parallel mechanisms connected by a wire, which in this case represents the tool of the machine itself. The resolution of parallel mechanisms is not constant within the entire workspace, so the positioning errors of the platform have different values in different parts of the workspace. These errors are reflected in the machining process errors of a complex multi-axis machine, and in this paper an analysis is presented that connects the positioning errors of the platforms of parallel mechanisms with the processing errors. Also, the possibility of reducing the machining error by reconfiguring the parallel mechanisms from which the complex multi-axis machine intended for the wire cutting processing is made is considered.

Key words: Inverse and direct kinematics problems, Planar parallel mechanism, Complex machine tool, Wire cutting



Vidaković, J., Stepanić, P., Dimić, Z., Rakić, A.¹⁾

SIMULACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA UREĐAJA ZA PROSTORNU DEZORIJENTACIJU PILOTA²⁾

Rezime

U ovom radu predstavljena je metoda za simulaciju sistema upravljanja uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota u programskom paketu Simulink/Matlab bazirana na dinamičkom modelu uređaja. Uređaj za prostornu dezorijentaciju pilota modelovan je kao robot sa četiri stepena slobode kretanja sa cilindričnim zglobovima. Pri simulaciji sistema upravljanja za objekat upravljanja usvaja se mehanički podsistem motora, pri čemu se efektivni moment inercije motora računa iz dinamičkog modela robota. Razmatran je uticaj nestacionarnog objekta na praćenje trajektorije ostvareno brzinskom PI petljom, poboljšanje performansi upravljačkog sistema uvođenjem dinamičkog modela robota pomoću feedforward kompenzacije momenta opterećenja motora, kao i uticaj greške dinamičkog modelovanja.

Ključne reči: uređaj za prostornu dezorijentaciju, upravljanje, dinamički model, simulacija

1. UVOD

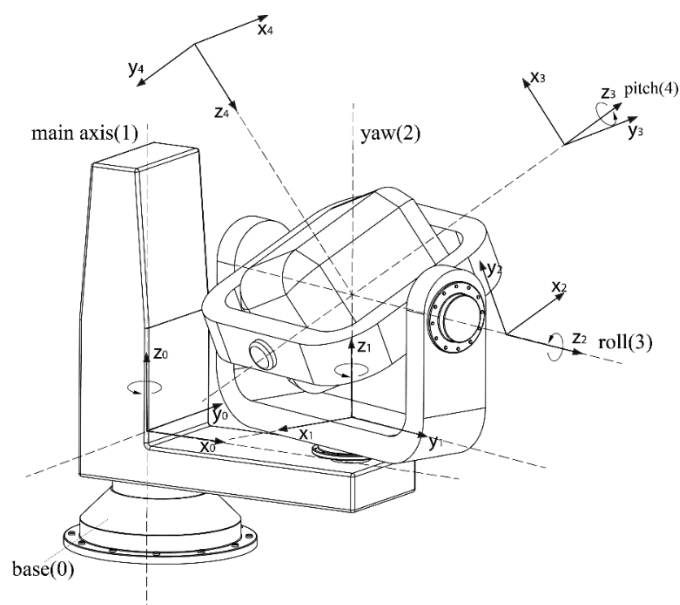
Proces trenaze pilota se u opštem slučaju oslanja na više metodologija učenja i trenažnih pomagala koja se koriste u okviru tri koncepta učenja: 1) teorijsko učenje; 2) obuka u trenažnim uređajima za simulaciju leta; 3) obuka u avionu. Borbeni avioni novije generacije ostvaruju nekonvencionalne letove koji se odlikuju veoma agilnim kretanjima sa velikim napadnim uglovima, vektorisanjem potiska u pravcu sve tri ose uz rotacije oko tih osa, pri čemu ostvaruju visoke vrednosti linearnih ubrzanja sa visokim priraštajima ubrzanja [1]. Navedeni nekonvencionalni uslovi leta su prisutni tokom obavljanja "supermanevara" [2]. Posledice delovanja opisanih opasnih uslova na sposobnost pilota za obavljanje zadataka upravljanja letelicom moraju biti ispitane metodama vazduhoplovne medicine. Takođe, piloti moraju proći kroz proces obuke za potrebe upravljanja letelicom u slučaju neobičnih trajektorija leta.

Prostorna dezorijentacija predstavlja jedan od glavnih uzroka nesreća sa smrtnim ishodom u vojnoj avijaciji. Pojednostavljeno se može opisati kao usvajanje pogrešnog utiska pilota o sopstvenoj poziciji i kretanju u odnosu na Zemljinu površinu [3]. Kao preventivnu meru protiv prostorne dezorijentacije, stručna i regulatorna tela predlažu obuku u trenažnim uređajima za simulaciju leta gde se piloti obučavaju na procedure i tehnike koje im omogućavaju da prepoznaju, izbegnu i reše probleme vezane za prostornu dezorijentaciju. Trenažni uređaji koji se koriste za obuku prostorne dezorijentacije značajno variraju u veličini i načinu demonstracije prostorne dezorijentacije, od uređaja namenski projektovanih za simulaciju prostorne dezorijentacije do simulatora leta. U uređajima za prostornu dezorijentaciju pilota (UPDP) različitih kinematičkih konfiguracija ispituje se sposobnost pilota da prepozna neuobičajene orijentacije koje se javljaju pri letu, da se adaptira na neobične pozicije, i da se pilot obuči da veruje u instrumente letelice umesto svojim čulima.

U ovom radu prikazana je metoda za simulaciju performansi upravljačkog sistema za UPDP koji je prikazan na Slici 1. UPDP je modelovan i upravljan kao robot sa četiri stepena slobode sa cilindričnim zglobovima, pri čemu se članovi i zglobovi UPDP-a smatraju krutim telima. Usvojena metoda realistične simulacije sistema upravljanja omogućava pravilan izbor metode upravljanja, pri čemu se vodi računa kako o performansama sistema, tako i o složenosti implementacije.

¹⁾ dr Jelena Vidaković, Lola institut, (jelena.vidakovic@li.rs), Pavle Stepanić dipl. inž. el., Lola institut, (pavle.stepanic@li.rs), dr Zoran Dimić, Lola institut, (zoran.dimic@li.rs), Aleksandar Rakić dipl. inž. el., Lola institut, (aleksandar.rakic@li.rs),

²⁾ Istraživanje opisano u ovom radu finansirano je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.



Slika 1. UPDP uređaj sa 4 stepena slobode [4]

2. SIMULACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA UREĐAJA ZA PROSTORNU DEZORIJENTACIJU PILOTA

Pri razvoju upravljačkog sistema UPDP-a, razvijeni su kinematički i dinamički modeli [5] u okviru razvoja algoritama planera trajektorije.

Izazov u upravljanju robota proističe iz nestacionarnosti modela i nelinearnih efekata sprezanja u dinamičkom modelu. Decentralizovane metode (pri kojima se svakim zglobov robota upravlja nezavisno od drugih) su jednostavnije za razvoj i implementaciju. S obzirom da UPDP ne ostvaruje velike brzine, postoji mogućnost da primena centralizovanih metoda upravljanja ne dovodi do značajnih poboljšanja performansi sistema kada se uzme u obzir složenost praktične implementacije. Sa aspekta izbora upravljačke strategije i projektovanja upravljačkih sistema trenajnih uređaja za simulaciju leta, ispravna simulacija performansi sistema upravljanja je veoma važna zbog smanjenih bezbednosnih rizika. U ovom radu se razmatra metoda upravljanja u prostoru zglobova brzinskim PI regulatorom, uz feedforward kompenzaciju momenta opterećenja usled kretanja međusobno povezanih članova UPDP-a. Ovde se pri simulaciji sistema upravljanja uzima u obzir sledeće: 1) rezonantne osobine mehaničke strukture; 2) efektivna inercija aktuatora koja se računa iz inverznog dinamičkog modela se koristi pri određivanju modela objekta upravljanja; 3) ograničenja momenata motora.

2.1 Modelovanje objekta upravljanja za potrebe razvoja simulacionih modela u Simulinku

Kao objekat upravljanja ovde se razmatra mehanički podsistem motora zgloba k čiji je nelinearni, nestacionarni model dat u jednačini (1).

$$I_{\text{eff}k} \ddot{q}_{mk} = \tau_{Mk} - \tau_{Lk} \quad (1)$$

Ovde je $\dot{q}_{mk} = r_k \dot{q}_k$ ugaona brzina rotora motora koji pokreće zglob k ; r_k je prenosni odnos reduktora; \dot{q}_k je ugaona brzina člana k , $I_{\text{eff}k}$ je moment inercije koji se odražava na rotor motora, tzv. efektivna inercija motora; τ_{Mk} je upravljački moment generisan od strane aktuatora zgloba k , τ_{Lk} je moment opterećenja. U jednačini (1), uticaj trenja je zanemaren i smatra se poremećajem [6]. U ovoj studiji se deterministički deo momenta opterećenja τ_{LDk} aktuatora zgloba k koji je posledica kretanja međusobno povezanih članova robota računa iz inverznog dinamičkog modela robota koji se može predstaviti kao sistem nelinearno-spregnutih diferencijalnih jednačina kretanja:

$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n h_{kji}(\mathbf{q}) \dot{q}_j \dot{q}_i + g_k(\mathbf{q}) = \tau_k \quad (2)$$

Svaka jednačina (za svaki zglob k) u prikazanom skupu n (broj stepeni slobode) diferencijalnih jednačina sadrži članove sila ili momenata koji se mogu klasifikovati u jednu od sledeće 4 grupe: 1) inercijalni- $d_{kk}(\mathbf{q}) \ddot{q}_k$, 2) reakcioni članovi generisani usled ubrzanja drugih zglobova- $d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j$, $j \neq k$, 3) brzinski reakcioni

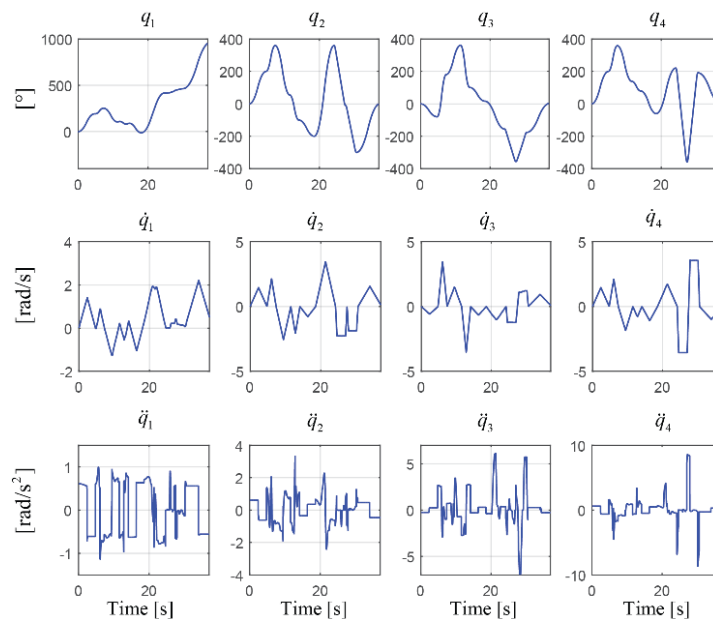
članovi (centrifugalni ili Koriolisovi)- $h_{kji}(\mathbf{q})\dot{q}_j\dot{q}_i$, 4) sila/moment usled sile Zemljine teže- $g_k(\mathbf{q})$ [7]. U jednačini (2), τ_k je pokretački moment za zglob k . Pri rešavanju inverznog dinamičkog zadatka robota primenom rekurzivnog metoda baziranog na opštim teoremama dinamike, pokretački moment $\tau_k = \hat{m}_{z_k}$ se dobija kao z_k komponenta vektora $\hat{\mathbf{m}}_k$, koji predstavlja moment kojim na segment k deluje segment $k-1$, dat u koordinatnom sistemu koji je vezan za zglob $k-1$. Iz (2) se računa efektivna inercija motora kao [7]:

$$I_{\text{eff}k} = (I_{mk} + d_{kk} / r_k^2). \quad (3)$$

U jednačini (3), I_{mk} je moment inercije motora i prenosnika koji je dostupan iz tehničke dokumentacije.

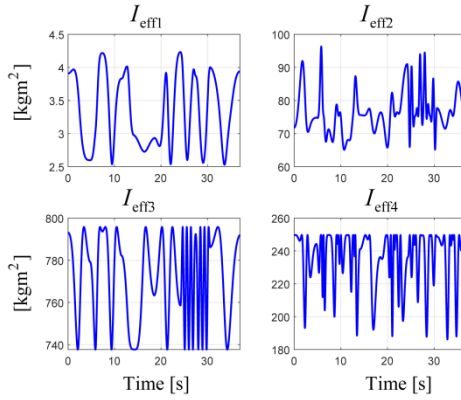
2.2 Proračun efektivne inercije

Proračun efektivne inercije motora, jednačina (1), (3) je neophodan za izbor pojačanja brzinskog PI regulatora u simulacionim modelima. Simulacija efektivne inercije nam daje informaciju o nestacionarnosti modela objekta upravljanja (mehaničkog podsistema motora), jednačina (1), tokom zadatih kretanja UPDP-a. Za proračun efektivne inercije prema (2) i (3), potrebno je rešiti inverzni dinamički zadatak UPDP-a, što je izvršeno rekurzivnim Njutn-Ojlerovim metodom u [5]. U programskom paketu Matlab ispisana je procedura za inverznu dinamiku UPDP-a u simboličkom obliku. Zbog rekurzivne prirode algoritma i njegove velike složenosti izračunavanja, primenjena je Matlab funkcija *coeff* kojom su dobijene funkcije $d_{kk}(\mathbf{q})$, $k=1..4$, jednačina (3). Podaci o aksijalnim momentima inercije motora i prenosnika su dati u [8-9]. Na Slici 2 data jedna tipična trajektorija UPDP-a koja je poslužila kao referenca pri simulaciji praćenja trajektorije upravljačkog sistema. Za promenu putanje UPDP-a na Slici 2 (prvi red), data je promena efektivne inercije na Slici 3.



Slika 2. Trajektorije UPDP-a [4]

Simulacijama su određene vrednosti najviše i najniže vrednosti efektivne inercije za putanju datu na Slici 2. Maksimalne vrednosti efektivne inercije u modelima mehaničkih podsistema aktuatora iznose $I_{\text{eff}1\text{max}} = 4.26 \text{ kgm}^2$, $I_{\text{eff}2\text{max}} = 98.01 \text{ kgm}^2$, $I_{\text{eff}3\text{max}} = 796. \text{ kgm}^2$, $I_{\text{eff}4\text{max}} = 250.28 \text{ kgm}^2$, dok su maksimalne vrednosti varijacije efektivne inercije 39.95%, 31.82%, 7.29%, 25.4% maksimalne efektivne inercije. Prenosni odnos za prvu osu je $r_1 = 67.2$, dok se za ose 2-4 koriste torki motora [4].



Slika 3. Promena efektivne inercije UPDP-a u simulacionom primeru

2.3 Izbor pojačanja brzinskog PI regulatora za potrebe simulacije

Da bi se procenio uticaj nelinearnih efekata sprezanja u dinamičkom modelu robota na upravljanje, potrebno je izvršiti izbor pojačanja PI regulatora u simulacionom modelu tako da se ostvari realistična simulacija performansi (približna performansi realnog sistema). Za brzinski PI regulator, karakteristična jednačina zatvorenog sistema upravljanja je data u jednačini (4):

$$s^2 + K_{PS} s / I_{effk} + K_{IS} / I_{effk}, \quad (4)$$

U jednačini (4) $I_{effk} = I_{effk}(\mathbf{q})$. Najjednostavniji pristup pri razvoju upravljačkog sistema za nestacionarni nelinearni objekat upravljanja je usvajanje LTI modela objekta upravljanja i projektovanje regulatora za najveće opterećenje uz prihvatljivo pogoršanje performanse za druge režime rada [7]. Ovde je podešavanje pojačanja PI regulatora vršeno za LTI-model sa najvećim opterećenjem, tj. za maksimalnu vrednost efektivne inercije I_{effk} koja je dobijena prethodno opisanim simulacijama. S obzirom da strukturalne deformabilnosti sistema nosu modelovane, posebno se vodi računa o rezonantnim efektima mehaničke strukture [10] i neophodno je ograničiti pojačanja PI regulatora. U ovom radu su pojačanja izabrana po metodi koji je dat u [4] tako da se postiže najbrži odziv bez oscilacija za sve vrednosti I_{effk} , uzimajući u obzir najnižu prirodnu učestanost mehaničke strukture UPDPa koja je dobijena pomoću softvera Catia i iznosi $\omega_r = 10.5028$ Hz [4]. Struktura brzinskog PI regulatora je data u [4].

2.4 Simulacija momenta opterećenja motora i zasićenja motora

Rasprezanjem dinamičkog modela robota se omogućava jednostrukoprenosna metoda upravljanja koja uzima u obzir dinamički model kroz feedforward kompenzaciju determinističkog dela momenta opterećenja τ_{LDk} motora [7]. Za svaki period interpolacije iz inverznog dinamičkog modela, jednačina (2), moment sprezanja $\tau_{coupledk}$ dobija iz sledeće jednačine [4, 7]:

$$\tau_{coupledk} = \sum_{j=1, j \neq k}^n d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n h_{kji}(\mathbf{q}) \dot{q}_j \dot{q}_i + g_k(\mathbf{q}). \quad (5)$$

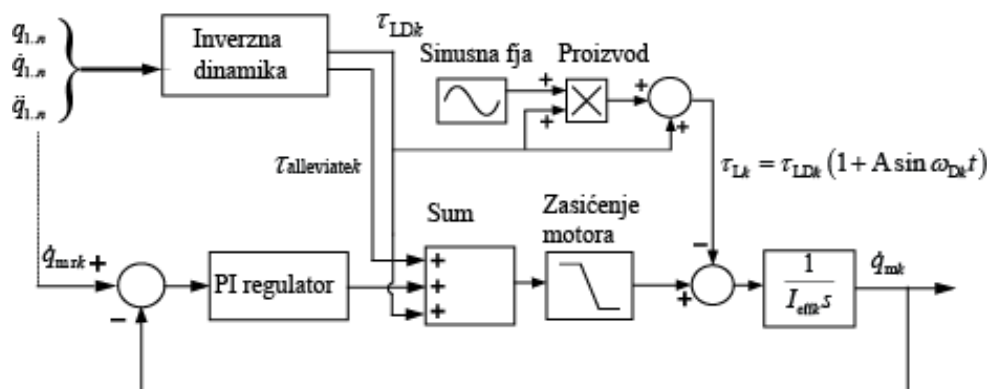
odakle se dobija moment opterećenja $\tau_{LDk} = \tau_{LDk}$ i moment $\tau_{alleviatek}$ kojim kretanja drugih članova (pogonjenih njihovim sopstvenim motorima) smanjuju potrebni moment koji motor u zglobu k mora da ostvari kako bi ostvario željeno kretanje datog člana. Momenti τ_{LDk} i $\tau_{alleviatek}$ se u simulacionim modelima računaju za svaki period interpolacije iz jednačina (2) i (5) na sledeći način [4]:

If $\text{sign}(\ddot{q}_k) = \text{sign}(\tau_{coupledk})$, then $\tau_{LDk} = \tau_{coupledk} / \Gamma_k$, $\tau_{alleviatek} = 0$;

Else if $\text{abs}(d_{kk}(\mathbf{q})\ddot{q}_k) > \text{abs}(\tau_{coupledk})$, then $\tau_{LDk} = 0$, $\tau_{alleviatek} = -\tau_{coupledk} / \Gamma_k$;

Else $\tau_{LDk} = -\tau_k / \Gamma_k$, $\tau_{alleviatek} = (\tau_k - \tau_{coupledk}) / \Gamma_k$;

Pri simulaciji zasićenja motora koje je primenjeno u simulacionim modelima vrši se dinamičko zasićenje preko bloka *Saturation Dynamic* koji je ugrađen u Simulink pomoću procedure u Matlabu koja uzima u obzir $\tau_{alleviatek}$, kao i činjenicu da je model motora opisan sa maksimalnom vrednošću efektivne inercije. Izračunati moment opterećenja za motor koji pokreće član k koji nastaje usled kretanja drugih članova robota τ_{LDk} se može kompenzovati feedforward signalom za svaki period interpolacije. Kompenzacija izračunatih momenata opterećenja u Simulink modelima je opisana na Slici 4.

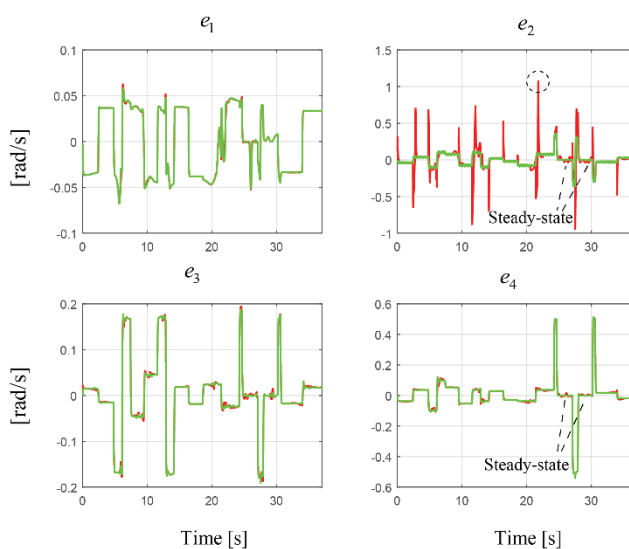


Slika 4. Simulacija feedforward kompenzacije momenta opterećenja motora usled kretanja drugih članova

Na Slici 4, za postizanje realistične simulacije, tj. da bi se uzelo u obzir greške modelovanja, kao i stohastički poremećaji, moment opterećenja je simuliran kao $\tau_{Lk} = \tau_{LDk}(\mathbf{q})(1 + A \sin(\omega_{Dk}t))$, gde su A i ω_{Dk} amplituda i frekvencija simuliranih poremećaja [4].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Razvijeni su Simulink modeli za sve četiri ose UPDP-a za modele objekata sa usvojenim maksimalnim opterećenjem (maksimalnom efektivnom inercijom) za trajektoriju sa Slike 2. Željene brzine su simulirane kao nizovi diskretnih vrednosti dobijenih iz planera trajektorije, Slika 2. Razvijene su dve grupe Simulink modela radi procene uticaja kompenzacije nelinearnog momenta opterećenja usled kretanja međusobno povezanih članova UPDP-a. U prvoj grupi, upravljanje se vrši sa brzinskim PI regulatorima uz simulaciju τ_{LDk} i $\tau_{alleviatek}$ koji se računaju za svaki period interpolacije koji iznosi 5ms. U drugoj grupi, vrši se kompenzacija τ_{LDk} feedforward signalom na način koji je predstavljen na Slici 4. Za $A=0.05$ (procenjena greška u proračunu momenta opterećenja od maksimalno 5%), greške u ostvarenoj brzini su date na Slici 5 zelenom bojom. Simulira se dinamičko zasićenje motora prema podacima o motorima dostupnim u tehničkoj dokumentaciji [8-9].



Slika 5. Greške u brzini: ostvarene brzinskim PI regulatorom-crvena kriva, ostvarene kompenzacijom τ_{LDk} dodatij brzinskom PI regulatoru- zelena kriva

Poboljšanje performansi usled uvođenja kompenzacije momenta opterećenja τ_{LDk} je značajno samo za drugu osu. Maksimalna greška u brzini se sa 1.08 rad/s spustila na 0.39 rad/s. Da bi se ispitalo pogoršanje performanse za promenljive vrednosti efektivne inercije razvijeni su simulacioni modeli u kojima su korišćeni isti brzinski PI regulatori podešeni za $I_{effkmax}$ i objekti modelirani pomoću minimalne vrednosti I_{effk} . Pogoršanje performanse sistema upravljanja nije značajno osim za osu dva, pri čemu se maksimalna apsolutna greška u ugaonoj brzini ostvarena PI brzinskim regulatorom sa 1.08 rad/s povećala na 1.204 rad/s. Realna greška bi bila između ove dve vrednosti. Za slučaj sa implementiranom kompenzacijom momenta

opterećenja, razlika u maksimalnim apsolutnim greškama u brzini (za $I_{eff2max}$ i $I_{eff2min}$) je zanemarljiva. Takođe, ispitan je uticaj greške modelovanja dinamike, i izvršena je simulacija sa $A=0.15$ (procenjena greška u proračunu momenta opterećenja od maksimalno 15 %). U tom slučaju, apsolutna vrednost maksimalne greške u stacionarnom stanju sa 0.39 rad/s skoči na 0.42 rad/s, tj. PI regulator uspeva da značajno neutrališe grešku u proračunu momenta opterećenja.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je simulacija sistema upravljanja za uređaj za prostornu dezorijentaciju pilota, koji je modelovan kao četvoroosni robot sa cilindričnim zglobovima, u programskom paketu Simulink. Simulacija sistema upravljanja uzima u obzir rezonantne osobine mehaničke strukture, efektivnu inerciju motora koja se računa iz inverznog dinamičkog modela, i ograničenja momenata motora. Simulacioni rezultati su pokazali da za projektovani UPDP uticaj nelinearnog dinamičkog modela na performanse upravljačkog sistema nije zanemarljiv, iako UPDP ostvaruje relativno male vrednosti ugaonih brzina članova. Značaj ostvarenih poboljšanja performanse je potrebno analizirati u odnosu na kompleksnost praktične implementacije razmatranog upravljačkog sistema.

5. LITERATURA

- [1] Norris, G.: *Breaking the stall barrier*, Flight International, Vol. 11, No. 17, pp. 34-37, 1992.
- [2] Albery, W.B.: *Current and Future Trends in Human Centrifuge Development*, SAFE Journal, Vol. 29, No. 2, 1999.
- [3] Gillingham, K.K.: *The spatial disorientation problem in the United States Air Force*, Journal of Vestibular Research, Vol. 2, pp. 297-306, 1992.
- [4] Vidaković, J., Kvirgić, V., Lazarević, M., Stepanić, P.: *Computed torque control for a spatial disorientation trainer*, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 269-280, 2020.
- [5] Kvirgić, V., Visnjic, Z., Cvijanovic, V., Divnic, D., Mitrovic, S.: (2015). *Dynamics and control of a spatial disorientation trainer*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 35, pp. 104-125, 2015.
- [6] Vukosavic, S.: *Digital control of electrical drives*, Springer Science & Business Media, New York, 2007.
- [7] Spong, M., Vidyasagar, M.: *Robot dynamics and control*, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [8] Siemens Configuration Manual, (PFT6), Edition 12, 6SN1197-0AD12-0BP0, 2004.
- [9] Siemens Configuration Manual, 05/2009, 6SN1197-0AE00-0BP3, 2009.
- [10] Craig, J.J.: *Introduction to robotics: mechanics and control, 3rd ed*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2005.

Vidaković, J., Stepanić, P., Dimić, Z., Rakić, A.

SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM PERFORMANCE OF SPATIAL DISORIENTATION TRAINER

Abstract: *This paper presents a method for simulation of the control system performance for spatial disorientation trainer in the Simulink / Matlab based on a dynamic model of the device. The spatial disorientation trainer is modeled as a robot with four rotational degrees of freedom. Within simulation of the control system performance, a motor's mechanical subsystem with effective inertia calculated from the dynamic model is adopted as the controlled process. The influence of the time variability of the process model on the PI speed feedback performance is considered. The effect of the improvement of trajectory tracking by introducing a compensation of the load disturbance due to coupled links motion calculated from the dynamic model via feedforward signal is analyzed, as well as the influence of the dynamic modeling error.*

Key words: *spatial disorientation trained, control, dynamic modeling, simulation.*



Vorkapić, N., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z.¹⁾

PROGRAMIRANJE TROOSNIH NU GLODALICA SA DVE TRANSLATORNE I JEDNOM OBRTNOM OSOM²⁾

Rezime

U radu se analizira programiranje troosnih NU glodalica koje imaju dve translatorne i jednu obrtnu osu. Obično su to desktop mašine za brzu izradu prototipova obrtnih simetričnih i/ili nesimetričnih delova. U radu je izvršena analiza raspoloživog softvera za programiranje koji može biti neki od standardnih CAD/CAM sistema ili neki specijalizovani CAM sistem. Pored analize i prikaza procedure metoda programiranja, razmatrana je i verifikacija programa simulacijom uklanjanja materijala i simulacijom rada virtuelne mašine po zadatom programu. Verifikacija metoda programiranja je realizovana obradom nekoliko karakterističnih delova, tipa geometrije i reljefa, primenom softvera Deskproto i Vericut.

Ključne reči: programiranje, simulacija, verifikacija, obrada sa obrtnom osom

1. UVOD

Brza izrada prototipova se pojavila kao jedna od ključnih tehnologija, sa sposobnošću da skрати dizajn i vreme razvoja proizvoda. Koristi se za brzu izradu fizičkih modela, prototipova i malih serija delova na bazi CAD modela [1]. Kada se govori o brzjoj izradi prototipova pre svega se misli na tehnologije dodavanja materijala, mada to mogu biti i tehnologije oduzimanja materijala, kombinovane tehnologije (dodavanja i oduzimanja), kao i formativne koje omogućavaju izradu delova livenjem.

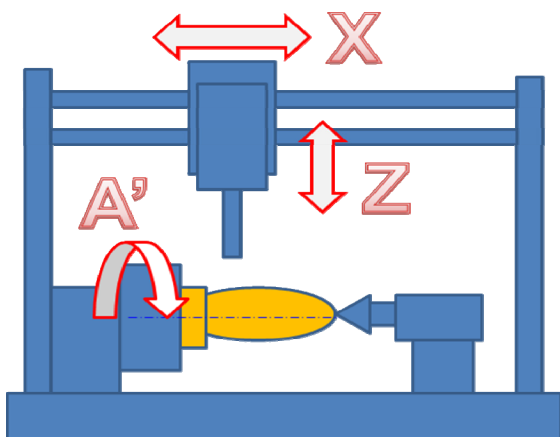
Trenutna generacija mašina za dodavanje materijala je ostvarila značajan uticaj, mada i ovi metodi imaju neka ograničenja, kada je u pitanju funkcionalnost tako napravljenih delova kao i materijal od čega je napravljen deo [2]. Predmet ovog rada je programiranje mašina za brzu izradu prototipova oduzimanjem materijala, poznat kao *Desktop milling*. Ova obrada može biti od troosne do petoosne. U radu se razmatra programiranje sa dodatnom obrtnom osom A, koja predstavlja rotaciju oko X ose. Takva obrada je poznata kao četveroosna. Međutim, obrada može biti i troosna, sa jednom obrtnom osom i dve translatorne. Konkretno u radu se priprema adekvatno okruženje za programiranje i verifikaciju programa jedne takve mašine. U ovoj konfiguraciji obradak se steže u steznu glavu na obrtnoj osi i kompletna obrada se izvodi u jednom stezanju, sa mogućnošću ostvarivanja povoljne orijentacije obratka prema alatu, za obradu kompleksnih obrtnih delova [3].

2. OPIS KONCEPTA MAŠINE

Tip mašine čije se programiranje razmatra u ovom radu pripada klasi mašina za brzu izradu prototipova rezanjem, pri čemu se u obradi koristi jedna obrtna osa. Ove mašine mogu biti troosne, sa dve translatorne i jednom obrtnom osom ili četveroosne sa tri translatorne i jednom obrtnom osom. Struktura mašine je A'OXZ, sa horizontalnom obrtnom osom A' u koju se postavlja obradak, i alatom koji nose dve translatorne ose Z i X, slika 2.1. Ova mašina je predmet razvoja, kao jedne edukacione mašine i u ovom radu se razmatra adekvatan sistem za njeno programiranje.

¹⁾ Nikola Vorkapić, (nvorkapic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), doc dr Branko Kokotović, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs), doc dr Nikola Slavković (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dr Zoran Dimić, (zoran.dimic@li.rs), LOLA Institut, Beograd

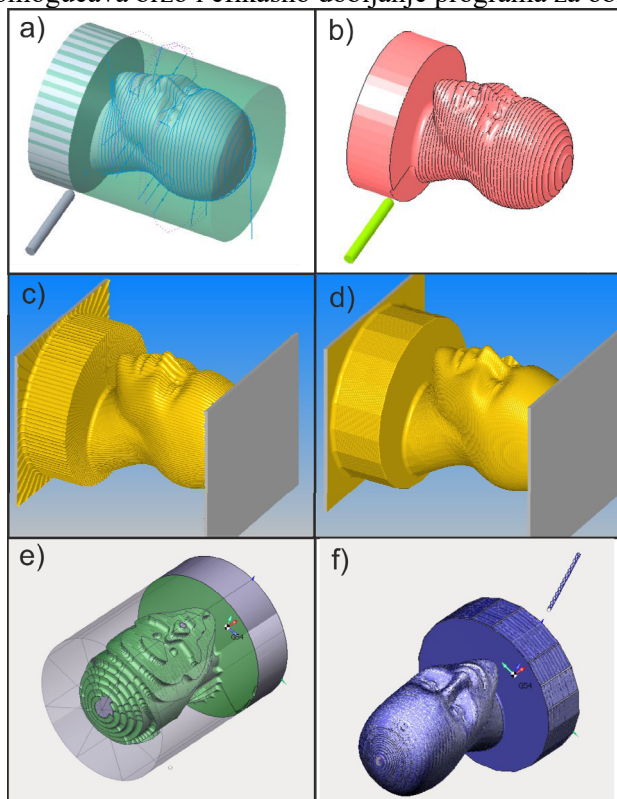
²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105, od 24.01.2020. godine.



Slika 2.1 Koncept mini CNC mašine strukture A'OXZ

softvera zavisi i od tipa modela koji treba obraditi. Ako je u pitanju već gotov model u STL formatu, onda se uobičajeno koriste specijalizovani softveri za brzu izradu prototipova, koji imaju mogućnost programiranja obrade sa obrtnom osom (Rotary Machining) kao što je na primer DeskProto [4], koji će biti detaljnije pokazan u poglavlju 4.0.

Verzija softvera DeskProto, pogodna za programiranje sa obrtnom osom je višeosna edicija (Multi-Axis) sa opcijama programiranja troosne, četvorosone i petoosne obrade. U ovom radu se razmatra opcija programiranja troosne obrade, ali sa jednom obrtnom i dve translatorne ose. Ovakvu obradu je moguće ostvariti na dva načina i to kontinualnom i/ili indesnom rotacijom obrtne ose. Na raspolaganju su i različite strategije za obradu (paralelna, poprečna, block, itd.). Primena ovakvih softvera je vrlo intuitivna i omogućava brzo i efikasno dobijanje programa za obradu.



Slika 3.1 Primer obrade izabranog modela glave u različitim CAD/CAM softverima

predobrade koja bi prethodila završnoj obradi delova sa obrtnom osom i moguće je vršiti programiranje samo završne obrade, što se može videti na slici 3.1.a i 3.1.b. Slika 3.1.a predstavlja simulaciju putanje alata,

Mašine ovakvog tipa su obično stone glodalice, koje mogu da rade u laboratorijskim ili kancelarijskim uslovima. Obrada na mašini se ostvaruje glodanjem po slojevima, na bazi STL fajla, koji se uobičajeno koristi za brzu izradu prototipova. Ovakve mašine se javljaju kao uspešna alternativa mašinama za aditivnu gradnju zbog niske cene, za kompleksne delove sa dominantnom obrtnom osom, koji nisu simetrični i ne mogu se obraditi na troosnim glodalicama u jednom baziranju.

3. ANALIZA SOFTVERA ZA PROGRAMIRANJE

Softver koji se može koristiti za programiranje mašina alatki sa dve translatorne i jednom obrtnom osom može biti neki od standardnih CAD/CAM sistema ili neki specijalizovani CAM sistem. Izbor

Pored softvera DeskProto, razmatrani su neki od univerzalnih CAD/CAM ili specijalizovanih CAM softvera za programiranje stone edukacione glodalice sa dve translatorne i jednom obrtnom osom. Izabrani primer za obradu je model glave koja se može videti na slici 3.1 na kojoj je prikazana obrada izabranog modela glave u tri različita softvera.

Kao primer univerzalnog CAD/CAM sistema, za analizu programiranja obrade CAD modela sa slike 3.1. izabran je softver Creo Parametric 6.0 [5]. Obzirom da je izabrani model glave u STL formatu, prethodno je potrebno izvršiti solidifikaciju, da bi se omogućio izbor površina za obradu, raspoloživim strategijama. Deo je obrađen strategijom Surface Milling, prema preporučenim režimima. Što se tiče pravca kretanja alata, on se uvek definiše uglom u odnosu na pozitivan smer X ose. Obzirom da se radi o specifičnoj obradi, koja zahteva obradu sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, u softveru Creo Parametric 6.0, izabran je tip četvorosone obrade. Obrada je specifična po tome što je kod ove četvorosone obrade Y osa nepomična, tj. koordinate Y ose su jednake nuli. Pri programiranju ovakvog tipa obrade, važno je definisati ravan kojoj je alat paralelan, kao i osu obrtanja obratka u odnosu na alat. Ovde ne postoji mogućnost adekvatne

odnosno CLF-a, dok slika 3.1.b. predstavlja simulaciju uklanjanja materijala prema generisanom CLF-u. Na slikama se može videti da je simulacija korektno izvršena, jer se dobija željeni oblik konture. Ova obrada se može realizovati na mašini, samo kada je već prethodno izvršena predobrada sa minimalnim dodacima za završnu obradu, ili je obradak od mekih materijala, pa su moguće i veće dubine rezanja. Kako softver Creo Parametric u sebi sadrži i generator postprocesora za mašine odgovarajuće konfiguracije, postoji mogućnost za njegovo generisanje.

Drugi primer softvera, koji je analiziran za programiranje primera sa slike 3.1 je AlphaCAM [6]. On predstavlja specijalizovan CAM softver, koji se koristi za programiranje NUMA (numerički upravljanih mašina alatki). Primer sa slike 3.1.c i 3.1.d. obradjen je u okviru modula Advanced Mill, koji odgovara modulu za programiranje višeosnih mašina alatki. Pogodnost koju ovaj modul nudi jeste očitavanje različitih formata modela, odnosno crteža. Za programiranje rotacionih simetričnih i asimetričnih delova glodanjem, odnosno sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, moguće je koristiti dve strategije obrade. Prva strategija, prikazana na slici 3.1.c, naziva se Cylindrical Parallel, kod koje obrtna osa A' vrši inkrementalno pomeranje za odgovarajući stepen, dok se alat kreće duž X ose. Druga strategija, koja je prikazana na slici 3.1.d, naziva se Cylindrical Profiling. Kod ove strategije, alat vrši inkrementalno pomeranje duž X ose, a obradak vrši obrtanje oko ose A'. U oba slučaja, Z osa služi za zauzimanje dubine rezanja, zavisno od oblika konture koja se obrađuje. Kao i u prethodnom primeru softvera, ne postoji mogućnost programiranja predobrade po cilindričnoj površini, već se na ovaj način može programirati samo završna obrada.

Treći primer programa kroz koji je izvršena analiza mogućnosti programiranja mašina alatki sa dve translatorne i jednom obrtnom osom je SprutCAM [7]. Ovaj softver je takođe specijalizovan za programiranje NUMA, ali i za programiranje robota za obradu. Za razliku od prethodna dva primera, kod kojih se dobijeni program za obradu generiše u nekoliko koraka, kod softvera SprutCAM 11 je taj postupak dugotrajniji. Deo za obradu se može učitati u program u različitim formatima, što predstavlja još jednu od pogodnosti ovog softvera. Potrebno je popuniti odgovarajuće upite i uneti režime obrade za odgovarajuće zahvate. SprutCAM poseduje mogućnost programiranja predobrade po cilindričnoj površini. Ovaj zahvat se u okviru softvera naziva Rotary roughing, koji je prikazan na slici 3.1.e. Za završnu obradu, koja je prikazana na slici 3.1.f, na identičan način, potrebno je uneti režime i izabrati odgovarajuću strategiju obrade za zahvat koji se naziva Rotary Machining. U delu predviđenom za simulaciju, moguće je učitati odgovarajući model virtuelne mašine i pomoćnog pribora, čime se na vreme mogu spriječiti greške nastale u programiranju procesa obrade za odgovarajući deo i time sprečiti moguće kolizije između elemenata obradnog sistema. SprutCAM sadrži generator postprocesora koji se programira u C programskom jeziku.

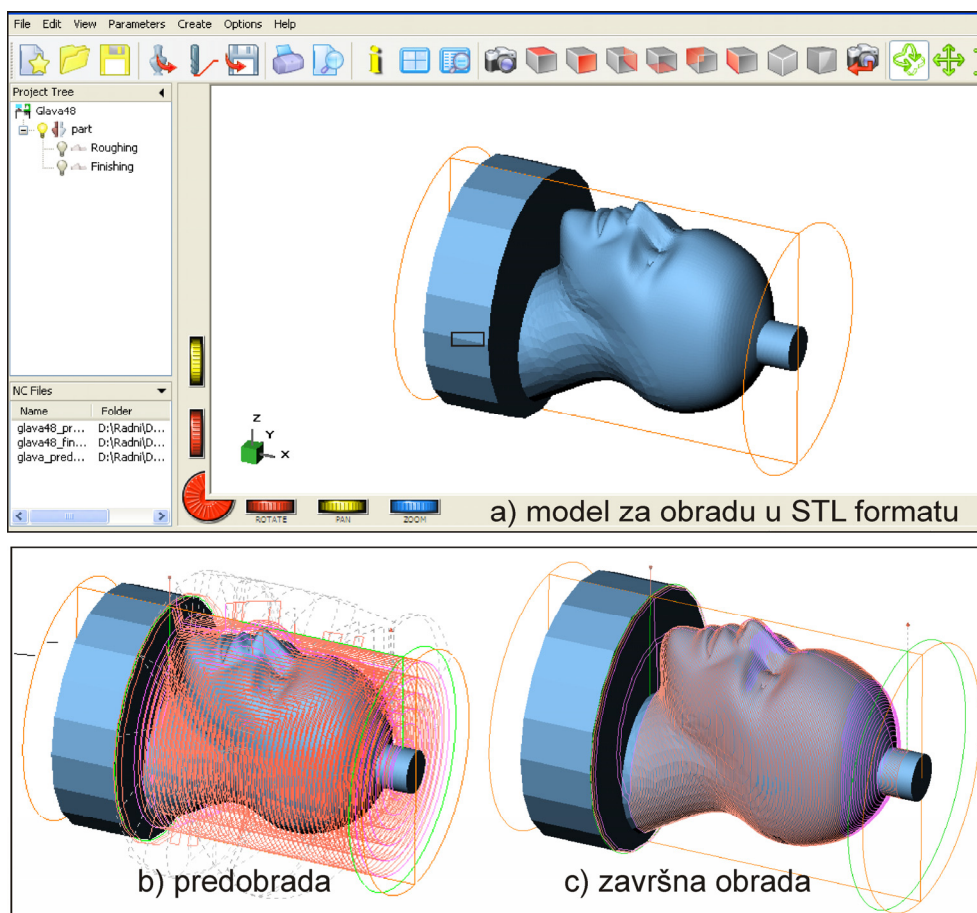
Sve simulacije analiziranih softvera su izvršene na bazi CL file-a. Simulacija programa za obradu koji je programiran u softveru DeskProto, prikazan je u okviru poglavlja 5.

4. PROGRAMIRANJE OBRADNE SA JEDNOM OBRTNOM OSOM PRIMENOM SOFTVERA DESKPROTO

U ovom poglavlju je predstavljeno programiranje brze izrade prototipova na desktop glodalica, koje imaju tri ose, pri čemu su dve ose translatorne, a jedna obrtna. Jedan od vrlo pogodnih softvera za programiranje je DeskProto [4]. Ovaj softver se može kombinovati sa raspoloživim CAD programima za pripremu modela za obradu, a mogu se koristiti i već gotovi modeli u STL formatu. Jedna od značajnih opcija ovog softvera je mogućnost programiranja obrade sa obrtnom osom, koja može biti sa kontinualanom rotacijom ili sa indeksnom rotacijom, uz primenu različitih strategija obrade.

Procedura programiranja obrade sa jednom obrtnom osom se odvija u nekoliko koraka: (1) izbor mašine i tipa glodanja (ovde mašina sa obrtnom osom i obrada sa obrtnom osom – Rotary machining); (2) učitavanje geometrijskog modela za obradu u STL formatu, eventualno skaliranje i orijentacija modela i definisanje centra rotacije; (3) izbor alata, režima obrade i strategije, dubine po prolazu za predobradu i dodatka za završnu obradu; (4) generisanje putanje za predobradu i završnu obradu; (5) prikaz putanje alata i (6) generisanje G koda za mašinu. Prikaz osnovnog ekrana softvera DeskProto je pokazan na slici 4.1a, sa učitanim modelom glave u STL formatu. Model glave je prethodno pripremljen i sačuvan u STL formatu u CAD/CAM sistemu PTC Creo 2.0. Prikaz generisanih putanja alata, po prethodno opisanoj proceduri za predobradu i završnu obradu pokazani su na slikama 4.1b i 4.1c.

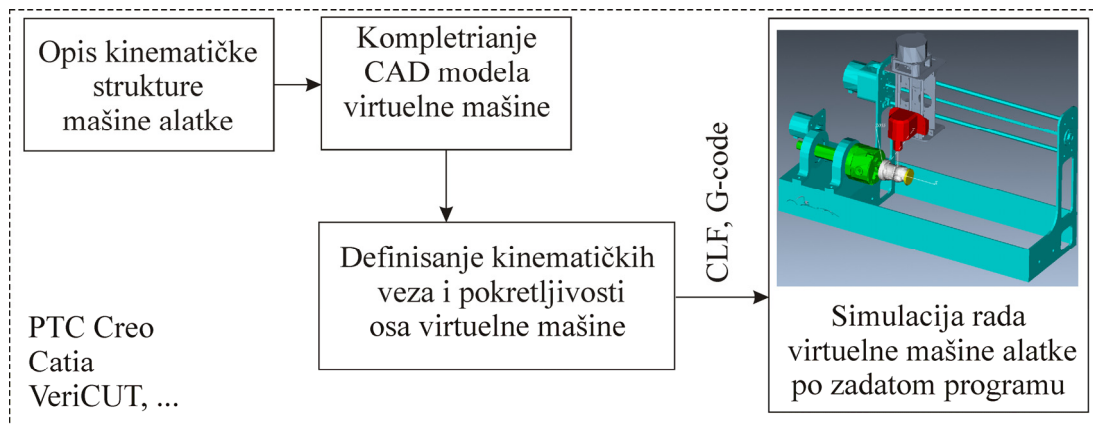
Uz sve pogodnosti koje nudi softver DeskProto za sada nema simulaciju putanje alata i uklanjanja materijala, radi verifikacije programa za obradu pre same obrade. U tom cilju je pripremljeno okruženje za verifikaciju dobijenih programa u Vericutu, sa konfigurisanom virtuelnom mašinom, koja izvršava program u G kodu i pri tome ostvaruje simulaciju uklanjanja materijala tokom virtuelne obrade, što je pokazano u poglavlju 5.



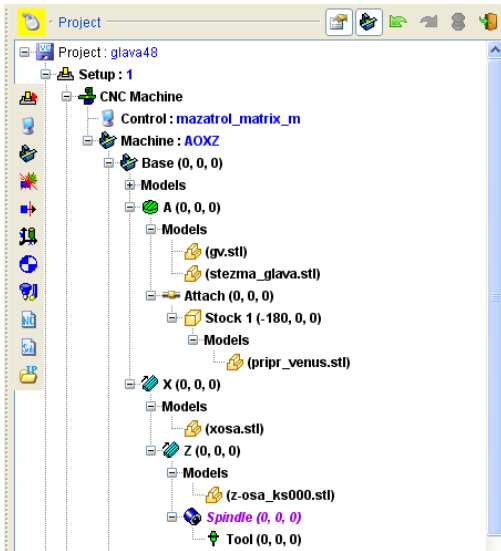
Slika 4.1 Primer programiranja modela glave u softveru DeskProto

5. VERIFIKACIJA PROGRAMA ZA OBRADU PRIMENOM SOFTVERA VERICUT

Verifikacija programa za obradu koji je dobijen u prethodnom poglavlju izvedena je u okruženju softvera Vericut [8]. Za kompletnu verifikaciju iskorišćena je mogućnost konfigurisanja virtuelne mašine alatke u Vericut okruženju prema zadatom programu, koja omogućava simulaciju rada mašine na bazi G kôda, uz simulaciju uklanjanja materijala i mogućnošću dobijanja virtuelnog obratka u STL formatu [9,10]. Za primer razmatrane 3-osne stone CNC mašine alatke sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, strukture A'OXZ konfigurisana je njena virtuelna mašina. Uopštena procedura konfigurisanja virtuelne mašine u Vericut okruženju je pokazana na slici 5.1.



Slika 5.1 Konfigurisanje virtuelne mašine za verifikaciju programa



Slika 5.2 Hijerarhijsko stablo strukture mašine A'OXZ u Vericutu

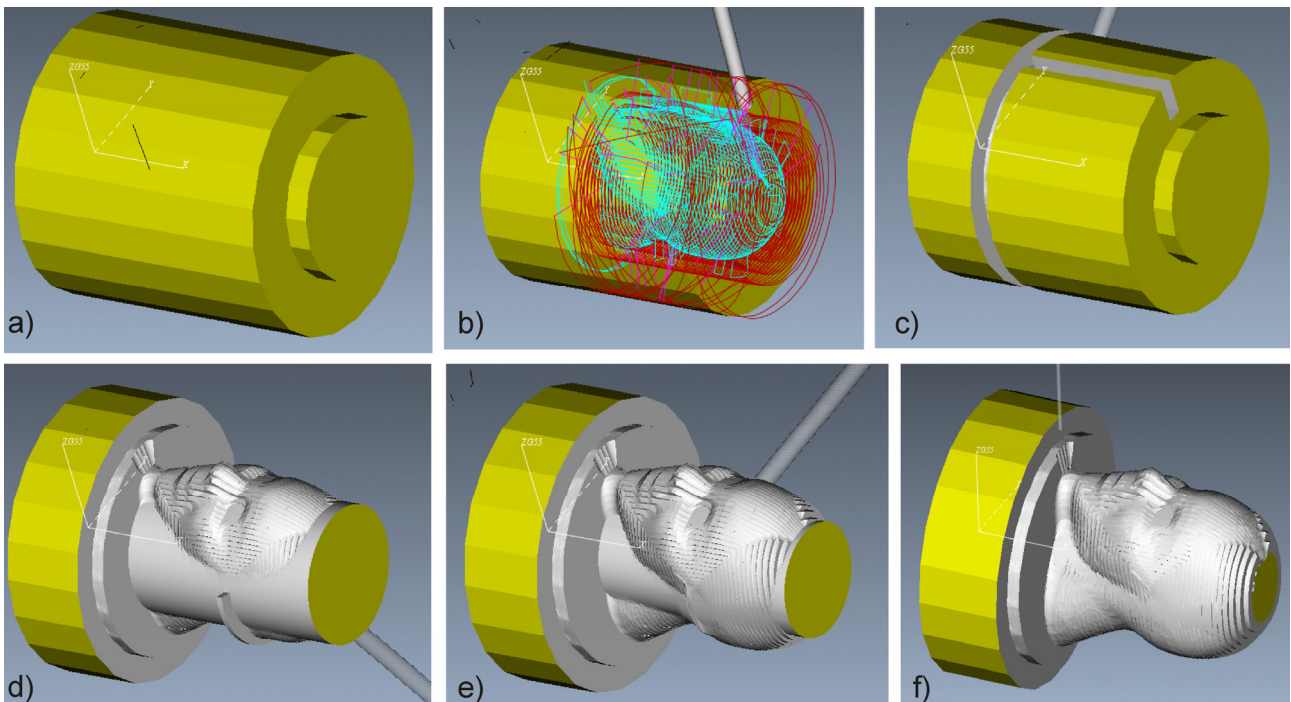
Kinematička struktura troosne CNC mašine alatke (A'OXZ) opisuje raspored i vrstu veza između baze i pokretnih komponenta mašine. Potrebno je definisati način i redosled vezivanja komponenta baze, grane alata i grane priprema, odnosno *BASE*, *TOOL* i *STOCK*. Nepokretni deo mašine je baza (Base), na koju treba dodati komponente grane alata (X i Z) i komponente grane priprema (A'), slika 5.2. Karakteristično za ovu mašinu je da nema pomeranja po Y osi.

Za konfigurisanje virtuelne mašine u Vericutu za NUMA strukture A'OXZ, polazimo od baze kao prve nepokretne komponente, na koju se dodaje obrtna osa A', kao deo grane obratka. Na ovoj osi se nalazi i stezna glava u koju se postavlja i bazira (Attach) pripremak (Stock) i obradak. Sa druge strane nepokretna baza je povezana sa preostale dve ose X i Z. Na bazu je po redosledu prvo dodata horizontalna translatorska osa X (X Linear), na kojoj je dodata i vertikalna translatorska osa Z (Z Linear). Na osu Z je povezano glavno vreteno (Spindle) i alat (Tool), čime je kompletirana kinematička struktura mašine. Hijerarhijsko stablo strukture

mašine A'OXZ je pokazano na slici 5.2. Nakon završenog konfigurisanja virtuelne mašine, treba je sačuvati i dodati je u bazu postojećih virtuelnih mašina alatki u Vericutu.

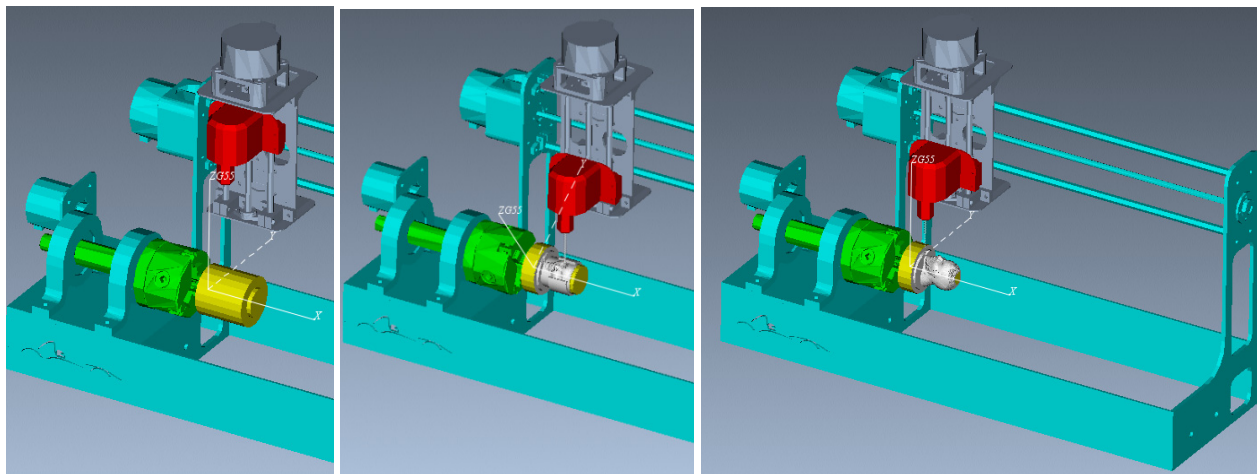
Za realizaciju projekta simulacije obrade potrebno je definisati [9,10]: (i) pripremak (Stock), (ii) radni predmet, koordinatni sistem (Nulta tačku programa), (iii) podešavanje položaja nulte tačke na virtuelnoj mašini (G code Offsets), (iv) alate koji se koriste u obradi i (v) NC programe i eventualno i potprograme. Primer jedne izvršene simulacije obrade za primer obrade modela glave u VeriCUT okruženju pokazan je na slikama 5.3 i 5.4.

Na slici 5.3 prikazana je simulacija putanje alata sa uklanjanjem materijala po etapama obrade, za primer predobrade modela glave. Pripremak može biti definisan u samom okruženju Vericut-a, ili može biti učitano kao STL fajl, slika 5.3a. Na slici 5.3b je pokazana putanja alata za predobradu na bazi postprocesiranog G koda, zajedno sa pripremkom, dok je na preostalim slikama 5.3c, d, e, f, pokazana simulacija uklanjanja materijala.



Slika 5.3 Primer simulacije uklanjanja materijala u Vericut-u

Pokazana simulacija uklanjanja materijala na bazi učitanoG koda, je okruženju Vericut-a, pokazana u dva prozora, od kojih je prvi pokazan na slici 5.3, a drugi sa virtuelnom mašinom na slici 5.4. Na ovaj način je proveren korišćeni postprocesor i tako dobijeni G kod, za specifičnu strukturu mašine koje nema Y osu, već dve translatorne X i Z i jednu obrtnu osu A', oko horizontalne ose X.



Slika 5.4 Verifikacija programa na virtuelnoj mašini u Vericut-u

6. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Ekspertimentalna verifikacija je izvršena na realizovanoj stonoj troosnoj CNC mašini alatki sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, strukture A'OXZ, za koju je i pripremano adekvatno okruženje za programiranje. S obzirom da je sistem za programiranje pripreman i pre kompletnog završetka hardvera mašine kao i njenog upravljanja, postoje male razlike u konfigurisanoj virtuelnoj mašini za potrebe verifikacije programa obrade. Ova razlika se odnosi na konstrukciono rešenje glavnog vretena i dodati nosač zadnjeg šiljka.

Obrada pokazana u ovom poglavlju je u stvari probni rad razmatrane mašine, koji je sa uspehom realizovan, posle kompletiranja upravljanja za mašinu na bazi LinuxCNC sistema. Kompletno radno okruženje mašine kao i obrađeni deo modela glave pokazani su na slici 6.1



Slika 6.1 Obrada na stonoj troosnoj mašini strukture A'OXZ

Neki od detalja prilikom probnog rada mašine su sledeći: (i) izgled obrađenog modela glave potvrđuju ostvareni koncept upravljanja i programiranja, kao i korektnost postprocesiranog G koda, (ii) pozicioniranje u granicama radnog prostora je bilo dobro, (iii) ostvarivanje poklapanja pozicije vrha alata sa nultom tačkom pokazalo je dobro pozicioniranje i određivanje nulte tačke, (iv) izgled obrađenog dela, potvrđuje ispravnost postavki referentnih tačaka na pogonskim osama i uspešan rad jedne realizovane 3-osne CNC mašine alatke sa dve translatorne i jednom obrtnom osom.

7. ZAKLJUČAK

Rezultati predstavljeni u ovom radu, obuhvataju analizu programiranja mašina alatki sa dve translatorne i jednom obrtnom osom. Analizirani su postojeći CAD/CAM sistemi, kao i specijalizovani CAM softveri i u okviru ovog rada predstavljene njihove mogućnosti. Na osnovu toga, stvorena je polazna baza znanja u ovoj oblasti, koja se može primeniti u edukaciji i vežbanjima, kao i laboratorijskim uslovima ispitivanja i istraživanja.

Analiziran je i primenjen jedan specijalizovan softver za programiranje ovakvog tipa mašine, kakav je DeskProto. S obzirom da DeskProto nema mogućnost simulacije rada virtuelne mašine i simulacije obrade uklanjanjem materijala, verifikacija putanje alata po zadatom programu izvršena je u VeriCUT softverskom okruženju. Time je stvorena sigurnost rukovaoca mašine i smanjena mogućnost pojave kolizija i grešaka u obradi.

Prikazana mašina za brzu izradu prototipova rezanjem, njeno programiranje i verifikacija programirane putanje alata je samo prva faza ovih istraživanja i dokaz koncepta jedne ovakve mašine. Istraživanja se planiraju proširiti i na konfigurisanje odgovarajućih postprocesora i programiranja u polarno cilindričnim koordinatama.

8. LITERATURA

- [1] Zivanovic S., Popovic, M., Vorkapic, N., Pjevic, M., Slavkovic N.: *An Overview of Rapid Prototyping Technologies using Subtractive, Additive and Formative Processes*, FME Transactions, Vol. 48, No. 1, pp. 246-253, 2020.
- [2] Frank, M. C., Wysk, R. A., Joshi, S. B.: *Rapid Prototyping Using CNC Machining*, 8th Design for Manufacturing Conference, Proceedings of DETC03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Chicago, Volume 3a, pp.1-10, Illinois, USA, September 2-6, 2003.
- [3] Joshi, A. M.: *Computer aided process planning for multi-axis CNC machining using feature free polygonal CAD models*, Graduate Theses and Dissertations, 2015. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/14844>
- [4] The DeskProto Multi-Axis edition, for rotary machining and more, <https://www.deskproto.com/products/multi-ax-ed.php>, jul 2020.
- [5] Creo Parametric, <https://www.ptc.com/en/products/creo/parametric>, jul 2020.
- [6] AlphaCAM, <https://www.alphacam.com/Alphacam>, jul 2020.
- [7] SprutCAM, <https://sprutc.com/sprutc/4-axis-milling-programming/>, jul 2020.
- [8] CGTech Vericut, <https://www.cgtech.com/products/about-vericut.html>, jul 2020.
- [9] Zeljković, M., Tabaković, S., Živković, A., Živanović, S., Mladenović, C., Knežev, M.: *Osnove CAD/CAE/CAM Tehnologija*, udžbenik, ISBN 978-86-6022-120-1, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2018.
- [10] Živanović, S., Vorkapić N., Dimić, Z., Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osnemi CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo 68, Broj 6/2019, str. 823-831, ISSN0040-2176, UDC: 621.92/98-519:004.4, doi: 10.5937/tehnika1906823Z

Vorkapić, N., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z.

PROGRAMMING OF 3-AXIS CNC MILLING MACHINES WITH TWO TRANSLATORY AND ONE ROTARY AXES

Abstract: *The paper analyzes the programming of three-axis NU milling machines that have two translational and one rotary axis. These are usually desktop machines for rapid prototyping of rotating symmetrical and/or asymmetrical parts. The paper analyzes the available programming software, which can be one of the standard CAD / CAM systems or a specialized CAM system. In addition to the analysis and presentation of the programming method procedure, the verification of the program by simulating the removal of materials and simulating the operation of a virtual machine according to a given program was also considered. Verification of programming methods was realized by processing several characteristic parts, such as geometry and relief, using Deskproto and Vericut software.*

Key words: programming, simulation, verification, rotary machining



Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N., Kokotović, B.¹⁾

ANALIZA PRIMENE NOVOG METODA PROGRAMIRANJA CNC STRUGOVA PRIMENOM STEP-NC PROTOKOLA ²⁾

Rezime

U radu se analizira mogućnost primene nove metode programiranja na bazi STEP-NC protokola za CNC strugove. Metod programiranja je baziran na STEP-NC standardu ISO 10303 AP238. U cilju verifikacije metoda programiranja, konfigurisani su virtuelni CNC strugovi koji mogu interpretirati STEP-NC programe. Virtuelni strugovi su integrisani u softversko okruženje STEP-NC Machine. Predložen je metod za dobijanje STEP-NC programa, kao i mogućnost trenutne primene takvih programa na raspoloživim CNC strugovima, korišćenjem raspoloživih postprocesora softvera STEP-NC Machine. Verifikacija predloženog metoda za programiranje je izvršena prvo, kroz simulacije na konfigurisanim virtuelnim CNC strugovima, a potom i eksperimentalno obradom izabranog probnog dela.

Ključne reči: STEP-NC, programiranje, CNC strug, simulacija

1. UVOD

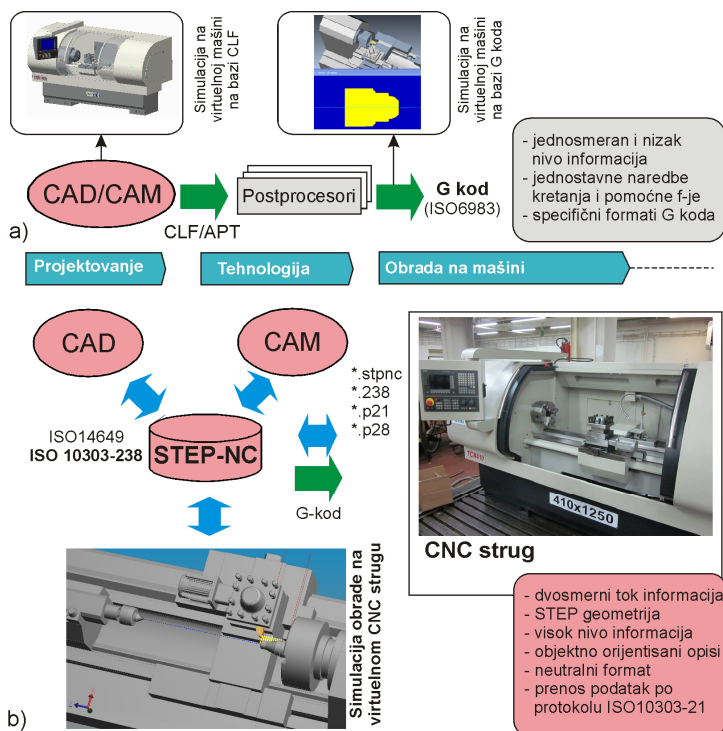
Već više od pola veka programiranje numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) je zasnovano na G-kôdu, prema standardu ISO 6983. Ovaj standard definiše proces obrade preko jednostavnog kretanja alata u odnosu na obradak primenom linearne i kružne interpolacije (pomoću odgovarajućih pripremljenih, G funkcija, za definisanje tih vrsta kretanja alata) i raznih uključivanja i isključivanja u obradnom sistemu (korišćenjem pomoćnih, M funkcija). Programom ovakvog formata adresiraju se direktno pojedine ose mašine, pa je neophodno koristiti postprocesore za svaku upravljačku jedinicu i kinematiku mašine posebno. Prema tome, sadašnji upravljački programi u obliku G kôda ne uključuju sve potrebne informacije o proizvodu, kao što su podaci o geometrijskim primitivima modela, tolerancijama, osobinama materijala, baziranju, pomoćnom priboru i drugim informacijama nastalih tokom projektovanja i planiranja tehnologije procesa obrade [1-6]. Sve ove informacije su nestale prilikom postprocesiranja putanje alata u G kôd, pa je tok informacija u ovom slučaju jednosmeran, slika 1a.

Ako se pojedini tehnološki oblici i/ili tehnološki primitivi, na delu koji treba napraviti, nazovu objektima (Features) i ako se program za tu izradu kompletira pomoću tih objekata, ne pomoću alfanumeričkih tekstova, onda se takvo programiranje NUMA može nazvati objektno programiranje [1]. Ovaj novi metod programiranja NUMA bazira se na primeni grupe STEP standarda, ISO 14649 i ISO 10303-238, i poznat je kao STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control) [7], slika 1b. Programiranje NUMA na bazi STEP-NC standarda omogućava vrlo visok nivo informacija, objektno orijentisane opise dela u neutralnom formatu, dvosmernu komunikaciju informacija, kao i povratne informacije iz procesa. Međutim, klasična programiranja u G kôdu su još uvek aktuelna i dominantno zastupljena, dok objektno programiranje do sada nije uvedeno u punom obimu, pa oba ova metoda programiranja egzistiraju uporedo [1,6], kako je i ilustrovano na slici 1.

Primenom klasičnih metoda programiranja NUMA potrebno je ostvariti mnogo konverzija podataka da bi se pokrenula jedna mašina, programima koji su formatirani po standardu ISO6983, što je poznati G kôd. Za moderne mašine alatke više nije dovoljno imati samo elementarne podatke o geometriji i tehnologiji dela, koji treba napraviti. Sada je došlo vreme kada treba jednu mašinu programirati pomoću projekta geometrije radnog predmeta (CAD), bez konverzija prilikom pripreme mašine za rad [1,3,6].

¹⁾ prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Nikola Vorkapić, (nvorkapic@mas.bg.ac.rs), doc dr Nikola Slavković, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), doc dr Branko Kokotović, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.



Slika 1. Uporedni prikaz programiranja CNC strugova primenom G-kôda i primenom STEP-NC protokola

integrirani virtualni CNC strugovi koji rade po programu u STEP-NC formatu u okruženju softvera STEP-NC Machine.

2. PROGRAMIRANJE OBRADNE STRUGANJEM NA BAZI STEP-NC PROTOKOLA

Jedan od prvih sistema zasnovan na STEP standardu koji se odnosi na obradu struganjem je STEPTurn sistem [10-12]. STEPTurn su razvili istraživači na Univerzitetu u Štutgartu (ISW), Nemačka. Ovaj sistem je CAPP sistem koji premošćuje jaz između CAD-a i CAM-a i čita podatke o geometriji prvo iz datoteke STEP AP203 Part21 i prikazuje geometriju dela i izvršava normalne zadatke za planiranje procesa kao što su prepoznavanje geometrijskih primitiva i NC sekvenci (Workingstep) radi generisanja STEP-NC fizičkog fajla [10]. Drugi takav sistem, TurnSTEP, razvijen je saradnjom istraživača iz Nacionalne istraživačke laboratorije za STEP-NC tehnologije POSTECH (Južna Koreja) i istraživača sa Univerziteta ISW u Štutgartu. TurnSTEP mora biti u potpunosti usklađen sa ISO 14649 i pogodan za e-proizvodnju. Što se tiče obrade struganjem, TurnSTEP je jedan od najranijih sistema koji je razvijen u skladu sa STEP-NC i podržan XML formatom [10]. Sistem G2STEP dizajniran je na osnovu dizajnerskih i funkcionalnih razmatranja koje su razvili istraživači iz Nacionalne istraživačke laboratorije za STEP-NC POSTECH (Južna Koreja), zajedno sa istraživačima iz EPFL (Švajcarska) i zasnovan je na ISO 14649 modelu podataka, ARM modelu i shemi uputstava za G-kôd zasnovan na FANUC0 seriji. Osnovna ideja za razvoj sistema G2STEP je generisanje STEP-NC programa na bazi G-kôda sa dodatnim informacijama o stvarnoj obradi koje treba lako da generišu kvalifikovani operatori [10,13].

Objektno programiranje na bazi STEP-NC protokola nije još uvedeno u punom obimu. Probe sa ovim metodom programiranja kao i njegova promocija deo su aktuelnih istraživanja i za sada se obično vrše u hibridnim obradnim sistemima [1], koji se obično programiraju pomoću G kôda, ali imaju i neku mogućnost da preuzmu i izvrše program dobijen na bazi STEP-NC protokola. Ovo je moguće zahvaljujući postojanju konvertora koji STEP-NC program prevodi u format koji UJ mašine može da interpretira. Primer jednog takvog pristupa je proizvođač NU sistema SIEMENS, koji se sa svojim sistemom ShopTurn za programiranje strugarske obrade na samoj mašini, uključio u razvoj objektnog programiranja [1,14]. Detalji ovog razvoja se mogu opisati u nekoliko koraka: (i) modeliranje radnog predmeta u CAD okruženju Catia, sa izlazom u STEP AP203 formatu; (ii) planiranje procesa obrade izvršeno je pomoću skupa tehnoloških primitiva u izdvojenih pomoću STEP 10303 AP224; (iii) za uvođenje opštih podataka o procesima koristi se i ISO 14649-10, dok se za izdvajanje podataka o procesima obrade struganjem vrši se po ISO 14649-12; (iv)

U ovom radu se razmatra analiza primene novog metoda programiranja CNC strugova na bazi STEP-NC protokola, primenom standarda ISO 10303 AP238 i softvera STEP-NC Machine kod strugova čije upravljačke jedinice izvršavaju G-kôd.

Kod klasičnog metoda programiranja verifikacija programa obrade je moguća u okviru CAD/CAM sistema [8] ili nekog CNC simulatora. Ova verifikacija programa može biti bazirana na putanji alata CLF (Cutter Location File) i/ili na G kôdu, i može uključivati i virtualnu mašinu alatku, slika 1a.

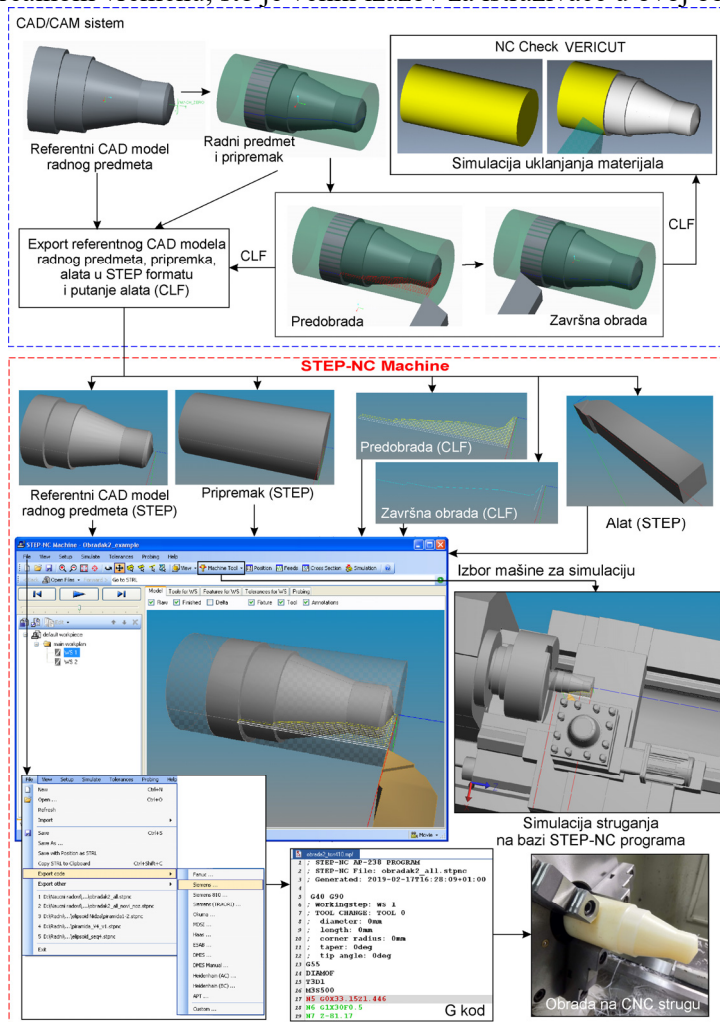
Novi metod programiranja baziran na STEP-NC protokolu AP238 (ISO 10303-238), takođe ima mogućnost konfigurisanja virtualne mašine alatke [9] i njihovu upotrebu za simulaciju rada mašine na bazi STEP-NC programa (*.stpnc, *.238, *.p21, *.p28), slika 1b. U cilju pripreme za analizu primene novog metoda programiranja primenom STEP-NC standarda, konfigurirani su i

konvertovanje dobijenog objektno orijentisanog programa (STEP-NC programa) u pogodan format, koji upravljačka jedinica te mašine može da čita i interpretira. Najjednostavniji slučaj je kada se konverzija vrši u G kôd [1,14].

Postoji puno rezultata za primenu STEP-NC standarda za operacije struganja [10-13,15,16] i svi se uglavnom zasnivaju na ISO14649 standardu. Ovaj rad ima za cilj da istraži primenu STEP-NC standarda ISO10303-AP238 za CNC strugove koji se programiraju primenom G kôda.

3. HIBRIDNI METOD PROGRAMIRANJA CNC STRUGOVA NA BAZI STEP-NC PROTOKOLA

Programiranje NUMA na bazi STEP-NC protokola je moguće ostvariti na tri nivoa [17]: (i) prvi nivo predstavlja indirektno ili hibridno STEP-NC programiranje koje podrazumeva korišćenje dobijenog STEP-NC programa njegovim prevođenjem na G kôd, da bi se mogla ostvariti obrada na postojećim mašinama sa upravljačkim jedinicama koje mogu da interpretiraju samo G kôd. Ovaj je metod je aktuelan jer može omogućiti primenu STEP-NC programiranja na većini postjećih NUMA i obično se naziva hibridni metod programiranja; (ii) drugi nivo predstavlja direktno STEP-NC programiranje koje podrazumeva korišćenje STEP-NC programa na NUMA sa upravljačkim jedinicama koje mogu ovakve programe direktno interpretiraju. U industriji je broj ovakvih mašina zanemariv i one se pretežno nalaze u naučno-istraživačkim institucijama, jer su još uvek u fazi razvoja; (iii) treći nivo predstavlja adaptivno STEP-NC programiranje, gde NUMA upravljačke jedinice on-line procesiraju podatke iz procesa i optimizuju parametre obrade u realnom vremenu, što je veliki izazov za istraživače u ovoj oblasti.



Slika 3. Hibridni metod programiranja CNC strugova na bazi STEP-NC protokola

softver, kao što je pokazano u [6,9]. U ovom poglavlju je pokazan predloženi metod, po kome se priprema sopstveni STEP-NC program korišćenjem pripreme tehnologije obrade u raspoloživom CAD/CAM sistemu, PTC Creo 2.0.

Tako generisani program se može simulirati u okviru STEP-NC Machine na konfigurisanom virtuelnom

Ovaj rad razmatra metod hibridnog programiranja, zasnovan na standardu ISO 10303-238 i softveru STEP-NC Machine, koji ima mogućnost za prevođenje STEP-NC fajla u formatu P21 na odgovarajući G-kôd.

Za izabrani obradak, potrebno je pripremiti tehnologiju obrade. Priprema STEP-NC programa za struganje podrazumeva prvo pripremu potrebnih geometrijskih informacija o obratku, pripremu, alatu, u STEP formatu. Zatim je potrebno pripremiti putanju alata u raspoloživom CAD/CAM sistemu. Na slici 3 pokazana je procedura sa osnovnim redosledom događaja u pripremi STEP-NC programa koja počinje u CAD/CAM sistemu, a završava u softveru STEP-NC Machine. Za razmatrani primer tehnologija obrade je pripremljena u CAD/CAM sistemu, odakle se preuzimaju modeli radnog predmeta, priprema, alata, u STEP formatu i putanje alata u CLF-u (za predobradu i završnu obradu) i učitavaju u softver STEP-NC Machine, gde se sve ove informacije integrišu u jedinstven STEP-NC program.

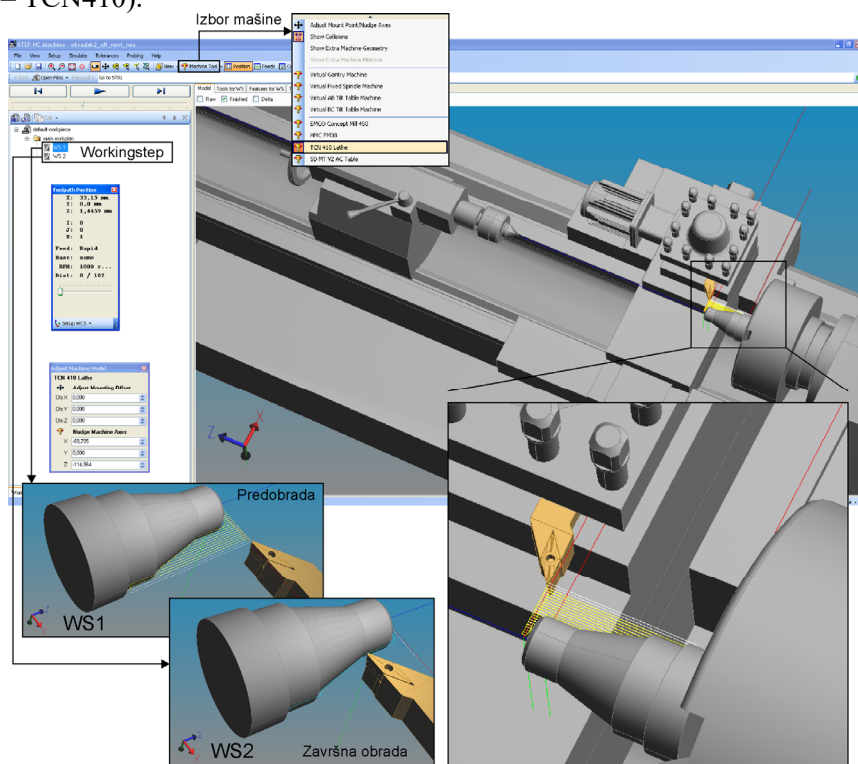
Za uvežbavanje novog metoda programiranja na primeru obrade struganjem, za sada nije moguće učitati mašinu iz baze softvera STEP-NC Machine, jer ne postoji, ali je zato moguće konfigurisati i integrisati svoju mašinu u

NU strugu, slika 3. Da bi radni predmet bilo moguće obraditi na većini raspoloživih NU strugova, koji se upravljaju pomoću G kôda, ovako dobijeni program se može korišćenjem Exoprtr opcije softvera STEP-NC Machine postprocesirati do G kôda na osnovu raspoložive baze postprocesora. Za sada ovo je tek priprema za novi metod programiranja, bez kompletne funkcionalnosti koju nudi STEP-NC, koja je primenljiva na postojeće CNC strugove.

4. SIMULACIJA RADA VIRTUELNOG CNC STRUGA NA BAZI STEP-NC PROGRAMA

Danas mali broj mašina može direktno interpretirati STEP-NC program. S tim u vezi, za direktnu verifikaciju STEP-NC programa korisno je koristiti konfigurisane virtualne mašine koje mogu raditi u okruženju STEP-NC Machine.

Konfigurisani virtuelni CNC strug može da interpretira STEP-NC programe u softverskom okruženju STEP-NC Machine. Primer ovakvog konfigurisanja strugova se može obuhvata sledeći niz aktivnosti [6,9]: (i) priprema CAD modela CNC struga u raspoloživom CAD/CAM sistemu u STEP formatu (AP203, AP214 or AP224); (ii) priprema opisa strukture mašine u XML formatu (algoritam upravljanja, baza mašine-nepokretni deo, definisanje koordinatnih osa na grani alata i na grani obratka, hodovi osa, postavljanje alata i obratka); (iii) prebaciti u folder .../ Machine, XML i STEP fajl mašine; (iv) pokrenuti STEP-NC Machine, učitati program i izabrati iz padajućeg menija Machine Tool konfigurisanu virtuelnu mašinu (npr. CNC strug – TCN410).



Slika 4. Simulacija rada CNC struga TCN410 u STEP-NC Machine okruženju

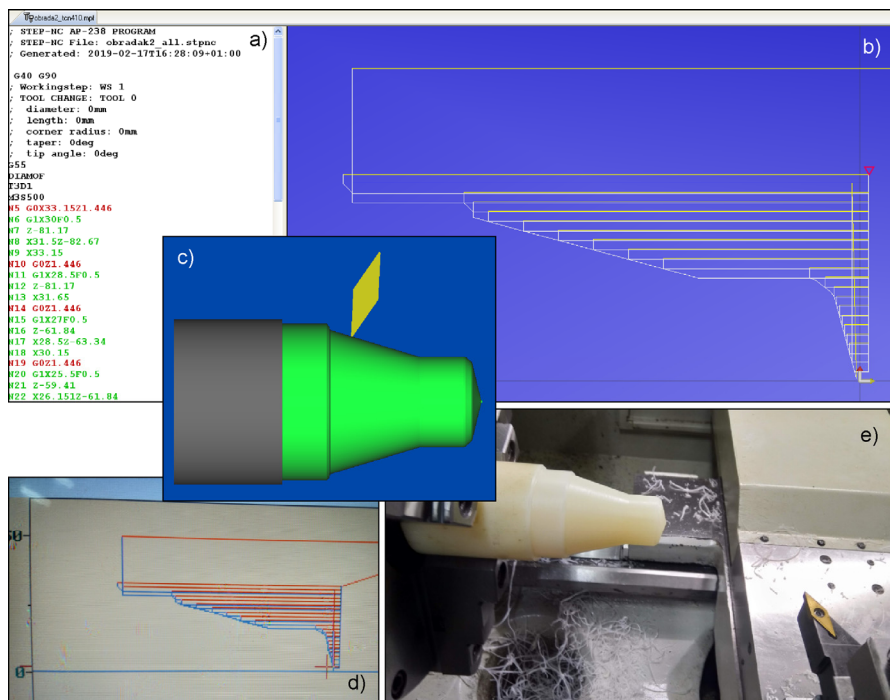
Za korektno kreiranje strukture XML fajla neophodno je učitati komponente sklopa mašine pomoću odgovarajućih oznaka shape_eid, kao i oznaka za površine face_eid za šta je potrebno koristiti softver ST Viewer. U strukturi mašine se mogu razlikovati tri osnovne celine: nepokretni deo mašine, ose na grani alata i ose na grani obratka. Za primer CNC struga razmatranog u ovom radu, pokretni klizači su postavljeni na grani alata sa kretanjima po X i Z osama. Treća osa Y takođe mora biti definisana u strukturi mašine, bez obzira što po njoj nema pomeranja, jer se koristi algoritam za serijsku kinematiku „3-axis“. Zbog toga se, prilikom definisanja Y ose zadaje da je $Y_{min} = 0$, $Y_{max} = 0$.

Model mašine u STEP formatu se izvozi u odnosu na referentni koordinatni sistem mašine, u odnosu na koji se postavlja i obradak, koji se može pomerati duž ose Z, što zavisi od položaja nulte tačke obratka. Prilikom pripreme modela ne moraju se učitati sve komponente originalnog modela, da bi model mašine bi što jednostavniji i da bi se brže učitavao. U ovom slučaju za CNC strug TCN410 u virtuelnu mašinu nije uključena kabina mašine, zbog bolje vidljivosti zone obrade tokom simulacije i jednostavnijeg modela.

Konfigurisani strug TCN410, se može izabrati iz padajućeg menija Machine Tool, slika 4, softvera STEP-NC Machine i ovo je jedan od prvih konfigurisanih CNC strugova u ovom softveru. Nakon pokretanja softvera STEP-NC Machine, i izbora mašine na njoj je moguće pokrenuti i testirati STEP-NC programe. Rad u virtuelnom okruženju je pogodan za obuku i obrazovanje u programiranju i pripremu za novi metod programiranja na bazi STEP-NC protokola.

5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Verifikacija razvijene metodologije programiranja primenom STEP-NC protokola, kroz obrade delova je izvršena na raspoloživim CNC strugovima u laboratoriji uz programiranje, simulaciju i prevođenje programa *.p21 u G kôd korišćenjem razvijenog TurnSTEP-NC translatora. Pre izvođenja eksperimenata, prema metodi programiranja prikazanom u poglavlju 3, za svaki eksperiment je, korišćenjem softvera PTC Creo 2.0, pripremljena putanja alata, STEP fajlovi (AP203) pripremk, obratka i alata, dok je STEP-NC Machine softver iskorišćen za generisanje programa u formatu P21. Nakon simulacije na virtuelnim CNC strugovima u STEP-NC Machine softveru, izvršeno je prevođenje programa na G-kôd.



Slika 5. Eksperimentalna verifikacija hibridnog metoda programiranja CNC strugova na bazi STEP-NC protokola

okruženju programa CIMCO (slika 5b,c), kao i na samoj upravljačkoj jedinici mašine Siemens Sinumerik 808D, slika 5d, nakon čega je izvršena obrada radnog predmeta na mašini, Slika 5e.

Obradom izabranog probnog dela je potvrđena mogućnost primene novog metoda programiranja na bazi STEP-NC protokola, primenom hibridnog metoda programiranja koja se u ovoj fazi svodi na prevođenje STEP-NC programa na G kôd primenom Export opcije softvera STEP-NC Machine.

6. ZAKLJUČAK

Probe i promocija novog metoda programiranja na bazi STEP-NC standarda za sada se obično vrše na hibridnim obradnim sistemima, koji se uobičajeno programiraju G kôdom, ali imaju i neku mogućnost da preuzmu i izvrše program pripremljen objektnim programiranjem. Ovde se koristi mogućnost softvera STEP-NC Machine za konverziju STEP-NC programa direktno u G kôd.

Pokazani primeri predstavljaju pripremu za novi metod programiranja primenom STEP-NC standarda, koja uz konfigurisane i inegrirane virtuelne mašine, ovde virtuelne CNC strugove, koje rade po programu u STEP-NC formatu u okruženju softvera STEP-NC Machine, imaju za cilj uvežbavanje i pripremu za primenu novog metoda programiranja.

U okviru daljih istraživanja se planira i razvoj translatora za prevođenje STEP-NC programa na specifične formate G-kôdova za CNC strugove. Novi metod programiranja baziran na STEP-NC standardu je i osnova za razvoj nove generacije upravljačkih jedinica NUMA, koje će biti u stanju da direktno interpretiraju STEP-NC programe, bez potrebe za njihovom konverzijom prilikom pripreme mašine za rad.

Primer pokazan u ovom radu se odnosi na obradu jednog radnog predmeta, slika 5, na CNC strugu TCN410. Za obradu ovog dela korišćen je strugarski nož sa držačem SVJBR, napadnim uglom od $\kappa_r = 93^\circ$ i pločicom od tvrdog metala VBMT. Pri obradi dela izvršena su dva zahvata: predobrada i završna obrada. Nakon generisanja STEP-NC programa u P21 formatu i simulacije na virtuelnom strugu TCN410 u STEP-NC Machine softveru, izvršeno je prevođenje programa na G-kôd za Siemens upravljačku jedinicu, slika 5a. Ovako dobijeni program u G-kôdu je dodatno testiran u

7. LITERATURA

- [1] Glavonjić, M.: *AN5-Objektno programiranje mašina alatki*, Predavanja iz Mašina alatki M, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.
- [2] Zivanovic, S., Vasilic, G.: *A New CNC Programming Method using STEP-NC Protocol*, FME Transactions, Vol. 45, No. 1, pp. 149-158, 2017.
- [3] Glavonjić, M., Živanović, S.: *Novi pristup programiranju numerički upravljanih mašina alatki primenom STEP-NC*, 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.112-3.117, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2012.
- [4] Živanović, S., Glavonjić, M.: *Methodology for implementation scenarios for applying protocol STEP-NC*, Journal of Production Engineering. Vol.17, No.1, pp 71-74, 2014.
- [5] Glavonjić M., Živanović S.: *Protokol STEP-NC za programiranje numerički upravljanih mašina alatki*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Broj 6, str 937-942, 2012.
- [6] Milan Zeljković, Slobodan Tabaković, Aleksandar Živković, Saša Živanović, Cvijetin Mladenović, Miloš Knežev, OSNOVE CAD/CAE/CAM TEHNOLOGIJA, udžbenik, ISBN 978-86-6022-120-1, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, 2018.
- [7] Step Tools, Inc., <https://www.steptools.com/>, 2020.
- [8] Živanović, S., Kokotović, B., Jakovljević, Ž.: *Turning machine simulation for program verification*, Proceedings of the 12th International Scientific Conference mma 2015, pp. 157-160, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, septembar 2015.
- [9] Živanović, S., Slavković, N.: *Application of the STEP-NC standard ISO 10303 AP238 for turning operations*, 13th International Scientific Conference mma 2018 – Flexible Technologies, Invited paper, Proceedings, pp. 49-52, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, septembar 2018.
- [10] Yusof, Y.: *Review of STEP-compliant Manufacturing for Turning operation*, Asian Journal of Industrial Engineering, Vol.2, No.3, pp.77-88, 2010.
- [11] Heusinger, S.: *ISO 14649 STEP-NC; Data model and implementation for turning in Germany*, 2002.
- [12] Yusof Y., Case, K.: *Design of a STEP compliant system for turning operations*, Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26, No.6, pp.753-758, 2010.
- [13] Shin, S. J., Suh, S. H., Stroud, I.: *Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications*, Computer Aided Design, Vol. 39, No. 1, pp.1-16, 2007.
- [14] STEP-NC Newsletter, Issue 5, September 2003, <http://www.step-nc.org/data/newsletter5.pdf>, 2020.
- [15] Sun, J., Zhang, X., Wang, J., Song, J.: *Research on CNC Turning System Based on STEP-NC*, Applied Mechanics and Materials Vols. 16-19, pp. 70-74, 2009.
- [16] Zhang, X., Liu, R., Nassehi, A., Newman, S.T.: *A STEP-compliant process planning system for CNC turning operations*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, pp.349–356, 2011.
- [17] Rauch, M., Laguionie, R., Hascoet, J.Y., Suh, S.H.: *An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes*, Rob. Comput. -Integr. Manuf., 28:375–384, 2012.

Živanović, S., Vorkapić, Slavković, N., Kokotović, B.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF A NEW PROGRAMMING METHOD OF CNC LATHES BY APPLICATION OF THE STEP-NC PROTOCOL

Abstract: The paper analyzes the possibility of applying a new programming method based on the STEP-NC protocol for CNC lathes. The programming method is based on the STEP-NC standard ISO 10303 AP238. In order to verify the programming method, virtual CNC lathes have been configured that can interpret STEP-NC programs. Virtual lathes are integrated into the STEP-NC Machine software environment. A method for obtaining STEP-NC programs is proposed, as well as the possibility of immediate application of such programs on the available CNC lathes, using the available post-processors of STEP-NC Machine software. Verification of the proposed programming method was performed first, through simulations on configured virtual CNC circuits, and then by experimentally machining the selected test piece.

Key words: CNC lathe, turning, STEP-NC, programming, simulation.

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



44. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2020.

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

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Ševarlić, F., Puzović, R. KOMUNIKACIJA IZMEĐU PROIZVODNIH RESURSA KORIŠĆENJEM OPC-UA STANDARDA	4.1
Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z. KLASIFIKACIJA SLIKE ZASNOVANA NA PRIMENI KONVOLUCIONIH NEURONSKIH MREŽA	4.13
Miljković, K., Petrović, M.M., Jovanović, R. PRILOG RAZVOJU INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA SERVO MOTORAJEDNOSMERNE STRUJE PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	4.24
Nedić, B., Đurić, S., Baralić, J. MONITORING OBRADE REZANJEM ANALIZOM SIGNALA OTPORA REZANJA	4.36
Vorkapić, M., Simonović, A., Čočkalo, D., Đorđević D. IMPLEMENTACIJA ADITIVNE PROIZVODNJE U LEAN KONCEPT	4.42





Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Ševarlić, F., Puzović, R. ¹⁾

KOMUNIKACIJA IZMEĐU PROIZVODNIH RESURSA KORIŠĆENJEM OPC-UA STANDARDA ²⁾³⁾⁴⁾

Rezime

Primena kibernetičko fizičkih sistema i industrijskog interneta stvari u proizvodnim pogonima otvara nove mogućnosti u oblasti automatizacije proizvodnje i dovodi do značajnih promena u industrijskoj proizvodnji nazvanih jednim imenom Industrija 4.0. Jedan od ključnih elemenata za efikasnu implementaciju rekonfigurabilnih tehnoloških sistema koji su u samoj osnovi Industrije 4.0 jeste interoperabilnost između uređaja i softverskih sistema različitih proizvođača na svim nivoima piramide automatizacije. OPC-UA (engl. Open Platform Communication – Unified Architecture) je prepoznat kao najistaknutiji standard za ostvarivanje komunikacije između različitih sistema uz visok nivo interoperabilnosti. U okviru ovog rada izlažu se osnove OPC-UA i ukazuje se na mogućnosti njegove primene u proizvodnim pogonima. Pored toga, prikazuje se primer upotrebe OPC-UA u komunikaciji između automatskog sistema za montažu delova i sistema za izvršavanje proizvodnje uz automatski protok informacija u realnom vremenu.

Ključne reči: Industrija 4.0, OPC – UA, Industrijski internet stvari, Sistem za izvršavanje proizvodnje

1. UVOD

Proizvodnja malih serija do nivoa pojedinačnih proizvoda po cenama masovne proizvodnje predstavlja imperativ opstanka na savremenom tržištu i može se ostvariti samo uz izuzetno visoku prilagodljivost tehnoloških sistema. Nesumnjivo, najveći stepen prilagodljivosti tehnološkog sistema se postiže uz visok stepen učešća manuelnog rada u tehnološkim operacijama. S druge strane, prihvatljiva cena gotovog proizvoda (jednaka ceni masovne), ujednačenost njegovog kvaliteta kao i brzina proizvodnje nameću automatizovanu proizvodnju koja je pak tradicionalno okarakterisana visokom osetljivošću na neodređenosti u procesu inherentno prisutne kod velike varijantnosti proizvoda. Odgovor na pitanje kako izaći iz ovog začaranog kruga i kako automatski proizvoditi u uslovima visoke varijantnosti proizvoda daju rekonfigurabilni tehnološki sistemi (engl. *Reconfigurable Manufacturing Systems - RMS*).

Rekonfigurabilni tehnološki sistemi su sistemi koji evoluiraju zajedno sa proizvodima koje proizvode i koji kroz fizičku i logičku rekonfiguraciju obezbeđuju „neophodan kapacitet i funkcionalnost tačno onda kada su potrebni i tačno na način na koji su potrebni“ [1]. Jedna od ključnih karakteristika rekonfigurabilnih sistema jeste njihova modularnost i to ne samo modularnost mehaničkih komponentata već i modularnost sistema upravljanja. U tom kontekstu kibernetičko-fizički sistemi (engl. *Cyber-Physical Systems - CPS*) u okviru kojih su fizički procesi i proračunske sposobnosti integrisani kroz interakciju u realnom vremenu, a ponašanje sistema u celini definisano njegovim fizičkim i kibernetičkim delom [2] imaju izuzetno značajnu ulogu. CPS se konfiguriraju u obliku sistema sistema (engl. *System-of-Systems*) gde sistemi manje kompleksnosti (npr. pametni senzori i aktuatori sa integrisanim proračunskim i komunikacionim sposobnostima) kreiraju sisteme veće kompleksnosti sve do nivoa kibernetičko fizičkih tehnoloških sistema (engl. *Cyber-Physical Manufacturing Systems - CPMS*) koji predstavljaju tehnološki sistem i njegovu virtuelnu reprezentaciju [3]. Smatra se da će promene koje CPS uvode u proizvodne sisteme biti istog nivoa

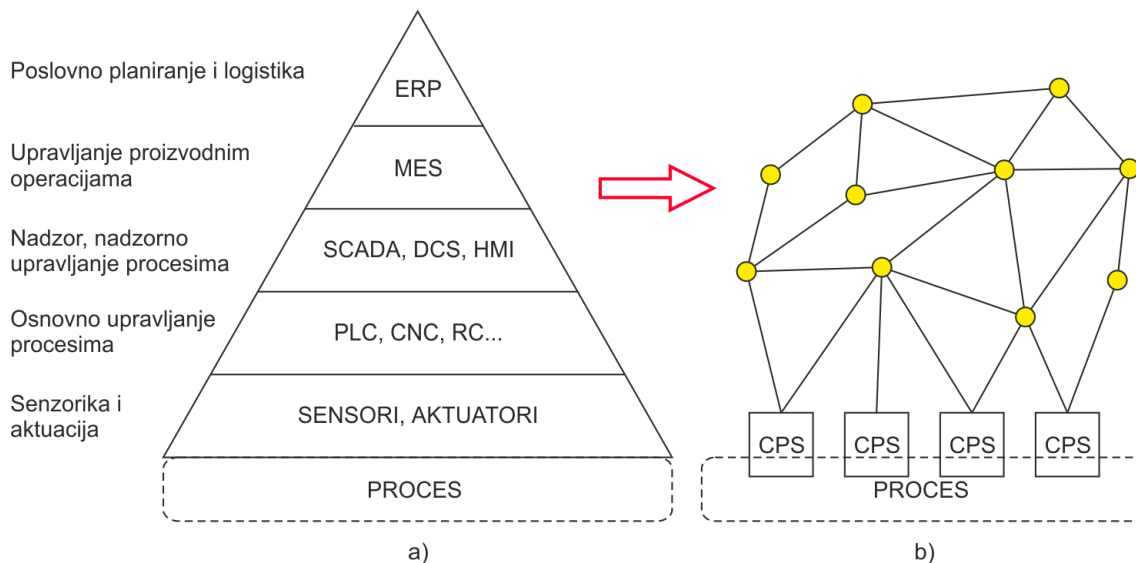
¹⁾ prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs), Dušan Nedeljković, mast. ing. maš., Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs), Filip Ševarlić, mast. ing. maš., GMB Automatik (filipsevarlic@gmail.com), prof. dr Radovan Puzović, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (rpuzovic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su sprovedena uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, broj projekta: 6523109, VI-Mission4.0, kao i MPNTR Republike Srbije u okviru projekta ev. broj: 451-03-68/2020-14/200105

³⁾ Autori se zahvaljuju kompaniji SMC International Srbija na donaciji komponentata koje su upotrebljene za izradu demonstracionog sistema za montažu.

⁴⁾ Autori se zahvaljuju kompaniji Key-IT, Beograd na donaciji *OperaMES* softvera.

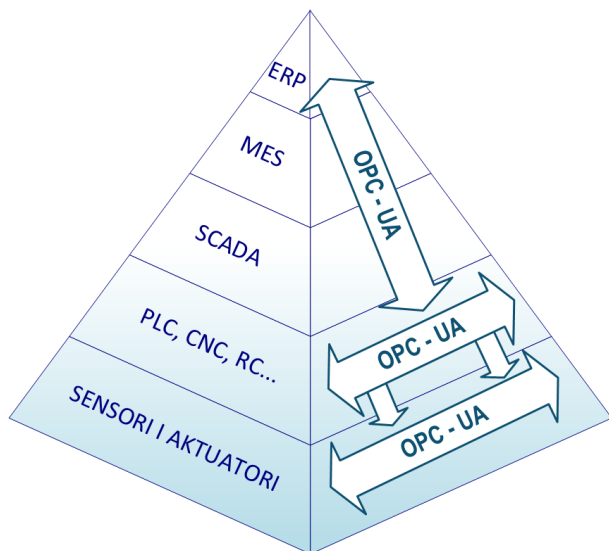
kao promene do kojih je u prošlosti dovelo na primer uvođenje programabilnih kontrolera ili mehanizacije i podele rada, tj. da će dovesti do nove industrijske (r)evolucije poznate pod imenom Industrija 4.0.



Slika 1. a) Piramida automatizacije, b) distribuirani sistemi upravljanja [3]

Kreiranje tehnoloških sistema u formi *ad hoc* mreže CPS bazirane na industrijskom internetu stvari (engl. *Industrial Internet of Things - IIoT*) nameće značajne izazove u modeliranju i kreiranju sistema upravljanja. Radi efikasne rekonfiguracije i brzog protoka informacija, sistemi upravljanja se distribuiraju na pojedinačne komponente/resurse, a funkcionalnost sistema se ostvaruje kroz njihovu intenzivnu komunikaciju [4]. Tradicionalna piramida automatizacije standardizovana kroz IEC 62264 [5] ustupa mesto distribuiranim sistemima upravljanja – slika 1. Model referentne arhitekture za Industriju 4.0 (engl. *Reference Architecture Model Industrie 4.0 – RAMI4.0*) predviđa da će svi nivoi piramide automatizacije nastaviti da egzistiraju u okviru Industrije 4.0 kao funkcionalni elementi sistema, ali bez striktno piramidalne segmentacije. Na primer, postojaće mogućnost direktne komunikacije između senzora i aktuatora i sistema za izvršavanje proizvodnje. Pored toga, neke funkcionalnosti će biti distribuirane na vertikalno i horizontalno umrežene CPS koji ih kolektivno izvršavaju.

Mehaničke strukture proizvodne opreme su po pravilu modularne i pogodne za rekonfiguraciju, pa usko grlo prilikom rekonfiguracije tehnoloških sistema predstavljaju sistemi upravljanja. U tom kontekstu jedan od ključnih faktora za brzu integraciju komponenata i njihovo rekonfigurisanje, a ne reprogramiranje jeste suštinska interoperabilnost koja mora biti nezavisna od proizvođača opreme [6]. Ukoliko se posmatra OSI (engl. *Open Systems Interconnection*) model komunikacije, može se uočiti da su na prva četiri nivoa ovog



Slika 2. Uloga OPC-UA u okviru piramide automatizacije

modela na raspolaganju široko rasprostranjeni i opšte prihvaćeni standardi (TCP/IP, Ethernet, Wi-Fi, ZigBee...) [7]. S druge strane, na višim nivoima postoji čitav niz standarda namenski razvijanih za pojedine primene ili za opremu pojedinih proizvođača koji povezivanje različitih uređaja često čini izuzetno vremenski zahtevnim i podložnim greškama. OPC-UA (engl. *Open Platform Communication – Unified Architecture*) predstavlja namenski razvijan IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*) standard čiji je cilj da obezbedi pouzdanu i sigurnu razmenu podataka u okviru industrijske automatizacije uz visoku interoperabilnost uređaja različitih proizvođača [8]. U okviru RAMI 4.0 OPC-UA je prepoznat kao najpogodniji standard za komunikaciju između uređaja [9, 10].

OPC-UA je baziran na servisno orijentisanoj arhitekturi u okviru koje su funkcionalnosti servera na raspolaganju klijentu kroz unapred definisan skup

servisa [11]. Interoperabilnost između uređaja obezbeđuje kroz razmenu informacija zajedno sa njihovim semantičkim meta modelom [12]. Značajna karakteristika OPC-UA je da je komunikacija prema ovome standardu nezavisna od platforme i može se vršiti korišćenjem različitih medija – žičanih i bežičnih [13]. Takođe, OPC-UA je skalabilan u smislu da omogućuje povezivanje uređaja između različitih nivoa i unutar istog nivoa piramide automatizacije na taj način doprinoseći distirbuiranju zadataka upravljanja na različite uređaje počevši od senzora i aktuatora, preko programabilnih logičkih kontrolera (engl. *Programmable Logical Controller - PLC*), SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) sistema, sistema za izvršavanje proizvodnje (engl. *Manufacturing Execution Systems - MES*), pa sve do sistema za planiranje resursa (engl. *Enterprise Resource Planning - ERP*) [14]. Osnovna karakteristika OPC-UA je da nije neophodan protok informacija kroz sve slojeve piramide automatizacije već je moguće da na primer senzori direktno komuniciraju sa ERP, ili međusobno – slika 2.

Imajući u vidu značaj koji OPC-UA ima u okviru preduzeća koje posluje po principima Industrije 4.0, u okviru ovog rada se izlažu osnovni elementi ovog standarda sa primerom njegove primene kroz direktnu komunikaciju MES i automatskog sistema za montažu.

2. OPC-UA

OPC-UA standard je razvila OPC fondacija [8] koja predstavlja industrijski konzorcijum proizvođača opreme i softvera za automatizaciju proizvodnje i krajnjih korisnika. Specifikacija standarda trenutno sadrži 18 delova (1-15, 17, 19 i 100) [7], a pojedini delovi su standardizovani i kroz standard *IEC 62541 - OPC Unified Architecture*. U okviru ovog odeljka izlažu se osnovni elementi OPC-UA.

2.1. Konfiguracija za razmenu podataka

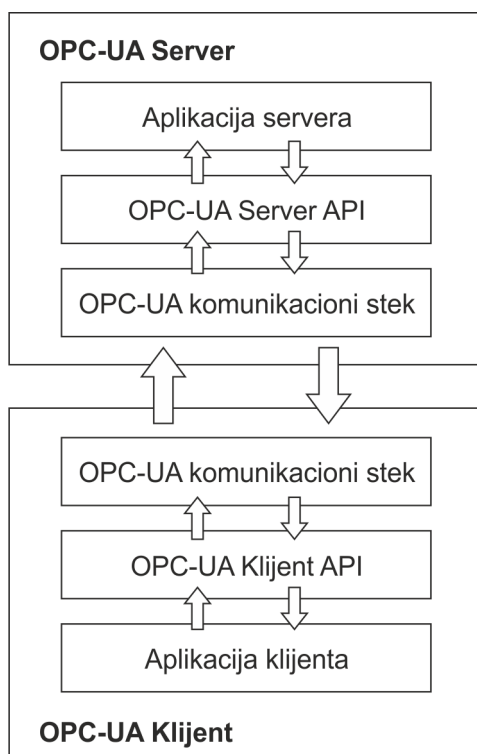
Kod OPC-UA moguća su dva pristupa za razmenu poruka: (1) klijent/server pristup i (2) objava/pretplata (engl. *publish/subscribe*) pristup [15]. U oba pristupa OPC-UA server, odnosno uređaj koji objavljuje poruku (engl. *Publisher*) enkapsulira podatke na odgovarajući način i stavlja ih na raspolaganje OPC-UA klijentu, odnosno OPC-UA pretplatniku (engl. *Subscriber*). Klijent bira koje podatke će pratiti, čitati, pisati i za to

koristi unapred definisane servise za pristup podacima. Potrebno je naglasiti da klijent može komunicirati sa više servera i obrnuto, kao i da je omogućena i komunikacija između servera.

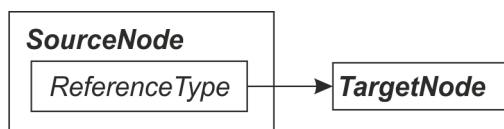
Softverska implementacija OPC-UA i na strani klijenta i na strani servera sastoji se iz tri softverska sloja – Slika 3 [15, 16]. Na strani servera prvi sloj je aplikacija servera čija je uloga da obezbedi podatke; ona po pravilu ima pristup realnim objektima (fizičkim ili softverskim) koji predstavljaju izvor podataka. Drugi sloj je OPC-UA Server API (aplikacija) koja izoluje kod iz aplikacije servera i pretvara ga u oblik pogodan za OPC-UA komunikacioni stek. Komunikacioni stek je poslednji, treći, sloj koji implementira odgovarajuće rutine vezane za transport; u okviru ovog sloja se definiše način kodiranja poruka (XML/text, UA Binary ili JSON [15]), način zaštite podataka kao i

korišćeni mrežni protokol (OPC-UA TCP, HTTPS ili WebSockets OPC-UA Applications [15]). Na strani klijenta, nalaze se analogni slojevi. OPC-UA komunikacioni stek ima istu ulogu kao kod servera. OPC-UA Klijent

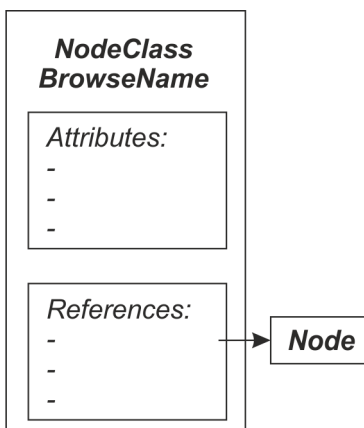
API izoluje podatke iz OPC-UA komunikacionog steka i predaje ih aplikaciji klijenta koja ih dalje koristi za odgovarajuće namene.



Slika 3. Softverski slojevi OPC-UA



Slika 5. OPC-UA referenca (Reference) [15]



Slika 4. OPC-UA čvor (Node) [15]

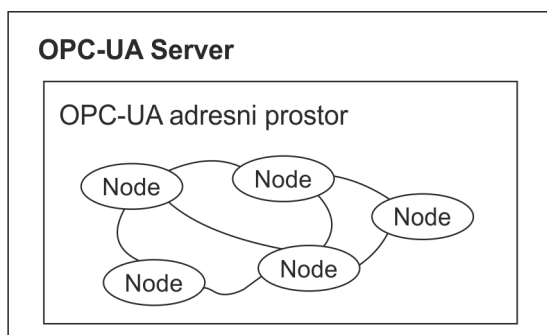
2.2. OPC-UA meta model i model informacija

OPC-UA meta model je jedan od najznačajnijih elementa OPC-UA specifikacije; on praktično obezbeđuje zajedničku semantiku kao izuzetno bitan element za interoperabilnost uređaja. Osnovni element ovog modela je čvor (engl. *Node*) kojim se objekti koje server čini vidljivim klijentu reprezentuju u adresnom prostoru servera. Svaki čvor je bliže određen svojim atributima i referencama – Slika 4. OPC-UA specifikacija sadrži osam definisanih klasa čvorova (engl. *Node Classes*) koje čine meta podatke. To su klase čvorova: *Object*, *ObjectType*, *Variable*, *VariableType*, *Method*, *ReferenceType*, *DataType*, *View*; sve one su zasovane na *Base NodeClass* koja sadrži attribute navedene u tabeli 1.

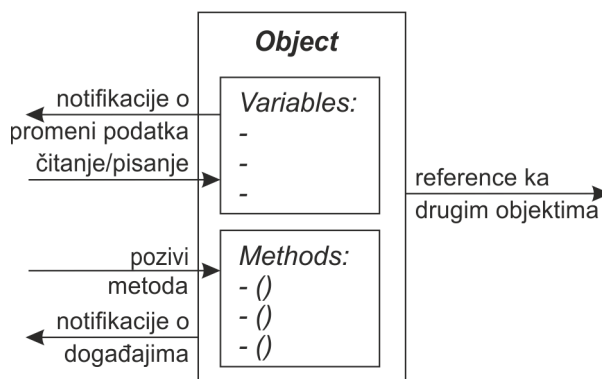
Pored atributa, koji ih bliže određuju, čvorovi sadrže i reference (engl. *References*) koje definišu relacije između pojedinih čvorova. Čvor koji sadrži reference naziva se *SourceNode*, a onaj na koji se referiše je *TargetNode* (slika 5). Prilikom kreiranja instance čvora u adresnom prostoru servera određuju se vrednosti atributa čvora kao i relacije (reference) između njih – slika 6.

Tabela 1. Atributi klase čvorova *Base NodeClass* [17]

Naziv atributa ⁵	Obavezan (M)/ Opcion (O)	Opis
<i>NodeId</i>	M	Jedinstveni identifikator čvora
<i>NodeClass</i>	M	Klasa čvora
<i>BrowseName</i>	M	Naziv čvora koji je razumljiv čoveku; koristi se za pretraživanje adresnog prostora servera
<i>DisplayName</i>	M	Naziv čvora koji klijent koristi za prikaz čvora korisniku
<i>Description</i>	O	Opis čvora
<i>WriteMask</i>	O	Ukazuje na mogućnost da klijent upisuje vrednosti u attribute čvora ne uzimajući u obzir prava pristupa koje korisnik ima
<i>UserWriteMask</i>	O	Ukazuje na mogućnost da klijent upisuje vrednosti u attribute čvora uzimajući u obzir prava pristupa koje korisnik ima
<i>RolePermissions</i>	O	Definiše odobrenja za odgovarajuće uloge (<i>Anonymous</i> , <i>AuthenticatedUser</i> , <i>Observer...</i>) koje imaju pristup čvoru
<i>UserRolePermissions</i>	O	Definiše odobrenja za sve uloge u datoj sesiji
<i>AccessRestrictions</i>	O	Definiše restrikcije vezane za pristup čvoru



Slika 6. OPC-UA adresni prostor [15]



Slika 7. OPC-UA model objekta [17]

Model informacija konkretnog servera definiše se u zavisnosti od aplikacije na osnovu OPC-UA meta modela, tj. na osnovu OPC-UA modela adresnog prostora [16]. Prilikom kreiranja modela informacija adresni prostor konkretnog servera se strukturiira u formi objekata (*Objects*) koji mogu da sadrže promenljive (*Variables*), metode (*Methods*), druge objekte i mogu da generišu događaje (*Events*) – slika 7. *Variables* predstavljaju ili određena svojstva – meta podatke (*Properties*) ili vrednosti podataka (*DataVariables*) koje klijent može čitati ili u koje može zapisivati određene vrednosti [18]; metode su funkcionalnosti sistema koje klijent može pozivati uz predaju odgovarajućih ulaznih podataka i koje klijentu vraćaju određene izlazne rezultate; podešavanjem atributa *EventNotifier* objekat može da generiše određene događaje (npr. dostizanje određene vrednosti neke promenljive) o kojima obaveštava klijente koji su na njih pretplaćeni.

Pored osnovnog modela informacija koji je definisan modelom adresnog prostora, OPC-UA predviđa i 4 standardna modela: *Data Access*, *Historical Access*, *Alarms & Conditions* i *Programs*. *Data Access* (pristup

⁵ Klasa *BaseNodeClass* nema specificirane reference

podacima) model informacija se odnosi na reprezentaciju i korišćenje podataka u automatizaciji [19]. Podaci se mogu nalaziti na uređajima koji su preko I/O kanala povezani sa OPC-UA serverom ili na samom serveru (npr. rezultati odgovarajućih proračuna). Ovaj model informacija pre svega odnosi se na definisanje odgovarajućih *VariableTypes* i njihovih svojstava.

Historical Access model informacija obezbeđuje pristup vrednostima podataka i događajima iz prethodnog perioda. Istorijski podaci se mogu čuvati u kratkotrajnim baferima ili u bazama podataka [20].

Programs se koriste za modeliranje kompleksnih funkcionalnosti na serveru ili na sistemu koji je na njega povezan, a koje klijent može pokrenuti. Za razliku od metode koja vraća izlazne vrednosti, programi su kompleksniji i korišćenjem događaja mogu klijentu slati i određene međuvrednosti [16,21].

Alarms & Conditions [22] definiše model informacija za odgovarajuće događaje koji označavaju ispunjavanje nekih uslova u sistemu ili dešavanje alarmnih situacija. Kada se ispune neki od uslova ili kada se desi alarm, server obaveštava pretplaćenog klijenta koji treba da potvrdi prijem ove informacije ili ne u zavisnosti od podešavanja.

Potrebno je naglasiti da je pre uvođenja OPC-UA korišćena takozvana klasična OPC arhitektura koja je podrazumevala postojanje nezavisnih *OPC Data Access*, *OPC Historical Access* i *OPC Alarms & Events* servera [13]; u okviru OPC-UA sve ove funkcionalnosti su integrisane u jedinstveni adresni prostor. Postoji veliki broj aplikacija razvijenih za klasičan OPC i za njihovu integraciju u OPC-UA postoje dva osnovna pristupa [11, 13]: (1) upakivanje (engl. *wrapping*) klasičnih OPC servera korišćenjem web zasnovanih softvera ili upotreba *proxy*-ja za klasične OPC klijente (*wrapper*-i *proxy*-ji mogu biti u formi OPC-UA gejtvėja za sve klasične OPC servere istovremeno) i (2) direktan pristup podacima. Prvi pristup podrazumeva teže održavanje zbog raznorodnosti aplikacija na serveru i otvara određena pitanja vezana za sigurnost podataka, dok je drugi pristup lakši za održavanje, ali je sve funkcionalnosti servera potrebno ponovo implementirati.

2.3. Skup servisa

Kao što je već navedeno, OPC-UA predstavlja servisno orijentisanu arhitekturu u okviru koje serveri stavljaju na raspolaganje klijentima podatke i funkcije strukturirane u obliku objekata kojima klijenti mogu pristupati korišćenjem standardizovanih servisa [23]. OPC-UA standardom je definisano 8 skupova servisa

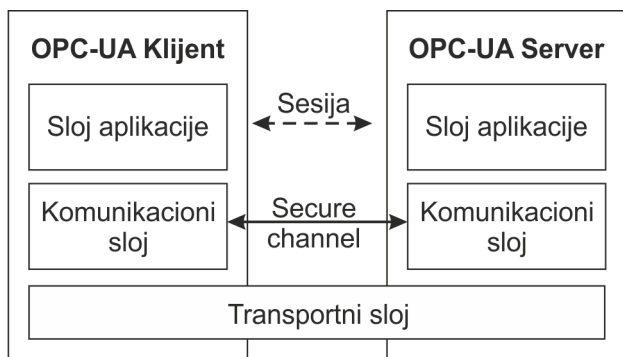


Slika 8. Razmena poruka između OPC UA klijenta i servera [15]

koji su uz kratak opis navedeni u Tabeli 2 [24]. Ovi servisi su na raspolaganju klijentu koji šalje zahtev (engl. *request*) serveru za ispunjavanje odgovarajućeg servisa; server odgovara na ovaj zahtev (engl. *response*) i uzvraća porukom o uspešnosti zahteva i podacima koje je u zavisnosti od servisa potrebno dostaviti klijentu (slika 8).

2.4. Arhitektura za bezbedan prenos podataka

Imajući u vidu posledice koje sajber napadi mogu imati na proizvodne pogone i radnu snagu u njima, bezbednost podataka koji se razmenjuju korišćenjem OPC -UA predstavlja izuzetno značajan element ovog standarda. Ona je raprezentovana kroz arhitekturu za bezbedan prenos podataka između klijenta i servera prikazanu na slici 8 [25]. U okviru sloja aplikacije obezbeđuje se autentifikacija i autorizacija korisnika.



Slika 9. OPC-UA arhitektura za bezbedan prenos podataka [25]

Bezbedni kanal (engl. *Secure Channel*) koji se ostvaruje na komunikacionom sloju obezbeđuje (i) poverljivost podataka korišćenjem enkripcije, (ii) integritet podataka kroz potpisivanje poruka i (iii) autentifikaciju aplikacije korišćenjem sertifikata. Ovi mehanizmi se implementiraju u okviru steka i podešavaju se u zavisnosti od bezbednosnog profila klijenta i servera. Slična arhitektura je na raspolaganju i za objava/pretplata konfiguraciju, s tim što za razliku od klijenata koji mogu imati različita bezbednosna podešavanja, svi pretplatnici moraju koristiti iste bezbednosne mehanizme.

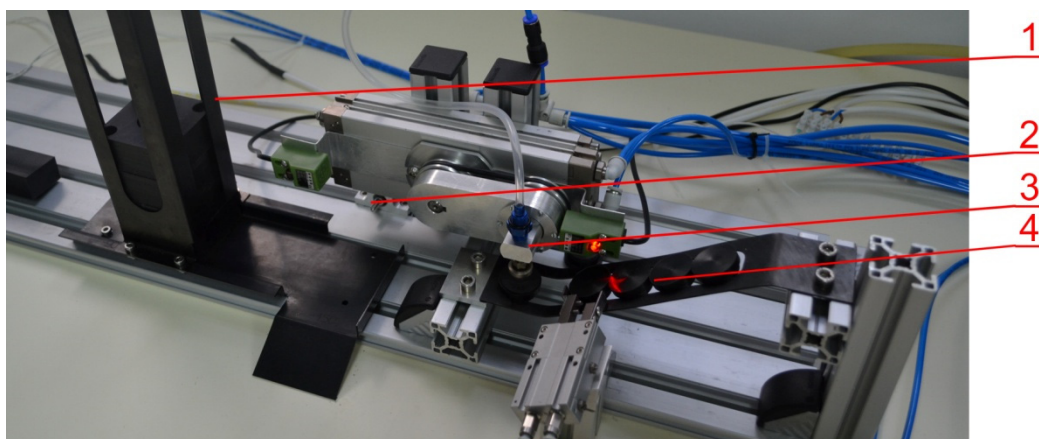
Naziv skupa servisa	Opis
<i>Discovery Service Set</i>	Omogućuju klijentu da otkrije krajnje tačke na serveru i sigurnosne protokole koji se na njima primenjuju
<i>SecureChannel Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da uspostavi bezbednu komunikaciju sa serverom
<i>Session Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da izvrši autentifikaciju korisnika i da upravlja sesijom
<i>NodeManagement Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da doda, modifikuje i briše čvorove iz adresnog prostora servera
<i>View Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da pretražuje adresni prostor servera
<i>Attribute Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da upisuje vrednosti i čita attribute
<i>Method Service Set</i>	Omogućavaju klijentu da poziva metode
<i>MonitoredItem and Subscription Service Sets</i>	Omogućavaju pretplatu klijenta na odgovarajuće čvorove – definišu attribute i događaje koji će se pratiti i pretplatu na njihove promene

3. KOMUNIKACIJA IZMEĐU SISTEMA ZA AUTOMATSKU MONTAŽU I SISTEMA ZA IZVRŠAVANJE PROIZVODNJE KORIŠĆENJEM OPC-UA

U okviru ovog rada biće opisano povezivanje demonstracionog sistema za montažu delova i sistema za izvršavanje proizvodnje korišćenjem OPC-UA.

3.1. Sistem za montažu delova

Demonstracioni sistem za montažu delova (slika 10.) razvijen je u okviru Laboratorije za automatizaciju proizvodnih procesa na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu [26, 27] i vrši montažu delova tipa čep u otvor. Sastoji se od magacina delova sa otvorom koji sadrži dodavač (1), magacina čepova sa pneumatskim selektorom (4), manipulatora koji vrši spajanje delova (3) i pneumatskog cilindra za izbacivanje gotovih sklopova (2). Radom sistema se upravlja pomoću programabilnog kontrolera *Omron CPM1-10CDR-A*. Nadređeni sistem za izvršavanje proizvodnje zadaje sistemu za montažu potreban broj ciklusa koje on počinje da izvršava nakon dobijanja odgovarajućeg signala. S druge strane, sistem za montažu vraća sistemu za izvršavanje proizvodnje informaciju o trenutnom broju ostvarenih ciklusa. Promenljive u okviru PLC-a koje se koriste za ostvarivanje ovih funkcionalnosti navedene su u tabeli 3.



Slika 10. Demonstracioni sistem za montažu delova

Naziv promenljive	Vrsta podatka	Adresa	Opis
<i>OPC Start</i>	BOOL	2.00	Startovanje zadatog broja ciklusa
<i>broj_c</i>	UINT BCD	DM0	Broj željenih ciklusa
<i>broj</i>	UINT BCD	DM110	Broj ostvarenih ciklusa

3.2. Sistem za izvršavanje proizvodnje

Sistemu za montažu delova nadređen je sistem za izvršavanje proizvodnje *OperaMES* [28]. U ovom odeljku će biti naznačeni samo pojedini elementi koji ilustruju primenu OPC-UA komunikacije u okviru ovog softvera, dok će detalji koji se odnose na unos podataka vezanih za klijente, radnike, mašine, operacije,

kreiranje operatorske konzole itd. zbog ograničenja u broju strana biti izostavljeni.

Slika 11. OperaMES - Kreiranje narudžbenice 13

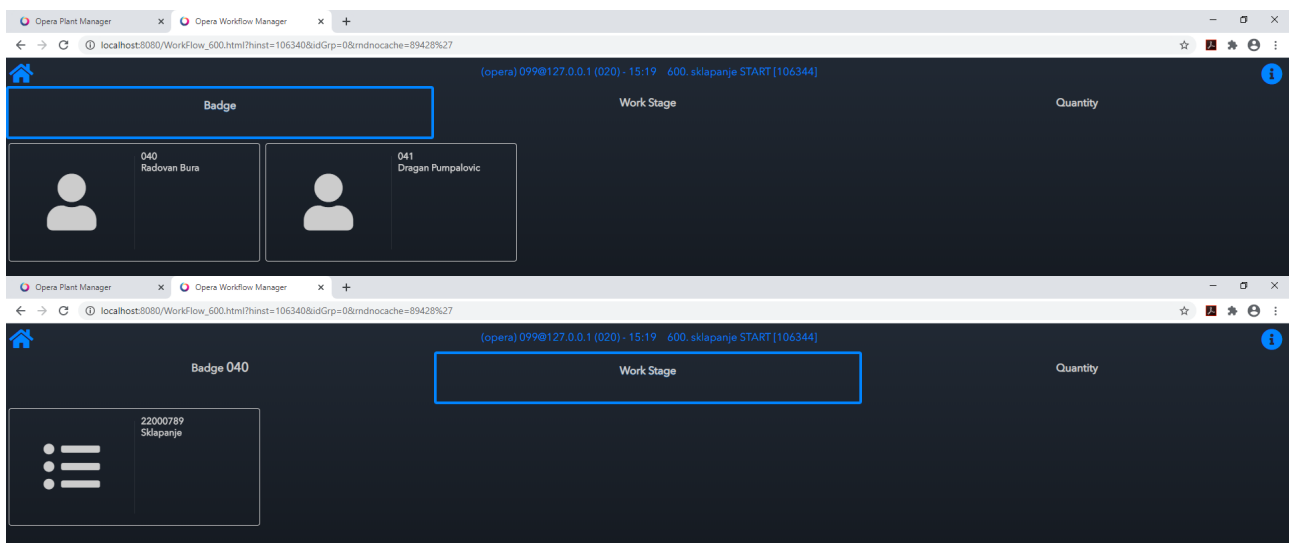
U okviru *OperaMES*, po prispeću narudžbenice (slika 11.), generiše se radni nalog za kreiranje sklopova na odgovarajućoj mašini; u konkretnom slučaju radi se o operaciji broj 20 – *Sklapanje* koja se izvršava na mašini broj 020 – *Masina za sklapanje* i kojom se formira proizvod broj 050 – *Sklop* – slika 12. Kada se kreira radni nalog, on se identifikuje kao *Processable* u tabeli radnih naloga (slika 12.) i istovremeno se pojavljuje na operatorskoj konzoli odabrane mašine označen crvenim emotikonom kao spreman za pokretanje – slika 13. Ova operatorska konzola se nalazi na bilo kom uređaju kojim se može pristupiti internetu korišćenjem klasičnih web pregledača (npr. *Mozilla Firefox*, *Google Chrome*, *Internet Explorer*) kao što su PC računar, tablet, mobilni telefon.

Number	Progr. Status Color	Work Stage Status	Scheduled Activity	Order	Activity Id	Operation	Batch no.	Schedule Description	Product	Product Descr.	Machine
1	●	Closed	782	narudzbenica_100043	782	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
2	●	Closed	784	narudzbenica_1100044	784	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
3	●	Closed	786	narudzbenica_1200045	786	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
4	●	Processable	788	narudzbenica_1300046	788	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
5	●	Closed	772	Narudzbenica_300038	772	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
6	●	Closed	770	Narudzbenica_400037	770	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020
7	●	Closed	774	narudzbenica_500039	774	20	0	Sklapanje	050	Sklop	020

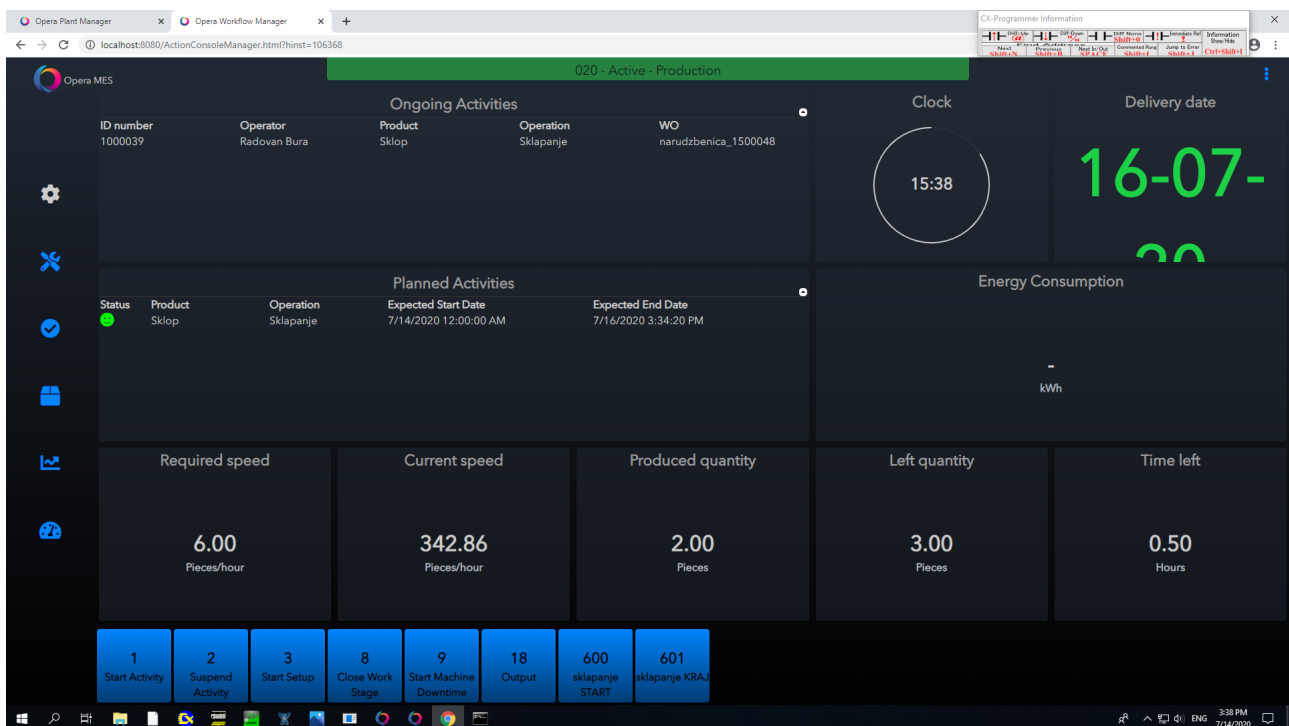
Slika 12. OperaMES – Kreiran radni nalog na osnovu narudžbenice 13 – status Processable

Slika 13. OperaMES – Operatorska konzola mašine za sklapanje (mašina broj 020) na kojoj je moguće započeti aktivnost sklapanje koja je u radnim nalogima označena kao Processable

Pritiskom na dugme *sklapanje START* na konzoli, nakon izbora operatera i operacije koja će se izvršavati (slika 14.) i zatvaranja odgovarajućeg prozora pokreće se procedura *StpMntrUserzivana600_Commt* kojoj će biti reči u odeljku 3.3. Ova procedura sistemu za montažu korišćenjem OPC-UA šalje podatke o broju željenih ciklusa koji je automatski preuzet iz narudžbenice i signal starta kako bi se automatski započelo sklapanje delova. Tokom izvršavanja montaže, na operatorskoj konzoli emotikon odgovarajuće operacije dobija zelenu boju (slika 15.), a u poljima *Produced quantity* i *Left quantity* se automatski osvežava broj montiranih i broj sklopova preostalih za montažu. Tokom trajanja sklapanja na mašini za montažu, u tabeli radnih naloga tekući radni nalog se automatski identifikuje kao *Ongoing*. Nakon završetka procesa sklapanja, operater pritiskom na dugme *sklapanje KRAJ* zatvara radni nalog, koji se uklanja iz liste planiranih aktivnosti na operatorskoj konzoli i u tabeli radnih naloga se označava kao *Closed*. Na ovaj način u okviru sistema za izvršavanje proizvodnje u realnom vremenu je na raspolaganju informacija o poslovima koji su u toku u pogonu.

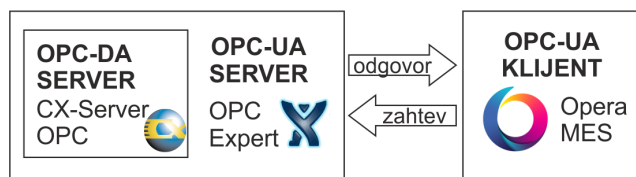


Slika 14. OperaMES – Započinjanje aktivnosti Sklapanje izborom radnika i konkretne aktivnosti



Slika 15. OperaMES – Operatorska konzola mašine za sklapanje (mašina broj 020) nakon započinjanja aktivnosti sklapanje – sklopljena su 2 sklopa, a preostalo je 3 za sklapanje

3.3. Uspostavljanje komunikacije između sistema za montažu delova i sistema za izvršavanje proizvodnje korišćenjem OPC-UA



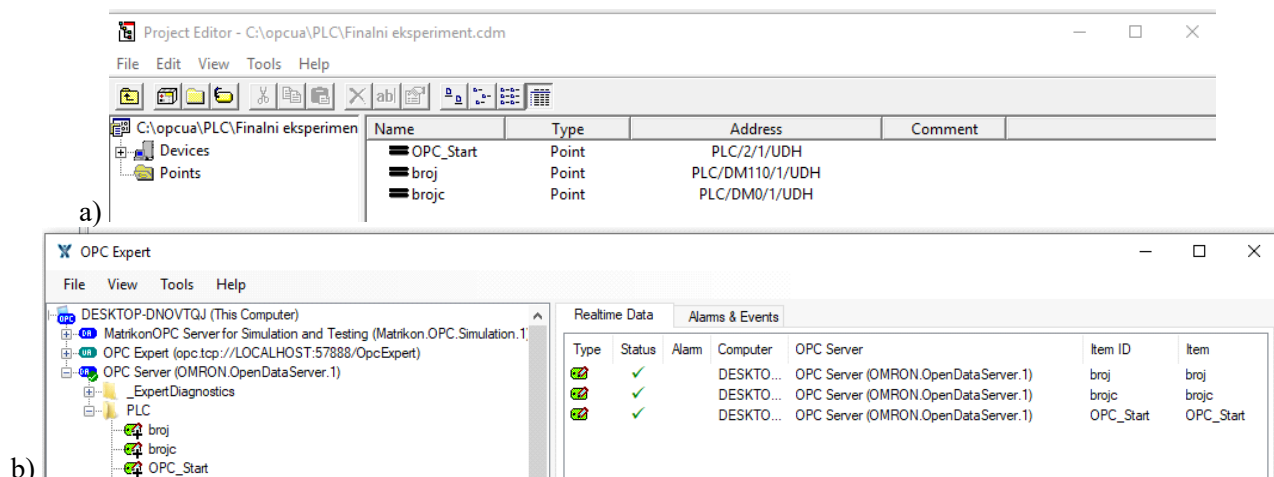
Slika 16. OPC-UA konfiguracija

Prenošenje podataka između *OperaMES* i sistema za montažu zasnovano je na OPC-UA klijent/server konfiguraciji. Na strani sistema za montažu podignut je OPC-UA server, dok *OperaMES* predstavlja OPC-UA klijenta. Za upravljanje radom sistema za montažu upotrebljen je PLC starije generacije za koji je na raspolaganju klasičan OPC-DA server *Omron*

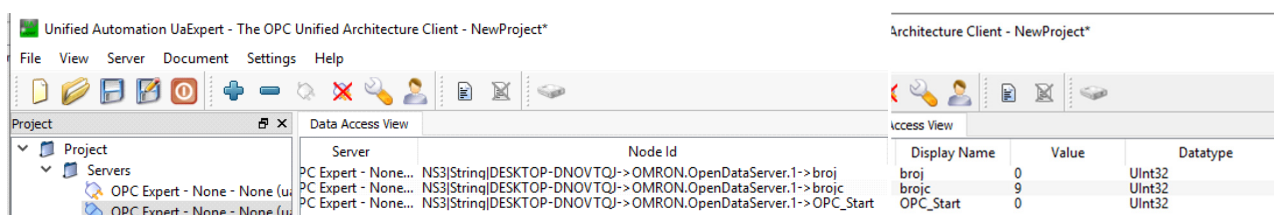
CX-Server OPC koji je u prethodnom radu [29] korišćen za komunikaciju. Kako bi se ovaj server prilagodio OPC-UA komunikaciji neophodno je njegovo upakivanje korišćenjem OPC-UA *wrapper*-a; u ovom radu u ove svrhe upotrebljen je *OPC Expert* [30]. Arhitektura na osnovu koje je uspostavljena komunikacija prikazana je na slici 16.

U okviru OPC-DA servera *Omron CX-Server OPC* kreirane su tri tačke (engl. *points*) koje obezbeđuju pristup odgovarajućim adresama na PLC-u *Omron CPM1-10CDR-A* u skladu sa opisom u Tabeli 3 – slika 17.a. Konverzija podataka sa OPC-DA servera u OPC-UA meta model izvršena je korišćenjem *OPC Expert*-a. Adresa OPC-UA servera je `opc.tcp://desktop-dnovtqj:57888/OpcExpert`, gde je *desktop-dnovtqj* ime *localhost*-a – slika 17.b. Pregledom adresnog prostora ovog servera korišćenjem softvera *UaExpert* [31] (slika 18.) zaključuje se da se registrima PLC-a značajnim za komunikaciju između sistema za montažu i *OperaMES* pristupa preko čvorova sa *NodeID* `NS3|String|DESKTOP-DNOVTQJ->OMRON.OpenDataServer.1->XX`, gde $XX \in \{\text{broj, brojc, OPC_Start}\}$; *XX* ujedno predstavlja i *DisplayName* datih čvorova, dok je *DataType* za sva tri čvora *UInt32*.

Nakon konfigurisanja OPC-UA Servera, neophodno je izvršiti i konfigurisanje klijenta, u ovom slučaju *OperaMES*. *OperaMES* OPC-UA klijent se konfigurira u namenskom *json* (engl. *JavaScript Object Notation*) fajlu koji je za konkretnu aplikaciju prikazan na slici 19. U okviru ovog fajla definišu se svi podaci relevantni za uspostavljanje komunikacije između klijenta i servera. Osnovni podatak je adresa servera koja u ovom slučaju definiše i da se radi o OPC-UA TCP mrežnom protokolu. Pošto postoji mogućnost komunikacije *OperaMES* sa većim brojem OPC-UA servera, neophodno je za svaki od njih definisati jedinstveni ID broj koji će se dalje koristiti pri kreiranju aplikacije klijenta; u ovom slučaju odabran je broj 1. Zatim se definišu čvorovi iz adresnog prostora servera kojima će se pristupiti i za njih se definišu *NodeID* i vrsta podataka. Pored toga, za svaki čvor definiše se alias koji će se koristiti tokom izrade aplikacije klijenta.



Slika 17. a) OPC-DA server *Omron CX-Server OPC* b) veza sa *OPC Expert* OPC-UA serverom



Slika 18. Osnovni atributi kreiranih čvorova očitani korišćenjem UaExpert-a

```
{
  "OPC-UA-Server": [
    {
      "Server": {
        "discoveryUrl": "opc.tcp://desktop-dnovtqj:57888/OpcExpert",
        "serverPollingInterval": "1000",
        "id": "1",
        "discriminator": "-1",
        "monitorAddress": "127.0.0.1",
        "monitorPort": "8087",
        "pingToMonitor": "5000",
        "username": "",
        "password": "",
        "reconnectWaiting": "5000",
        "requestedPublishingInterval": "100",
        "requestedMaxKeepAlive": "100",
        "requestedLifeTimeCount": "100",
        "publishingEnabled": "1",
        "nodes": [
          {
            "alias": "broj",
            "signalLineId": "1",
            "deltaMode": "False",
            "onlyOnChange": "False",
            "type": "UInt32",
            "nodeId": "ns=3;s=DESKTOP-DNOVTQJ->OMRON.OpenDataServer.1->broj"},
          {
            "alias": "brojc",
            "signalLineId": "6",
            "deltaMode": "False",
            "onlyOnChange": "False",
            "type": "UInt32",
            "nodeId": "ns=3;s=DESKTOP-DNOVTQJ->OMRON.OpenDataServer.1->brojc"},
          {
            "alias": "OPC_start",
            "signalLineId": "7",
            "deltaMode": "False",
            "onlyOnChange": "False",
            "type": "UInt32",
            "nodeId": "ns=3;s=DESKTOP-DNOVTQJ->OMRON.OpenDataServer.1->OPC_Start"}
        ]
      }
    }
  ]
}
```

Slika 19. Konfigurisanje Opera OPC-UA klijenta

```
declare @date datetime = getdate()
declare @XML xml = '<Collection><Event>
  <Header>
    <Info notifytype="4" timestamp="" eventid="" reasonstype="0"/>
    <Eventsource objecttype="2" discriminator="-1"/>
    <Eventtarget adp_id="99" te_id="4"/>
    <root objecttype="1029" hdl="00000000-0000-0000-000000000000" subobjecttype="3" id="1"/>
  </Header>
  <State currentstate="0"/>
  <Batches>
    <Batch ba_id="1" seq="0" ba_code="BA01" ma_codice="020">
      <Function fu_id="666" fu_code="FU01" seq="0">
        <Parameter id_parameter="brojc" fp_value="1" valustr="+@Quantity1+!"/>
      </Function>
    </Batch>
  </Batches>
</Event>
</Collection>'
delete from MntrSqlEvent
insert into MntrSqlEvent values (NULL, '0', @date, NULL, NULL, NULL, @XML, 99)
```

Slika 20. Deo procedure *StpMntrUserzivana600_Commit* koja se koristi za prenos podataka od OperaMES ka sistemu za montažu

Kako bi se odgovarajući podaci prosledili OPC serveru, neophodno je kreirati odgovarajuću proceduru u okviru aplikacije klijenta. U *OperaMES* kreira se SQL procedura kojom se odgovarajući XML upisuje kao podatak u tabelu *MntrSqlEvent*. U našem primeru radi se o proceduri koja se pokreće nakon izbora operatera i operacije koja će se započeti – procedura *StpMntrUserzivana600_Commit*. Deo ove procedure

koji definiše prenos podataka o željenom broju ciklusa prikazan je na slici 20. Pored OperaMES specifičnih podataka koje nećemo detaljno opisivati, XML sadrži ID broj OPC-UA servera koji je definisan u json fajlu (u našem slučaju 1), alias čvora u koji se upisuje vrednost (u ovom slučaju broj_c) i vrednost koja se upisuje (u ovom slučaju sadržana u promenljivoj @Quantity1). Željeni broj ciklusa (@Quantity1) se preuzima iz tabele radnih naloga za pokrenutu aktivnost. Za prijem podataka potreban je čitav niz *OperaMES* specifičnih podešavanja koja su izvan okvira ovog rada.

4. ZAKLJUČAK

U okviru Industrije 4.0 interoperabilnost uređaja predstavlja jedan od ključnih faktora za postizanje efikasne rekonfigurabilnosti tehnoloških sistema i brzog prilagođavanja različitim vrstama proizvoda. U tom kontekstu od izuzetnog je značaja je i servisno orijentisan OPC-UA komunikacioni protokol koji obezbeđuje interoperabilnost različitih uređaja zahvaljujući tome što pored samih podataka sadrži i njihov semantički meta model. Ovaj protokol je i u okviru Modela referentne arhitekture za Industriju 4.0 – RAMI4.0 prepoznat kao najpogodnija osnova za razvijanje komunikacionog sloja.

U okviru ovog rada izvršena je analiza uloge OPC-UA u Industriji 4.0 i mogućnosti koje on otvara u ostvarivanju neometane horizontalne i vertikalne komunikacije između uređaja na različitim nivoima tradicionalne piramide automatizacije. Izloženi su osnovni elementi ovog standarda kako bi se ukazalo na različite mogućnosti njegove primene kao i na mogućnosti za integraciju klasične OPC komunikacije u OPC-UA okvir. Primena OPC-UA zasnovane komunikacije ilustrovana je na primeru pokretanja ciklusa spajanja na automatskom sistemu za montažu iz sistema za izvršavanje proizvodnje uz direktno korišćenje informacija iz narudžbenice. Uz to, pokazano je da se korišćenjem OPC-UA, informacije o trenutnom statusu proizvodnje mogu automatski prikupljati u sistemu za izvršavanje proizvodnje u realnom vremenu što je od izuzetnog značaja za brzo i pouzdano kreiranje planova proizvodnje i poslovnih planova u narednom vremenskom periodu, kao i za analizu proizvodnje u prethodnom vremenskom periodu na osnovu realnih i nepristrasnih podataka.

Izloženi primer primene OPC-UA podrazumevao je direktnu komunikaciju između uređaja na prvom i trećem nivou tradicionalne piramide automatizacije. U daljem radu planira se primena ovog standarda u horizontalnoj komunikaciji između uređaja na prvom, kao i između uređaja na nultom nivou piramide automatizacije u okviru distribuiranih sistema upravljanja.

5. LITERATURA

- [1] Koren, Y., Gu, X., Guo, W., *Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends*, Frontiers of Mechanical Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 121–136, 2018.
- [2] Lee, E. A., Seshia, S. A., *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach*, Second Edition, 2015, <http://leeseshia.org>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [3] Jakovljevic, Z., Majstorovic, V., Stojadinovic, S., Zivkovic, S., Gligorijevic, N., Pajic, M., *Cyber-physical manufacturing systems (Cpms)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 199–214, 2017.
- [4] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.*, 2013, <http://www.acatech.de>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [5] IEC 62264-1:2013 *Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology*, International Electrotechnical Commission., 2013.
- [6] Schleipen, M., *OPC UA supporting the automated engineering of production monitoring and control systems*, IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, art. no. 4638464, pp. 640-647, 2008.
- [7] OPC foundation, OPC UA Online Reference, <https://reference.opcfoundation.org>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [8] OPC foundation, <https://opcfoundation.org>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [9] Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0), 2015, <http://www.zvei.org>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [10] Givehchi, O., Landsdorf, K., Simoens, P., Colombo, A.W., *Interoperability for Industrial Cyber-Physical Systems: An Approach for Legacy Systems*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13 (6), art. no. 8012471, pp. 3370-3378, 2017.
- [11] Hannelius, T., Salmenperä, M., Kuikka, S., *Roadmap to adopting OPC UA*, IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), art. no. 4618203, pp. 756-761, 2008.
- [12] Greenfield, D., *Industry 4.0 and OPC UA*, Automation World,

<https://www.automationworld.com/products/networks/blog/13311977/industry-40-and-opc-ua>, datum pristupa: 13.08.2020.

- [13] Leitner, S., Mahnke, W., *OPC UA – Service-oriented Architecture for Industrial Applications*, GI Softwaretechnik-Trends, Vol. 26, No. 4, 2006.
- [14] Azangoo, M., Blech, J.O., Atmojo, U.D., *Towards formal monitoring of workpieces in agile manufacturing*, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2020-February, art. no. 9067188, pp. 334-339, 2020.
- [15] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-1: OPC Unified Architecture, Part 1: Overview and Concepts*, Release 1.04, 2017-11-22
- [16] Mahnke, W., Leitner, S.-H., Damm, M., *OPC Unified Architecture*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-68898-3, 2009.
- [17] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-3: OPC Unified Architecture, Part 3: Address Space Model*, Release 1.04, 2017-11-22
- [18] Cavalieri, S., Mule, S., Salafia, M. G., *Enabling OPC UA and oneM2M interworking*, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, art. no. 9067161, pp. 278-285, 2020.
- [19] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-7: OPC Unified Architecture, Part 7: Profiles*, Release 1.04, 2017-11-01
- [20] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-8: OPC Unified Architecture, Part 8: Data Access*, Release 1.04, 2017-11-01
- [21] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-10: OPC Unified Architecture, Part 10: Programs*, Release 1.04, 2017-11-01
- [22] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-9: OPC Unified Architecture, Part 9: Alarms & Conditions*, Release 1.04, 2017-11-22
- [23] Grüner, S., Pfrommer, J., Palm, F., *RESTful Industrial Communication with OPC UA*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 12 (5), art. no. 7407396, pp. 1832-1841, 2016.
- [24] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-4: OPC Unified Architecture, Part 4: Services*, Release 1.04, 2017-11-22
- [25] OPC Foundation, *OPC UA Online Reference, OPC 10000-2: OPC Unified Architecture, Part 2: Security Model*, Release 1.04, 2018-08-03
- [26] Šljivar, S., *Projektovanje i izrada fleksibilne tehnološke ćelije za montažu*, master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2018.
- [27] Lazarević, M., *Projektovanje upravljanja automatizovanog sistema za montažu*, master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2019.
- [28] Opera MES, <https://www.opendatasrl.it/en/prodotto-2/opera-mes.html>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [29] Ševarlić, F., *Razmena podataka između sistema za izvršavanje proizvodnje i proizvodnih resursa korišćenjem OPC-UA*, master rad, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2019.
- [30] OPC Expert, <https://www.opcti.com/opcexpert.aspx>, datum pristupa: 13.08.2020.
- [31] UaExpert - A Full-Featured OPC UA Client, <https://www.unified-automation.com/products/development-tools/uaexpert.html>, datum pristupa: 13.08.2020.

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Ševarlić, F., Puzović, R.

COMMUNICATION BETWEEN MANUFACTURING RESOURCES USING OPC-UA STANDARD

Abstract: *The application of Cyber Physical Systems and Industrial Internet of Things at shop-floor opens up new possibilities in the manufacturing automation and leads to the significant changes in industrial manufacturing known as Industry 4.0. One of the key elements for effective implementation of Reconfigurable Manufacturing Systems, which are fundamental for Industry 4.0, is the interoperability between multi-vendor devices and/or software at all levels of automation pyramid. OPC-UA (Open Platform Communication – Unified Architecture) is considered as the most prominent standard for the establishment of communication between different systems with high level of interoperability. This paper presents the basics of OPC-UA and points out the possibilities of its application at manufacturing shop-floor. Besides, it presents an example of the OPC-UA application in communication between assembly system and manufacturing execution system with automatic real-time data flow.*

Key words: *Industry 4.0, OPC-UA, Industrial Internet of Things, Manufacturing Execution System*



Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.¹⁾

KLASIFIKACIJA SLIKE ZASNOVANA NA PRIMENI KONVOLUCIONIH NEURONSKIH MREŽA²⁾

Rezime

Razvoj tehnologija obrade slike otvara nove perspektive i doprinosi povećanju produktivnosti i kvaliteta širokog spektra industrijskih aplikacija. Klasifikacija slike spada u grupu najkompleksnijih procesa u oblasti digitalne obrade slike, a predstavlja dodeljivanje klase (iz prethodno definisanog skupa) slici koja se posmatra. U okviru ovog rada, klasifikacija slike koristi se u cilju određivanja orijentacije prizmatičnog dela. Predložena metoda klasifikacije zasnovana je na primeni konvolucionih neuronskih mreža (CNN - engl. Convolutional Neural Network). U zavisnosti od vrste ulaza koji se dovodi CNN-u, razmatrana su dva pristupa: prvi pristup podrazumeva preprocesiranje slike i izdvajanje obeležja baziranih na detekciji ivica; dok drugi pristup koristi sirove podatke (bez prethodno izdvojenih obeležja). Metod klasifikacije testiran je u realnom vremenu na eksperimentalnoj instalaciji baziranoj na Raspberry Pi platformi.

Ključne reči: mašinsko gledanje, obrada slike, klasifikacija, konvolucione neuronske mreže

1. UVOD

Koncept inteligentne proizvodnje koja za cilj ima povećanje pouzdanosti, efikasnosti i produktivnosti proizvodnih procesa, podrazumeva visok nivo primene računara i tehnika veštačke inteligencije u okviru postojećih proizvodnih postrojenja. Jedna od glavnih osobina inteligentne proizvodnje jeste analiza podataka koja može biti ključni faktor prilikom donošenja poslovnih odluka i daljeg unapređenja proizvodnje. Analizom je moguće utvrditi zakonitosti koje se javljaju u okviru podataka, na osnovu kojih se kreira model predikcije. Pored primene na nivou poslovnog sistema, tehnike veštačke inteligencije (AI – engl. *Artificial Intelligence*) imaju izuzetno značajno mesto u sistemima upravljanja proizvodnim resursima. Ova uloga je naročito izražena u automatizaciji proizvodnih sistema sa velikom varijantnosti proizvoda kod kojih je inherentno prisutno nestruktuirano radno okruženje. Inteligentni senzorski sistemi zasnovani na AI, kroz integraciju percepcije, kognicije i sposobnosti donošenja odluka, daju osnov za obezbeđivanje odgovarajućeg nivoa autonomnosti proizvodnih resursa neophodnog u ovakvom radnom okruženju. U upravljanju proizvodnim resursima koriste se različiti senzorski sistemi, a uključivanjem kamere, ostvaruje se mogućnost mašinskog gledanja (engl. *machine vision*).

Operacije mašinskog gledanja pronašle su široku primenu u različitim industrijskim aplikacijama, poput robotizovane montaže [2, 3], upravljanja automatski vođenih kolica [4], sistema za kontrolu kvaliteta u vidu prepoznavanja defektnih delova [5].

Tradicionalno, implementacija koncepta mašinskog gledanja može se grubo opisati kroz nekoliko osnovnih operacija: akvizicija slike, priprema slike, segmentacija, izdvajanje obeležja, klasifikacija [1]. Akvizicija obuhvata prikupljanje i transformaciju snimljene slike u odgovarajući oblik (niz vrednosti) koji se može koristiti na računaru. Kako slike generisane u realnim uslovima nisu idealne (obično poseduju šum i neželjene refleksije) izvršavanjem pripremnih operacija dovode se u odgovarajuću formu za dalju obradu. Segmentacijom se vrši podela slike prema postavljenom kriterijumu (najčešće intenzitet osvetljenosti) na regione koji odgovaraju delovima ili celim objektima unutar scene. Izdvajanje obeležja podrazumeva

¹⁾ Dušan Nedeljković, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs), dr Živana Jakovljević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs), dr Zoran Miljković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zmiljkovic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ Rad je nastao u okviru istraživanja sprovedenog uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, evidencioni broj: 6523109, VI-MISSION4.0, 2020-2022. U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja u okviru projekta ev. broj: 451-03-68/2020-14/200105 finansijski podržanog od strane MPNTR Republike Srbije.

grupisanje piksela sa istim ili sličnim svojstvima u objekte ili delove objekata. Konačno, operacijom klasifikacije slici na ulazu se dodeljuje klasa iz prethodno definisanog skupa. Postavljeni zadatak određuje potrebu za primenom jedne ili više navedenih operacija.

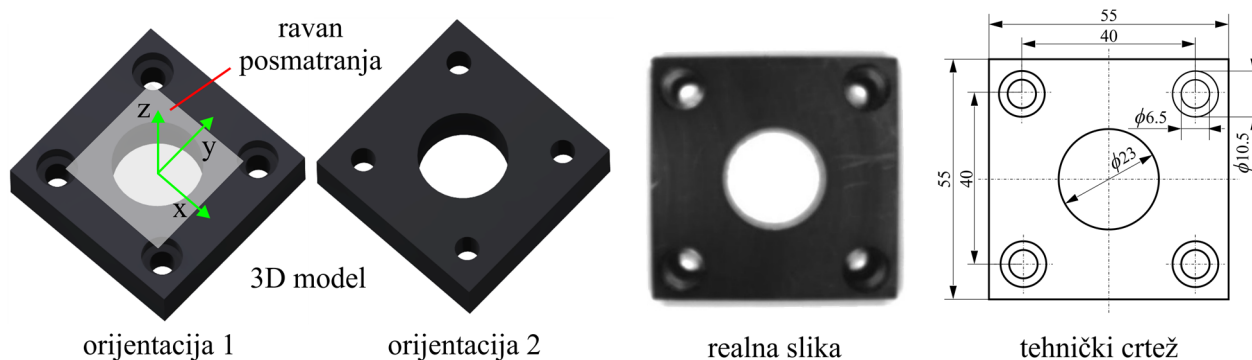
Kako proces klasifikacije često iziskuje velike proračunske resurse, pronalazak odgovarajuće tehnike predstavlja izazovan zadatak. Za rešavanje ovog problema, korišćene su razne tehnike poput mašina sa nosećim vektorima (SVM - engl. *Support Vector Machines*) [6], fazi logike (engl. *fuzzy logic*) [7], a posebna pažnja usmerena je ka razvoju algoritama zvananih na konvolucionim neuronskim mrežama [8, 9].

Za rešavanje problema klasifikacije korišćenjem CNN moguća su dva pristupa koja su opisana i primenjena u okviru ovog rada. Prvi pristup obuhvata tradicionalan postupak u klasifikaciji slike koji podrazumeva korišćenje unapred definisanih i iskustveno odabranih filtera za detekciju ivica kao značajnih obeležja pre same klasifikacije. Drugi pristup je zasnovan na dubokom učenju gde CNN dobija sirove podatke (slike) bez prethodno ekstrahovanih obeležja, automatski izdvaja relevantna obeležja korišćenjem filtera čije vrednosti su dobijene kao rezultat obučavanja i na osnovu toga donosi zaključak o klasi. Performanse razmatranih metoda klasifikacije testirane su na primeru detekcije orijentacije dela i primenjene na realnoj eksperimentalnoj instalaciji.

Nastavak rada biće struktuiran na sledeći način. Drugo poglavlje prikazuje postavku problema detekcije orijentacije dela koja će se koristiti kao primer za ilustraciju i poređenje metoda. Treće i četvrto poglavlje daju opis metoda za detekciju ivica, konvolucionih neuronskih mreža, kao i rezultate klasifikacije dobijene korišćenjem razmatranih pristupa. Implementacija sistema za detekciju orijentacije delova opisana je u poglavlju 5, dok su zaključne napomene i pravci daljih istraživanja dati u poglavlju 6.

2. DEFINISANJE PROBLEMA DETEKCIJE ORIJENTACIJE DELA

U mnogim industrijskim aplikacijama, informacija o orijentaciji dela određuje naredne upravljačke akcije. Jedan od primera je proces montaže, gde podatak o nepravilnoj orijentaciji dela može sprečiti koliziju između sastavnih elemenata sklopa/sistema. U okviru ovog rada, korišćen je prizmatični deo, čiji su 3D model, realna slika i tehnički crtež prikazani na slici 1. Razmatrane su dve orijentacije dela (definisane kao na slici 1), gde je ravan posmatranja paralelna sa ravni xy. Razliku između orijentacija dela čine 4 upusta $\phi 10.5$ mm vidljiva u orijentaciji 1. Rešavanje zadatka u ovom slučaju svodi se na problem binarne klasifikacije u kojoj je na izlazu iz sistema prepoznavanja za orijentaciju 1 i orijentaciju 2 potrebno dobiti vrednosti 1 i 0, respektivno. Potrebno je naglasiti da je deo izrađen od crne plastike nepovoljnih optičkih svojstava sa aspekta vidljivosti upusta što se može uočiti na slici 1.



Slika 1. 3D model, realna slika i tehnički crtež razmatranog dela

U postupku akvizicije slika, za obe razmatrane orijentacije dela generisano je po 10000 slika. Kako bi se povećala robusnost skupa podataka i kasnije dobila tačnija predikcija, varirana je i distanca između kamere i dela (4 različite vrednosti). Takođe, deo je vršio kontinualno kretanje oko z ose pomoću mehanizma sa koračnim motorom i remenim prenosnikom kako bi se dobile slike sa različitim orijentacijama dela u xy ravni.

Za prikupljanje slika, korišćena je kamera *Cognex In-Sight 2000-120* [10], koja ima mogućnost generisanja monohromatske slike (256 nijansi sive) rezolucije 640×480 piksela. Kamera može ostvariti maksimalno 75 frejmova u sekundi, dok je fokalna dužina ugrađenog sočiva 8 mm.

3. DETEKCIJA IVICA

Detekcija ivica predstavlja tehniku ekstrakcije obeležja iz slike koja se zasniva na otkrivanju diskontinuiteta usled značajnih lokalnih promena nivoa osvetljenosti susednih piksela. Ivice se obično javljaju na granicama između dva različita regiona slike. Detekcija ivica najčešće je prvi korak u postupku izvlačenja informacija iz slike. Obeležja izdvojena ovim postupkom mogu se koristiti prilikom identifikacije objekata i daljih analiza slike. Kako realne slike sadrže veliku količinu šuma koji ometa otkrivanje postojećih i/ili doprinosi pojavi lažnih ivica, detekcija ivica predstavlja izazovan problem. U cilju poboljšanja performansi, često se pre postupka detekcije vrši filtriranje, pri čemu je potrebno pronaći kompromis između debljine ivice i redukcije šuma.

Matematički posmatrano, slika se može predstaviti kao funkcija f u kojoj maksimalni gradijent (jednačina 1) označava prelaz iz jednog nivoa osvetljenosti u drugi [11].

$$\mathbf{G} = \nabla f = [\mathbf{G}_x, \mathbf{G}_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (1)$$

Iz jednačine (1), može se primetiti da se gradijentom razmatraju promene u horizontalnom (x) i vertikalnom (y) pravcu, pa se amplituda gradijenta izračunava kao:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

Kada amplituda gradijenta $G[i, j]$ prekorači unapred definisan prag h , piksel na lokaciji $[i, j]$ smatra se za ivični. Pravac gradijenta određen je uglom α u odnosu na horizontalnu osu (jednačina 3).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (3)$$

Međutim, primena metoda baziranih na izračunavanju prvog izvoda često rezultira ogromnim brojem ivičnih piksela, što kasnije dovodi do otežane identifikacije objekata. Zbog toga, osmišljene su metode koje koriste drugi izvod funkcije f (jednačina 4).

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (4)$$

Na ovaj način, uklanjaju se tačke koje ne predstavljaju lokalne maksimume, čime se postiže tačnija detekcija ivica. Drugim rečima, lokalni maksimumi dobijeni prvim izvodom odgovaraju tačkama promene znaka drugog izvoda funkcije [11].

Postoji veliki broj različitih metoda za detekciju ivica iz slike, a u okviru ovog rada sa ciljem identifikacije orijentacije razmatranog dela primenjeno je ukupno sedam metoda, i to sledeće zasnovane na prvom izvodu:

- Sobelova metoda (engl. *Sobel method*),
- Robertsova metoda (engl. *Roberts method*),
- Previt metoda (engl. *Prewitt method*),
- Kani metoda (engl. *Canny method*),
- Robinsonova metoda (engl. *Robinson method*),

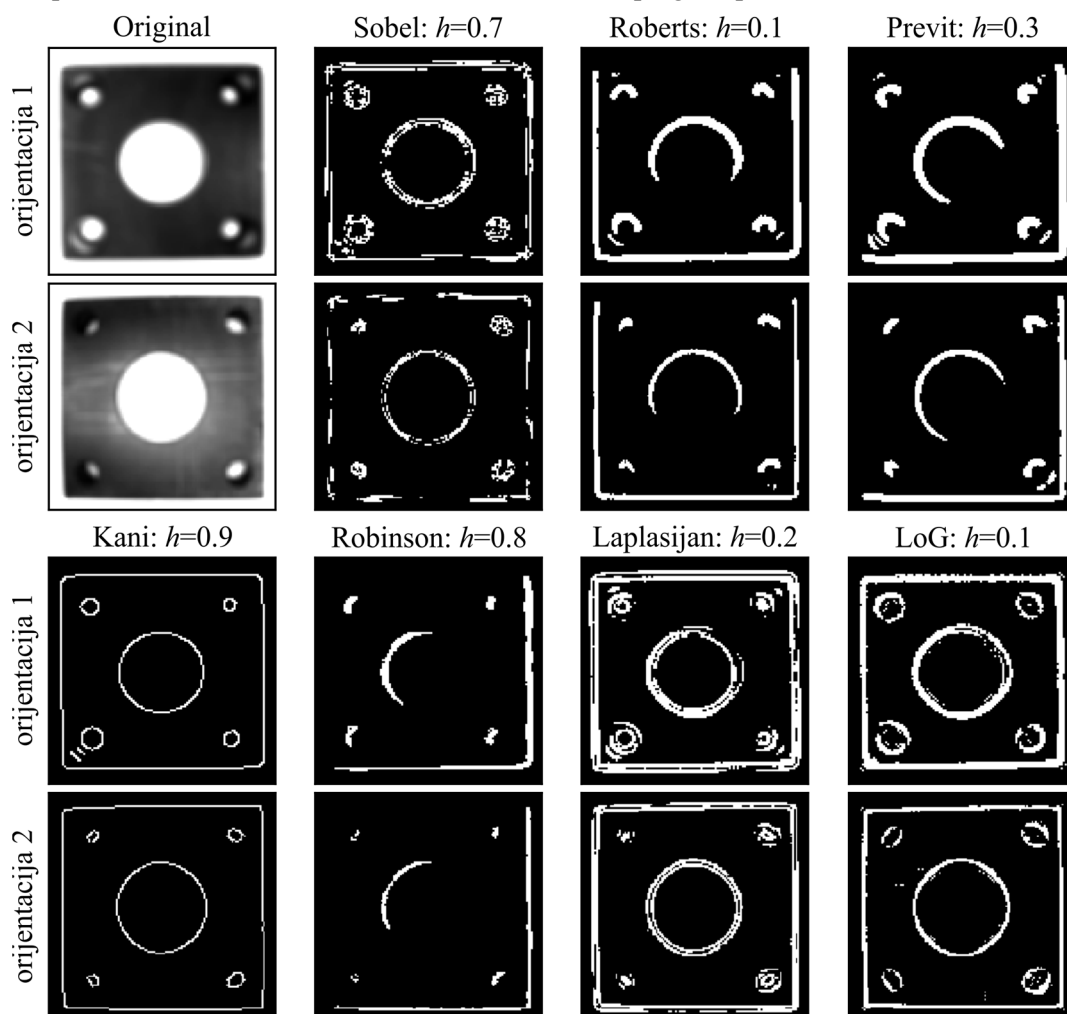
kao i metode bazirane na drugom izvodu:

- Laplasijan metoda (engl. *Laplacian method*),
- Laplasijan-Gausova metoda (LoG - engl. *Laplacian of Gaussian method*).

Pre procesa detekcije ivica, na sliku je primenjen Gausov filter (engl. *Gaussian blur*) dimenzija 5×5 , konstantne vrednosti $1/15$. Ovaj pripremni korak bitan je kako bi se smanjio šum koji može imati negativan uticaj na dalje procesiranje slike.

Pre određivanja praga aktivacije, izvršena je normalizacija, pa je opseg intenziteta osvetljenosti 0-255 sveden na vrednosti u opsegu 0-1. Kako bi se postigli najbolji rezultati, vrednosti praga h varirane su za svaku tehniku pojedinačno u opsegu od 0.05–0.95.

Rezultati primene navedenih tehnika za izabrane vrednosti pragova prikazani su na slici 2.



Slika 2. Rezultati primene metoda za detekciju ivica

Da bi se orijentacije dela razlikovale, neophodna je detekcija otvora $\phi 6.5$ mm i upusta $\phi 10.5$ mm za orijentaciju 1, odnosno samo otvora $\phi 6.5$ mm za orijentaciju 2. Otvor najvećeg prečnika $\phi 23$ mm, pozicioniran u centru (slika 1), uspešno je detektovan u većini slučajeva. Ipak, detekcija ove konture ne predstavlja relevantnu informaciju za dalju analizu dobijenih rezultata.

Metode Roberta, Previta i Robinsona nisu detektovale ni jednu zatvorenu konturu, a dalje smanjivanje praga dovodi samo do većeg šuma u regionu detektovanih piksela. S druge strane, Sobel, Laplasijan i LoG metoda generišu previše šuma, pa se gotovo isti rezultati dobijaju za obe orijentacije. Najbolji rezultat ostvaren je primenom Kani metode, gde je orijentacija 2 potupno definisana. Međutim, u slučaju orijentacije 1, nisu detektovani upusti, što se ne postiže ni sa manjim vrednostima praga. Na osnovu rezultata, može se reći da ni jedna tehnika nije uspešno detektovala konture na osnovu kojih bi se mogao doneti zaključak o orijentaciji dela.

4. KONVOLUCIONE NEURONSKE MREŽE

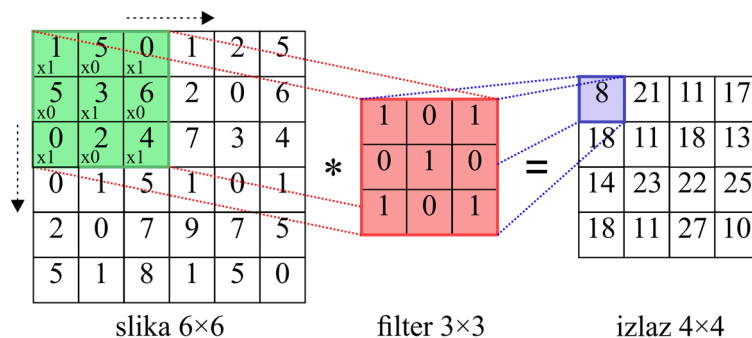
CNN spadaju u klasu neuronskih mreža sa dubokim učenjem (engl. *deep neural networks*). Ovaj tip neuronskih mreža ima za cilj da putem nelinearnih transformacija izvuče reprezentativna obeležja iz podataka različitih oblika [8]. Inspirisan biološkim procesima, CNN se može definisati kao oblik višeslojnog perceptrona.

Kod potpuno povezanih neuronskih mreža, broj parametara naglo raste sa porastom broja slojeva. Veliki broj parametara dalje prouzrokuje ogromno vreme potrebno za njihovo podešavanje. Na primer, kod slike

koja se može prikazati kao matrica piksela, za dimenzije 300×300 piksela neophodno je 90000 neurona u ulaznom sloju. U ovakvim slučajevima, nije praktično ili je čak nemoguće treniranje potpuno povezanih neuronskih mreža. Pored toga, kada se razmatraju slike u boji, treba uzeti u obzir i tri sloja koji karakterišu osnovne boje (RGB - engl. *Red-Green-Blue*), što dodatno povećava kompleksnost obučavanja. Upravo u ovom problemu, ogleda se glavna prednost CNN-a da efikasno redukuje broj parametara, bez značajnih gubitaka, odnosno sa očuvanjem kvaliteta slike.

CNN je sačinjen od ulaznog, izlaznog i jednog ili više skrivenih slojeva. Arhitektura mreže formira se u zavisnosti od konkretne aplikacije u kojoj se koristi CNN. Ulazni sloj, kao i u svakoj neuronskoj mreži služi da bi se podaci uveli u mrežu. Izlazni sloj, sa druge strane, predstavlja potpuno povezan sloj koji na izlazu mreže daje rešenje u prethodno definisanom obliku. Postupak konvolucije koji se dešava u skrivenim slojevima, odnosno između ulaznog i izlaznog sloja je ono što karakteriše CNN. Zbog razumevanja CNN arhitekture korišćene u ovom radu, ukratko će biti objašnjeni sledeći slojevi: sloj konvolucije (engl. *convolutional layer*), sloj sažimanja (engl. *pooling layer*) i ispravljajući sloj (engl. *flatten layer*).

Konvolucionni sloj izvršava glavnu operaciju mreže. Konvolucija označava matematičku operaciju u kojoj se od dve funkcije dobija treća funkcija na izlazu. Operacija konvolucije u vremenskom/prostornom domenu, odgovara operaciji filtriranja signala u frekventnom domenu. Kada je ulazni podatak slika, konvolucija se izvodi pomoću dvodimenzionalnog (za sliku intenziteta) ili višedimenzionalnog filtera (engl. *kernel*), čija polja uzimaju vrednosti realnih brojeva. Dimenzije konvolucionog filtera su po pravilu višestruko manje od dimenzija razmatrane slike. Pojednostavljen primer postupka konvolucije prikazan je na slici 3, gde je na sliku dimenzija 6x6 piksela primenjen konvolucionni filter dimenzija 3x3 piksela.



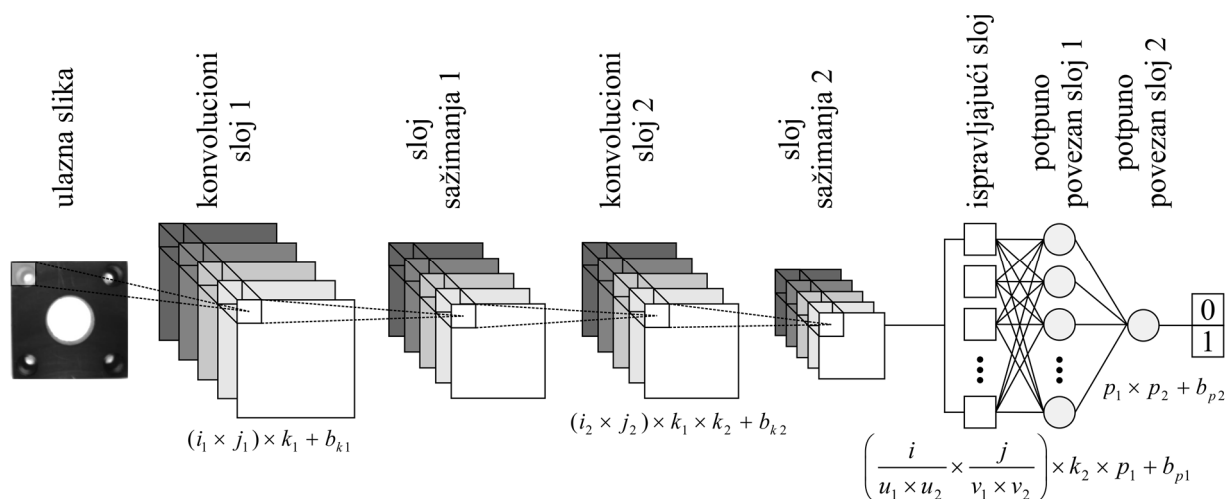
Slika 3. Primer procesa konvolucije

Konvolucionni filter translira se duž horizontalne i vertikalne ose za prethodno definisan korak (engl. *stride*), koji direktno određuje dimenzije izlazne matrice. Vrednosti izlazne matrice dobijaju se kao suma proizvoda članova filtera i njima odgovarajućih vrednosti intenziteta osvetljenosti slike koje u tom trenutku preklapaju. Sa slike 3, može se primetiti da dimenzije slike nakon procesa konvolucije naglo opadaju. Međutim, često je potrebno prilagoditi dimenzije slike kako bi se ispunili odgovarajući zahtevi vezani za njenu dalju obradu. U tu svrhu sprovodi se postupak proširivanja slike, tj. dodavanja piksela po obodu slike, najčešće sa vrednostima 0 (engl. *zero padding*).

Sloj sažimanja redukuje broj piksela slike i na taj način smanjuje broj parametara CNN modela. Najčešće se vrši sažimanje maksimumom (engl. *max pooling*), gde se u okviru izabranog regiona slike bira piksel sa najvećim intenzitetom osvetljenosti, dok se ostali pikseli tog regiona odbacuju. Pored sažimanja maksimumom, često se koristi i sažimanje prosekom (engl. *average pooling*), kod kojeg se izračunava srednja vrednost intenziteta osvetljenosti grupe piksela prisutnih u regionu.

Ispravljajući sloj pretvara ulazni format podataka u jednodimenzionalni niz pogodan za rad sa potpuno povezanim slojevima. Aktivaciona funkcija koja se koristi u pojedinim slojevima odlučuje o tome da li će neuron biti aktiviran ili ne. Svrha aktivacionih funkcija ogleda se u uvođenju nelinearnosti u izlaz neurona. Drugim rečima, aktivaciona funkcija nelinearnom transformacijom omogućava da se iz ulaznih podataka izvuku kompleksna obeležja.

Kako bi se pronašla optimalna arhitektura mreže za detekciju orijentacije razmatranog dela, u ovom radu su kreirane i testirane različite CNN arhitekture. Zbog primene algoritma u realnim sistemima, teži se što manjem broju parametara modela, kako bi se redukovala proračunska kompleksnost i postigao brz odziv. S druge strane, nedovoljan broj obučavajućih parametara mreže može dovesti do netačnih rezultata klasifikacije. Iz navedenih razloga, odabir arhitekture često se svodi na kompromis između broja parametara i tačnosti koju neuronska mreža ostvaruje. Daljom analizom, izabrana je arhitektura koja sadrži ukupno 7 slojeva povezanih kao na slici 4.



Slika 4. Izabrana arhitektura konvolucione neuronske mreže

Pored navedenih slojeva, na slici 4 prikazane su i formule za izračunavanje broja parametara koji figurišu u određenim slojevima neuronske mreže, pa je potrebno bliže definisati korišćene oznake:

- $i \times j$ - dimenzija ulazne slike
- $i_1 \times j_1, i_2 \times j_2$ - dimenzije filtera u konvolucionom sloju 1, 2
- k_1, k_2 - broj filtera u konvolucionom sloju 1, 2
- $u_1 \times v_1, u_2 \times v_2$ - dimenzije prozora koje definišu region u sloju sažimanja 1, 2
- p_1, p_2 - broj neurona u potpuno povezanom sloju 1, 2
- $b_{k1}, b_{k2}, b_{p1}, b_{p2}$ - broj elemenata *bias* vektora u konvolucionom sloju 1, 2 i potpuno povezanom sloju 1, 2

Da bi dimenzije slike u konvolucionim slojevima 1 i 2 ostale nepromenjene, sproveden je postupak dodavanja piksela po obodu slike. Dimenzija filtera u konvolucionim slojevima 1 i 2 je 3×3 piksela ($i_1=j_1=i_2=j_2=3$), a filter se duž horizontalne i vertikalne ose translira za korak $c=1$ piksel. U okviru konvolucionih slojeva 1 i 2 korišćena je aktivaciona funkcija ispravljajuće linearne jedinice (ReLU - engl. *Rectified Linear Unit*), definisana sa:

$$rl(x) = \max(0, x) \quad (5)$$

ReLU funkcija na izlazu daje 0 ukoliko na ulazu dobije bilo koju negativnu vrednost x , dok pozitivne vrednosti ostaju nepromenjene. S druge strane, u potpuno povezanom sloju 2, korišćena je sigmoidna aktivaciona funkcija koja se može zapisati na sledeći način:

$$sg(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

Sigmoidna funkcija za ulaznu vrednost x na izlazu daje vrednost u opsegu $(0, 1)$, što u slučaju klasifikacije predstavlja verovatnoću.

Tokom pronalaženja optimalnog modela, varirano je ukupno 4 parametra koji definišu određene slojeve CNN arhitekture: $k_1=[8, 16]$, $k_2=[8, 16]$, $p_1=[2, 5]$, $u_1 \times v_1, u_2 \times v_2=[2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4]$. Varijacija parametara rezultirala je sa ukupno 24 generisana modela. CNN modeli su generisani na osnovu sirovih podataka bez prethodno izdvojenih obeležja (pristup 2). Ulazni skup podataka podeljen je na delove za treniranje/validaciju i testiranje u odnosu 80/10/10 %, respektivno. Kako je po zadatku klasifikacija binarna, za funkciju cilja izabrana je funkcija binarne unakrsne entropije (engl. *binary cross-entropy function*), koja se može formulisati na sledeći način [12]:

$$bce(x) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i \cdot \log(z(x_i)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - z(x_i))] \quad (7)$$

gde je n broj članova u skupu za testiranje, x_i i y_i predstavljaju ulaz i željeni izlaz i -tog člana, dok je z model koji sadrži težinske vrednosti neuronske mreže. Optimizacija vrednosti funkcije cilja izvršena je korišćenjem

optimizatora Adam, sa parametrom učenja $\alpha=0.001$, gde se u jednoj iteraciji uzima podskup (engl. *batch size*) od 200 slika. Prethodnim testiranjem, utvrđeno je da su promene tačnosti treniranja i validacije nakon 10 epoha zanemarljivo male, stoga se u cilju optimizacije vremena, ovaj broj epoha usvaja kao optimalan. Pre uvođenja slike u neuronsku mrežu, originalna dimenzija 640×480 piksela redukovana je na 100×100 piksela, čime se omogućilo brže procesiranje, odnosno smanjilo vreme potrebno za treniranje i validaciju modela. Kreiranje CNN modela realizovano je korišćenjem *Python* programskog jezika u *Visual Studio Code* okruženju i upotrebom *Keras* biblioteke, koja je orijentisana na projektovanje neuronskih mreža.

Tabela 1. Performanse izabranih CNN modela

r. br.	k_1	k_2	$u_1 \times v_1,$ $u_2 \times v_2$	p_1	Broj parametara	Vreme treniranja	Greška	Tačnost
1.	16	16	2×2	5	52491	34 min	0.0108	0.9975
2.	16	16	2×2	2	22485	31 min	0.0292	0.9925
3.	8	16	2×2	2	21253	21 min	0.0517	0.9925
4.	8	16	2×2	5	51259	20 min	0.0251	0.9910
5.	16	8	2×2	5	26331	25 min	0.0302	0.9900
6.	16	8	2×2	2	11325	29 min	0.0537	0.9885
7.	16	16	3×3	2	6357	21 min	0.0607	0.9845
8.	8	16	4×4	5	4139	12 min	0.0558	0.9835
9.	16	16	3×3	5	12171	25 min	0.0525	0.9805
10.	8	8	2×2	2	10669	19 min	0.0539	0.9800

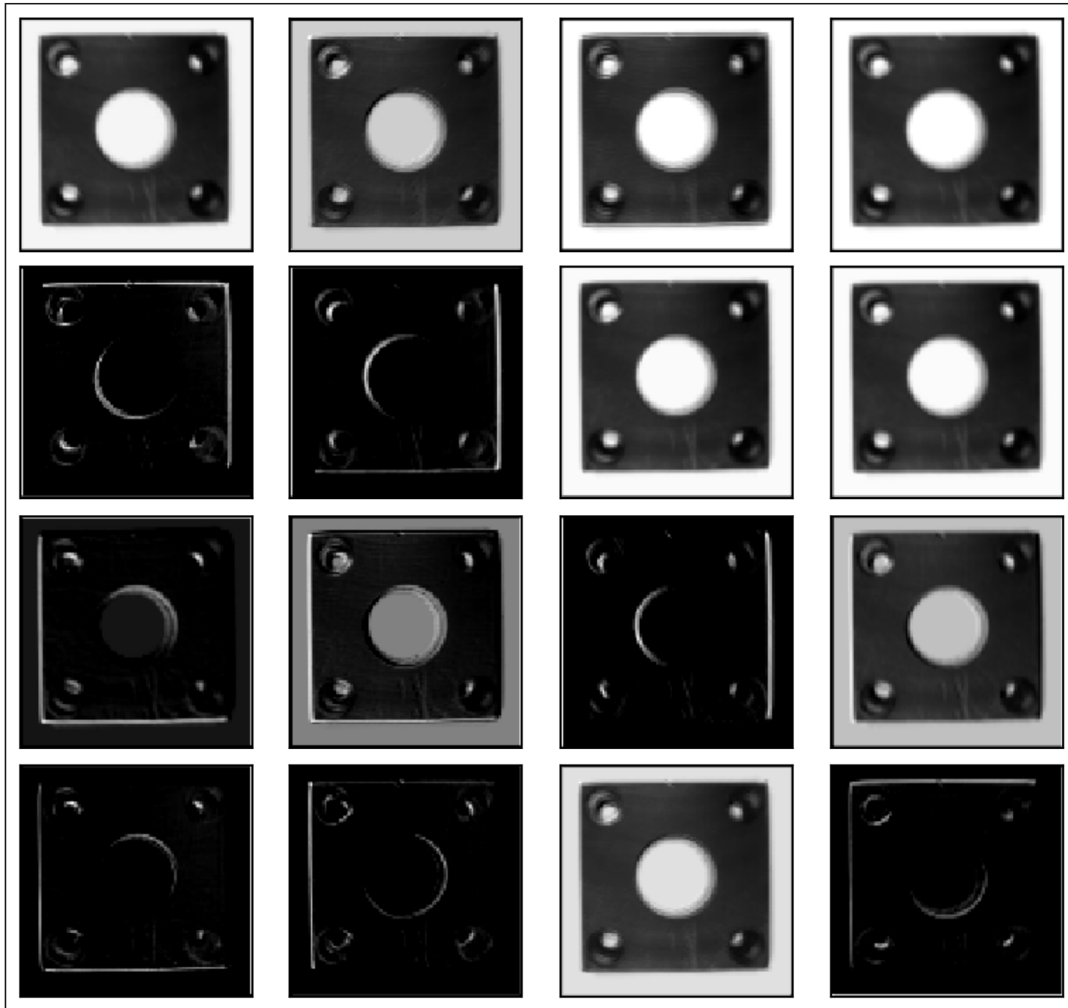
Od generisana 24 modela, 10 najboljih (prema kriterijumu tačnosti) prikazano je u tabeli 1. Analizom rezultata, može se zaključiti da je razlika između najveće i najmanje ostvarene tačnosti 1.75 %. Međutim, po kriterijumu broja parametara, modeli se drastično razlikuju, što se najbolje uočava poređenjem modela 1 i 8. Za implementaciju na realnom sistemu, izabran je model 6, kao kompromisno rešenje između ostvarene tačnosti i broja parametara.

Na slici 5 prikazani su izlazi dobijeni upotrebom filtera u konvolucionom sloju 1 ($k_1=16$, rezolucija izlazne slike 100×100 piksela) i konvolucionom sloju 2 ($k_2=8$, rezolucija izlazne slike 50×50 piksela). Može se primetiti da su u okviru jednog konvolucionog sloja primenom filtera automatski izdvojena različita obeležja. Ni jedna od izlaznih slika pojedinačno ne sadrži izdvojene sve ivice, ali se upoređivanjem sadržaja različitih slika može uočiti da su, kada se sve slike uzmu u obzir, relevantne ivice izdvojene. Dakle, ni jedan filter pojedinačno nije u mogućnosti da izdvoji reprezentativna i diskriminativna obeležja iz slike, ali njihova kombinacija uspešno izvršava ovaj zadatak. Na ovaj način, korišćenjem više filtera omogućava se izdvajanje većeg broja obeležja, koja predstavljaju osnovu u daljem postupku klasifikacije. Filteri u ovom pristupu sadrže vrednosti koje su generisane u procesu obučavanja. U tabeli 2 za ilustraciju navedeni su primeri vrednosti koeficijenata u okviru filtera za generisanje pete i šeste izlazne slike iz konvolucionog sloja 1.

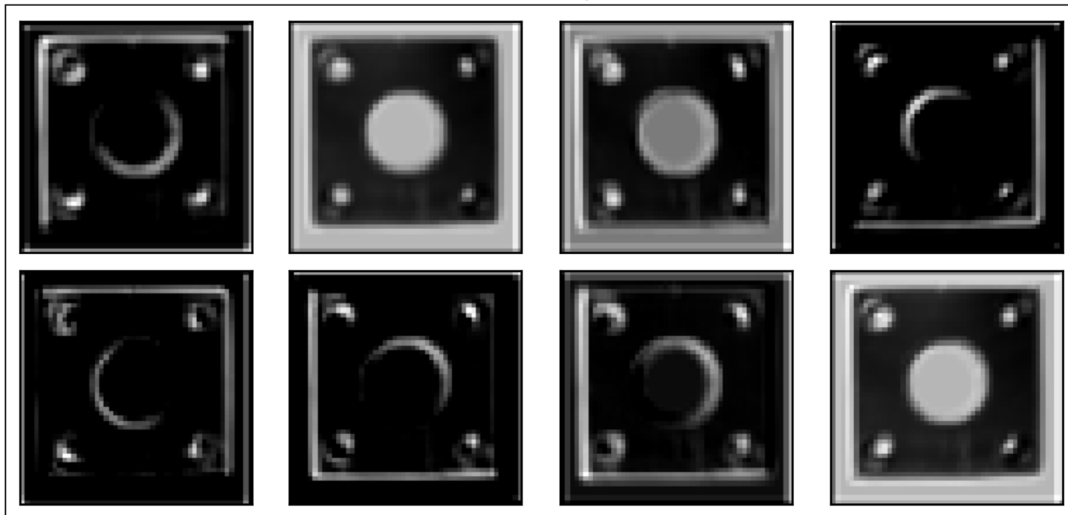
Tabela 2. Vrednosti koeficijenata u okviru filtera za izlazne slike 5 i 6 iz konvolucionog sloja 1

r. br. filtera	vrednosti koeficijenata: w -težinski koeficijenti, b -bias
filter 5	$w_5=[0.16904709, -0.03604977, -0.08377788,$ $0.10606162, -0.09235477, -0.16050835,$ $0.15777418, -0.00920481, -0.15690242].$ $b_5=0.01347827$
filter 6	$w_6=[0.03383054, 0.02300355, 0.11710286,$ $0.11649627, -0.07874936, 0.16420484,$ $-0.0023982, 0.24465808, -0.00459176].$ $b_6=-0.04123958$

konvolucioni sloj 1 ($k_1=16$)

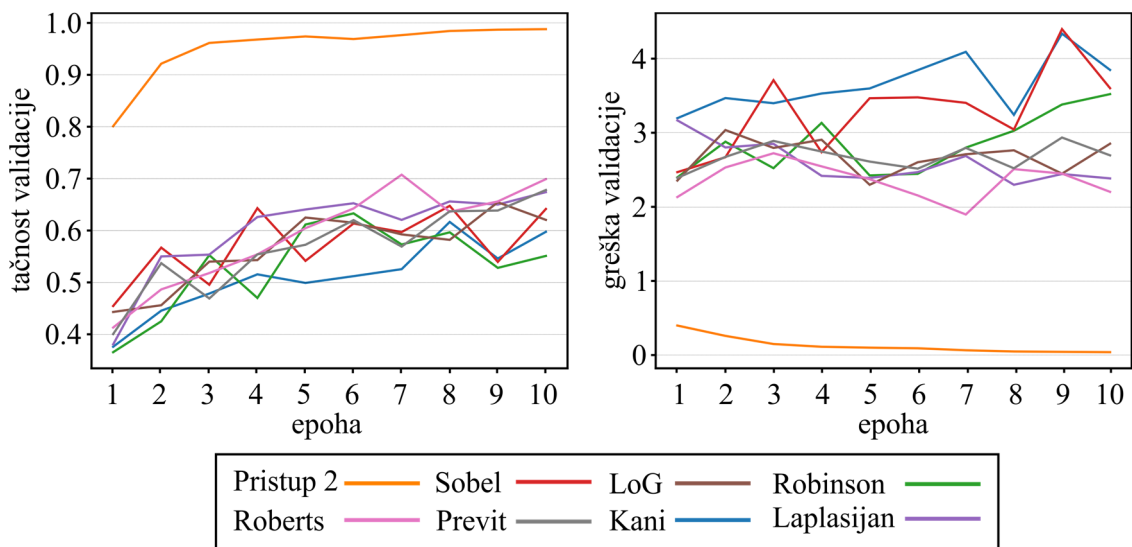


konvolucioni sloj 2 ($k_2=8$)



Slika 5. Slike dobijene primenom filtera u konvolucionom sloju 1 i 2

Koristeći arhitekturu mreže pod rednim brojem 6 (tabela 1), za svaku od metoda detekcije ivica iz poglavlja 3 (ukupno 7 metoda) kreiran je CNN model. U ovom slučaju, obučavajuće parove na ulazu u neuronsku mrežu čine slike dobijene nakon procesa detekcije ivica. U cilju poređenja rezultata klasifikacije dobijenih obučavanjem CNN-a na osnovu sirovih podataka (pristup 2) i na osnovu podataka dobijenih prethodnom detekcijom ivica (pristup 1), na slici 6 prikazana je promena tačnosti i greške validacije kroz epohe.

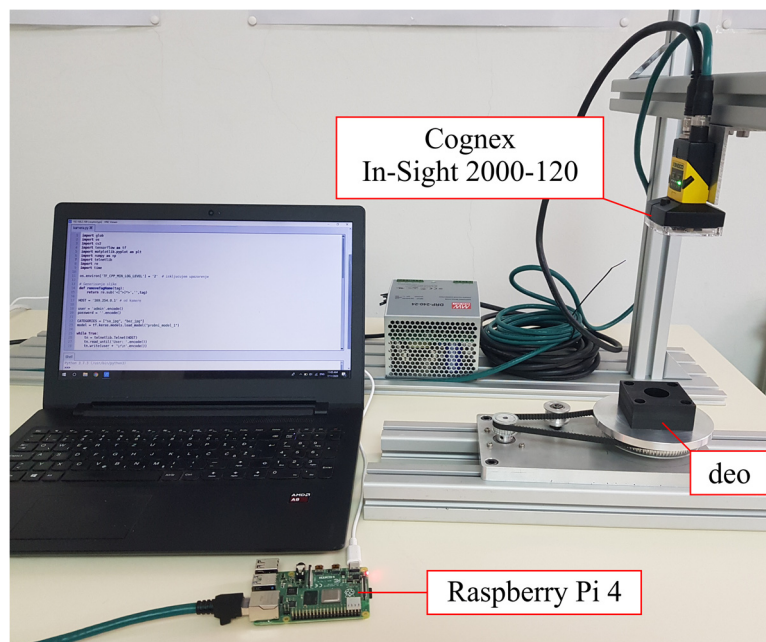


Slika 6. Poređenje rezultata klasifikacije

Sa slike 6 se može primetiti da je postignuta tačnost validacije metoda zasnovanih na prethodnom izdvajanju obeležja značajno manja (između 50 i 70 %) u odnosu na rezultate klasifikacije koristeći pristup 2. Isti zaključak se može doneti poređenjem ostvarene greške validacije. Niska tačnost u slučaju pristupa 1 bila je očekivana, s obzirom na to da su obučavajući parovi za obe orijentacije gotovo identični, što je dalje prouzrokovalo lošu predikciju.

5. IMPLEMENTACIJA RAZVIJENOG SISTEMA ZA KLASIFIKACIJU NA REALNOJ INSTALACIJI

Na slici 7. prikazana je eksperimentalna instalacija koja se nalazi u Laboratoriji za automatizaciju proizvodnih procesa Katedre za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu i koja se sastoji od *Cognex In-Sight 2000-120* kamere i *Raspberry Pi 4* računara (laptop računar se u okviru eksperimentalne instalacije koristi isključivo kao periferni uređaj za prikaz *Raspberry Pi* okruženja). Algoritam za klasifikaciju baziran na CNN modelu, implementiran je na računarsku platformu *Raspberry Pi 4*, koja raspolaže sa 2GB RAM memorije i procesorom od 1.5 GHz. *Raspberry Pi 4* podržava *IEEE 802.11 Wireless LAN* komunikacioni protokol, kao i prenos podataka upotrebom *Ethernet* protokola.



Slika 7. Eksperimentalna instalacija

Komunikacija između *Raspberry Pi* računara i kamere odvija se putem *Ethernet* protokola, gde se generisanje slike sprovodi slanjem upravljačkih komandi kameri (engl. *Set Event 8* - SE8 komanda u slučaju *Cognex* senzora), nakon čega se dobijena slika šalje u povratnom smeru ka računaru. Primitljena slika definisana je u ASCII heksadecimalnom kodu, a zapisana u vrstama koje sadrže po 80 karaktera. Pre dalje upotrebe, sliku je neophodno konvertovati (uzimajući redom po 2 člana) u matricu sa vrednostima u opsegu 0-255, koje označavaju intenzitet osvetljenja piksela (slika 8).

<pre>Welcome to In-Sight(tm) IS8402M Session 0 User: admin Password: User Logged In SE8 RB 1 3314 5C6362666B6D6B6A716B70B0B36DE73706D6D706E7271716E706CD71726B76B36F36FD706CF72063 6D696453245D32353490C1108008594220B0A0B0A0A090D0B0909C008080AC0AB0A0SCB0B0A0B0 0D0B0909090B0F080A0B012183043566654666C69B6949393916F707027123327137217123713431 6A6F77868473737C0B0B0C0C0D0B0C011221A66717146EA7273788777777333F78080003410B0D3 0D0C009090D0C0C0D0C0D0C0C1122134A6671E7727717777374F808080D71114677101808080D0 ...</pre>	a)
<pre>for i in range(7712): a=tn.read_until('\n'.encode()) # učitavanje vrsta ascii hex koda a = a.decode("utf-8") # dekodiranje, prevodjenje u stringove lista.append(a) # kreiranje liste stringova if 29 < i < 7710: k = lista[i][0:-2] for j in range(0, len(k)-1, 2): # konverzija iz heksadecimalnog u decimalni zapis k1 = int(k[j:j+2], 16) dec_lista.append(k1) matrica_slike = np.empty([480,640]) for i in range(1, 481): matrica_slike[i-1,:] = dec_lista[(i-1)*640:i*640]</pre>	b)

Slika 8. Konverzija slike: a) deo ASCII heksadecimalnog koda; b) programski kod za konverziju

Na *Raspberry Pi* platformi, programski jezik *Python* korišćen je u *Thonny* okruženju. Nakon realizovane konverzije, izvršena je normalizacija intenziteta osvetljenosti piksela, čime je opseg vrednosti 0-255 sveden na opseg 0-1. Takođe, dimenzije slike 640×480 piksela prilagođene su dimenzijama koje koristi obučeni CNN model (100×100 piksela). Predloženi metod se pokazao kao efikasan na realnom eksperimentu i korišćenjem razvijenog CNN modela uspešno je klasifikovao dve orijentacije dela. Brzina klasifikacije zavisi od broja parametara modela i performansi računara na kojem je algoritam implementiran. Vreme koje je potrebno za prenos slike sa senzora na računar je u ovom slučaju zanemarljivo malo, s obzirom na odnos kapaciteta memorije koju nosi slika i brzine prenosa koju podržava *Ethernet* protokol.

6. ZAKLJUČAK

U fokusu ovog rada je problem klasifikacije slike, kao jedne od najčešće korišćenih operacija mašinskog gledanja. Za objekte klasifikacije izabrane su dve orijentacije prizmatičnog dela koje se razlikuju po prisustvu/odsustvu upusta. Razmatrano je rešavanje ovog problema korišćenjem konvolucionionih neuronskih mreža, pri čemu su primenjena dva pristupa. Prvi pristup na ulazu u neuronsku mrežu koristi sliku sa prethodno izdvojenim ivicama korišćenjem sedam različitih metoda za detekciju ivica (praktično je razvijeno sedam različitih modela), dok je drugi pristup usmeren na primenu sirovih podataka.

Najbolji rezultati postignuti su upotrebom drugog pristupa, gde je ostvarena tačnost klasifikacije iznosila 99.75 %. Dobijeni rezultati ukazuju na to da u slučaju prepoznavanja delova koji su izrađeni od materijala nepovoljnih optičkih svojstava (kao što je razmatrani deo) direktna primena CNN daje bolje rezultate u odnosu na tradicionalan pristup zasnovan na prethodno izdvojenim ivicama. Drugim rečima, filteri (za konvoluciju) dobijeni tokom obučavanja CNN su pokazali bolju sposobnost da detektuju značajna obeležja na delu, nego filteri koji su direktno kreirani za detekciju ivica.

Algoritam za klasifikaciju koji u osnovi koristi jedan od generisanih CNN modela, implementiran je na

Raspberry Pi 4 platformi u okviru eksperimentalne instalacije. Razvijeni metod pokazao se kao efikasan prilikom izvršavanja zadatka klasifikacije objekata u realnom vremenu.

Pravci daljih istraživanja biće usmereni na uvođenje više-klasne klasifikacije, što uključuje i razvoj novih CNN arhitektura. Takođe, razvijeni metod biće implementiran na eksperimentalnoj instalaciji u okviru koje se između ostalog, na osnovu podatka o orijentaciji izvršava hvatanje dela.

7. LITERATURA

- [1] Golnabi, H., Asadpour, A.: *Design and application of industrial machine vision systems*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, No. 6, pp. 630-637, 2007.
- [2] Peña-Cabrera, M., Lopez-Juarez, I., Rios-Cabrera, R., Corona-Castuera, J.: *Machine Vision Approach for Robotic Assembly*, Assembly Automation, Vol. 25, No. 3, pp. 204-216, 2005.
- [3] Ma, G., Lou, Y., Li, Z., Gao, M., Yang, Y., Liu, Y., He, Z., Zhu, H.: *A machine vision based sealing rings automatic grabbing and putting system*, IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 202-206, Poitiers, France, July 2016.
- [4] Miljković, Z., Vuković, N., Mitić, M., Babić, B.: *New Hybrid vision-based control approach for automated guided vehicles*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66, pp. 231-249, 2013.
- [5] Caggiano, A., Zhang, J., Alfieri, V., Caiazzo, F., Gao, R., Teti, R.: *Machine learning-based image processing for on-line defect recognition in additive manufacturing*, CIRP Annals, Vol. 68, No. 1, pp. 451-454, 2019.
- [6] Zhang, H., Berg, A. C., Maire, M., Malik, J.: *SVM-KNN: Discriminative Nearest Neighbor Classification for Visual Category Recognition*, 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), pp. 2126-2136, New York, USA, 2006.
- [7] Korytkowski, M., Rutkowski, L., Scherer, R.: *Fast image classification by boosting fuzzy classifiers*, Information Sciences, Vol. 327, pp. 175-182, 2016.
- [8] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.: *ImageNet classification with deep convolutional neural networks*, Neural Information Processing Systems (NIPS), Nevada, USA, Dec. 2012.
- [9] Rastegari, M., Ordonez, V., Redmon, J., Farhadi, A.: *XNOR-Net: ImageNet Classification Using Binary Convolutional Neural Networks*, European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 525-542, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2016.
- [10] In-Sight 2000 model specification, <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-sensors/in-sight-2000-vision-sensors/models-and-specs>, datum pristupa: 07.09.2020.
- [11] Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B. G.: *Machine Vision*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [12] Ho, Y., Wookey, S.: *The real-world-weight cross-entropy loss function: Modeling the costs of mislabeling*, IEEE Access, Vol. 8, pp. 4806-4813, 2020.

Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.

IMAGE CLASSIFICATION BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Abstract: *The development of image processing technologies opens up new perspectives and increases the productivity and quality of a wide range of industrial applications. Image classification belongs to the group of the most complex processes in the field of digital image processing and represents the assignment of a class (from a previously defined set) to the image being observed. In this work, image classification is used to determine the orientation of a prismatic part. The proposed classification method is based on convolutional neural networks (CNN). Depending on the type of input provided to CNN, two approaches are considered: the first approach involves image preprocessing and extraction of features based on edge detection, whereas the second approach uses raw data (without previously extracted features). The classification method was tested in real time on the experimental installation based on the Raspberry Pi platform.*

Key words: *machine vision, image processing, classification, convolutional neural networks*



Miljković, K., Petrović, M.M., Jovanović, R.¹⁾

PRILOG RAZVOJU INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA SERVO MOTORA JEDNOSMERNE STRUJE PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA²⁾

Rezime

U radu je prikazan mogući pristup inteligentnog upravljanja servo motora jednosmerne struje korišćenjem veštačkih neuronskih mreža. Pored primene jedne od najzastupljenijih tehnika veštačke inteligencije, u radu je predloženo i dato matematičko modelovanje ovog široko zastupljenog objekta automatskog upravljanja. Takođe, u cilju prevazilaženja nedostataka vezanih za konvencionalno upravljanje servo motora jednosmerne struje, u radu su iskorišćene sposobnosti veštačkih neuronskih mreža da mogu da generalizuju i aproksimiraju izlaze ovog objekta primenom mašinskog učenja kroz proces njihovog obučavanja. Predloženi pristup, prvo je analiziran putem simulacije, a potom je i eksperimentalno verifikovan na primeru dva od četiri modela koji su razmatrani.

Ključne reči: *inteligentno upravljanje, servo motor jednosmerne struje, veštačke neuronske mreže, mašinsko učenje, matematičko modelovanje*

1. UVOD

Inteligentni sistemi upravljanja [2] predstavljaju naprednu naučnu multidisciplinarnu oblast koja ima intenzivan razvoj u 21. veku. Multidisciplinarnost obuhvata razvoj i primenu prvenstveno sledećih naučnih disciplina: automatskog upravljanja [3], veštačke inteligencije [5] i matematičkog modelovanja objekata [1, 2, 3]. Cilj ovog rada je vezan za naučno-istraživačku potrebu autora da se sagleda mogućnost primene veštačkih neuronskih mreža [5] pri inteligentnom upravljanju servo motora jednosmerne struje [7].

Danas, posebno u domenu inteligentnog upravljanja DC servo motora [1, 2], neophodno je bilo da se posebno razmotri mogućnost identifikacije, odnosno modelovanja i upravljanja izlaza ovog objekta korišćenjem jedne od najzastupljenijih tehnika veštačke inteligencije, veštačkih neuronskih mreža [5]. Veštačke neuronske mreže imaju sposobnost generalizacije i aproksimacije izlaza objekta primenom mašinskog učenja, i to kroz proces njihovog obučavanja korišćenjem širokog spektra dostupnih algoritama [6]. Jedan od najčešće primenjivanih je backpropagation (BP) algoritam učenja sa povratnim prostiranjem greške [5], koji je i primenjen u ovom radu.

Istraživanje, prikazano u ovom radu, podrazumevalo je modelovanje objekta, uz simulaciju i eksperimentalnu verifikaciju dobijenog modela objekta (DC motor), kao i realizaciju inteligentnog upravljanja tog servo motora jednosmerne struje, primenom neuronskih mreža, i to korišćenjem dva od četiri razmatrana modela [2, 4].

2. KOMPONENTE SISTEMA

Za eksperimentalnu realizaciju rada korišćen je Quanser SRV02 [7], rotacioni servo objekt, prikazan na slici 1, a koji se sastoji od servo motora jednosmerne struje (DC motor), smeštenog u aluminijsko kućište, kao i od potenciometra, tahometra i enkodera. Tahometar se koristi za merenje ugaone brzine, dok potenciometar i enkoder vrše merenje ugaone pozicije. Za dobijanje eksperimentalnih rezultata, u radu je korišćen isključivo

¹⁾ MSc Katarina Miljković, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu-Mašinski fakultet, kmiljkovic@mas.bg.ac.rs,
dr Milica M. Petrović, docent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, mmpetrovic@mas.bg.ac.rs,
dr Radiša Jovanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, rjovanovic@mas.bg.ac.rs.

²⁾ Rad je nastao u okviru istraživanja na potprojektu: „Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva - Duboko mašinsko učenje inteligentnih tehnoloških sistema u proizvodnom mašinstvu“ koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije (ugovor br. 451-03-68/2020-14/200105), kao i na projektu VI - MISSION4.0 (evidencioni broj: 6523109) koji je finansijski podržan od strane Fonda za nauku Republike Srbije, 2020.

tahometar [4], koji je direktno priključen na DC motor. Na taj način se sprečava bilo kakvo kašnjenje u vremenu i osigurava da se ugaona brzina motora utvrđuje sa višom tačnošću. Naime, dobija se naponski signal koji je proporcionalan ugaonoj brzini. Motor ima reduktor sa spoljašnjim zupčanicima. Kao opterećenje ovog DC motora, postavljen je disk mase 0.04kg i prečnika 0.05m (slika 1). Prosleđivanje signala sa računara ka DC servo motoru, kao i sa senzora ka računaru, omogućeno je akvizicionom karticom [9], dok se napajanje senzora i pojačavanje signala vrši pomoću pojačavača [10].



Slika 1. Servo motor Quanser SRV02 sa izabranom konfiguracijom zupčanika [7] (a), primer postavljanja opterećenja [7] (b), akviziciona kartica [9] (c) i pojačavač [10] (d)

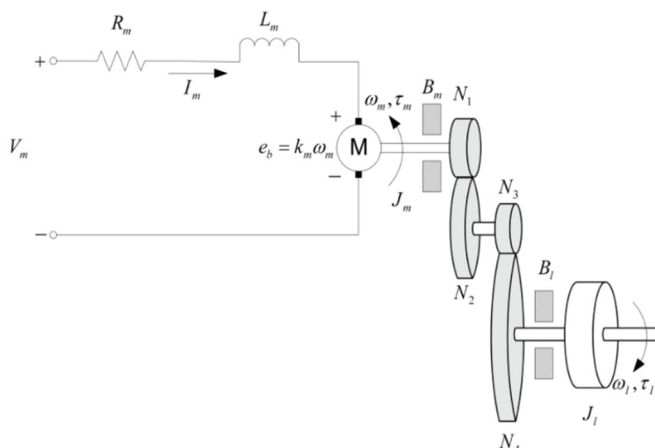
3. MATEMATIČKI MODEL OBJEKTA

Uopšteno posmatrano, ugaona brzina vratila DC servo motora, u odnosu na ulazni napon motora, može biti opisana pomoću sledeće prenosne funkcije prvog reda:

$$\frac{\Omega_l(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1'} \quad (1)$$

gde je $\Omega_l(s)$ Laplasova transformacija ugaone brzine vratila, $V_m(s)$ Laplasova transformacija ulaznog napona motora, K poziciono pojačanje, τ vremenska konstanta, a s kompleksna promenljiva.

Prikaz armature namotaja i sklopa zupčanika, korišćenog servo motora Quanser SRV02, vidi se na slici 2. Električni deo podrazumeva napon izvora napajanja V_m , kontra elektromotornu silu e_b , rednu vezu otpornika otpornosti R_m i kalema induktivnosti L_m , dok je mehanički deo predstavljen momentom inercije motora J_m , čije se vratilo rotira ugaonom brzinom ω_m stvarajući obrtni moment τ_m . Preko zupčastih parova N_1, N_2 i N_3, N_4 , ugaona brzina ω_m i obrtni moment τ_m postaju ω_l i τ_l , a koji pokreću i opterećenje momenta inercije J_l .



Slika 2. Prikaz armature namotaja i sklopa zupčanika servo motora SRV02 [8]

U nastavku ovog rada, daje se detaljniji matematički model posmatranog objekta, kroz električne i mehaničke jednačine [8].

3.1 Električne jednačine

Elektromotorna sila $e_b(t)$ zavisi od ugaone brzine vratila motora ω_m i konstante motora k_m . Ona se suprotstavlja trenutnom toku struje i data je jednačinom:

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t), \quad (2)$$

gde je k_m koeficijent elektromotorne sile, a ω_m ugaona brzina vratila motora.

Koristeći Kirhofov zakon moguće je napisati sledeću jednačinu:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0, \quad (3)$$

gde je V_m napon armaturnog namotaja, I_m struja armaturnog namotaja, R_m električna otpornost armaturnog namotaja i L_m koeficijent induktivnosti armaturnog namotaja.

S obzirom da je indukcija motora L_m mnogo manja od njegove otpornosti, ona može biti zanemarena. Na osnovu toga dobija se izraz za struju motora:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0, \quad (4)$$

$$I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m}. \quad (5)$$

3.2 Mehaničke jednačine

Jednačina ulaznog vratila (vratila motora) data je kao:

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t), \quad (6)$$

dok je jednačina izlaznog vratila:

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t) = \tau_l(t), \quad (7)$$

gde J_m, J_l predstavljaju momente inercije motora i opterećenja, sledstveno, ω_m, ω_l ugaone brzine vratila motora i izlaznog vratila, τ_m, τ_l obrtne momente vratila motora i izlaznog vratila, B_m, B_l koeficijente viskoznog trenja motora i prenosnika, dok je τ_{ml} obrtni moment sveden na vratilo motora.

Obrtni moment na izlaznom vratilu se može napisati kao:

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_{ml}(t), \quad (8)$$

gde η_g predstavlja stepen iskorišćenja, a K_g prenosni odnos zupčanika na servo motoru.

Diferencijalna jednačina koja opisuje kretanje izlaznog vratila data je u pojednostavljenom obliku:

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t). \quad (9)$$

3.3 Redukovani linearni matematički model objekta

Obrtni moment motora proporcionalan je ulaznom naponu, a opisuje se sa:

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t), \quad (10)$$

gde η_m predstavlja stepen iskorišćenja motora, k_t trenutnu konstantu obrtnog momenta, a I_m jačinu struje.

Ukoliko se obrtni moment motora izrazi pomoću ulaznog napona V_m i ugaone brzine izlaznog vratila ω_l , zamenjujući ranije dobijene izraze za jačinu struje I_m i ugaonu brzinu vratila motora ω_m i koristeći diferencijalnu jednačinu koja opisuje kretanje izlaznog vratila, dobija se:

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + \left(\frac{k_m \eta_g K_g^2 \eta_m k_t}{R_m} + B_{eq} \right) \omega_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t V_m(t)}{R_m}. \quad (11)$$

Ukoliko je ekvivalentni koeficijent prigušenja dat kao:

$$B_{eq,v} = \frac{k_m \eta_g K_g^2 \eta_m k_t + B_{eq} R_m}{R_m}, \quad (12)$$

dok je pojačanje:

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m}, \quad (13)$$

jednačina (11) postaje:

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq,v} \omega_l(t) = A_m V_m(t). \quad (14)$$

Dobijena jednačina predstavlja konačni oblik diferencijalne jednačine koja opisuje kretanje izlaznog vratila i može se zapisati u obliku:

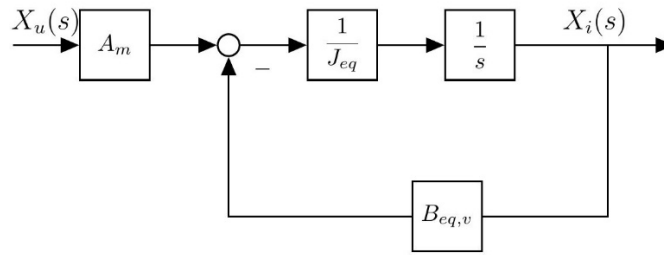
$$J_{eq} \dot{x}_i(t) + B_{eq,v} x_i(t) = A_m x_u(t). \quad (15)$$

Pod pretpostavkom da se zazor u prenosniku može zanemariti, dobija se linearni matematički model objekta, predstavljen blok dijagramom na slici 3. Sada je moguće prikazati prenosnu funkciju sistema koja predstavlja količnik levih Laplasovih transformacija njegove izlazne i ulazne veličine, pri svim početnim vrednostima jednakim nuli. Primenom leve Laplasove transformacije na dobijenu diferencijalnu jednačinu ponašanja u vremenskom domenu, dobija se njen oblik u kompleksnom domenu:

$$J_{eq} s X_i^-(s) + B_{eq,v} X_i^-(s) = A_m X_u^-(s), \quad (16)$$

na osnovu koje sledi prenosna funkcija sistema:

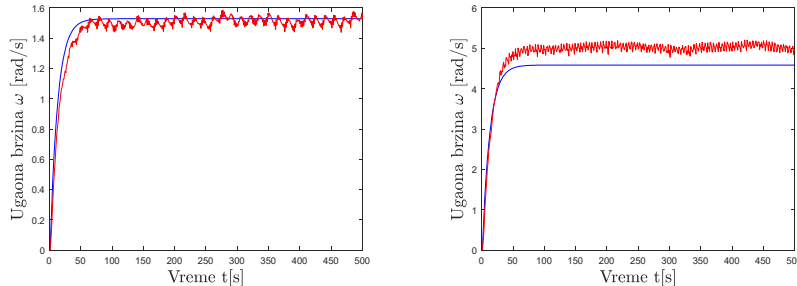
$$W(s) = \frac{X_i^-(s)}{X_u^-(s)} = \frac{A_m}{J_{eq} s + B_{eq,v}}. \quad (17)$$



Slika 3. Blok dijagram linearnog sistema [4]

3.4 Eksperimentalna verifikacija dobijenog linearnog modela

Nakon snimljenih podataka dobijenih simulacijom linearnog modela i stvarnog odziva objekta, izvršena su poređenja prikazana na slikama 4 i 5.

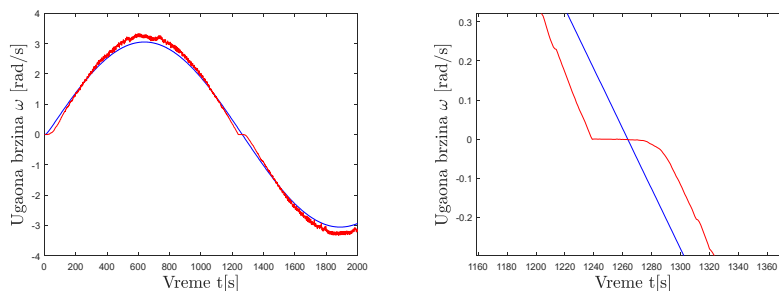


Slika 4. Poređenje signala dobijenog simulacijom (plavo) i odziva objekta na dati odskočni signal (crveno) [4]

Ukoliko je promena ulazne veličine zadata odskočnom funkcijom, odziv simulacije i stvarnog objekta, za veću konstantnu vrednost, vidno će odstupati. Odzivi objekta i simulacionog modela na sinusnu pobudu (slika 5, levo) ne poklapaju se u potpunosti, što se bolje može primetiti na slici 5 (desno), gde je dat uvećan prikaz područja oko nule i jasno se vidi da postoji nelinearnost pri stvarnom radu servo motora.

Nakon izvršenih eksperimenata utvrđeno je da stvarno ponašanje objekta nije linearno, tačnije linearni model ne opisuje dovoljno dobro ponašanje objekta u celom prostoru izlaza. Osnovni uzrok je trenje, za sve navedeno. Umesto linearnog člana $B_{eq,v}\omega_l$ uvodi se nelinearna funkcija, a ne ulazeći u matematički opis nelinearnosti, može se označiti kao $M_{TR}(\omega_l)$. Smatrajući ω_l izlaznom veličinom, moment trenja se može predstaviti nelinearnošću $N(x_i)$. Diferencijalna jednačina ponašanja tada postaje:

$$J_{eq}\dot{x}_i(t) + N(x_i(t)) = A_m x_u(t). \quad (18)$$



Slika 5. Simulacioni (plavo) i eksperimentalni (crveno) odziv objekta na sinusnu pobudu (levo) i uvećan detalj u području oko nule (desno) [4]

S obzirom da je objekt nelinearan i da linearni model ne opisuje dobro dinamičko ponašanje servo motora, očitu nelinearnost je moguće rešiti primenom veštačkih neuronskih mreža, što je u ovom radu i prikazano.

4. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Pri modelovanju i upravljanju sistemima i procesima uglavnom se pretpostavlja da opšti, analitički model sistema može da se definiše. Međutim, postoje kompleksni sistemi kao i mnogi procesi koji su toliko komplikovani da se opšti model retko kada može uspostaviti. Dakle, nastaje problem vezan za mogućnosti modelovanja i predviđanja ponašanja pojedinih sistema u situacijama kada se njihovo ponašanje temelji na potpuno stohastičkim pojavama. U takvim slučajevima, veštačke neuronske mreže se mogu koristiti kao univerzalni aproksimatori [2, 5, 6]. Veštačke neuronske mreže imaju sposobnost adaptivnog ponašanja prema promenama, kroz učenje ulaznog uzorka, jer mogu da uče preslikavanje između ulaznog i izlaznog prostora.

Sa stanovišta teorije sistema [2], neuron se može posmatrati kao višestruko prenosni sistem, tj. kao sistem sa više ulaza (n -dimenzionalni vektor ulaza $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$) i jednim izlazom (skalar $y \in \mathcal{R}$). Vektor ulaza $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$ predstavlja signale koji se prenose sa okolnih neurona na posmatrani neuron. Veličina izlaza, koju posmatrani neuron dobija od drugih (ulaz za posmatrani neuron), zavisi od jačine veza i ona je određena težinskim odnosom koji se pridružuje svakoj takvoj vezi, te je moguće odrediti vektor težinskih koeficijenata, tj. vektor težinskih odnosa ($\mathbf{w} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_n]^T$). Parametar θ predstavlja prag osetljivosti neurona, koji omogućava dalje generisanje signala, ukoliko je njihova vrednost veća od njegove. Matematički posmatrano, sposobnost obrade informacija unutar neurona, može se predstaviti nelinearnim preslikavanjem vektora \mathbf{x} u skalar y , koje se deli na ulazno preslikavanje i operaciju nelinearne aktivacije. Ulazno preslikavanje predstavlja skalarni proizvod vektora \mathbf{x} i \mathbf{w} , tj. preslikavanje iz n -dimenzionalnog ulaznog prostora neurona u jednodimenzionalni prostor, $v \in \mathcal{R}$. Veličina v se naziva aktivaciona vrednost neurona i definiše se kao:

$$v = \mathbf{w}^T \mathbf{x} - \theta = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i - \theta. \quad (19)$$

Da bi veštačka neuronska mreža izvršila neki postavljeni zadatak, potrebno je povezati neurone u odgovarajuću konfiguraciju, postaviti težinske odnose između neurona i izabrati ulazno-izlaznu funkciju [5]. Osnovni princip rada mreže podrazumeva da se raspoloživi podaci (npr. veličine stanja signala) prosleđuju ulaznom sloju mreže, s obzirom da vrednosti signala koje primaju neuroni u skrivenom sloju zavise od modifikacije ulaznog signala, a predstavljene su jačinama veza između neurona, kao i time na koji način će tako formiran ulaz u neuron biti promenjen izborom odgovarajuće aktivacione funkcije u neuronu.

Stvaranje, odnosno konfigurisanje veštačke neuronske mreže obuhvata četiri faze [5]:

- sprovođenje eksperimenata (prikupljanje ulaznih veličina stanja signala, za obučavanje i testiranje);
- projektovanje mreže (definisane svega što mrežu određuje: broj slojeva u mreži, aktivacione funkcije, algoritam učenja, itd.);
- povezivanje neurona u svakom od slojeva;
- implementacija (pretvaranje ulaznih veličina u željeni format, pretprocesiranje podataka, testiranje rada mreže).

Algoritam učenja sa povratnim prostiranjem greške (*backpropagation*, BP), primenjen je na višeslojne neuronske mreže bez povratnih veza, koje se sastoje od procesirajućih elemenata sa neprekidnim, diferencijabilnim aktivacionim funkcijama [2]. Za dati obučavajući skup, tj. skup ulazno-izlaznih parova $\mathbf{x}^{(k)}$, $\mathbf{d}^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, p$, algoritam učenja obezbeđuje proceduru za promenu težinskih odnosa u BP mreži, kao i za klasifikovanje ulaznih uzoraka. Osnova za podešavanje težinskih odnosa je gradijentna metoda. Za dati ulazno-izlazni par $(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{d}^{(k)})$, kod BP algoritma učenja se mogu uočiti dve faze toka informacija, tj. signala. Prvo, ulazni uzorak \mathbf{x} se prostire od ulaznog sloja do izlaznog i kao rezultat ovog toka signala unapred, na izlazu mreže se generiše odgovarajući izlaz. Tada se signali greške koji predstavljaju razliku između $\mathbf{d}^{(k)}$ i $\mathbf{y}^{(k)}$, prostiru unazad od izlaznog sloja do prethodnog, a koriste se i za podešavanje njihovih težinskih odnosa.

5. IDENTIFIKACIJA SISTEMA I INTELIGENTNO UPRAVLJANJE

Primena veštačkih neuronskih mreža u upravljanju je veoma atraktivna zbog njihove sposobnosti da uče, aproksimiraju funkcije i klasifikuju uzorke, kao i mogućnosti za masovnu paralelnu hardversku implementaciju. One imaju sposobnost da generišu ulazno-izlazna preslikavanja koja mogu da aproksimiraju bilo koju funkciju sa željenom tačnošću. Veštačke neuronske mreže se, u sistemima automatskog upravljanja, uglavnom koriste za *identifikaciju sistema* i *inteligentno upravljanje*.

Primena veštačkih neuronskih mreža ostvaruje se u diskretnom domenu. Simulacija rada nekog tehničkog sistema ne mora da se odvija u realnom vremenu. U tu svrhu se koriste približne, numeričke metode za rešavanje diferencijalnih jednačina, sa konstantnim ili promenljivim korakom integracije. U ovom radu, simulacija i eksperimenti su vršeni istovremeno, primenom *Simulink*-a i posebnog softvera QUARC za rad i upravljanje u realnom vremenu. S obzirom na brzinu prelaznog procesa, izabrana je perioda obabiranja od 0.002s što je ujedno bila i vrednost konstantnog koraka integracije u postupku simulacije.

Na osnovu diferencijalne jednačine ponašanja, ostavljajući sa leve strane samo izvod izlazne veličine:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{A_m}{J_{eq}} x_u(t) - \frac{B_{eq}}{J_{eq}} x_i(t) \quad (20)$$

i usvajajući $x_i = y_p$, $x_u = u$ zbog kompatibilnosti označavanja datih veličina u literaturi [2], moguće je dobiti neophodnu diferencnu jednačinu:

$$\frac{y_p(k+1) - y_p(k)}{T} = \frac{A_m}{J_{eq}} u(k) - \frac{B_{eq}}{J_{eq}} y_p(k), \quad (21)$$

$$y_p(k+1) = \frac{A_m}{J_{eq}} T u(k) - \left(\frac{B_{eq}}{J_{eq}} T - 1 \right) y_p(k), \quad (22)$$

$$y_p(k+1) = f[y_p(k), u(k)]. \quad (23)$$

5.1 Primena veštačkih neuronskih mreža u identifikaciji sistema

Identifikacija sistema je analitička procedura za određivanje matematičkog modela sistema na osnovu izmerenih ulazno-izlaznih veličina. To znači da identifikacija sistema zahteva određenu analizu sistema, određivanje reda sistema, određivanje parametara i njihovo ocenjivanje. Generalno, dinamički sistem može biti opisan skupom diferencijalnih ili diferencnih jednačina. Na primer, višestruko prenosni sistem sa r ulaza i m izlaza može biti opisan preko:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (24)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(k)) \quad (25)$$

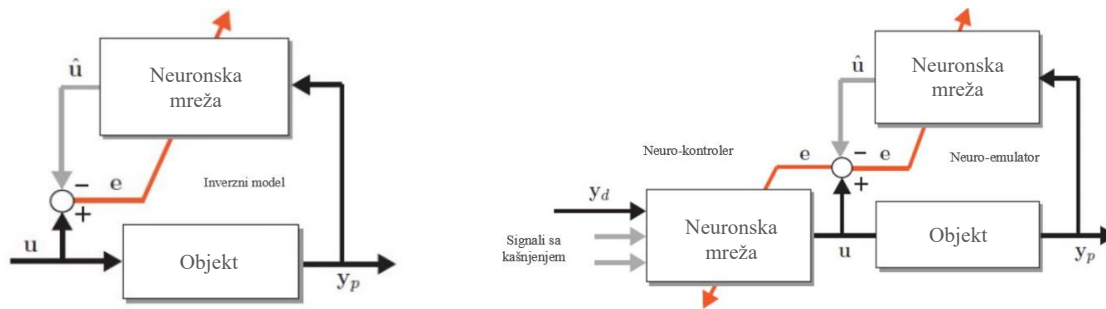
gde su $\mathbf{x}(k) \in \mathcal{R}^n$, $\mathbf{u}(k) \in \mathcal{R}^r$ i $\mathbf{y}(k) \in \mathcal{R}^m$ vektor stanja, ulaza i izlaza, sledstveno. Preslikavanja $\mathbf{f}: \mathcal{R}^r \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$ i $\mathbf{g}: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^m$ su statička nelinearna preslikavanja. Modeli sistema se posmatraju u diskretnom domenu, kao i mreže.

Identifikacija sistema je neophodna kada funkcije $\mathbf{f}(\cdot)$ i $\mathbf{g}(\cdot)$ nisu poznate, pa ih je neophodno spoznati. Problem identifikacije sistema se tada transformiše u postupak određivanja pogodnog modela sistema, na osnovu ulazno-izlaznih veličina, tako da razlika izlaza sistema i modela za isti ulaz, bude manja ili jednaka nekoj unapred postavljenoj granici.

Identifikacija sistema podrazumeva izbor odgovarajućeg parametarskog modela i podešavanje parametara tog modela primenom nekog adaptivnog zakona, tako da odziv modela na određeni ulazni signal može da aproksimira ponašanje realnog sistema. Kako višeslojne neuronske mreže imaju veoma dobre mogućnosti aproksimacije, one predstavljaju moćan alat za identifikaciju nepoznatih sistema koji u sebi sadrže razne nelinearnosti. Nelinearna funkcija objekta se zamenjuje neuronskom mrežom sa fiksnim, ali nepoznatim matricama težinskih odnosa, a koja se obučava koristeći pogodan algoritam učenja na dostupnom skupu podataka. U procesu identifikacije sistema, razvija se arhitektura neuronske mreže i predstavlja model objekta koji treba upravljati. Identifikator se sastoji od višeslojne neuronske mreže koja je u paralelnoj vezi sa dinamičkim sistemom, a adekvatnost strukture se prati na osnovu standardne funkcije greške koja se koristi u teoriji upravljanja i identifikacije sistema [1, 2, 3]. Informacija o strukturi konfigurisane veštačke neuronske mreže, sadržana je u njenim vezama i težinskim odnosima [2, 5]. U ovom radu je korišćena identifikacija inverznog modela. Veštačka neuronska mreža se inače može obučavati *off-line*, u tzv. *batch* modu, i to koristeći najčešće zastupljen BP algoritam učenja. Jednom kada se veštačka neuronska mreža obuča da predstavlja inverzni model objekta, ona se tako konfigurisana i obučena, može koristiti za direktno upravljanje objekta, što će biti prikazano u nastavku rada.

5.2 Primena veštačkih neuronskih mreža u upravljačke svrhe

Najčešće korišćene upravljačke strukture, za primenu veštačkih neuronskih mreža u upravljanju, su one koje se koriste u adaptivnim sistemima upravljanja. Naime, neuronska mreža se koristi za ocenjivanje nepoznatog nelinearnog sistema, a nakon toga se sintetiše upravljanje korišćenjem prethodno obučene mreže. Postoji nekoliko osnovnih šema, odnosno postupaka, zasnovanih na veštačkim neuronskim mrežama, koje se koriste u upravljačke svrhe (direktno, indirektno, direktno inverzno, adaptivno upravljanje, itd.). Za potrebe ovog rada, na servo motoru jednosmerne struje, primenjena je jedna od najzastupljenijih šema neuro-upravljanja, zasnovana na direktno inverznom modelu. Ova šema koristi inverzni model upravljaniog sistema, koji je kaskadno povezan sa upravljanim objektom, da bi kompletan sistem rezultovao jediničnim preslikavanjem između željenog ponašanja (ulaz u neuronsku mrežu) i izlaza upravljaniog objekta. Zato ova neuronska mreža deluje direktno kao kontroler u glavnoj grani, a očekivani izlaz iz upravljaniog objekta jednak je željenom izlazu, što je ujedno konačni cilj preslikavanja, odnosno mašinskog učenja tokom inteligentnog upravljanja. Prvo se formira inverzni model objekta u cilju ocene izlaza inverznog modela $\hat{\mathbf{u}}$, slika 6 (levo). Takav izlaz $\hat{\mathbf{u}}$ se upoređuje sa signalom obučavanja \mathbf{u} i greška $\mathbf{e} = \mathbf{u} - \hat{\mathbf{u}}$ se koristi za obučavanje inverznog modela. Kada se dobije inverzni model, on se tada kaskadno vezuje sa objektom, i to kao kontroler u otvorenom kolu. Parametri neuro-kontrolera se podešavaju direktno. Direktno inverzno upravljanje je prikazano na slici 6 (desno). Referentni signal (željena vrednost izlaza) \mathbf{y}_d treba da pokriva dovoljno široku ulazno-izlaznu oblast tokom određivanja inverznog modela.



Slika 6. Blok dijagram direktno inverznog upravljanja: dobijanje inverznog modela (levo) i upravljanje u otvorenom kolu (desno) [2]

5.3 Modeli za identifikaciju i upravljanje

Modeli za identifikaciju i upravljanje nepoznatog nelinearnog dinamičkog sistema mogu se primeniti u analizi i sintezi takvih sistema koji sadrže neuronske mreže kao svoje podsisteme. U problemu identifikacije sistema koriste se četiri vrste diskretnog modela jednostruko prenosnog sistema [2]. Ovi modeli su izabrani zbog uopštenosti, ali i zbog postojećih, odgovarajućih modela koji se koriste u adaptivnim sistemima za identifikaciju linearnih sistema, a mogu se posmatrati i kao generalizacija za nelinearne sisteme. Pomenuti modeli se mogu opisati sledećim nelinearnim diferencnim jednačinama:

$$\text{Model I:} \quad y_p(k+1) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i y_p(k-i) + g[u(k), \dots, u(k-m+1)], \quad m \leq n \quad (26)$$

$$\text{Model II:} \quad y_p(k+1) = f[y_p(k), \dots, y_p(k-n+1)] + \sum_{i=0}^{m-1} \beta_i u(k-i), \quad m \leq n \quad (27)$$

$$\text{Model III:} \quad y_p(k+1) = f[y_p(k), \dots, y_p(k-n+1)] + g[u(k), \dots, u(k-m+1)], \quad m \leq n \quad (28)$$

$$\text{Model IV:} \quad y_p(k+1) = f[y_p(k), \dots, y_p(k-n+1); u(k), \dots, u(k-m+1)], \quad m \leq n \quad (29)$$

gde $[y_p(k), u(k)]$ predstavlja ulazno-izlazni par objekta u trenutku k , a $f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ i $g: \mathcal{R}^m \rightarrow \mathcal{R}$ su diferencijabilne funkcije svojih argumenata.

Da bi se identifikovao objekt, identifikacioni model se bira na osnovu *a priori* informacija koje odgovaraju klasi modela kome pripadaju. Na primer, ako se pretpostavi da model ima strukturu opisanu modelom III, cilj je tada odrediti težinske odnose dve neuronske mreže N^1 i N^2 , tako da preslikavanje N^1 bude jednako funkciji $g[\cdot]$, a preslikavanje N^2 jednako funkciji $f[\cdot]$. Ako su $y_p(k+1)$ i $\hat{y}_p(k+1)$, sledstveno, izlazi objekta i identifikacionog modela u trenutku $(k+1)$, greška $e(k+1) = y_p(k+1) - \hat{y}_p(k+1)$ se koristi za podešavanje težinskih odnosa neuronskih mreža N^1 i N^2 . Koristi se ili statički ili dinamički BP algoritam učenja, zavisno od strukture identifikatora. U tom smislu, mogu se razlikovati dva modela identifikatora (modela za testiranje rada obučenih veštačkih neuronskih mreža):

- **paralelni model** koristi izlaz identifikacionog modela (mreže), a može se opisati jednačinom:

$$\hat{y}_p(k+1) = N^2[\hat{y}_p(k), \dots, \hat{y}_p(k-n+1)] + N^1[u(k), \dots, u(k-m+1)]. \quad (30)$$

- **serijsko-paralelni model** zahteva da se koristi izlaz iz objekta, a opisan je jednačinom:

$$\hat{y}_p(k+1) = N^2[y_p(k), \dots, y_p(k-n+1)] + N^1[u(k), \dots, u(k-m+1)]. \quad (31)$$

6. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

6.1 Simulacija i eksperimentalna verifikacija dobijenog modela objekta

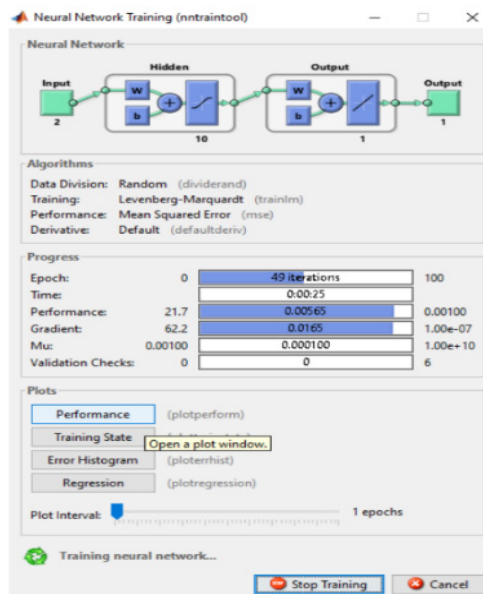
Eksperimenti su vršeni primenom *Simulink*-a [11], zadavanjem različitih ulaznih signala poput *chirp*, *random*, *repeating sequence*, *step* i sinusnog signala, i to po nekoliko puta, sa različitim parametrima. Na osnovu sačuvanih podataka (vrednosti zadatih ulaza i odziva motora) izvršeno je obučavanje neuronske mreže u MATLAB-u [11], pomoću odgovarajućeg koda u kojem se, zadavanjem potrebnih komandi, mreža obučava, a naravno, prethodno se određuje: broj skrivenih slojeva, dozvoljena greška, maksimalan broj iteracija, itd.

Na slici 7, prikazan je proces obučavanja troslojne veštačke neuronske mreže kao i njena struktura, gde se vidi da obučavana mreža sadrži jedan skriveni sloj u kojem se nalazi deset neurona i izlazni sloj sa jednim

neuronom. Takvoj strukturi veštačke neuronske mreže prethodi postupak podešavanja broja neurona u skrivenom sloju, počevši od manjeg, sve dok mreža nije pokazala zadovoljavajuće rezultate na obučavajućem skupu podataka.

Odabirom vrednosti greške koja se zadaje na početku, uz nameru da mreža bude dovoljno tačno obučena kako bi kasnije zadovoljila neophodna testiranja, jer u suprotnom slučaju, ona može dati grešku jednaku nuli na obučavajućem skupu podataka, dok pri testiranju može pokazati veoma nezadovoljavajuće rezultate. Tada se konstatuje da je došlo do preobučavanja neuronske mreže.

Nakon adekvatnog obučavanja neuronske mreže, neophodno je testirati datu mrežu korišćenjem više različitih eksperimentalno prikupljenih signala, kako bi se izveo zaključak da li je neophodno njeno ponovno obučavanje radi dobijanja zadovoljavajućih rezultata ili je u datom trenutku mreža već validno obučena. Eksperimentalni rezultati obučених veštačkih neuronskih mreža, za model II i model IV, kao i testiranja na paralelnim i serijsko-paralelnim modelima, biće prikazani u nastavku ovog rada.



Slika 7. Neural Network Train Tool-prikaz

Testiranje na paralelnim modelima

Paralelni model podrazumeva testiranje rada obučene neuronske mreže na osnovu ulaznog signala i izlaza iz mreže, u datom trenutku, što je moguće zaključiti iz jednačine:

$$\hat{y}_p(k+1) = f[\hat{y}_p(k), u(k)]. \quad (32)$$

Mreže obučene na osnovu odziva DC servo motora za *chirp* signal, testirane su za više različitih ulaznih signala, a rezultati obučene mreže za model II prikazani su na slici 12, dok su za model IV dati na slici 17.

Testiranje na serijsko-paralelnim modelima

Karakteristika serijsko-paralelnog modela ogleda se u tome da se odziv sistema u trenutku $(k+1)$ dobija na osnovu odziva stvarnog objekta u trenutku k i ulaza u tom trenutku:

$$\hat{y}_p(k+1) = f[y_p(k), u(k)]. \quad (33)$$

Date obučene neuronske mreže (na osnovu odziva servo motora jednosmerne struje za *chirp* i *random* signale), testirane su za nekoliko različitih ulaznih signala, a eksperimentalni rezultati obučених mreža za model II prikazani su na slikama 10 i 11, dok su za model IV dati na slikama 15 i 16.

6.1.1 Prvi metod identifikacije

Prvo je razmatran identifikacioni model II, predstavljen jednačinom (27), u opštem obliku. Diferencijalna jednačina ponašanja (18), naglašava se da je data sa oznakama korišćenim kada su u pitanju veštačke neuronske mreže, i to u vremenskom domenu, sledećeg je oblika:

$$J_{eq}\dot{y}_p(t) + N(y_p(t)) = A_m u(t). \quad (34)$$

U diskretnom domenu, diferencna jednačina je tada:

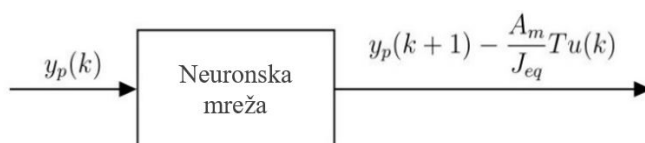
$$y_p(k+1) = N(y_p(k)) + \frac{A_m}{J_{eq}} T u(k). \quad (35)$$

Za korišćeni DC servo motor, jednačina identifikacionog modela II (27) postaje:

$$y_p(k+1) = f[y_p(k)] + \frac{A_m}{J_{eq}} T u(k), \quad (36)$$

$$f[y_p(k)] = y_p(k+1) - \frac{A_m}{J_{eq}} T u(k). \quad (37)$$

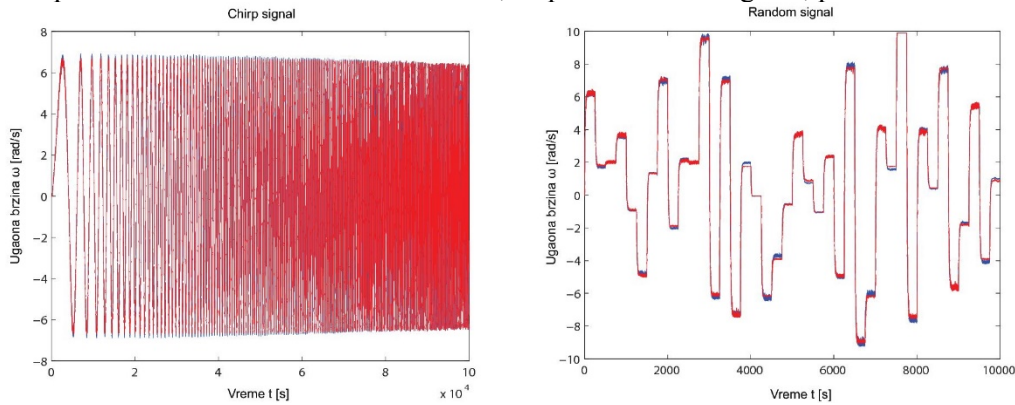
Opravdanost uvođenja neuronskih mreža ogleda se u mogućnosti mreže da identifikuje nelinearnost, kada linearni matematički model ne opisuje dobro rad objekta, kao što je pokazano da važi u slučaju servo motora jednosmerne struje Quanser SRV02 [8], a postupak identifikacije je opisan jednačinom (37) i prikazan je strukturnim dijagramom na slici 8.



Slika 8. Dijagram modela II

Dakle, ulaz u neuronsku mrežu biće vrednost izlaza u datom trenutku, dok je izlaz iz mreže razlika vrednosti izlaza u sledećem trenutku i ulaza u k -tom trenutku. Naime, neuronske mreže su obučene pomoću snimljenih

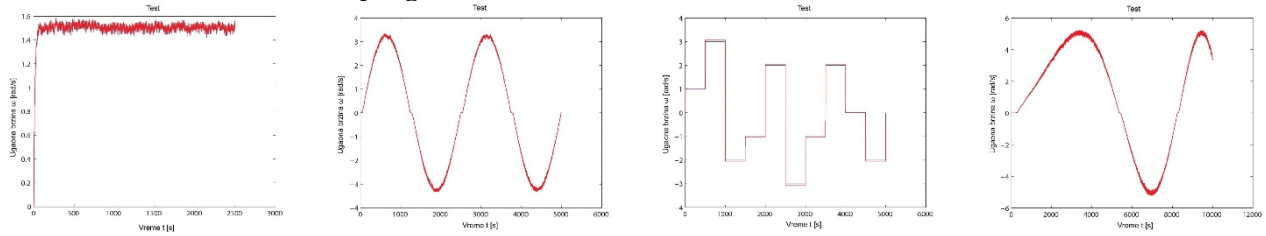
odziva motora za zadate *chirp* i *random* ulazne signale. *Chirp* obučavajući signal je konstantne amplitude 4, dok je frekvencija promenljiva u zadatom opsegu od 0.02Hz do 2Hz. *Random* signal je ograničen najvećom mogućom razlikom između vrednosti signala u dve susedne periode (zadata perioda je 250s, a pomenuta razlika 10). Eksperimentalni rezultati obučanih mreža, za pomenuta dva signala, prikazani su na slici 9.



Slika 9. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za chirp signal (levo) i random signal (desno)

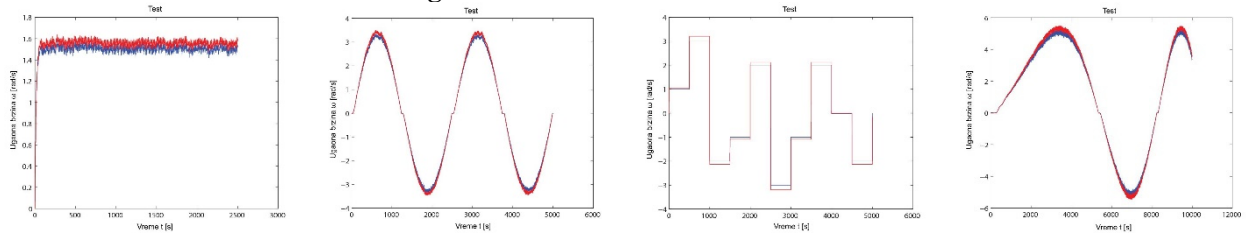
Rezultati testiranja rada obučanih mreža na serijsko-paralelnim modelima

• Mreža obučena na chirp signalu:



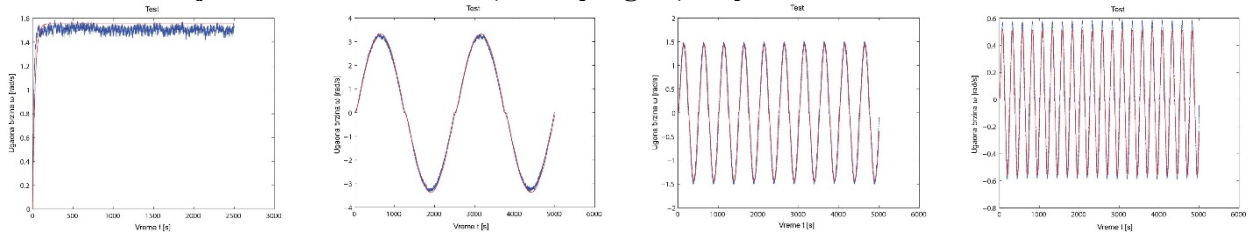
Slika 10. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni, sinusni, repeating sequence, chirp i random ulaz, sledstveno

• Mreža obučena na random signalu:



Slika 11. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni, sinusni, repeating sequence, chirp i random ulaz, sledstveno

Rezultati testiranja rada obučene mreže (za chirp signal) na paralelnim modelima



Slika 12. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni ulaz i sinusne ulaze različitih amplituda i frekvencija, sledstveno

6.1.2 Drugi metod identifikacije

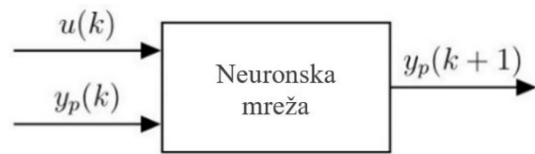
Sledeći identifikacioni model, korišćen za obučavanje neuronskih mreža je model IV, predstavljen jednačinom (29), u opštem slučaju. Diferencna jednačina data je kao:

$$y_p(k+1) = N(y_p(k)) + \frac{A_m}{J_{eq}} T u(k). \quad (38)$$

Razlika između prethodno razmatranog modela za identifikaciju i trenutnog, ogleda se u mogućnosti predstavljanja modela i na sledeći način:

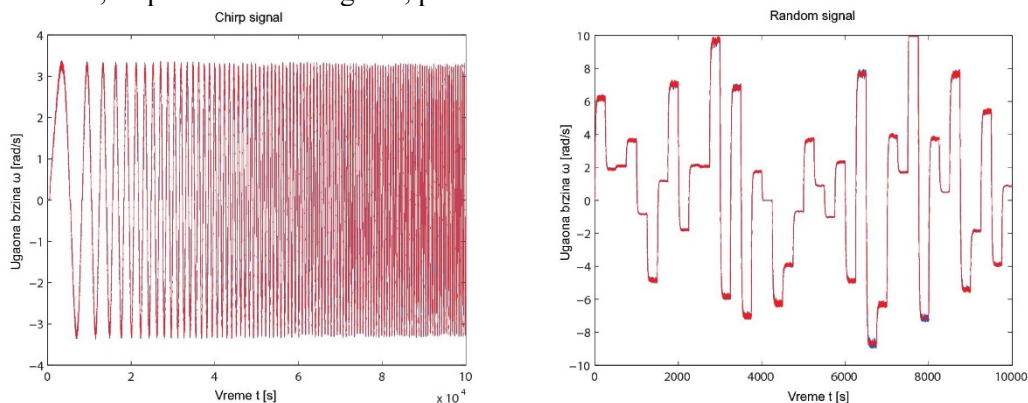
$$y_p(k+1) = f[y_p(k), u(k)]. \quad (39)$$

Neuronska mreža obučavana je pomoću dva skupa obučavajućih podataka, vrednosti ulaznog signala i vrednosti izlaza iz mreže u datom trenutku, dok je izlaz dat za sledeći trenutak. Naravno, neophodno je pri obučavanju usvojiti početne vrednosti ulaza i izlaza. Strukturni dijagram modela IV, prikazan je na slici 13.



Slika 13. Dijagram modela IV

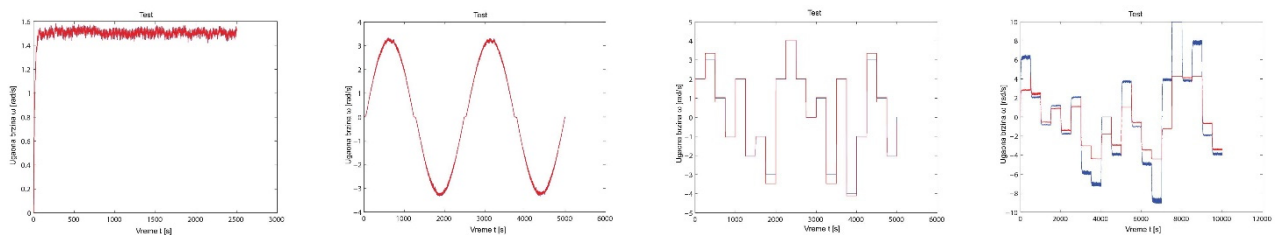
Neuronske mreže su obučene na osnovu snimljenih odziva DC servo motora za zadate *chirp* i *random* ulazne signale. *Chirp* obučavajući signal je konstantne amplitude 2, dok je frekvencija promenljiva u zadanom opsegu od 0.01Hz do 1Hz. *Random* signal je ograničen najvećom mogućom razlikom između vrednosti signala u dve susedne periode (zadata perioda je 250s, a pomenuta razlika 10). Eksperimentalni rezultati obučanih neuronskih mreža, za pomenuta dva signala, prikazani su na slici 14.



Slika 14. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za chirp signal (levo) i random signal (desno)

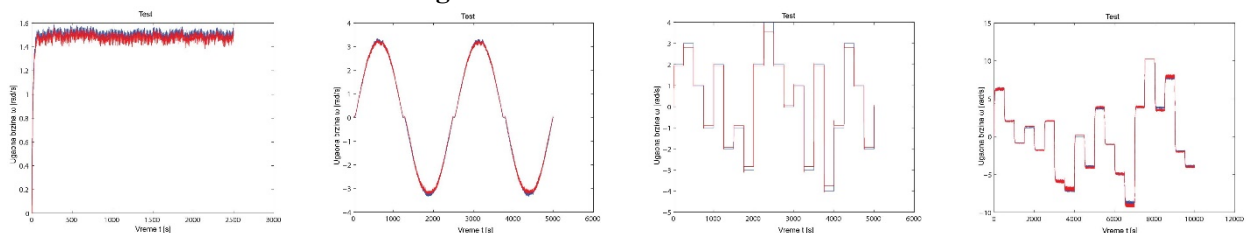
Rezultati testiranja rada obučanih mreža na serijsko-paralelnim modelima

- Mreža obučena na *chirp* signalu:



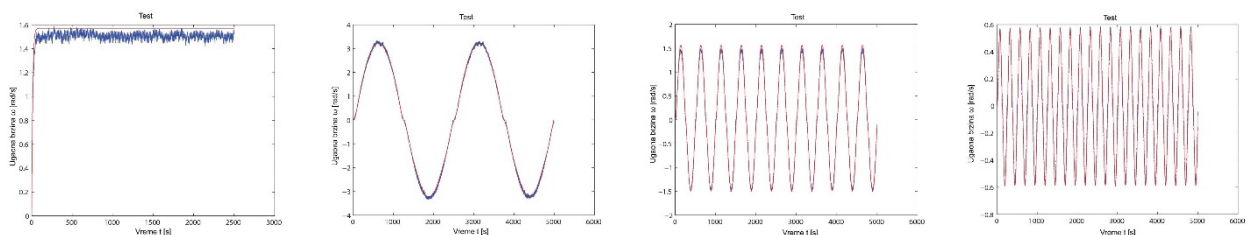
Slika 15. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni, sinusni, repeating sequence i random ulaz, sledstveno

- Mreža obučena na *random* signalu:



Slika 16. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni, sinusni, repeating sequence i random ulaz, sledstveno

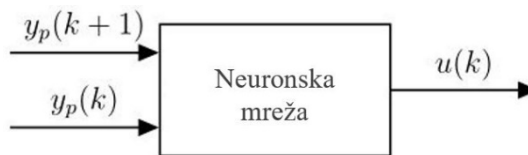
Rezultati testiranja rada obučene mreže (za chirp signal) na paralelnim modelima



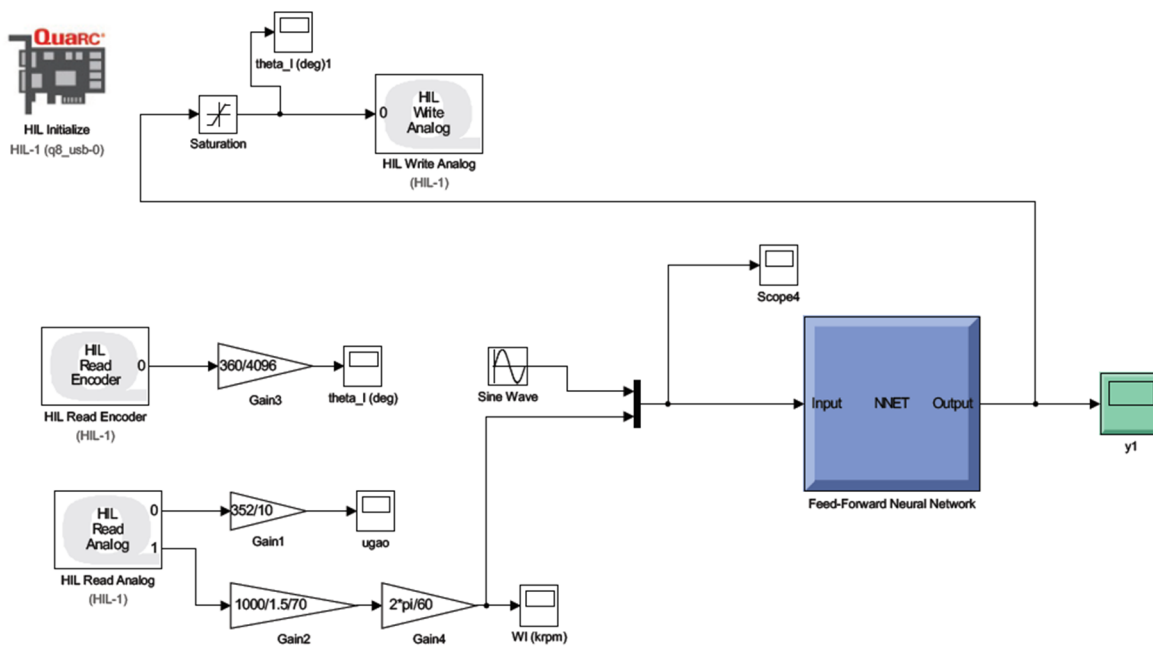
Slika 17. Poređenje odziva DC servo motora (plavo) i obučene neuronske mreže (crveno) za odskočni ulaz i sinusne ulaze različitih amplituda i frekvencija, sledstveno

6.2 Realizacija inteligentnog upravljanja i poređenje simulacionih i eksperimentalnih rezultata

Realizovano je direktno inverzno upravljanje koje je ranije objašnjeno. Pre svega snimljene su vrednosti *chirp* signala, kao i odziva za zadati signal, konstantne amplitude 2 i promenljive frekvencije čija se učestanost vremenom povećava na zadatom opsegu od 0.01Hz do 1Hz. Za dati signal dobijen je inverzni model. Tada je neuronska mreža obučavana na osnovu dva ulaza, i to: vrednosti izlaza objekta u datom trenutku i vrednosti izlaza u prethodnom trenutku, dok je izlaz iz obučene mreže zapravo upravljanje za dati sistem. Prikaz strukturnog dijagrama inverznog modela, dat je na slici 18. Nakon obučavanja mreže i testiranja, moguće je realizovati inteligentno upravljanje objekta pomoću neuronskih mreža. Naime, zadovoljavajuće obučenu mrežu je neophodno generisati u *Simulink* blok čiji su ulazi, željena vrednost izlaza i stvarni izlaz objekta očitani sa tahometra, dok je izlaz iz mreže upravljanje za dati objekt. Blok šema upravljanja, prikazana je na slici 19.

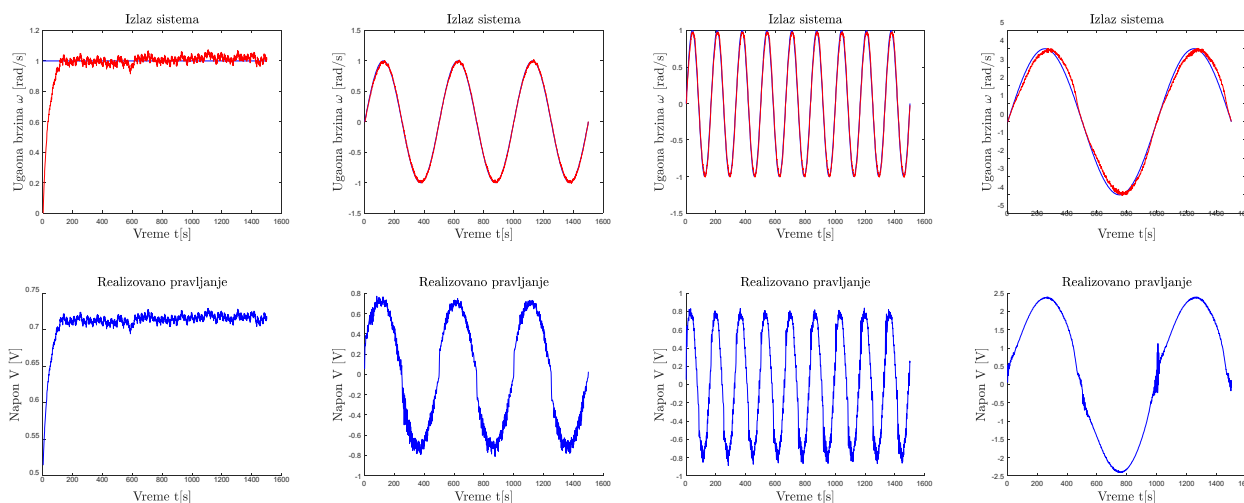


Slika 18. Dijagram inverznog modela



Slika 19. Simulink model sistema

Realizovano inteligentno upravljanje, kao izlaz iz veštačke neuronske mreže, kao i poređenje simulacionih sa eksperimentalnim rezultatima, i to za različite testirane signale, prikazano je konačno na slici 20.



Slika 20. Poređenje odziva (crveno) i željene vrednosti izlaza (plavo) sistema DC servo motora (gore) i promena upravljanja (dole) za jediničnu odskočnu željenu vrednost i sinusne signale različitih amplituda i frekvencija, sledstveno

7. ZAKLJUČAK

Rad je imao za cilj modelovanje i inteligentno upravljanje servo motora jednosmerne struje primenom veštačkih neuronskih mreža, što je realizovano kroz simulaciju i eksperimentalnu verifikaciju. Od razmatranih modela, ocenjivan je paralelni model kao i serijsko-paralelni model. Sproveden je niz eksperimenata koji su pomogli u donošenju validnih zaključaka, posle obučavanja veštačkih neuronskih mreža, i to u domenu identifikacije izlaza objekta.

Na osnovu brojnih eksperimenata, realizovanih kod paralelnog modela, može da se zaključi da je neuronska mreža, obučavana na osnovu snimljenih veličina stanja (npr. ulazni *chirp* signal i odziv motora), odgovarajuća za pojedine jednostavnije tipove signala.

Posmatrajući realizovane eksperimente, ostvarene kod serijsko-paralelnog modela, može da se izvede zaključak da su veštačke neuronske mreže, obučavane na osnovu snimljenih veličina stanja (ulaznih *chirp* i *random* signala i odziva motora), odgovarajuće za sve signale na kojima je vršeno testiranje mreže. Takođe, može da se primeti da su poklapanja kod serijsko-paralelnog modela, u odnosu na paralelni, višeg nivoa tačnosti, zbog toga što se kod paralelnog modela za testiranje uzima vrednost izlaza neuronske mreže u prethodnom trenutku, tako da je očekivano da se greška vremenom povećava.

Na kraju, posmatranjem svih ostvarenih eksperimentalnih rezultata, može da se zaključi da je inteligentno upravljanje predmetnog objekta - DC servo motora, bazirano na primeni obučanih veštačkih neuronskih mreža, ostvareno sa zadovoljavajućom tačnošću, i to kod oba razmatrana modela za identifikaciju i upravljanje.

Posmatrajući sve navedene zaključke, a posebno eksperimentalne rezultate prikazane u poglavlju 6, opravdanost uvođenja inteligentnih sistema upravljanja, kod ispitivanog objekta kao što je servo motor jednosmerne struje, apsolutno je evidentna. Uspešna primena inteligentnog sistema upravljanja baziranog na korišćenju veštačkih neuronskih mreža, ovde verifikovana na servo motoru jednosmerne struje, otvara mogućnost realizacije sličnih modernih sistema upravljanja i kod složenijih objekata, kao što su svi oni koji koriste ovaj tip motora, što je i očekivana smernica budućeg naučno-istraživačkog rada, posebno u domenu razvoja dinamičke optimizacije inteligentnih robotskih sistema u okviru Industrije 4.0, u svetu i kod nas.

8. LITERATURA

- [1] Radiša Jovanović, *Matlab i Simulink u automatskom upravljanju*, Mašinski fakultet u Beogradu, 2016.
- [2] Radiša Jovanović, *Predavanja iz predmeta Inteligentni sistemi upravljanja - pisani materijali*, Mašinski fakultet u Beogradu, 2017.
- [3] Radiša Jovanović, *Predavanja iz predmeta Osnove automatskog upravljanja - pisani materijali*, Mašinski fakultet u Beogradu, 2016.
- [4] Katarina Miljković, *Modelovanje i upravljanje servo motora jednosmerne struje primenom neuronskih mreža*, Master rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2018.
- [5] Zoran Miljković i dr., *Veštačke neuronske mreže – zbirka rešenih zadataka sa izvodima iz teorije*, Mašinski fakultet u Beogradu, II izdanje, 2018.
- [6] Simon Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 3rd Edition, May 2007, Prentice-Hall, Inc, USA.
- [7] User Manual – SRV02 Rotary Servo Base Unit
- [8] Student Workbook – SRV02 Base Unit
- [9] User Manual – Q8-USB Data Acquisition Device
- [10] User Manual – VoltPAQ-X1 Amplifier
- [11] MATLAB and *Simulink*. (2016). Natick, Massachusetts United States.: The MathWorks Inc.

Miljković, K., Petrović, M.M., Jovanović, R.

TOWARDS DEVELOPMENT OF DC SERVO MOTOR INTELLIGENT CONTROL BY APPLYING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract: In this paper the possible approach of DC servo motor intelligent control is presented by using artificial neural networks. Besides the application of one of the most important techniques of artificial intelligence, this paper suggests and gives the mathematical modelling of widely used object of automatic control. Also, this paper uses abilities of artificial neural networks in order to generalize and approximate the outputs of this object by applying machine learning through the process of its training, aiming to overcome the faults connected to the conventional control of the DC servo motor. The suggested approach, was analyzed firstly by simulation, and then it was experimentally verified in two out of four models which were taken into consideration.

Key words: intelligent control, DC servo motor, artificial neural networks, machine learning, mathematical modelling

Nedić, B.¹⁾, Đurić, S., Baralić, J.

MONITORING OBRADJE REZANJEM ANALIZOM SIGNALA OTPORA REZANJA²⁾

Rezime

Otpori rezanja ne predstavlja statičku već dinamičku veličinu koja se najčešće predstavlja svojom srednjom vrednošću, amplitudom, disperzijom i učestanošću njene promenei. Na osnovu vrednosti amplituda signala otpora rezanja u radu su konstruisani elipsoid i elipse signala koje predstavljaju obvojnice signala rezultante i komponenti otpora rezanja.

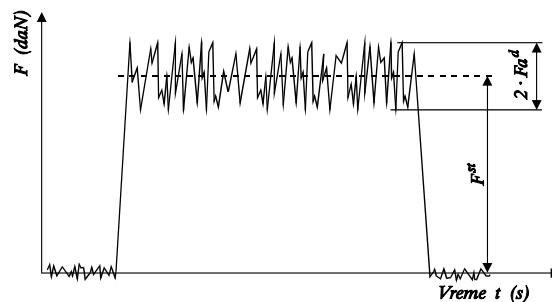
U cilju razvoja novog sistema za monitoring procesa obrade rezanjem u radu su za različite stepene pohabanosti alata u obradu struganjem prikazani elipsoidi i elipse signala otpora rezanja. Na ovaj način je pokazano da parametri elipsoida mogu biti osnova za razvoj novog sistema za praćenje i upravljanje procesom rezanja.

Ključne reči: obrada metala, signal, dinamika otpora rezanja, habanje alata, monitoring, elipsoid,

1. UVOD

Razvoj merne i računarske tehnike je omogućio da se veoma lako i brzo dođe do vrednosti otpora rezanja. U najvećem broju slučajeva merenje otpora rezanja ima za cilj uspostavljanje korelativnih zavisnosti otpora rezanja i uslova obrade radi određivanja obradivosti materijala predmeta obrade, optimizacije procesa obrade ili monitoringa procesa [1, 2].

Otpor rezanja se najčešće meri i analizira preko svojih statičkih komponenti u pravcu odgovarajućih osa. Kada je u pitanju obrada struganjem to su komponente otpora rezanja u pravcu glavnog kretanja (glavni otpor rezanja F_1), pravcu prodiranja alata (F_2) i pravcu pomoćnog kretanja (F_3). Komponente otpora rezanja nisu statičke veličine već imaju dinamički karakter (slika 1) [3]. To znači da se prilikom analize signala komponenti otpora rezanja mora pored izračunavanja srednjih vrednosti signala, vršiti izračunavanje dinamičkih karakteristika signala, kao što su maksimalna amplituda, disperzija i karakteristične učestanosti.



Slika 1. Srednja vrednost i amplituda dinamičke komponente otpora rezanja

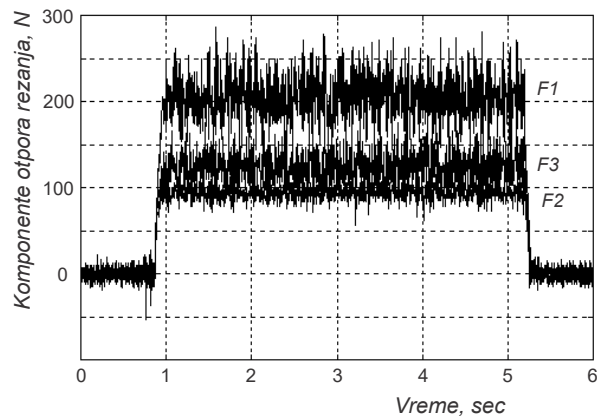
Za razliku od srednjih vrednosti komponenti otpora rezanja, koje se veoma uspešno mogu predstaviti korelativnim zavisnostima u funkciji uslova obrade, za parametre koji opisuju dinamički karakter signala, ne može se naći dovoljno podataka za donošenje konačnog zaključka o karakteru uticaja uslova obrade na njih [4]. To ukazuje na potrebu stalnih istraživanja u ovoj oblasti.

¹⁾ Prof. dr Bogdan Nedić, Fakultet inženjerskih nauka Univerzitet u Kragujevcu (nedic@kg.ac.rs), Stefan Đurić, istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka Univerzitet u Kragujevcu (sdjuric@kg.ac.rs), Prof. dr Jelena Baralić, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu (jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopšteni su rezultati istraživanja na projektu TR35034: 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.

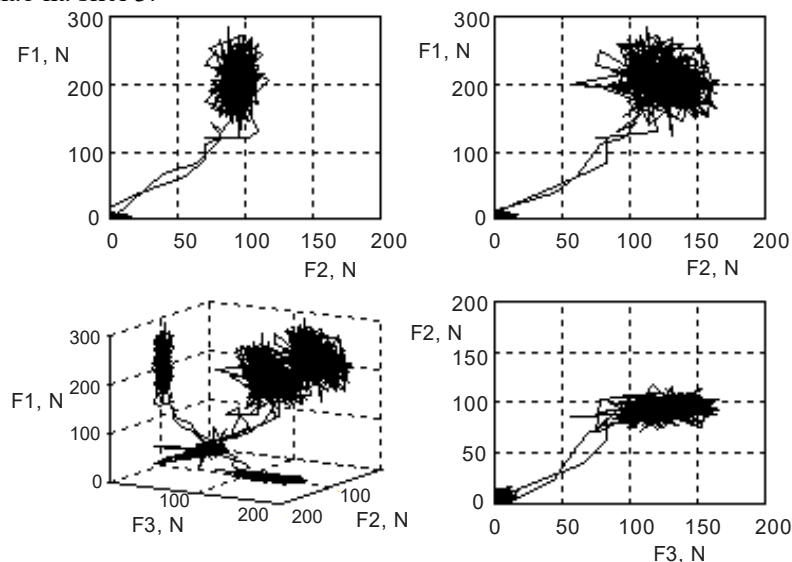
2. ELIPSOID SIGNALA OTPORA REZANJA

Vrh alata usled dinamičkog karaktera procesa formiranja strugotine osciluje u prostoru, što znači da se promena rezultante otpora rezanja vrši u prostoru i to po intenzitetu i po položaju u odnosu na koordinatni sistem kome pripadaju komponente otpora rezanja. Na slici 2 je prikazan karakterističan signal komponenti otpora rezanja dobijen pri obradi struganjem.



Slika 2. Signali komponenti otpora rezanja

Prethodno prikazan signal komponenti otpora rezanja se može prikazati u koordinatnom sistemu komponenti otpora, kao na slici 3.



Slika 3. Otpor rezanja u koordinatnim ravnima komponenti otpora

Posmatrajući rezultujućii otpor rezanja u prostoru i u koordinatnim ravnima komponenti, kao i oblik signala nameće se zaključak da bi se signal mogao opisati odgovarajućim obvojnica ili da je moguće definisati parametre koji mogu uspešno da opišu karakteri i položaj signala u prostoru. U koordinatnim ravnima komponenti, slika 3, može se zaključiti da se najveći deo signala nalazi unutar prostora koji se može opisati elipsama čiji su poluprečnici jednaki amplitudama dinamičkih komponenti signala (F_{a1} , F_{a2} , F_{a3}). To znači da se rezultanta može opisati položajem i dimenzijama elipsoida signala u prostoru (slika 4).

Elipse signala u koordinatnim ravnima ($F_3 \rightarrow x$, $F_2 \rightarrow y$, $F_1 \rightarrow z$), odnosno elipsoid signala se može matematički opisati pomoću izraza:

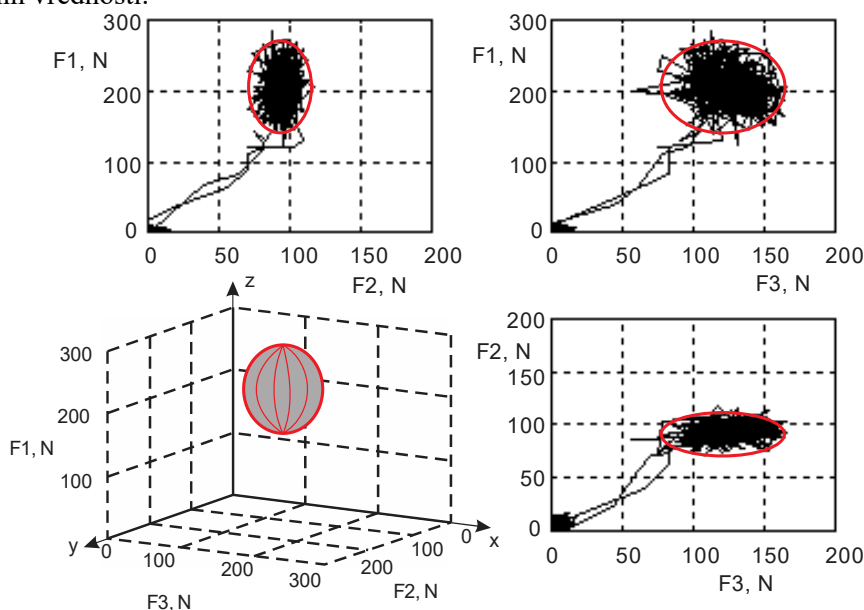
$$\begin{array}{lll} \text{Elipse signala: } F_1 - F_2: & z = F_1 + F_{a1} \sin \theta & y = F_2 + F_{a2} \cos \theta \\ F_1 - F_3: & z = F_1 + F_{a3} \sin \theta & x = F_3 + F_{a3} \cos \theta \\ F_2 - F_3: & y = F_2 + F_{a2} \sin \theta & x = F_3 + F_{a3} \cos \theta \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Elipsoid signala:} \\ x = F_3 + F_{a3} \cos \psi \cos \theta \\ y = F_2 + F_{a2} \cos \psi \sin \theta \\ z = F_1 + F_{a1} \sin \psi \end{array}$$

Ugao θ je trenutni ugao položaja rezultante otpora rezanja u ravni $y - x$, odnosno $F_2 - F_3$, a ugao ψ je trenutni ugao položaja rezultante otpora rezanja prema z osi, odnosno komponenti F_1 .

Na slici 4 su prikazane konstruisane elipse u pojedinim koordinatnim ravnima zajedno sa signalom komponenti otpora, pri čemu su poluprečnici elipsa jednaki izračunatim amplitudama signala. Centar elipsoida je određen statičkim vrednostima odgovarajućih signala komponenti otpora rezanja.

Amplitude oscilovanja signala komponenti otpora rezanja se izračunavaju na osnovu srednje vrednosti usvojenog broja maksimalnih amplituda na određenoj dužini signala da bi se izbegao uticaj lokalnih ekstremnih vrednosti.



Slika 4. Elipsoid i elipse signala otpora rezanja

3. UTICAJ HABANJA NA ELIPSOID SIGNALA OTPORA REZANJA

Kako je mnogim radovima potvrđeno usled habanja alata dolazi do povećanja srednje vrednosti otpora rezanja. Eksperimentalna ispitivanja [5] su pokazala da usled habanja alata dolazi do promene amplitude oscilovanja signala otpora rezanja oko njegove srednje vrednosti. Najčešće rastu amplitude oscilovanja.

Iz razloga kompleksnosti uslova i procesa koji se odvijaju u zoni rezanja (složena rezna geometrija, širok spektar mogućih režima obrade, itd.) do danas nisu uspostavljene pouzdane korelativne zavisnosti habanja i izlaznih parametara obrade na osnovu kojih bi bilo moguće pratiti i predvideti razvoj habanja i otkaz alata. Zbog toga u je cilju razvoja adaptivnog sistema za upravljanje procesor rezanja i dalje aktuelno istraživanje u cilju nalaženja adekvatnih parametara pomoću kojih se može vršiti monitoring procesa rezanja.

U okviru ovog rada prikazani su rezultati merenja habanja i promene otpora rezanja usled različite pohabanosti alata pri obradi struganjem 30CrNiMo8 (Č5432) u poboljšanom stanju (40 HRC) u sledećim uslovima: $v=190$ m/min, $s=0,2$ mm/o, $\delta=1,5$ mm bez prisustva SHP sa strugarskim nožem PTG NR 2525M16 i pločicom TNMG 160408-15 u kvalitetu PGP-15, Corun Užice.

Merni lanac je činio trokomponentni dinamometar za merenje otpora rezanja u obradi struganjem KISTLER tip 9265A1, pojačivač sa piezo davača KISTLER tip Ca5001, AD pretvarač i računar sa odgovarajućim softverima. Merenje komponenti otpora rezanja je vršeno sa ušestanošću 300 Hz radi analize srednjih vrednosti signala i amplituda signala i izračunavanje rezultante otpora rezanja.

Merenje habanja alata nakon određenog vremena obrade je bilo na na univerzalnom mikroskopu UIM-21. Kao parametar pohabanosti alata usvojena je maksimalna pohabanost ledne površine rezne pločice (mesto 1, prema slici 5). Obrada rezanjem je vršena i u uslovima sa katastrofalno pohabanim alatom, da bi se uočilo vreme njegovog početka i utvrdio karakter promene merenih parametara.

Na slici 5 je prikazana kriva habanja.

Kriva habanja prikazana na slici 6 se može predstaviti pomoću polinoma trećeg stepana [6] u obliku:

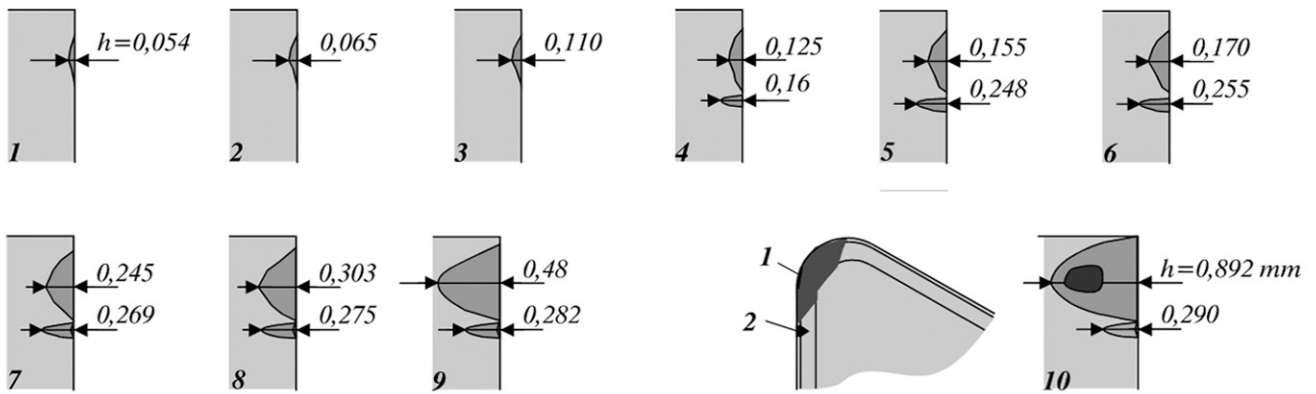
$$h = C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3$$

$$h = 0,0422 T - 0,0044 T^2 + 0,000147 T^3 \quad \text{Koef. kor. } R = 0,99183$$

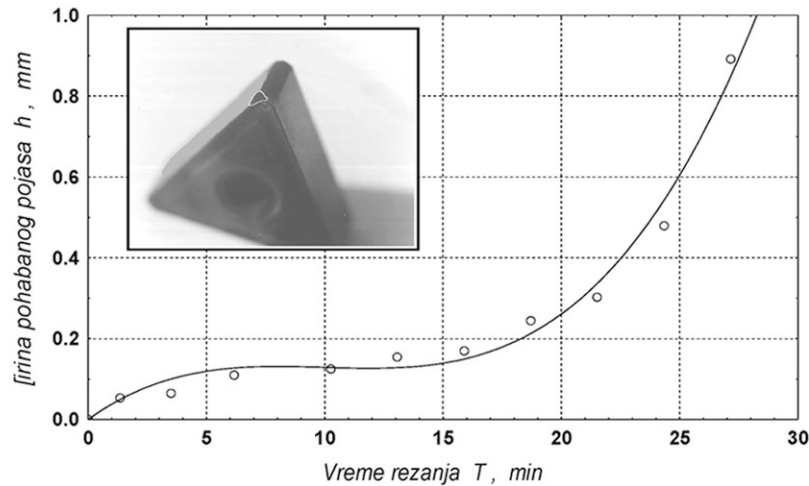
odnosno, ovaj polinom se može prikazati i u razvijenom obliku, pri čemu su h_p i T_p koordinate prevojne tačke:

$$h = h_p + A_1 (T - T_p) + A_2 (T - T_p)^3$$

$$h = 0,128 - 0,0018 (T - 10) + 0,000147 (T - 10)^3$$

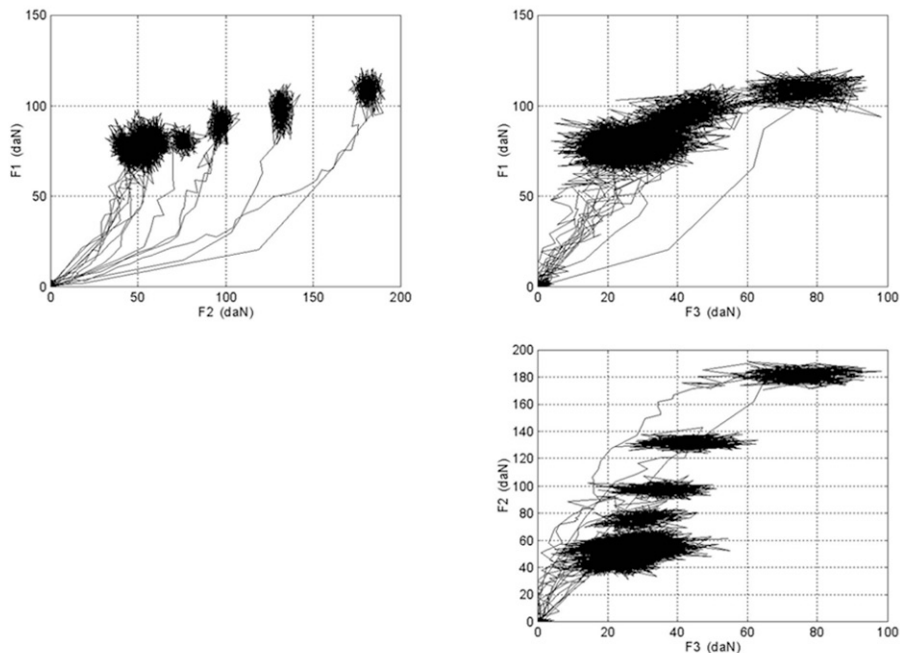


Slika 5. Razvoj habanja alata



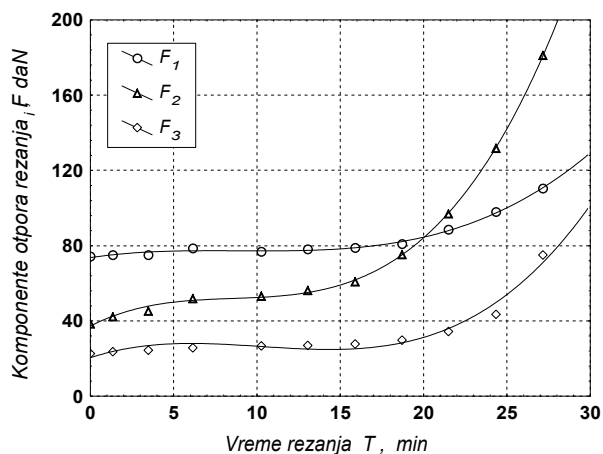
Slika 6. Kriva habanja i pohabana rezna pločica

Na slici 7 su prikazani signali rezultante i komponenti otpora rezanja za različite pohabanosti alata. Na slici 10 su za prethodne signale prikazane elipse signala u koordinatnim ravnima komponenti otpora rezanja.

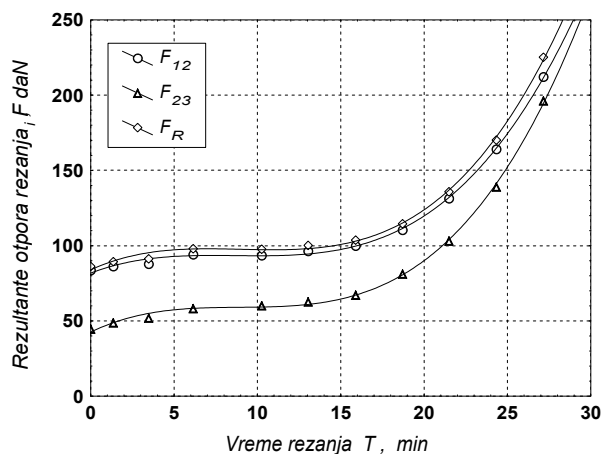


Slika 7. Promena signala otpora rezanja u zavisnosti od habanja

Posmatrajući signale komponenti otpora rezanja za različite pohabanosti alata, slika 6, može se da sa habanjem rastu sve tri komponente, a promena amplitude oscilovanja oko srednje vrednosti imaju različit karakter. Na slici se takođe može uočiti da komponente F_2 i F_3 imaju značajniji poras sa habanjem alata. Na slici 8 su prikazane promene pojedinih komponenti otpora rezanja u toku vremena a na slici 9 promena ukupne rezultante F_R i rezultanti u pojedinim koordinatnim ravnima.



Slika 8. Komponente otpora rezanja F_i

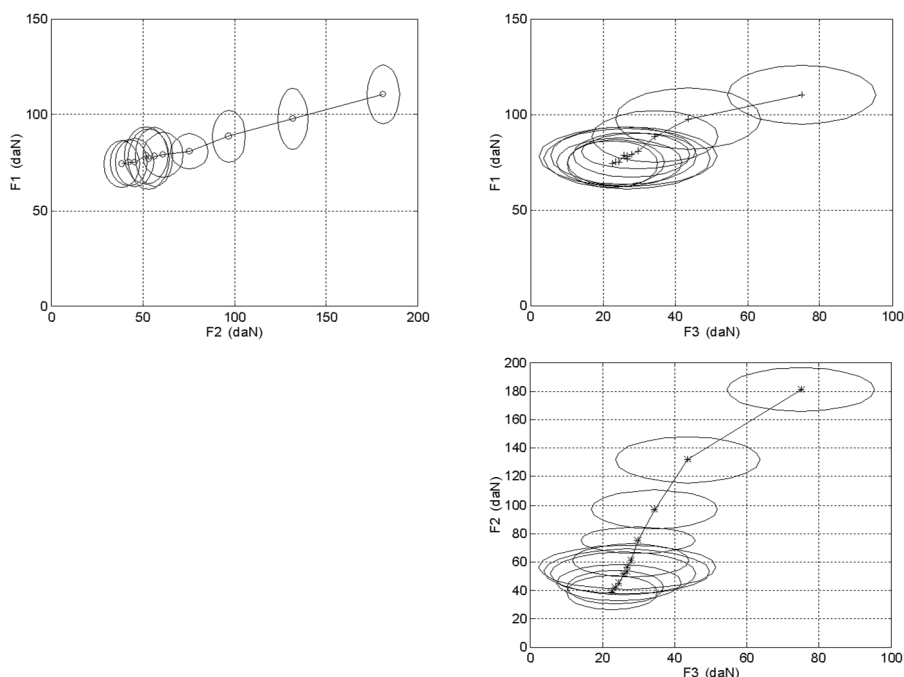


Slika 9. Rezultante otpora rezanja F_{Ri}

Analizom signala komponenti otpora rezanja, slika 6, može se primetiti da sa porastom širine pojasa habanja alata rezultante otpora rezanja rastu, odnosno centri oscilovanja signala se pomeraju. Posmatranje i analiza signala u koordinatnim ravnima komponenti, kao na slici 6, nije najpogodniji oblik jer dolazi do preklapanja trenutnog sa prethodno dobijenim signalom. Zbog toga je pogodnije prikazati promenu signala pomoću elipsa signala. U tom slučaju prikazuju se samo obvojnica signala.

Sa povećanjem habanja alata poluprečnici elipsi se menjaju, najvećim delom rastu, stim da je taj porast najveći u pravcu F_2 i F_3 osa. Na osnovu prethodnih dijagrama i poznavajući vrednosti amplituda na slici 9 su prikazane odgovarajuće elipse signala za svaku vrednost širine pojasa habanja alata.

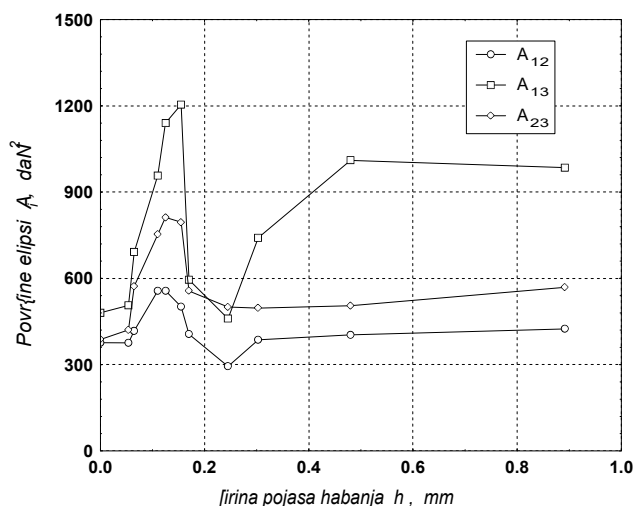
Korišćenje elipsi signala, koje opisuju dinamički karakter otpora rezanja, omogućava da se odredi površina koju opisuje signal otpora rezanja i da se na taj način dođe do novog parametra za analizu i praćenje procesa obrade, a to je površina elipse signala. Za elipse prikazane na slici 10, na dijagramu na slici 11 su prikazane promene vrednosti površina elipsi u pojedinim koordinatnim ravnima u zavisnosti od širine pojasa habanja alata.



Slika 10. Elipse signala u zavisnosti od habanja

Može se primetiti da postoji određena oblast pohabanosti alata gde su dinamičke komponente signala manje u tom slučaju, odnosno površina elipsi je manja.

Ako bi se uspostavio dijagram zavisnosti amplituda signala komponenti otpora rezanja i vremena rezanja uz istovremeno praćenje krive habanja, došlo bi se do zaključka da su u fazi ustaljenog habanja dinamičke komponente signala otpora rezanja minimalne. Razlog za ovakav oblik promene površina elipsi, a time i amplituda oscilovanja signala otpora rezanja treba najverovatnije tražiti u postizanju optimalne vrednosti zaobljenja vrha reznog klina alata, čime se postižu najpovoljniji uslovi trenja između alata i predmeta obrade i alata i strugotine.



Slika 11. Zavisnost površina elipsa signala od habanja alata

4. ZAKLJUČAK

Pokazana analiza promene dinamičkog karaktera signala otpora rezanja daje mogućnost daljeg razvoja čitavog niza modela za analizu procesa obrade rezanjem preko dinamičkih karakteristika procesa. Pokazano je da amplitude oscilovanja signala otpora rezanja mogu biti parametar za identifikaciju stanja procesa rezanja. Predstavljanjem signala komponenti otpora rezanja u koordinatnom sistemu kome te komponente pripadaju, dobija se prostorna slika signala rezultante otpora rezanja. Njenim projektovanjem u koordinatne ravni komponenti otpora rezanja dobijene su ravanske slike signala. Opisivanjem signala rezultante otpora rezanja obvojnicom u obliku elipsoida, odnosno njenih projekcija u koordinatnim ravnima pomoću elipsa signala, stvoren je novi parametar pomoću koga se uspešno opisuje dinamički karakter rezanja. Analiza položaja centra elipsoida, odnosno elipsi signala i veličine njihovih poluprečnika, kao i površina elipsi u zavisnosti od uslova obrade predstavlja novi pristup u izučavanju dinamike rezanja. Poznavanjem oblika promene parametara elipsoida signala otpora rezanja (npr. nagle promene dimenzija ili položaja elipsoida) može predvideti otkaz alata.

LITERATURA:

- [1] Dimla E. Dimla Snr., *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods*, Machine tools & Manufacture, Vol 40 (2000), pp. 1073-1098
- [2] Jasiwicz, M., Miadlicki, K., *Implementation of an Algorithm to Prevent Chatter Vibration in a CNC System*, Materials, 2019, 12, 3139; pp. 2-15, doi: 10.3390/ma12193193
- [3] Ivković, B., *Obrada metala rezanjem*, Jugoslovensko društvo za tribologiju i Mašinski fakultet, Kragujevac, 1994.
- [4] Nedić, B., *Razvoj metode upravljanja procesom obrade metala rezanjem preko dinamičkih karakteristika parametara rezanja*, doktorski rad (u rukopisu), Mašinski fakultet, Kragujevac, 1997.
- [5] Nedić, B., *Dinamika procesa rezanja*, monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2006.
- [6] Nedić, B., *Upravljanje procesom obrade bušenjem*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1991.

DYNAMIC FORCE SIGNALS FOR MONITORING IN METAL CUTTING

Rezime:

The signal of the cutting force is not a static, but dynamic entity, which may be represented by its mean value, amplitude, dispersion and frequency of oscillating around the mean value. On the basis of the cutting forces' signal amplitude, there were ellipsoid and the ellipses of those signal constructed. These shapes represent the envelope for the signal of resultant and component forces.

The paper gives the ellipsoid and ellipses of the cutting forces' signals for various cutting conditions and states of wear. This enables the ground for the development of the monitoring system and cutting process management.

Key words: metal cutting, signal, dynamic force, tool wear, monitoring, ellipsoid



Miloš Vorkapić¹⁾, Aleksandar Simonović²⁾, Dragan Čočkaló, Dejan Đorđević³⁾

IMPLEMENTACIJA ADITIVNE PROIZVODNJE U LEAN KONCEPT⁴⁾

Rezime

Rezime: U ovom radu prikazan je značaj aditivne proizvodnje u okviru Lean koncepta. Koncept definiše sedam vrsta proizvodnog otpada, dok Lean proizvodnja podrazumeva uklanjanje tog otpada. Aditivna proizvodnja ispunjava sve kriterijume kako bi se otpad sveo na minimum. Uopšteno, postoji razlika između ovih proizvodnji. Lean proizvodnja je karakteristična za masovnu proizvodnju, dok je aditivna proizvodnja našla primenu u maloserijskoj i pojedinačnoj proizvodnji. Najbolje se pokazala u izradi prototipa. U radu analiziran je postupak izrade modela i strategija implementacije aditivne proizvodnje primenom Lean filozofije u preduzeću.

Ključne reči: Lean proizvodnja, Aditivna proizvodnja, Algoritam, Lean koncept, Otpad

1. UVOD

Osnovni cilj Lean proizvodnje (LP) je uklanjanje/smanjenje procesnog otpada [1]. Otpad predstavlja resurs koji postoji ali ne stvara vrednost. U tom smislu, LP smanjuje negativan uticaj otpada na okruženje. Nažalost, LP je karakteristična za masovnu proizvodnju i stabilno poslovno okruženje, a van toga ona ne dobija na značaju. Takođe, mali broj preduzeća je postigao znatna poboljšanja, jer kao rezultat dobija se veća složenost sistema, a dobijeni rezultati su ispod očekivanih vrednosti [2]. Taj [3] naglašava dva važna aspekta u razmatranju LP: ljudski i tehnološki. Tehnološki aspekt podrazumeva projektovanje proizvodnog procesa (planiranje, raspoloživost inventara, lanac snabdevanja). Ljudski aspekt podrazumeva projektovanje organizacije (organizaciona struktura, sigurnost i podela posla, organizacioni kapacitet i obuka).

Aditivna proizvodnja (AP) koristi se za proizvodnju prototipova, modela, komponenti i delova uz upotrebu različitih materijala: plastika, metal, keramika, staklo i kompozit [4]. Primenom AP u mogućnosti smo da uklonimo razne izvore otpada koji se javljaju tokom proizvodnje. AP preduzećima daje sledeće prednosti [5]:

- smanjuje potrebno vreme za izlazak prototipa/proizvoda na tržište,
- drastično smanjuje potrebno vreme za lansiranje serije proizvoda,
- smanjuje ili eliminiše višak koraka u procesu obrade,
- smanjuje potrebe za raznovrsnim materijalima,
- smanjenje potrebu za energijom,
- omogućuje proizvodnju složenih delova,
- smanjuje ukupne troškove proizvodnje,
- skraćuje lanac snabdevanja i potrebu za transportom,
- preusmerava proizvodnju na druge korisnike.

2. PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Aditivna tehnologija ima značajnu primenu u sledeća tri slučaja, [6], videti sliku 1:

- *Razvoj i izrada prototipova* (brza izrada prototipova) predstavlja osnovnu primenu AP [7]. Prototipovi ne zahtevaju posebne alate i proizvode kada je reč o malim serijama, realizuju se u kratkom roku uz minimalne troškove i upotrebu raznovrsnih materijala. Uopšteno, brza izrada prototipa najviše se koristi za vizuelizaciju i/ili funkcionalnu potvrdu gotovog proizvoda.

¹⁾ dr Miloš Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, NU IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, (worcky@nanosys.ihtm.bg.ac.rs);

²⁾ prof. Dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (asimonovic@mas.bg.ac.rs)

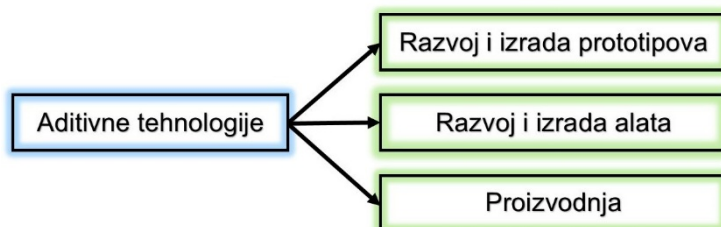
³⁾ prof. dr Dragan Čočkaló, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” u Zrenjaninu, (cole@tfzr.uns.ac.rs);

prof. dr Dejan Đorđević, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin” u Zrenjaninu, (dejan.djordjevic@tfzr.rs)

⁴⁾ Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

- *Razvoj i izrada alata* (brzi alati) omogućava povećanje brzine izrade specijalnih i kompleksnih alata uz drastično smanjenje troškova za razliku od konvencionalne proizvodnje [8]. Na ovaj način materijali za konvencionalnu izradu alata zamenjuju se materijalima za AP.
- *Proizvodnja* (brza proizvodnja) predstavlja najnoviju aplikaciju koja je razvijena pomoću procesa AP. Koristi se za maloserijsku proizvodnju, a najveću primenu ima u vazduhoplovnoj i automobilskoj industriji, kao i u medicini. Razvoj velikoserijske i masovne proizvodnje zavisi od obima razvoja tehnologije AP [9].

Uopšteno, AM omogućava realizaciju brzih prototipova sa složenom geometrijom u relativno malim količinama [10] i povoljnu izradu brzih alata/kalupa koji će se koristiti u masovnoj proizvodnji [11].



Slika 1. Osnovni elementi u primeni aditivne tehnologije

S tim u vezi, Realizacija prototipa odvija se u okviru sledećih aktivnosti [12]:

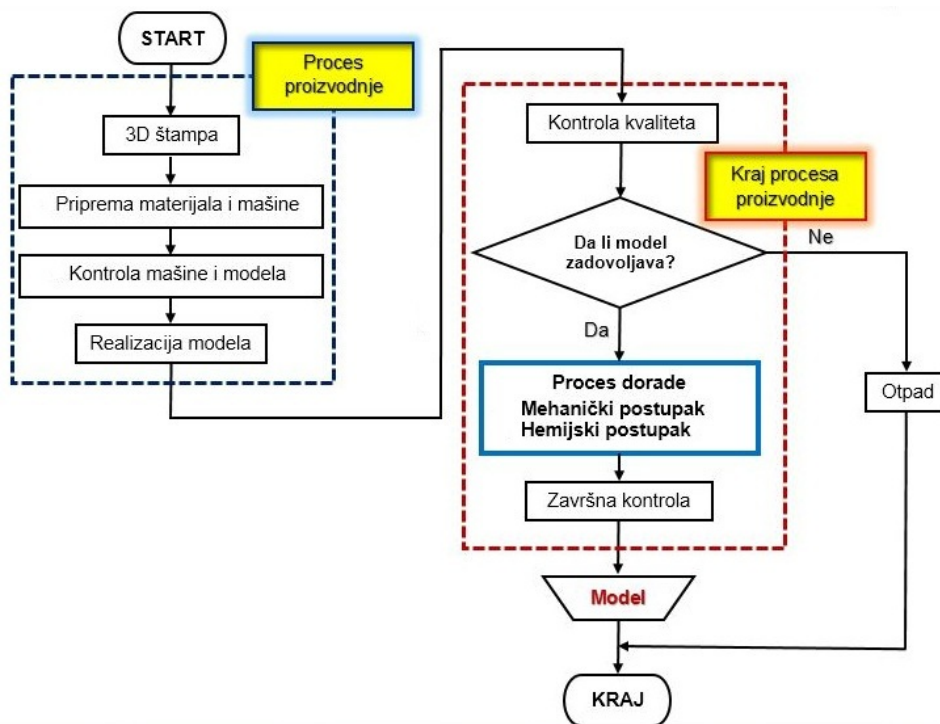
1. Modelovanje: uključuje odabir materijala, kontrolu ulaznih parametara, optimizaciju parametara dizajna, razvoj analitičkog modela, razvoj algoritma i baze podataka zasnovanih na predikciji kvaliteta;
2. Štampanje: uključuje kontrolu kvaliteta i nadzor u toku procesa štampe;
3. Završna obrada: podrazumeva završnu kontrolu, dorade na komadima, korekcije defekata (termičkim, hemijskim i mašinskim putem);
4. Analiza: podrazumeva: tumačenje dobijenih parametara i proveru parametara rada uređaja. Ovde je neizostavan postupak validacije i ocenjivanje pouzdanosti dela.
5. Ekonomičnost proizvoda: uključuje validaciju procesa i parametara, definiše najbolju orijentaciju dela i daje procenu obradivosti.

U poređenju sa konvencionalnom proizvodnjom (KP), AP predstavlja revolucionarni iskorak, jer se delovi realizuju prema digitalnom prikazu i time su isključeni mašinska obrada, kovanje i livenje [13]. AP podrazumeva dodavanje materijala po slojevima, dok KP oduzima material od polufabrikata kako bi se dobio željeni oblik. Kod KP javljaju se problemi zbog velike raznovrsnosti modula pri formiranju proizvoda. U tom slučaju kupcima je ostavljeno da kombinuju module, što dovodi do usložnjavanja pri sklapanju finalnog proizvoda. Zato većina preduzeća, ograničavaju kupce u kombinovanju modula, i pri tome kupci ne mogu da dobiju proizvod kakav žele. Takođe, suštinske razlike između pomenutih proizvodnji su evidentne i one se odnose na: upotrebu materijala, ukupno vreme za obradu/izradu, potrošnju energije, kvalitet dobijenih površina, smanjenje fizičkog otpada, smanjenje upotrebe većeg broja alata i uticaj proizvodnje na životnu sredinu.

AP se javlja kao dobro rešenje u realizaciji proizvoda i to prvenstveno zbog izrade sofisticiranih proizvoda koja u sebu uključuju primenu novih materijala i izradu složenih oblika. U tom kontekstu, AP može da postane ključna tehnologija za masovnu proizvodnju proizvoda. Određeni proizvodi se prilagođavaju potrebama kupaca, uz poštovanje zahteva projekatana. Kupci tako stvaraju nove inovativne proizvode i ostvaruju vrednost kroz saradnju sa drugim kupcima/potrošačima i proizvođačima.

3. ALGORITAM U REALIZACIJI MODELA

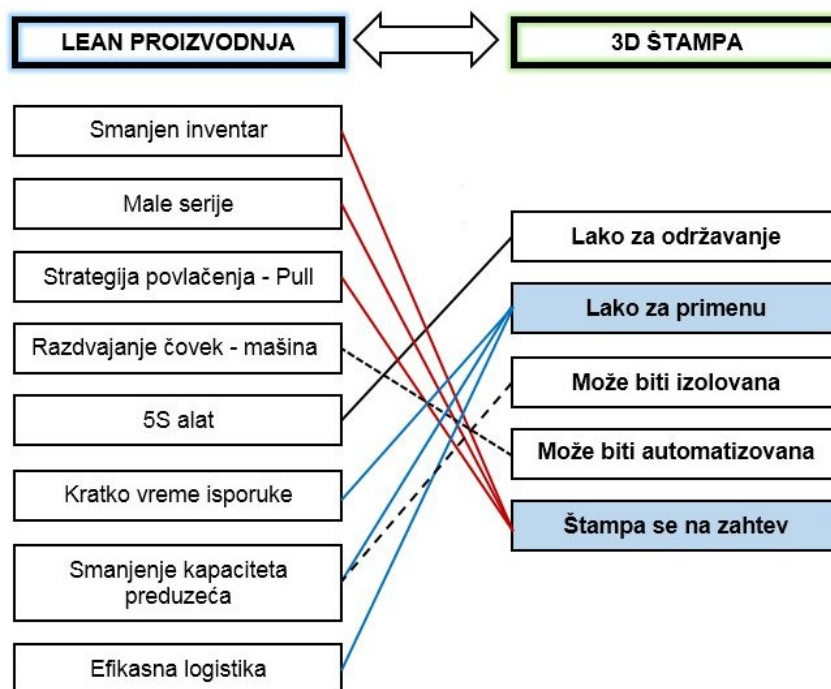
Algoritam u postupku realizacije prototipa [14] prikazan je na slici 2. Algoritam obuhvata sam proces proizvodnje i kraj procesa proizvodnje. Pre početka štampe definišu se parametri i vrši se izbor materijala. Kada se uređaj pusti u rad, operater neprestano vrši kontrolu štampe. Na kraju procesa proizvodnje vrši se dodatna kontrola geometrije i površina gotovog modela. Na kraju, prihvaćeni model se dodatno doraduje mehanički i hemijski. Uz takav tretman, dobija se prototip koji je po veličini, obliku i dimenzijama ekvivalentan originalu izrađenom na obradnom centru. Ukoliko model ne zadovoljava pomenute kriterijume smešta se u otpad. Dakle, postoji značajna razlika u vizuelnom prikazu i realizovanom modelu, odnosno kvalitet površine izrađenog modela zavisi od parametara štampača i od prostorne orijentacije. Nažalost, uređaji za 3D štampu i dalje nisu pouzdani jer ne poseduju pouzdani sistem za kontrolu kvaliteta [15]. Takođe, izbor materijala i dalje je presudan po pitanju kvaliteta 3D štampe [16].



Slika 2. Algoritam u postupku realizacije prototipa

4. AP U REŠAVANJU PROBLEMA LEAN KONCEPTA

AP (ili 3D štampa) omogućava da se virtualni modeli realizuje u pravi model. Konceptualni CAD model na računaru realizuje se kao 3D objekat na štampaču. 3D štampa je veoma jednostavna i jeftinija od drugih metoda brze izrade prototipova, pa može imati primenu u raznim industrijama. 3D štampa omogućava rad sa kupcima kako bi se rešili problemi dizajna i dobile pravovremene informacije pre nego što se krene u lansiranje proizvodnje. Prema Cupar i dr. [17] za štampanja pomoću 3D štampača, potrebno je napredno tehničko znanje u pripremi, zadavanju parametara i sam postupak realizacije štampe. Veza između LP i AP data je na slici 3.



Slika 3. Veza LP i AP elemenata u okviru Lean principa

Sve je u saglasnosti sa nekim od Lean principima [18], a najviše se odnosi na:

1. *Povlačenje proizvodnje* – ovde se misli prvenstveno na kupca koji svojim zahtevom pokreće proizvodnju. Sa slike se može videti da postoji veza elemenata LP sa elementom AP. Štampanje (ili proizvodnja) na zahtev kupca vezuje se za maloserijsku proizvodnju, uz smanjenje inventara i primenu strategije povlačenja – „Pull”. Strategija povlačenja znači da niko u lancu stvaranja vrednosti ne bi trebalo da proizvodi proizvod sve dok se ne izrazi kupčeva želja. Ova veza omogućava LP da se na brži način okrene maloserijskoj proizvodnji. Strategija povlačenja označava pokretanje zahteva od strane kupca u cilju zadovoljenja i ispunjenja traženih aktivnosti koja u sebi generiše sve potrebne aktivnosti do konane montaže [19],
2. *Kontinualni tok* – ovde se misli na stabilan protok aktivnosti koje pri radu minimiziraju zaustavljanja, otpad, realizaciju lošeg kvaliteta i ponavljanje operacija ili koraka [20]; tj. treba nastojati da se uklone svi elementi koji ne daju vrednost. Ovde postoji jaka veza između realizacije modela i njegove njegove specifičnosti sa kratkim vremenom isporuke (smanjuje se broj koraka), smanjenjem kapaciteta preduzeća (prostor, alat, inventar) i efikasnom logistikom, ali i nezaobilaznom obukom zaposlenih. AP omogućuje uspostavljanje najboljeg rešenja kroz jednostavno izvršavanje aktivnosti i preusmeravanje viška vremena ka istraživačko razvojnim delatnostima.
3. *Kontinualno unapređenje* – ukazuje na unapređenje procesa proizvodnje bez grešaka, tj. da potrebne informacije i količina vremena usmerena ka kupcu treba postepeno da opadaju.. AP u tom pogledu definiše tri elementa na kojima se mogu primeniti Lean: jednostavan sistem održavanja pomoću 5S alata, omogućena automatizacija proizvodnje upotrebom više mašina i mogućnost da se ceo proces proizvodnje izoluje.

Lean koncept (LK) usmeren je na pronalaženje pravih aktivnosti, postavljanje stvari na pravo mesto, u pravo vreme kako bi se postigao savršen protok rada uz minimiziranje otpada [21]. LK definiše sedam vrsta proizvodnog otpada [22]: 1) prekomerna proizvodnja, 2) transport, 3) zastoji, 4) nepotrebni pokreti, 5) prekomerna obrada, 6) škart i 7) zalihe.

AP, na osnovu definisanih proizvodnih otpada ispunjava sve kriterijume kojima bi se otpad sveo na minimum. Iako je tehnologija AP svedena na brzu prototipsku ili maserijsku izradu, suština je i u brznoj implementaciji AP u LK. AP S tim u vezi, u tabeli 1 daje se značaj AP u otklanjanju otpada prema pomenutim kriterijumima. Kao što se vidi iz tabele, svi definisani otpadi ne figurišu primenom AP, jer ona ima potencijal da promeni lanac snabdevanja, eliminiše otpad i stvori nove tokove vrednosti.

Tabela 1. Primana AP u otklanjanju otpada LK

Lean koncept	Tip otpada	Aditivna proizvodnja
Prekomerna proizvodnja	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stvaraju se proizvodi koji ne mogu da se plasiraju na tržište; ▪ Izvode se nepotrebne operacije; ▪ Stvara se nepotrebna dokumentacije. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proizvodi se prave samo prema zahtevu kupaca; ▪ Nema nepotrebni operacije; ▪ Nema dokumentacije.
Transport	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Javlja se nepotrebno kretanje materijala/ poluprizvoda između operacija ili skladišta; ▪ Postoji slab tok informacija. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materijal se nalazi pored mašine; ▪ Informacije su definisane na relaciji čovek – mašina.
Zastoji	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Postoji vreme čekanja materijala između dve operacije; ▪ Javlja se neaktivan rad; ▪ Čeka se na isporuku. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nema čekanja materijala; ▪ Nema neaktivnog rada; ▪ Nema čekanja na isporuku.
Nepotrebni pokreti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nepotrebni pokreti su prisutni zbog lošeg rasporeda mašina. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nema nepotrebni pokreta; ▪ Raspored i rad mašina ne zavisi od manipulacije operatera.

Prekomerna obrada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Postoji veliki broj mašina ▪ Postoji nepotrebna oprema ▪ Javlja se čišćenje između operacija, ▪ Postoji previše koraka u obradi 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Radi se na jednoj mašini, ▪ Nema nepotrebne opreme; ▪ Javlja se čišćenje modele nakon izrade; ▪ Postoji realizacija proizvoda prema definisanoj tehnologiji 3D štampe.
Škart	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loša realizacija poslovnog procesa; ▪ Gubitak vremena u otklanjanju uzroka problema; ▪ Nedovoljno osposobljenih operatera; ▪ Nedostatak standardnih procedura. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Primenjuje se strategija „Just in Time”; ▪ Uzroci problema se otklanjaju na početku procesa; ▪ Operater je u potpunosti osposobljen za rad; ▪ Nisu potrebne striktno procedure.
Zalihe	<ul style="list-style-type: none"> • Postojanje nepotrebnih količina materijala i gotovih proizvoda 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne postoji magacin materijala i magacin gotovog proizvoda.

5. ZAKLJUČAK

U radu smo ukazali koliki značaj ima aditivna proizvodnje u realizaciji Lean filozofije. Suštinski koncept Lean proizvodnje je smanjenje upotrebe resursa. Mnoge promene u tehnologijama znatno su uticale da se izvrše promene u organizacijama. Jedna od njih je aditivna tehnologija koja udružena kroz Lean filozofiju omogućava optimizaciju i povećanje efikasnosti svih raspoloživih resursa.

Sa aspekta produktivnosti proizvodnje i kvaliteta, aditivna proizvodnje ima dosta problema. Ona je fokusirana na pojedinačnu ili maloserijsku proizvodnju, što u suštini nije relevantno za Lean koncept. Sa druge strane, izrada velikih serija povlači za sobom velike troškove priprema, ogromne troškove kapitala, velike zalihe, veće količine škarta.

Na taj način se preduzeća okreću kupcima i primenom aditivnih tehnologija vrše eksperimente na svojim poslovnim modelima poput: brza izrada prototipova/proizvoda, automatizacija proizvodnje, izolovan (zatvoren) sistem izrade, manji prostor i brža distribucija dobara.

6. LITERATURA

- [1.] Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., De Sanctis, I.: *Lean practices implementation and their relationships with operational responsiveness and company performance: an Italian study*. International Journal of Production Research, Vol. 55, No. 3, pp. 769-794, 2017.
- [2.] Marvel, J. H., Standridge, C. R.: *Simulation-enhanced lean design process*. Journal of Industrial Engineering and Management, vol. 2, No. 1, pp. 90-113, 2009.
- [3.] Taj, S.: *Applying lean assessment tools in Chinese hi-tech industries*. Management Decision, Vol. 43, No. 4, pp. 628-643, 2005.
- [4.] Lyons, B.: *Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook*. Bridge Vol. 44, No. 3, pp. 13-19, 2014.
- [5.] Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P.: *Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing*. Business Horizons, Vol. 58, No. 2, pp. 209-215, 2015.
- [6.] Chen, T., Lin, Y. C.: *Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3d printing: a review*. International Journal of Intelligent Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 394-413, 2017.
- [7.] Bibb, R., Winder, J.: *A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques*. Radiography, Vol. 16, No. 1, pp. 78-83, 2010.
- [8.] Campbell, R.I., De Beer, D.J., Pei, E.: *Additive manufacturing in South Africa: building on the foundations*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 156-162, 2011.
- [9.] Hague, R., Campbell, I., Dickens, P.: *Implications on design of rapid manufacturing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 217, No. 1, pp. 25-30, 2003.
- [10.] Sachs E, Cima, M., Williams, P., Brancazio, D., Cornie, J.: *Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model*. Journal of Engineering and Industry, Vol. 114, No. 4, pp. 481-488, 1992.
- [11.] Lu, B., Li, D. Tian, X.: *Development trends in additive manufacturing and 3D printing*. Engineering. Vol. 1, No. 1, pp. 85-89, 2015.

- [12.] Kim, H., Lin, Y., Tseng, T. L. B.: *A review on quality control in additive manufacturing*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 645-669, 2018.
- [13.] Shah, R. and Ward, P.T.: *Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance*. Journal of operations management, Vol. 21, No. 2, pp. 129-149, 2003.
- [14.] Ahsan, N., Khoda, B.: *AM optimization framework for part and process attributes through geometric analysis*. Additive Manufacturing, Vol. 11, pp. 85-96, 2016.
- [15.] Brajljih, T., Valentan, B., Balic, J. Drstvensek, I.: *Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines*. Rapid Prototyp Journal, Vol. 17, No. 1, pp. 64-75, 2011.
- [16.] Lanzetta, M. and Sachs, E.: *Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 157-166, 2003.
- [17.] Cupar, A., Pogačar, V. and Stjepanović, Z.: *Shape verification of fused deposition modelling 3D prints*. International journal of information and computer science, Vol. 4, pp. 1-8, 2015.
- [18.] Vorkapić, M., Čockalo, D., Đorđević, D., Bešić, C.: *Implementation of 5s tools as a starting point in business process reengineering*. Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC), Vol. 7, No. 1, pp. 44-54, 2017.
- [19.] Åhlström, P.: *Sequences in the implementation of lean production*. European Management Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 327-334, 1998.
- [20.] Womack, J.P., Jones, D.T.: *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York, NY: Free Press, 2003.
- [21.] Dora, M., Kumar, M., Gellynck, X.: *Determinants and barriers to lean implementation in food-processing SMEs—a multiple case analysis*. Production Planning and Control, Vol. 27, No. 1, pp. 1-23, 2016.
- [22.] Bicheno, J., Holweg, M. (2009). *The Lean Toolbox: The Essential Guide to Lean Transformation, Production and Inventory Control*. System and Industrial Books, UK, 2009.

Miloš Vorkapić, Aleksandar Simonović, Dragan Čockalo, Dejan Đorđević

IMPLEMENTATION OF ADDITIVE MANUFACTURING IN THE LEAN CONCEPT

Abstract: *In this paper, the importance of additive manufacturing within the Lean concept presented. The concept defines seven types of production waste, while Lean production involves removing that waste. Additive manufacturing satisfies all the criteria to minimize waste. In general, there is a difference between these productions. Lean production is characteristic of mass production, while additive manufacturing has found application in small-scale and individual production. Additive production best proved in prototyping. The paper analyzes the developing process of models and strategies for the additive manufacturing implementation using Lean philosophy in the enterprise.*

Key words: *Lean production, Lean concept, Additive manufacturing, Waste, Algorithm,*

42. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

42nd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



22. simpozijum

MENADŽMENT KVALITETOM

Beograd, oktobar 2020.

MENADŽMENT KVALITETOM
QUALITY

Васиљевић, П., Шћеповић, М., Стојадиновић, С., Пузовић, Р.
ПЛАНИРАЊЕ КОНТРОЛЕ КВАЛИТЕТА ПРОИЗВОДА У СОФТВЕРУ OPERA MES 5.1





Васиљевић Петар¹⁾, Шћеповић Милош²⁾, Стојадиновић Славенко³⁾, Пузовић Радован⁴⁾

ПЛАНИРАЊЕ КОНТРОЛЕ КВАЛИТЕТА ПРОИЗВОДА У СОФТВЕРУ OPERA MES

Резиме

Данашњи производни системи захтевају висок степен флексибилности, аутономности, интероперабилности и дигиталног праћења и управљања квалитетом производа где једну од кључних улога имају производни информациони системи и менаџмент квалитетом. У раду је представљен развој и имплементација једног информационог подсистема за управљање квалитетом производа коришћењем софтверског система за праћење производње, Opera V.6 са акцентом на планирању тестирања производа. Моделирани производни систем садржи све минимално неопходне компоненте за тестирање у Quality Checks модулу софтвера Opera V.6. Помоћу софтвера Opera V.6 врши се преглед потребних података о квалитету како би се пратила производња једне фабрике, односно квалитет њених производа. Софтвер значајно олакшава корисницима управљање широким спектром информација о квалитету помоћу пажљиво креираних интерфејса који су управо тако направљени да потпомогну у раду корисника. Након дефинисања налога за тестирање као и дефинисања одговарајућих радњи како би се спровело само тестирање, као излаз се генерише листа стања сваког појединачног теста као и статус усаглашености тј. да ли је позитиван или негативан тест. Рад је настао као резултат спроведених истраживања у два мастер рада на предмету менаџмент квалитетом.

Кључне речи: Opera MES, производни информациони системи, контрола квалитета, тестирање производа

1. УВОД

Данашњи производни системи захтевају висок степен флексибилности, аутономности, интероперабилности и дигиталног праћења и управљања квалитетом производа где примарну улогу имају производни информациони системи. Важан сегмент унутар производних информационих система представља подсистем за праћење квалитета производа који у реалном времену прати карактеристике квалитета процеса и производа, и тако обезбеђује прописани ниво квалитета. Управљање квалитетом производа на систематичан начин гарантује да ће се организоване активности контроле одвијати онако како је планирано [8]. Такође, управљање квалитетом производа се бави превенцијом тј. спречавањем појаве проблема, као и контролом истих, чиме се уз одређене резерве осигурава процес контроле. Управљање квалитетом производа у оквиру информационог система за управљање производње повећава ефикасност и смањује могућност грешака при контроли и анализи добијених резултата.

Циљ рада је развој информационог подсистема за контролу квалитета у софтверу Opera MES за одабрани и моделирани производни систем са циљем праћења и унапређења квалитета. Opera MES је информациони систем производно оријентисан у којем су сви производни ресурси и процеси међусобно повезани ради потпуног надзора и управљања читавом дигиталном фабриком. Састоји се

¹⁾ Петар Васиљевић, студент друге године мастер академских студија, Универзитет у Београду, Машински факултет (peki.v94@gmail.com)

²⁾ Милош Шћеповић, студент друге године мастер академских студија, Универзитет у Београду, Машински факултет (milosscepovic@gmail.com)

³⁾ Др Славенко Стојадиновић, доцент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, (ssojadinovic@mas.bg.ac.rs)

⁴⁾ Проф. др Радован Пузовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, (rpuzovic@mas.bg.ac.rs)

од четири основна модула и додатног петог модула, а то су: производња, квалитет (*Quality Checks*), материјал, одржавање и веза са уређајима. Софтвер пружа информације у реалном времену за управљање и надгледање производног процеса, од поруцбине до испоруке готовог производа. Систем за извршавање производње (*MES – Manufacturing execution system*) представља информациони систем који повезује, надгледа и управља сложеним производним системима и токовима података у фабрици [3]. *Quality Checks* контролише квалитет производа на бази генерисаних тестова и плана тестирања на основу кога се потом врши тестирање и отклањају се евентуалне грешке испитиваног производа, што је детаљно описано у [9]. Добро управљање тестовима квалитета гарантује поуздане резултате усаглашеност или неусаглашености производа у производњи. Овим модулом могуће је тестирати квалитет сировина, полупроизвода и финалних производа. Добијеним анализама резултата, могуће је открити главни разлог дефектности производа и увести неку од корективних мера за побољшање квалитета производа и процеса. Као резултат испитивања квалитета за сваки производ добија се позитиван или негативан тест.

Према пропозицијама софтверта, да би се креирали тестови на основу којих се испитује квалитет производа, неопходно је дефинисати инструменте који се користе приликом самог тестирања производа, креирати мерне толеранције, затим креирати грешке које се могу појавити при тестирању, као и дефинисање самих тестова. Да би се производи нашли на једном месту, потребно је креирати и складиште производа који се контролишу и локацију на којој ће се налазити, а затим креирати и производне серије. На самом крају, за приказ резултата, неопходно је извршити експеримент циклуса испитивања као и генерисати Парето дијаграма.

2. MES СИСТЕМИ И СОФТВЕР OPERA MES

MES (енгл. *Manufacturing execution system*) системи у највећој мери служе за планирање, праћење, реализацију и израду документације комплетног производног циклуса самог производа. *MES* систем пружа информације у реалном времену које помажу да се донесе одлука у циљу унапређења производних процеса, и исто тако омогућује контролу над свим елементима производног процеса. Такође, представља и глобално решење за управљање производњом, складиштењем, квалитетом, одржавањем и праћењем процеса рада на свим локацијама. Главни циљ *MES* система је побољшање продуктивности, односно смањење времена производње од почетне сировине до финалног производа праћењем информација о извршавању операција производње. Ток информација у систему за извршавање производње омогућава боље оптимизовање процеса и праћење рада свих делова производње у реалном времену.

У оквиру овог рада коришћен је софтвер *Opera MES* у којем је развијен систем за праћење производње за одабрани производни систем са циљем праћења и унапређења квалитета. *Opera MES* пружа информације у реалном времену за управљање и надгледање производног процеса, од поруцбине до испоруке готовог производа. Ово је *WEB* решење, модуларне и флексибилне структуре, а омогућава управљање материјалима, производњом, квалитетом, одржавањем, као и повезивање са машинама за аутоматско прикупљање и слање података преко канала комуникације. *Opera MES* је информациони систем у којем су сви производни ресурси и процеси међусобно повезани ради потпуног надзора и управљања читавом дигиталном фабриком. Основни критеријум за избор овог софтвера огледа се у цени, нивоу комплексности, имплементацији, интеграцији програма са другим системима итд.

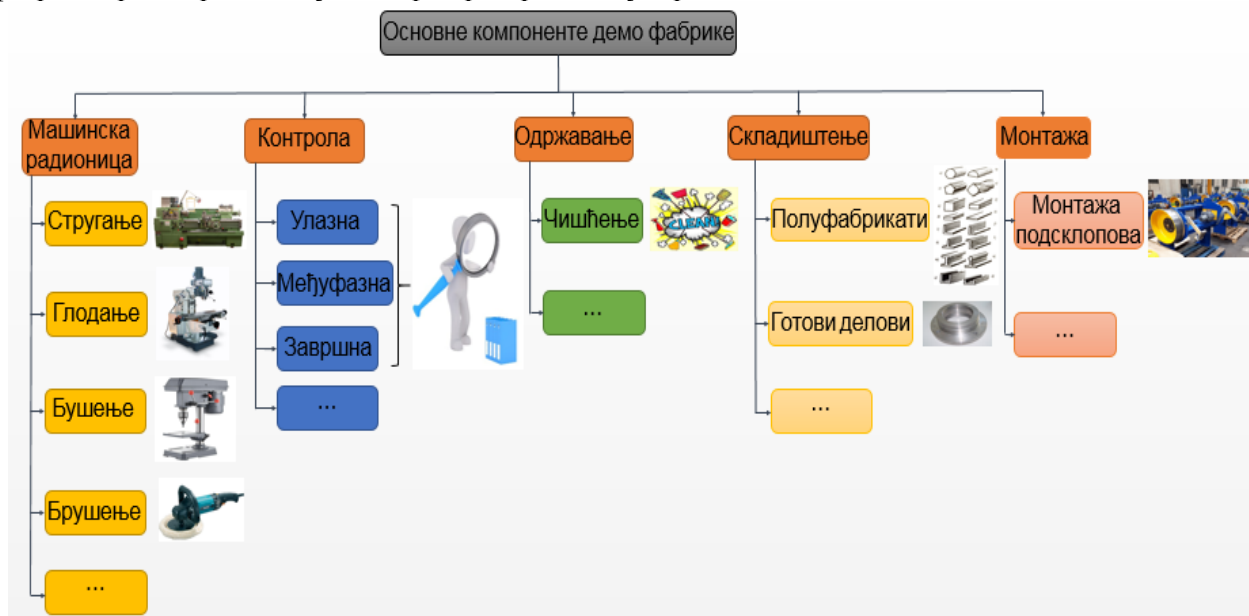
Основни циљеви овог система су управљање и достављање информација у реалном времену о напретку производног плана, омогућавање интерактивне комуникације оператера путем различитих интерфејса, праћење производних процеса, као и њихових параметара. *Opera MES* покрива својим радом и праћење материјала, произведених серија, садржи податке о одржавању и квалитету и не користи било какву врсту штампане документације.

3. ПЛАНИРАЊЕ ТЕСТОВА КВАЛИТЕТА У *QUALITY CHECKS* МОДУЛУ СОФТВЕРА *OPERA V.6*

Имајући у виду да је конкурентност фабрике на тржишту махом одређена квалитетом њених производа и процеса унутар саме фабрике укључујући и процесе за квалитет, при чему је квалитет производа прилагођавање жељама купца у процесу производње, циљ сваког успешног и тржишно оријентисаног пословног система је постизање високог нивоа квалитета производа – ка изврности у квалитету. Исто тако, квалитет означава настојање да се ствари ураде добро први и сваки следећи пут

[4]. Увођењем и коришћењем информационог система управљања квалитетом у компанији долази до: континуираног сталног побољшања, повећања конкурентности, повећање ефикасности и профитабилности, јасних процедура, минимизирања грешака, смањењу времена производње, боље мотивације запослених, боље комуникације и информисаности, сигурности и поузданости производа или услуга.

Пре самог успостављања процеса праћења производње и развоја подсистема за управљање квалитетом потребно је дефинисати демо фабрику са минимумом неопходних компоненти како би се илустровао и имплементирао поменути подсистем. Упрошћена структура основних компоненти ове фабрике према пропозицијама софтвера *Opera V.6* је приказана на слици 1.



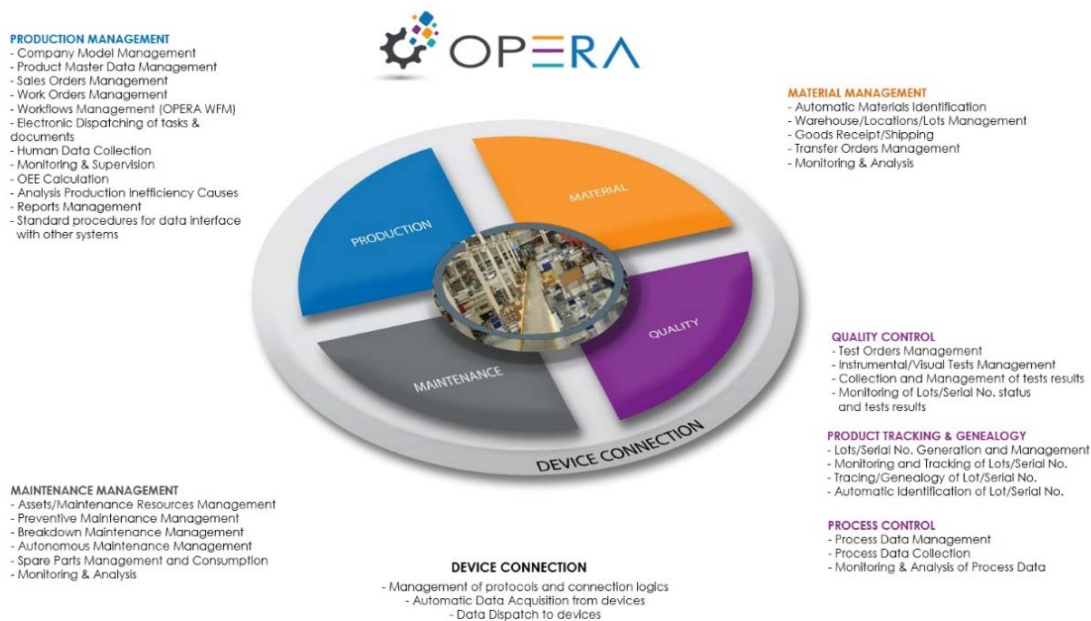
Слика 1. Упрошћена структура демо фабрике

Исто тако, да би било извршено праћење производње са становишта квалитета, потребно је дефинисати производ (скуп производа) који се прати и чији квалитет се тестира планирањем тестова. Као што је речено, за моделирање демо фабрике и информационог подсистема за управљање квалитетом производа, у овом раду коришћен је софтвер *Opera MES*.

Управљање квалитетом у оквиру *Opera MES* се односи на податке о квалитету, моделирање процеса контроле, креирање тестова и праћење квалитета у одређеном временском периоду. *Opera* менаџмент конзола за управљање је интерфејс у коме се дефинишу основни подаци за сваку функционалну област. Поред осталих модула за производњу, садржи модул квалитета или *Quality Checks* модул који представља један од главних модула овог софтвера.

3.1. Основна структура софтвера *Opera V.6*

Највиши ниво система *Opera V.6* је сама компанија која се затим дели на одељења попут машинске радионице, контроле, одржавања, монтаже и складиштења. Свако одељење може садржати један или више места трошка помоћу којих се апсорбују трошкови производних активности. У оквиру једног места трошка може се налазити једна или група од више машина. Поред овог груписања машине се деле и у радне центре тј. групе машина које имају сличне функције. Потрошни центри и радни центри су независни једни од других и налазе се на истом нивоу али је њихова функционалност различита. При томе сви системи су међусобно повезани почевши од компаније затим одељења, радних и потрошних центара па све до машина, операција и оператера. Након моделирања компаније неопходно је креирати и опишати циклусе испитивања квалитета. Они се реализују у *Quality Checks* модул састоји се из 3 подопције а то су: *Company*, *Test Cycle* и *Quality Checks*. Детаљније је описано у [5]. На слици 2 приказана је структура софтвера *Opera V.6* која представља део менаџмент конзоле.



Слика 2. Структура софтвера Opera MES [1]

3.2. Планирање тестирања производа

Да би се гарантовао квалитет и поузданост резултата контроле производа (као што су сировине, полупроизводи и готови производи) потребно је планирати и тачно извршити низ квалитативних и квантитативних тестова, како по пријему робе, тако и током извршења процеса, кроз једноставне поступке који се могу спровести у реалном времену. Контролу квалитета могу да изврше оператери или да аутоматски генеришу машине и мерни инструменти повезани са софтвером преко канала комуникације, у складу са организованим и планираним догађајима (достигнута количина, радно време и калибрација алата, итд.) [7].

Као што је и раније речено, *Opera MES* се користи за планирање тестирања производа у одређеном временском периоду. При томе неопходно је користити модул *Quality Checks* у оквиру кога ће се вршити планирање тестирања производа. Да би смо то урадили било је потребно извршити претходне кораке, као што су дефинисање машина, радних центара, операција, производа и других активности описаних у [6]. На основу тога могло се приступити извршењу овог задатка, тј. планирању тестирања производа.

Quality Checks модул проверава квалитет производа на основу кога се врши тестирање и отклањају се евентуалне грешке испитиваног производа. Том приликом могу бити два типа тестова квалитета:

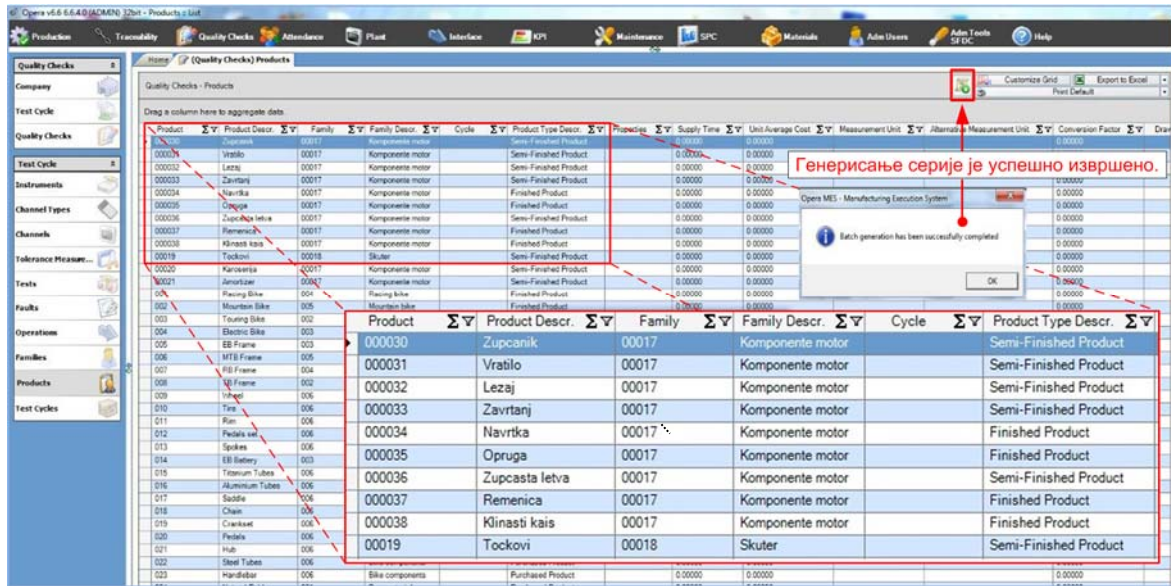
- инструментални: да би се извршила испитивања, неопходно је извршити мерење инструментом. Сваки инструмент може бити прилагођен за обављање једног или више тестова. Резултат је усаглашеност (или неусаглашеност) претходно одређене вредности или распона [1].
- атрибутивни: у овом случају оператор ће се сам изјаснити да ли је производ компатибилан или не, на основу онога што стварно види. Такође, могу се навести многи могући разлози неусклађености, нпр. погрешна боја, лоше штампање, итд. [1].

За сваки појединачни тест дефинишу се недостаци који се могу појавити приликом тестирања. Другим речима, креирају се такозвани стандардни тестни циклуси производа. Стварни циклус испитивања приказује листу извршених испитивања са датумом генерисања налога за тестирање.

Opera MES користи и друге методе менаџмента квалитетом као што су контролне карте, које омогућавају праћење вредности графикона и непосредну идентификацију у случају да процес измиче контроли. Такође користи и Паретов метод рангирања карактеристика квалитета производа (функционалне карактеристике тј. тражене особине неког производа као што су машина алатка - тип операције, тачност, итд.,) из асортимана производа моделираног производног система. Парето методом се утврђују узрочно-последичне везе између фактора и карактеристика квалитета.

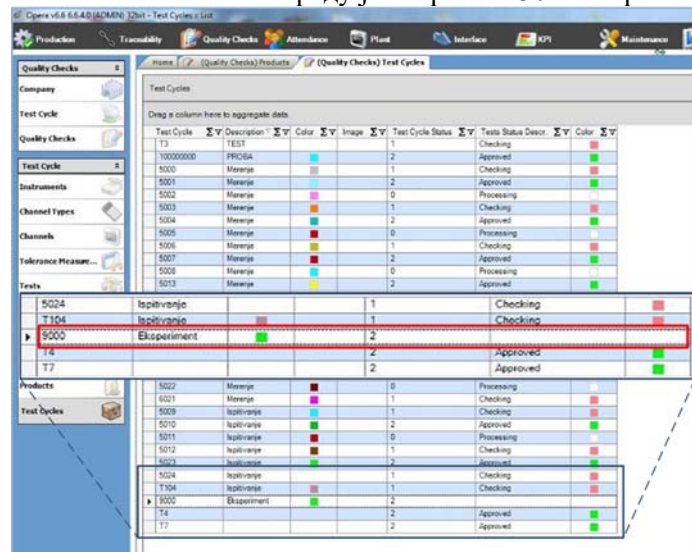
4. ЕКСПЕРИМЕНТ ЦИКЛУСА ИСПИТИВАЊА

Експеримент циклуса испитивања представља резултат контроле квалитета производа са циљем добијања задате вредности параметара квалитета и отклањања евентуалних грешака. Први корак се састоји у проналажењу производа тј. *Products*. Како би се дошло до тога потребно је пратити путању *Quality Checks/Test Cycle/Products/Search* где ће се на екрану појавити стандардни образац. Детаљније је описано у [5]. Након тога, кликом на картицу *Run Search*, на екрану ће се појавити стандардна листа са свим дефинисаним производима. На овој листи потребно је изабрати један производ за тестирање, а то је у овом примеру зупчаник. Кликом на поље које је означено стрелицом и оквиром на слици 3, врши се покретање поступка генерисања серијских и тестних циклуса. Ако је све тачно, на екрану ће се појавити прозор којим се ово потврђује.



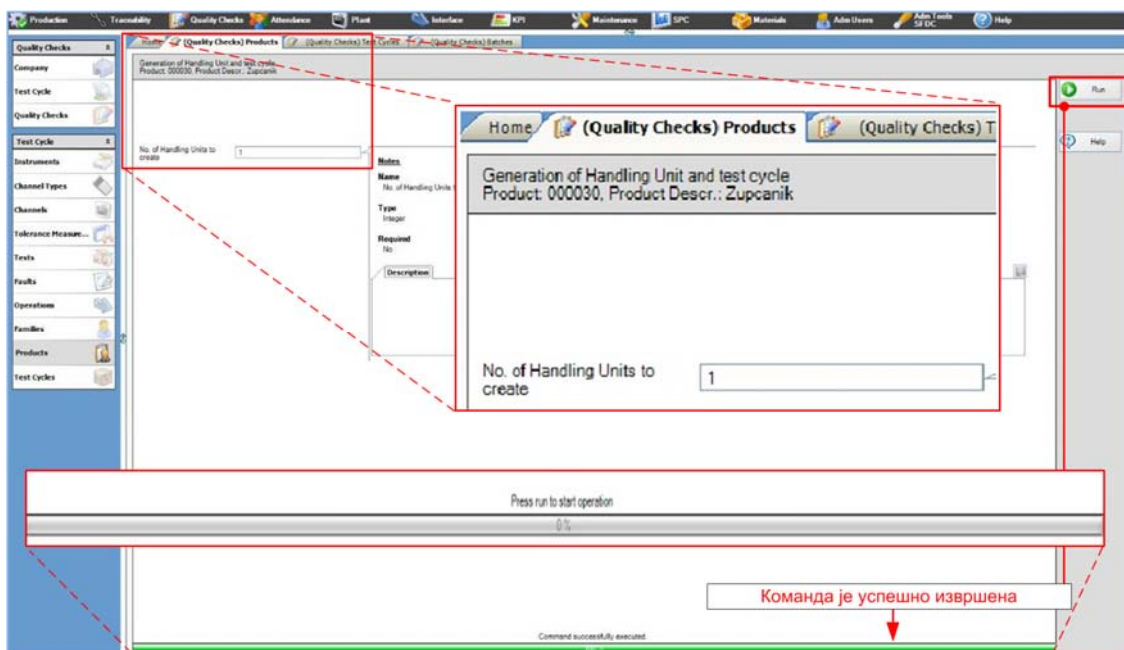
Слика 3. Генерисање налога за тестирање квалитета производа

Следећи корак се састоји у дефинисању циклуса испитивања тј. *Test Cycles*. За то је потребно пратити путању *Quality Checks/Test Cycle/Test Cycles/Search* где ће се на екрану појавити стандардни образац. Детаљније је описано у [6]. Кликом на картицу *Run Search*, а затим на картицу *Detail*, на екрану ће се појавити стандардни образац за дефинисање циклуса испитивања. Овде се уноси *ID Test Cycle-a*, затим опис, боја и статус циклуса испитивања. Након тога кликом на картицу *List* добија се листа где се проверава да ли се дефинисани циклус испитивања налази на њој. На овој листи може се видети да је циклус испитивања додат, али без описа статуса теста. На слици 4 је приказана листа са дефинисаним циклусима испитивања. У овом раду је извршено 30 експеримената за *Test Cycles*.



Слика 4. Листа циклуса испитивања

Након тога враћањем у *Batches* где се кликом на картицу *Run Search* отвара картица *List* у оквиру које се налази падајући подмени. Да би се дошло до тога потребно је пратити путању *Quality Checks/Quality Checks/Batches/Search*. У оквиру падајућег подменија картице *List*, изабере се картица *Test order* и у оквиру ње картица *Detail* где ће се на екрану појавити стандардни образац који треба дефинисати, а након тога и сачувати. Овде се уноси *ID Test order-a*, операција која се изводи и секвенца. Затим је потребно кликом на картицу *List* вратити се у листу где ће се проверити да ли се дефинисани тестни налог налази на њој. У оквиру ове картице налази се падајући подмени где је потребно изабрати картицу *Tests*, а затим у оквиру ње картицу *Detail* где је потребно дефинисати одређени поступак, оператера, секвенцу, вредност итд. Затим се кликом на картицу *List* и враћањем у листу проверава да ли се овај тест налази на њој. Након тога потребно је вратити се поново у *Products* тј. у листу са дефинисаним производима, где се поново означава врста одабраног производа за испитивање. У оквиру картице *Detail* производа који ће се тестирати, налази се падајући подмени где је потребно кликнути на картицу *Create Handling Unit for testing*. На тај начин се може одредити колико јединица се жели генерисати – у овом случају је вредност 1. Кликном на *Run* извршава се ова операција. Након тога на дну екрана се појављује зелена трака, што значи да је поступак успешно завршен. На слици 5 је приказано генерисање јединице за тестирање. На самом крају потребно је вратити се поново у листу циклуса испитивања тј. *Test Cycles*, где се види да је дефинисан и опис статуса теста. На слици 6 приказана је листа са дефинисаним описом статуса теста.



Слика 5. Генерисање јединице за тестирање

Test Cycle	Description	Color	Image	Test Cycle Status	Tests Status Descr.
T3	TEST			1	Checking
T3000000	PROBA			2	Approved
5000	Merjenje			1	Checking
5001	Merjenje			2	Approved
5002	Merjenje			0	Processing
5003	Merjenje			1	Checking
5004	Merjenje			2	Approved
5005	Merjenje			0	Processing
5006	Merjenje			1	Checking
5007	Merjenje			2	Approved
5008	Merjenje			0	Processing
5009	Merjenje			2	Approved
5010	Merjenje			1	Checking
5024	Ispitivanje			1	Checking
T104	Ispitivanje			1	Checking
9000	Experiment			2	Approved
T4				2	Approved
T7				2	Approved

Слика 6. Листа са дефинисаним описом статуса теста

Такође на слици 6 се може видети статус теста који има 3 стања: *Checking* (провера теста) тј. црвени квадратић, *Processing* (тест је у току процеса извршења) тј. бели квадратић и *Approved* (тест је одобрен) тј. зелени квадратић. Исто тако се види и опис и шифра испитиваних тестова.

У оквиру картице *Quality Checks* изабере се *Batches* и пратећи следеће кораке *List* па *Test order* па *List* па *Tests* па *List* добијају се резултати тестова. Сада се могу видети како су подаци о тестовима организовани у *Opera V.6*. На слици 7 се може видети да су поједини тестови прихваћени, поједини прихваћени након прегледа а поједини одобрени, а све то у задатом временском периоду. Такође тестови могу бити одбијени и могу се ставити у ред за тестирање. На основу грешке чија дозвољена вредност је претходно унета врши се генерализација за сваки појединачан тест као и преглед који оператер је извршио испитивање.

Color	Action	Result	Test	Test Sequence	Test Order	Batch	Operator	Name	Operator Dept	Dept. Descr	Operator Plant	Plant Descr	Fault	Date
Green	Approved				218000002	00000000	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/20/2020
Green	Approved				218000001	00000000	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		01/26/2018
Yellow	Passed after review				218000005	218000009	014	Amy	003	Painting Dept.	PLANT 1	Bike World		02/03/2018
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		05/29/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	01	05/29/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	06	05/29/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	15	05/29/2020
Green	Test		1300	30	218000001	00000000	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	02	05/29/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	04	05/29/2020
Green	Test		T2		T5	220000003	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	F3	06/02/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/02/2020
Green	Test				T5	220000003	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/02/2020
Green	Test		T2	0000001	220000026	220000037	00009	Petar	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/10/2020
Green	Test		T3	22224	218000004	218000008	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas	12	06/10/2020
Green	Test		101	888	218000004	218000008	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/10/2020
Green	Test		1100	10	218000001	00000000	00010	Milica	00001	Masinska radionica	Proizvodnja	Kompanija za mas		06/11/2020
Red	Test	Negative test	1300	30	218000001	00000000	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		01/26/2018
Red	Test	Negative test	1300	30	218000001	00000000	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		01/26/2018
Red	Test	Negative test	1300	30	218000001	00000000	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		01/26/2018
Red	Test	Negative test	102	40	218000004	218000008	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	14	02/01/2018
Red	Test	Negative test	103	50	218000004	218000008	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	13	02/01/2018
Red	Test	Negative test	101	40	218000004	218000008	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	15	02/01/2018
Red	Test	Negative test	102	40	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	14	02/03/2018
Red	Test	Negative test	103	50	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	13	02/03/2018
Red	Test	Negative test	1100	10	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		02/03/2018
Red	Test	Negative test	1200	20	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		02/03/2018
Red	Test	Negative test	1300	30	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World		02/03/2018
Red	Test	Negative test	103	50	218000006	218000011	013	Frank	005	Packing Dept.	PLANT 1	Bike World	13	02/03/2018
Red	Test	Negative test	102	40	218000006	218000011	009	Adam	004	Finishing Dept.	PLANT 1	Bike World	14	02/03/2018
Red	Test	Negative test	102	40	218000005	218000009	014	Amy	003	Painting Dept.	PLANT 1	Bike World	14	02/03/2018

Слика 7. Листа резултата серија тестова

Такође на слици 7 се може видети колико је укупно тестова употребљено за тестирање, затим број извршених тестова као и број тестова који тек треба да се изврши за одговарајући производ, што зависи од даљег одвијања процеса производње. То се види у оквиру картице *Quality Checks* након одабира *Handling unit* па затим команде *List*.

5. ЗАКЉУЧАК

За инжењере је од изузетног значаја да током образовања поред теоријских знања стекну свест о важности имплементације истих, било то да је реч о практичној или софтверској имплементацији.

У овом раду, може се уочити да се један релативно сложен процес за управљање, као што је управљање квалитетом, успешно моделира и имплементира у софтверу *Opera MES*. У овом софтверу могуће је имати увид у квалитет у било ком тренутку за било који производ унутар подсистема управљања квалитетом. При томе, могу се добити информације о квалитету веома брзо и то на основу података, односно критеријума које корисник софтвера жели или унесе. С обзиром да је тржиште све захтевније и да опстајање на тржишту превасходно зависи од квалитета производа, управљање квалитетом је од великог значаја. Да би се изашло у сусрет томе као и олакшала контрола производа, потребно је од предузећа креирати дигитално предузеће. Из тог разлога је неопходно моделирати демо фабрику, што је у овом раду и учињено, која обухвата све процесе и производе који се користе за креирање тестова.

Да би се креирали тестови на основу којих се испитује квалитет производа, било је неопходно дефинисати инструменте који се користе приликом самог тестирања производа, креирати мерне толеранције, затим креирати грешке које се могу појавити при тестирању, као и дефинисање самих тестова [2].

Quality Checks модул контролише квалитет производа на бази генерисаних тестова и плана тестирања

на основу кога се потом врши тестирање и отклањају се евентуалне грешке испитиваног производа. Овим модулом могуће је тестирати квалитет сировина, полупроизвода и финалних производа. Добијеним анализама резултата могуће је открити главни разлог дефектности производа и увести неку од корективних мера за побољшање квалитета производа и процеса. Као резултат испитивања квалитета за сваки производ добија се позитиван или негативан тест [2].

Будућа истраживања ће бити фокусирана на развој и интеграцију мерних протокола и прикупљање информација са радних-мерних места што ће омогућити не само планирање тестова већ и реално тестирање производа. На тај начин ће се омогућити један дигитални концепт управљања квалитетом из једног центра унутар фабрике или другог места са кога ће се пратити квалитет на даљину.

ЗАХВАЛНОСТ

Аутори се захваљују компанији Key-IT, Београд на донацији Opera MES софтвера као и подршци приликом инсталација и коришћења софтвера. Представена истраживања у овом раду је подржало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије по уговору бр. 451-03-68/2020-14/200105.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Упутство за коришћење софтвера *Opera V.6* - FullOperaManual.pdf
- [2] С. Стојадиновић, Менаџмент квалитетом - изводи са предавања, Машински факултет у Београду, 2018.
- [3] Тијана З. Д., Пројектовање и развој система за извршавање производње за мало предузеће, Мастер рад, Машински факултет у Београду, 2019.
- [4] Р. Пузовић, Производни информациони системи – изводи са предавања, Машински факултет у Београду, 2016.
- [5] Васиљевић П., Развој информационог подсистема за управљање квалитетом производа и имплементација у софтверу Opera MES, мастер рад (у изради), 2020.
- [6] Шћеповић М., Планирање контроле квалитета производа у софтверском систему за праћење производње, мастер рад (у изради), 2020.
- [7] Мајсторовић, В., Управљање квалитетом производа 1, Универзитет у Београду, Машински факултет.
- [8] Bovarnick E., Dobbins D. R., Methods and apparatus for providing a quality control management system, United States, May 3, 2000, GE Mortgage Holdings, LLC, Raleigh, NC (US).
- [9] Christer, A. H., Modelling the quality of automatic quality checks, Journal of the Operational Research Society, 1994, pp. 806-816.

Vasiljevic Petar, Scepovic Milos, Stojadinovic Slavenko, Puzovic Radovan

A PLANING OF PRODUCT QUALITY CONTROL IN OPERA MES SOFTWARE

Abstract: *Today's production systems require a high degree of flexibility, autonomy, interoperability and digital monitoring and production quality management where one of the key roles is played by production information systems and quality management. The paper presents the development and implementation of an information subsystem for product quality management using a software system for monitoring production, Opera V.6 with an emphasis on product testing planning. The modeled production system contains all the minimum necessary components for testing in the Quality Checks module of Opera V.6 software. Based on Opera V.6 software, the necessary quality data is reviewed in order to monitor the production of a factory, or the quality of its products. The software makes it much easier for users to manage a wide range of quality information with carefully designed interfaces designed as user-friendly. After defining the test order as well as defining the appropriate actions in order to conduct the test itself, a list of the status of each individual test as well as the compliance status is generated as an output, whether it is a positive or negative test. The paper was created as a result of research conducted in two master's theses to the quality management course.*

Key words: *Opera MES, production information systems, quality control, products testing*

ZAHVALNICA



Brza i efikasna
primena naučnih
znanja u industriji

LOLA INSTITUT

INMOLD

ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
IATF 16949:2016

INMOLD LTD Vojvode Mišića 5
31210 Požega, Serbia



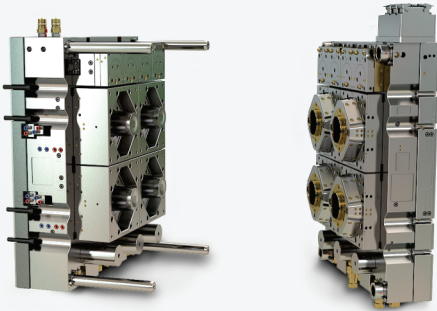
ultra slim

IML ROBOT

Driven by experience and innovation

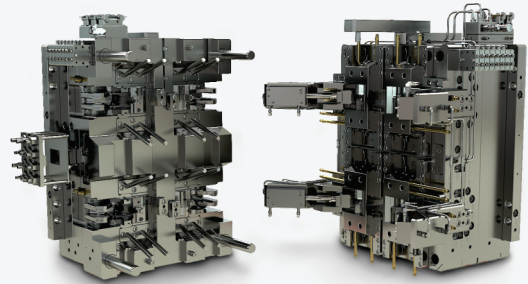
Packaging

Reliable and durable molds for highest quality production



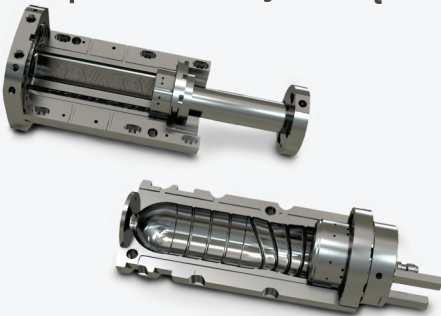
Technical components

Mold concept tailored to your requirements



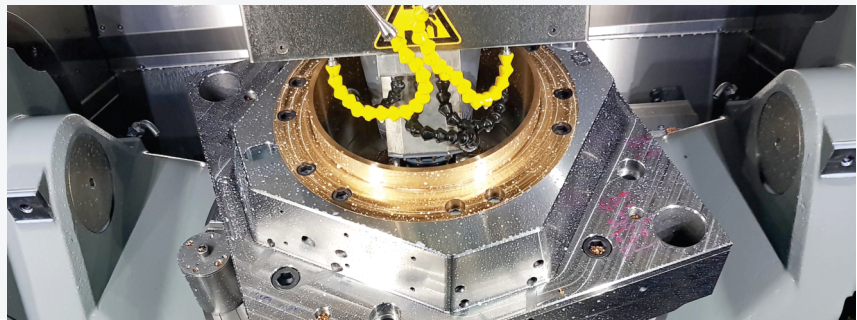
Blow-moulding

Mold concept tailored to your requirements



Machining

Modern machines and highly skilled personnel



Plastic injection

Modern machines and highly skilled personnel

www.inmold-ltd.com



Meusburger – „Postavljamo standarde“

Ono što je započelo kao samostalan posao 1964. godine je s vremenom izraslo u globalno aktivnu kompaniju. U sklopu Meusburger grupe nalazi se više kompanija koje svojim radom čine da smo u mogućnosti ponuditi kompletnu podršku za projekte iz raznih oblasti.



Naša ponuda proizvoda se konstantno širi za potrebe **izrade alata za brizganje plastike, deformacije lima, mašinogradnje i mašinske obrade**. Danas, pored visoko preciznih standardnih delova, radioničke opreme, toplih blokova i sistema za kontrolu toplih dizni, radimo i na metodama upravljanja znanja WBI i rešenja za efikasno korporativno upravljanje u području softvera ERP/PPS.

Konstantno radimo na obuci mladih kadrova. Naša radionica za praksu na površini od 2100 m² ima preko 60 modernih mašina za mašinsku obradu i 200 m² učionica, za kvalitetnu obuku preko 150 učenika godišnje.

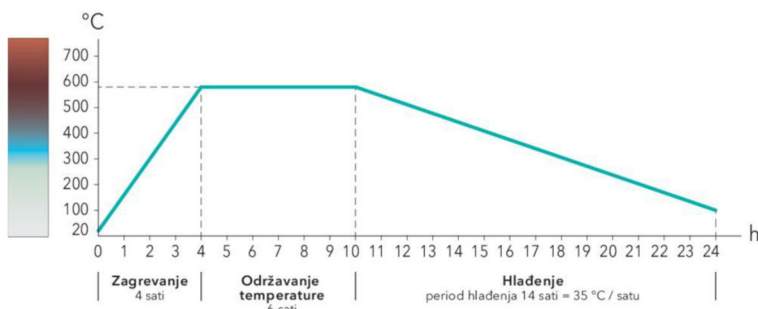


Meusburger Georg GmbH & Co KG
Kesselstr. 42, 6960 Wolfurt, Austria
M: +381 69 79 555 3
T: +43 5574 6706-0
F: +43 5574 6706-11
D.Zatezic@meusburger.com
www.meusburger.com

meusburger
SETTING STANDARDS

24 sata za žarenje

Kod nas se sve vrste čelika prvo podvrgnu žarenju pre dalje mašinske obrade. Postupak žarenja ublažava stres i zahteva upravo toliko vremena. U naše tri peći sa ukupnim dnevnim kapacitetom od 240 tona, prirodna napetost u materijalu smanjena je na minimum. Uspeh ovog procesa je u velikoj meri određen dugim periodom hlađenja od 14 sati (35°C/h). To osigurava ravnomerno hlađenje jezgra i površinske zone i na taj način sprečava stvaranje novih napona. Istovremeno, mikrostruktura i mehanička čvrstoća materijala ostaje nepromenjena. Ovo stvara optimalne uslove za obradu sa malim deformacijama i garanciju kraćeg vremena obrade usled manjeg potrebnog dodatka, kao i stabilniji i duži radni vek alata. Na kraju dobijamo proizvod visoke preciznosti.



Osnovne vrednosti kompanije Meusburger



Vrhunski **kvalitet i dugoročna pouzdanost** zasnovana na striktnim procedurama provere kvaliteta



Minimalne deformacije ploča prilikom dalje obrade kroz visoko kvalitetne čelike, žarene radi smanjenja unutrašnjih napona



Izvandredne usluge kompetentnog osoblja i veoma lako poručivanje



Kontinuirana dostupnost više od 96.000 artikala zahvaljujući najvećem centralizovanom skladištu standardnih delova



Kratki rokovi isporuke zahvaljujući optimalnim procesima i odličnoj logističkoj mreži



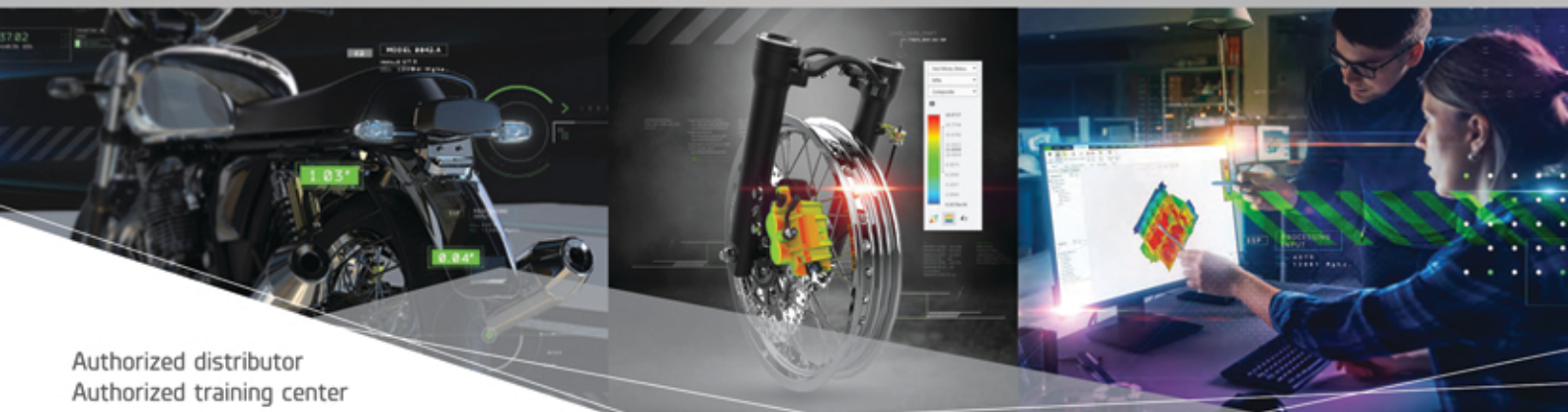
novi svet pred vama



R5_CORE_SMP
1374.84DRX



CPS - Cad Professional Systems d.o.o Vladimira Popovića 6/B2B, 11070 Novi Beograd, Srbija. t: +381 11 311 52 31 t/f: +381 11 311 54 59 www.cadpro.co.rs office@cadpro.co.rs



Authorized distributor
Authorized training center




CPS - CAD Professional Systems d.o.o.



Industrija 4.0 - Planiranje i praćenje proizvodnje u realnom vremenu

Simatic IT Preactor i Opera MES rešenja Vam omogućavaju da u realnom vremenu planirate – terminirate proizvodnju, nadgledate čitav proizvodni proces: od porudžbenice kupca, preko procesa proizvodnje, do isporuke gotovog proizvoda, uz kvalitetno praćenje informacija iz proizvodnje koje su Vam neophodne za upravljanje proizvodnim procesom i ostalim poslovanjem kompanije.

 **Simatic IT Preactor (Opcenter Scheduling), rešenje za planiranje – terminiranje proizvodnje u realnom vremenu omogućava**

- Optimizaciju i maksimalno iskorišćenje ljudskih i mašinskih resursa uz poštovanje planiranih rokova isporuke. Reterminiranje na osnovu povratnih informacija (u realnom vremenu) o napredovanju proizvodnje, statusu mašina i radnika, nabavljenom materijalu
- Planiranje unapred i unazad, uzimajući u obzir primarne i sekundarne resurse, planove nabavke i održavanja, rokove isporuke, prioritete porudžbine, neplanirane ispade i okolnosti
- Planiranje kako na strateškom (godišnjem, kvartalnom nivou) ili operativno (dnevnom, nedeljnom, mesečnom)
- Simulaciju plana proizvodnje, opterećenja kapaciteta, za željeni vremenski period, kako za realne planove proizvodnje tako i za eventualne porudžbine ili upite potencijalnih kupaca
- Pravovremenu informaciju o eventualnim problemima u proizvodnji iz ugla planera proizvodnje i daje mogućnost za njihovo prevazilaženje



Opera MES softver za praćenje proizvodnje u realnom vremenu

- Radnika na mašini: kalendar, trenutna aktivnost i struktura radnog vremena, produktivnost, kvalitet proizvoda, škart, odstupanje od normiranog vremena, zastoji...
- Mašina: kalendar, trenutni status (u radu, u pripremi, zastoje, redovno održavanje), raspoloživost, efikasnost, iskorišćenje mašine, očitavanje parametara sa mašine (status, aktivnost, broj obrtaja, takt, temperatura, pritisak) – integracija sa SCADA/PLC ... Upravljanje održavanjem (preventivnim i havarijskim)
- Materijala, poluproizvoda i gotovih proizvoda: označavanje, kretanje kroz proces proizvodnje (od magacina do mašine, od mašine do mašine, od mašine do magacina), sledljivost materijala i operacija (ko je, kada, od kog materijala, na kojoj mašini radio neku operaciju, pod kojim uslovima (režimima obrade, temperaturi), koliko vremena, koliko je uradio dobrih a koliko loših)
- Kvaliteta: upravljanje kontrolnim operacijama, evidentiranje i analiza rezultata kontrole, automatsko očitavanje parametara kvaliteta sa mašine kao i parametara procesa (temperatura, pritisak, brzina rada) sa mašina gde postoje tehničke mogućnosti (SCADA/PLC)
- Izveštavanje na različitim nivoima: mašine, linije mašina, odeljenja, pogona, proizvodnje.

U pomenuta softverska rešenja ugrađeno je višedecenijsko iskustvo u različitim industrijama (mašinska, elektro, prehrambena, farmaceutska, tekstilna, drvnoprerađivačka), što potvrđuje veliki broj implementacija širom sveta. Oba softvera se jednostavno integrišu sa ERP rešenjima (SAP, ORACLE, AX, NAV, SKALA,..., lokalna rešenja), i predstavljaju prirodnu nadgradnju na ERP.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

658.5:004.384(082)(0.034.2)
004.896(082)(0.034.2)
621.7/.9-52(082)(0.034.2)
007.52:658.5(082)(0.034.2)
005.6(082)(0.034.2)

ZBORNIK radova [Elektronski izvor] = Proceedings / [35. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala [i] 29. simpozijum CAD/CAM [i] 38. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 44. simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala [i] 22. simpozijum Menadžment kvalitetom [sve u okviru]] 42. Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem = 42nd Jupiter Conference with foreign participants, Beograd, oktobar 2020. ; [organizator] Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet = [organizer] University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2020 (Beograd : Planeta print). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Nasl. sa nasl. strane dokumenta. - Tekst ćir. i lat. - Tiraž 100. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-6060-055-6

1. Јупитер конференција са међународним учешћем (42 ; 2020 ; Београд) 2. Симпозијум CIM у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала (35 ; 2020 ; Београд) 3. Симпозијум CAD/CAM (29 ; 2020 ; Београд) 4. Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (38 ; 2020 ; Београд) 5. Симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала (44 ; 2020 ; Београд) 6. Симпозијум Менаџмент квалитетом (22 ; 2020 ; Београд)
а) CIM системи -- Зборници б) CAD/CAM системи -- Зборници в) Махине алатке -- Нумеричко управљање -- Зборници г) Роботи -- Зборници д) Флексибилни технолошки системи -- Зборници њ) Металоперађивачка индустрија -- Управљање -- Зборници е) Управљање квалитетом -- Зборници

COBISS.SR-ID 21917449

ISBN 978-86-6060-055-6



9 788660 600556 >