

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, oktobar 2024.

44. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



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

31. simpozijum
CAD/CAM

40. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

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

24. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Beograd, oktobar 2024. godine

44. 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

Za izdavača: Dekan, dr Vladimir Popović, red. prof.

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta i Dekan Mašinskog fakulteta

Odlukom br. 29/2024 od 24.09.2024.

Tehnički urednici:

Prof. dr Saša Živanović

Doc. dr Miloš Pjević

Doc. dr Dušan Nedeljković

Lazar Matijašević, mast. inž. maš.

Beograd, oktobar 2024.

Tiraž: 100 primeraka

Štampa: **Planeta print,**

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

ISBN 978-86-6060-204-8

44. JUPITER KONFERENCIJA

PROGRAMSKI I NAUČNI ODBOR

Predsednik:

Prof. dr Zoran Miljković, MF Beograd

Članovi: Prof. dr Slavko Arsovski, FIN Kragujevac • Prof. dr Aco Antić, FTN Novi Sad • Prof. dr Pavao Bojanić, MF Beograd • Prof. dr Božica Bojović, MF Beograd • Prof. dr Nikolai I. Bobir (Ukrajina) • Stevo Borojević (RS, BiH) • Prof. dr Konstantin D. Bouzakis (Grčka) • Prof. dr Radomir Vukasojević (Crna Gora) • Prof. dr Đorđe Vukelić, FTN Novi Sad • Prof. dr Milan Vukčević (Crna Gora) • Prof. dr Miloš Glavonjić, MF Beograd • dr Zoran Dimić, LI, Beograd • Prof. dr Kornel Ehmann (SAD) • Prof. dr Saša Živanović, MF Beograd • Prof. dr Milan Zeljković, FTN Novi Sad • Prof. dr Živana Jakovljević, MF Beograd • Prof. dr Vid Jovišević (RS, BiH) • Prof. dr Simo Jakanović, (RS, BiH) • Prof. dr Milisav Kalajdžić, MF Beograd • Akad. Prof. dr Isak Karabegović (BiH) • Prof. dr Radovan Kovačević (SAD) • Prof. dr Pavel Kovač, FTN Novi Sad • Prof. dr Milija Krajišnik, (RS, BiH) • Prof. dr Sergey A. Klimenko (Ukrajina) • Prof. dr Zbigniew Kulesza (Poljska) • Prof. dr Miodrag Lazić, FIN Kragujevac • Prof. dr Ljubomir Lukić, MF Kraljevo • dr Srećko Manasijević, LI, Beograd • Prof. dr Miodrag Manić, MF Niš • Prof. dr Dragan Milutinović, MF Beograd • Prof. dr Zoran Miljković, MF Beograd • Prof. dr Peter P. Melnichuk (Ukrajina) • Prof. dr Radivoje Mitrović, MF Beograd • Prof. dr Goran Mladenović, MF Beograd • Prof. dr Nicolae Negut (Rumunija) • Prof. dr Bogdan Nedić, FIN Kragujevac • Prof. dr Miroslav Pajić (SAD) • Prof. dr Petar Petrović, MF Beograd • Prof. dr Milica Petrović, MF Beograd • Prof. dr Miroslav Pilipović, MF Beograd • Prof. dr Mihajlo Popović, MF Beograd • Prof. dr Radovan Puzović, MF Beograd • Prof. dr Goran Putnik (Portugalija) • Prof. dr Saša Randelović, MF Niš • Prof. dr Sreten Savićević (Crna Gora) • Prof. dr Nikola Slavković, MF Beograd • Prof. dr Slavenko Stojadinović, MF Beograd • Prof. dr Mirko Soković (Slovenija) • Prof. dr Victor K. Starkov (Rusija) • Prof. dr Ljubodrag Tanović, MF Beograd • Prof. dr Slobodan Tabaković, FTN Novi Sad • Prof. dr Velimir Todić, FTN Novi Sad • Prof. dr Miroslav Trajanović, MF Niš • Prof. dr Milan Trifunović, MF Niš • Prof. dr Ilija Ćosić, FTN Novi Sad • Prof. dr Miodrag Hadžistević, FTN Novi Sad • dr Rodolfo Haber (Španija) • dr Nebojša Čović, Beograd

ORGANIZACIONI ODBOR

Predsednik: Prof. dr Saša Živanović, MF Beograd

Sekretar: Doc. dr Miloš Pjević, MF Beograd

Članovi: Doc. dr Dušan Nedeljković, MF Beograd • Asist. Nikola Vorkapić, MF Beograd • Asist. Lazar Matijašević, MF Beograd • Asist. Aleksandar Jokić, MF Beograd • Asist. Bogdan Momčilović, MF Beograd • Đorđe Jevtić, istraživač pripravnik • Katarina Brenjo, istraživač pripravnik

ZAHVALNICA

Organizacioni odbor **44. JUPITER KONFERENCIJE** se najsrdačnije zahvaljuje svim institucijama i pojedincima koji su ličnim angažovanjem i konstruktivnim delovanjem pomogli u organizovanju ove konferencije, a posebno se zahvaljujemo pokroviteljima:



Република Србија

МИНИСТАРСТВО НАУКЕ,
ТЕХНОЛОШКОГ РАЗВОЈА И ИНОВАЦИЈА

Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija
Vlade Republike Srbije

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

 **LOLA INSTITUT**

Istraživačko razvojni institut LOLA d.o.o.

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

GRUNDFOS 

“Grundfos” Srbija d.o.o.

<https://www.grundfos.com/rs>



Metalac A.D.

<https://www.metalac.com/>

MING
FORGING AND MACHINING

MING KOVAČNICA A.D.

<https://mingbgd.com/>

 **CPS** CAD
Professional
Systems

CPS-CAD Professional Systems d.o.o.

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

 AXIOM TECH
AXIOM TECH d.o.o.

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

SERVOTEH
SERVOTEH d.o.o

<http://www.servoteh.rs/>



HAHN+KOLB d.o.o.

<https://www.hahn-kolb.rs/>

PREDGOVOR

U cilju naučne i stručne verifikacije rezultata istraživačkih projekata i određivanja budućih pravaca razvoja JUPITER sistema, pre 49 godina pokrenuta je i JUPITER Konferencija kao naučno-stručni skup članova Zajednice i drugih činilaca industrije prerade metala, naučno istraživačkih institucija i fakulteta. Prva JUPITER konferencija je održana u Miločeru, od 17. do 20. februara 1975. godine. JUPITER predstavlja akronim za: Jedinostveno Upravljanje Proizvodnim I TEhnoškim Resursima.

JUPITER Konferencija i danas nastavlja tradiciju i prikazuje značajne rezultate istraživanja ostvarene u prethodne dve godine. Ovogodišnja 44. JUPITER Konferencija je prilika da se sagledaju trendovi u domenu nauke, obrazovanja i industrije u Republici Srbiji u kontekstu aktuelnog koncepta Industrija 4.0.

Osnovni ciljevi 44. JUPITER konferencije su ostvareni kroz razmenu iskustava između predstavnika privrede i akademske zajednice, definisanje stanja istraživanja u oblasti proizvodnog mašinstva, i odedivanje pravaca daljih istraživanja i razvoja u cilju podizanja tehnološkog nivoa zemlje i stvaranja preduslova za pokretanje postojećih tehnoloških kapaciteta i uvođenje novih tehnologija. 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 kibernetiko-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.

Na 44. JUPITER Konferenciji su predstavljeni novi rezultati istraživanja i razvoja u oblastima inteligentnih tehnoloških sistema, kompjuterski integrisanih tehnologija, CAD/CAM sistema, CNC tehnologija, robotike, fleksibilnih tehnoloških sistema, primene informacionih tehnologija u upravljanju proizvodnjom, menadžmenta kvalitetom itd. Neophodno je intenziviranje saradnje između akademskih institucija i proizvodnih subjekata kako bi se ostvario napredak u teoriji i praksi. Identifikovani su glavni trendovi u proizvodnom mašinstvu danas. Prezentirani rezultati istraživanja iz svih oblasti proizvodnog mašinstva predstavljaju značajan doprinos kontinuiranom razvoju nauke i prakse u domenu proizvodnog mašinstva.

Na Konferenciji će biti izloženo 39 radova autora iz Srbije i inostranstva. Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Lola institut, “Grundfos” Srbija d.o.o, Metalac A.D, MING KOVAČNICA A.D, CPS-CAD Professional Systems d.o.o, AXIOM TECH d.o.o, SERVOTEH d.o.o. i HAHN+KOLB d.o.o. su pomogli organizovanje ove konferencije kao podršku naporima za unapređenje obrazovanja i nauke u oblasti proizvodnog mašinstva. U ime organizacionog odbora posebno se zahvaljujem pokroviteljima, svim domaćim i stranim autorima, kao i članovima recenzentskog tima na izvršenim recenzijama.

Dobro došli na 44. JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 16. oktobar 2024.

Prof. dr Saša Živanović

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

Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B., Marković, J., Čulum, M. PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKOG PROCESA PRIMJENOM GRUPNE TEHNOLOGIJE	4.1
Brenjo, K., Jevtić, Đ., Jokić, A., Petrović, M.M., Miljković, Z. INTELIGENTNI TEHNOLOŠKI SISTEMI I PROCESI - NOVI PRAVCI RAZVOJA INTELIGENTNO-VIZUELNOG UPRAVLJANJA MOBILNOG ROBOTA-LETELICE I OPTIMALNO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA U DINAMIČKIM USLOVIMA	3.14
Dorđević, V., Karić, M., Erić Obućina, J. OCENA SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA NA PRIMERU ZUPČANIK.....	4.8
Erić Obućina, J., Karić, M., Djordjević, V. PRIMENA STANDARDA ZA RAZMENU GRAFIČKIH INFORMACIJA U 3D MODELIRANJU HIDRAULIČKOG SERVOUPRAVLJAČA	2.7
Gegić, M. PLATFORMA ISO 9001:2015 I JEDAN MODEL PROJEKTOVANJA ZA KVALITET U METALOPRERAĐIVAČKOJ INDUSTRIJI	5.13
Jotić, M., Popović, M., Pjević, M., Bojović, B. PRIKAZ ADITIVNE TEHNOLOGIJE EKSTRUDIRANJEM MATERIJALA ZA IZRADU DELOVA OD KOMPOZITA	2.19
Jovičić, A., Ikodinovic, M., Baralić, J., Mitrović, A., Nikitović, A. PRIMENA CAD/CAE/CAM SISTEMA PRI LIVENJU ODLIVAKA U PESKU.....	2.13
Košarac, A., Zeljković, M., Tabaković, S. PRIMJENA MAŠINSKOG UČENJA ZA PREDIKCIJU HRAPAVOSTI OBRADENE POVRŠINE PRI OBRADI GLODANJEM BOKOMPATIBILNE LEGURE TITANIJUMA TI-6AL-4V	1.11
Krezovic, N., Bojović, B., Pjević, M., Popović, M. PROJEKTOVANJE I IZRADA OKVIRA BESPILOTNE LETELICE PRIMENOM GENERATIVNOG DIZAJNA I ADITIVNIH TEHNOLOGIJA	2.25
Lazarević, N., Anđelić, K., Lazić, A., Popović M., Pjević, M., Milovanović, A. UTICAJ PROMENE PARAMETARA NA MEHANIČKA SVOJSTVA PROIZVODA DOBIJENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA	2.31
Darko Lovrec, Željko Šitum, Vito Tič DEVELOPMENT OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT FOR REMOTE CONTROL APPLICATION	3.1
Lukić, D., Milošević, M., Đurđev, M., Božić, D., Obradović, P. OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADJE PROIZVODA PRIMENOM PRAVILA PRETHOĐENJA I SIMULACIONE TEHNIKE.....	1.1
Majstorović, M., Bojović B., Mladenović G., Golubović Z. INTEGRACIJA ADITIVNE TEHNOLOGIJE I MEHANIČKE ANALIZE ZA EPRUVETU AUKSETIČKE STRUKTURE	2.38
Majstorović, V. 75. GODINA PROIZVODNE METROLOGIJE NA MAŠINSKOM FAKULTETU U BEOGRADU.....	5.27
Maletić, J., Živanović, S., Popović, M., Puzović, R. SIMULACIJA PROCESA OBRADJE SKULPTORSKIH POVRŠINA NA MAŠINAMA SA HORIZONTALNOM OBRTNOM OSOM.....	3.24
Matijašević, L., Jakovljević, Ž. FLEKSIBILNI ROBOTSKI HVATAČI U INDUSTRIJSKOM OKRUŽENJU – PREGLED POSTOJEĆIH MEHANIČKIH STRUKTURA	3.38

Matin, I., Štrbac, B., Ranisavljev, M., Vukelić, Đ., Hadžistević, M. THE ADVANCED SYSTEM FOR DETERMINING THE DEVIATION OF PLASTIC INJECTED MOLDED PARTS	5.21
Milutinović, M., Dačević, B., Stefanović, Lj, Panić, M., Movrin, D. UTICAJ MODELA TRENJA NA TAČNOST REZULTA NUMERIČKIH SIMULACIJA U PROCESU KOMBINOVANOG ISTISKIVANJA	2.44
Момчиловић, Б., Славковић, Н., Воркапић, Н., Живановић, С. ПРОТОТИП ИНДУСТРИЈСКОГ РОБОТА SCARA КОНФИГУРАЦИЈЕ	3.30
Movrin, D., Pjević, M., Popović, M., Milutinović, M. ADITIVNE TEHNOLOGIJE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE PROCESA INJEKCIJONOG PRESOVANJA	2.1
Nešovanović, Lj., Živanović, S., Popović, M. SIMULACIJA RADA TROOSNOG MEHANIZMA SA PARALELNOМ KINEMATIKOM NA BAZI MEHANIZMA ČEBIŠEVA	3.49
Rejčić, D., Mišković, Ž., Popović, M., Pjević, M., Mitrović, R., Magdolen L., Danko J. PROCENA RIZIKA ADITIVNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA PRIMENOM KINIJEVE METODE	2.52
Путник, Г. ВИРТУАЛИЗАЦИЈА ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА: ЈЕДНА ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛИЗАЦИЈЕ ПРОИЗВОДЊЕ. ОД РАЧУНАРСТВА И ПРОИЗВОДА ДО СИСТЕМА, ПРЕДУЗЕЋА И ДРУШТВА	UR.1
Радовановић, С., Стојадновић, С. ПРОЈЕКТОВАЊЕ, ОБРАДА И ИНСПЕКЦИЈА ГЕОМЕТРИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА КВАЛИТЕТА КУЋИШТА РУЧНОГ САТА	5.44
Randelović, S., Mladenović, S., Arandelović, J., Kostić, N., Zorić, A., Trajković Milenković, M. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ПРОЦЕСА ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА СЛОЖЕНИХ НЕРОТАЦИОНИХ ЕЛЕМЕНАТА	UR.23
Ranisavljev, M., Štrbac, B., Matin, I., Hadžistević, M., Runje, B., Horvatić Novak, A. PREGLED RAZLIČITIH ARTEFAKATA KOJI SE POJAVLJUJU U KOMPJUTERSKOJ TOMOGRAFIJI	5.53
Šibalić, N., Milatović, V. MJERENJE NIVOА OSVJETLJENJA NA RADNOM MJESTU	5.67
Spasojević Brkić, V., Perišić, M., Papić, N., Janev, N., Čosović, E. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U ANALIZI BEZBEDNOSNIH I ERGONOMSKIH ASPEKATA KABINA RUDARSKIH MAŠINA	1.22
Stanojković, J., Madić, M., Lazarević D. COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING FORCE PREDICTION MODELS	3.55
Stepanović M., Živković S., Malbašić S. INSPEKCIЈА ГЕОМЕТРИЈЕ ВАКАРНИХ ОТКОВАКА КУМУЛАТИВНЕ БОЈЕВЕ ГЛАВЕ РАКЕТЕ „МАЛЈУТКА“	5.61
Stojadinović, S., Živanović, S., Marjanović, M. INTEROPERABILNOST PODACIMA I DIGITALNI MERNI BLIZANCI U KOORDINATNOJ METROLOGIJI	5.1
Suvajac, Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž. UPOREDNA ANALIZA ALGORITAMA ZA DETEKCIЈU POZICIЈE I ORIJENTACIЈE OBJEKATA U OKVIRU SISTEMA VEŠTAČKOG GLEDANJA	3.61
Tabaković, S., Zeljković, M. DIGITALIZACIЈА МАШИНА АЛАТКИ – МОГУЋНОСТИ I PRIMENA U REPUBLICI SRBIJI	UR.5
Tič, V., Benić, J. REMOTE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT USING BECKHOFF SOFT- PLC	3.7
Todorović P., Mačuzić I., Savković M. MODERNIZACIЈА ПРОИЗВОДНЕ ОПРЕМЕ U MSP KROZ INTEGRACIЈU NAPREDNIH REŠENJA UPRAVLJAČKE ELEKTRONIKE	3.71

Trajković, A., Turudija, R., Arandelović, J., Stojković, M., Vitković, N. OPTIMIZACIJA PROCESA STRUGANJA PRIMENOM METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA: PIV I RAM METODE	1.30
Trifunović, M., Madić, M., Janković, P. DEVELOPMENT OF EMPIRICAL MODEL FOR ANALYSIS OF CHIP COMPRESSION RATIO IN MEDIUM TURNING OF C45E	3.77
Vasilic, G., Živanović, S., Milutinović, M., Dimić, Z. KONCEPT KOMPLEKSNE REDUDANTNE MAŠINE ALATKE NAMENJENE ZA PROCES OBRADJE SEČENJA ŽICOM	3.83
Vorkapić, M., Ilić, S., Spasenović, M., Vasić, M. PRIMENA 8R STRATEGIJE U REALIZACIJI NOSIVIH SENZORA	2.58

SPISAK AUTORA
LIST OF AUTHORS

ANĐELIĆ, K.	LOVREC, D.	PUZOVIĆ, R.
ARANĐELOVIĆ, J.	LUKIĆ, D.	RADOVANOVIĆ, S.
BARALIĆ, J.	MAČUŽIĆ, I.	RANĐELOVIĆ, S.
BENIĆ, J.	MADIĆ, M.	RANISAVLJEV, M.
BOJOVIĆ, B.	MAGDOLEN, L.	RUNJE, B.
BOROJEVIĆ, S.	MAJSTOROVIĆ, M.	SAVKOVIĆ, M.
BOŽIĆ, D.	MAJSTOROVIĆ, V.	ŠIBALIĆ, N.
BRENJO, K.	MALBAŠIĆ, S.	ŠITUM, Ž.
ČIČA, Đ.	MALETIĆ, J.	SLAVKOVIĆ, N.
ĆOSOVIĆ, E.	MARJANOVIĆ, M.	SPASENOVIĆ, M.
ĆULUM, M.	MARKOVIĆ, J.	SPASOJEVIĆ BRKIĆ, V.
DAČEVIĆ, B.	MATIJAŠEVIĆ, L.	SREDANOVIĆ, B.
DANKO J.	MATIN, I.	STANOJKOVIĆ, J.
DIMIĆ, Z.	MILATOVIĆ, V.	STEFANOVIĆ, LJ.
ĐORĐEVIĆ, V.	MILJKOVIĆ, Z.	STEPANOVIĆ, M.
ĐURĐEV, M.	MILOŠEVIĆ, M.	STOJADINOVIĆ, S.
ERIĆ OBUĆINA, J.	MILOVANOVIĆ, A.	STOJKOVIĆ, M.
GEGIĆ, M.	MILUTINOVIĆ, M.	ŠTRBAC, B.
GOLUBOVIĆ, Z.	MIŠKOVIĆ, Ž.	SUVAJAC, Ž.
HADŽISTEVIĆ, M.	MITROVIĆ, A.	TABAKOVIĆ, S.
HORVATIĆ NOVAK, A.	MITROVIĆ, R.	TIČ, V.
IKODINOVIC, M.	MLADENOVIĆ, G.	TODOROVIĆ, P.
ILIĆ, S.	MLADENOVIĆ, S.	TRAJKOVIĆ, A.
JAKOVLJEVIĆ, Ž.	MOMČILOVIĆ, B.	TRAJKOVIĆ-MILENKOVIĆ, M.
JANEV, N.	MOVRIN, D.	TRIFUNOVIĆ, M.
JANKOVIĆ, P.	NEDELJKOVIĆ, D.	TURUDIJA, R.
JEVTIĆ, Đ.	NEŠOVANOVIĆ, LJ.	VASIĆ, M.
JOKIĆ, A.	NIKITOVIĆ, A.	VASILIĆ, G.
JOTIĆ, M.	OBRADOVIĆ, P.	VITKOVIĆ, N.
JOVIČIĆ, A.	PANIĆ, M.	VORKAPIĆ, M.
KARIĆ, M.	PAPIĆ, N.	VORKAPIĆ, N.
KOŠARAC, A.	PEJČIĆ, D.	VUKELIĆ, Đ.
KOSTIĆ, N.	PERIŠIĆ, M.	ZELJKOVIĆ, M.
KREZOVIC, N.	PETROVIĆ, M.M.	ŽIVANOVIĆ, S.
LAZAREVIĆ, D.	PJEVIĆ, M.	ŽIVKOVIĆ, S.
LAZAREVIĆ, N.	POPOVIĆ M.	ZORIĆ, A.
LAZIĆ, A.	PUTNIK, G.	

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



UVODNI RADOVI

Beograd, oktobar 2024.

UVODNI RADOVI
INTRODUCTORY PAPERS

Путник, Г. ВИРТУАЛИЗАЦИЈА ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА: ЈЕДНА ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛИЗАЦИЈЕ ПРОИЗВОДЊЕ. ОД РАЧУНАРСТВА И ПРОИЗВОДА ДО СИСТЕМА, ПРЕДУЗЕЋА И ДРУШТВА.....	UR.1
Tabaković, S., Zeljković, M. DIGITALIZACIJA MAŠINA ALATKI – MOGUĆNOSTI I PRIMENA U REPUBLICI SRBIJI	UR.5
Randelović, S., Mladenović, S., Arandelović, J., Kostić, N., Zorić, A., Trajković Milenković, M. PROJEKTOVANJE PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA SLOŽENIH NEROTACIONIH ELEMENATA.....	UR.23





Путник, Г. Д.¹⁾

ВИРТУАЛИЗАЦИЈА ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА: ЈЕДНА ТЕХНОЛОГИЈА ДИГИТАЛИЗАЦИЈЕ ПРОИЗВОДЊЕ *Од рачунарства и производа до система, предузећа и друштва*

Резиме

Виртуализација почиње (у инжењерству) у рачунарству пошто је препозната као „појединачно најефективнији начин за смањење трошкова ИТ-а док снажно утиче на повећање ефикасности и агилности предузећа свих величина“ [1]. Иако се технологија виртуелизације (у ИТ-у) јавља још од 1960-их, није била широко прихваћена све до раних 2000-их [2].

Постоји низ дефиниција. Нпр. у колоквијалном језику виртуелизација значи „процес промене нечега што постоји у реалном облику у виртуелну верзију (= ону која је креирана помоћу рачунара)“ [3], која у свом корену има „виртуелно“. Нпр. у рачунарској науци „Виртуализација је процес који омогућава ефикасније коришћење физичког рачунарског хардвера и представља основу рачунарства у облаку“ [4], или „Виртуализација, у свом најширем смислу је емулација једне или више радних станица/сервера, унутар једног физичког рачунара. Другим речима, то је емулација хардвера унутар софтверске платформе“ [5].

Такође, „Виртуализација користи софтвер за креирање апстрактног нивоа преко рачунарског хардвера који омогућава да се хардверски елементи једног рачунара – процесори, меморија, складиште и још много тога – поделе на више виртуелних рачунара, који се обично називају виртуелне машине (ВМ). Свака ВМ покреће сопствени оперативни систем (ОС) и понаша се као независни рачунар, иако ради само на делу стварног основног рачунарског хардвера. Најједноставније речено, виртуелна машина (ВМ) је виртуелна репрезентација физичког рачунара [6].

Што се тиче структуре предавања, предавање почиње представљањем принципа виртуелизације у рачунарским наукама, заједно са неким дефиницијама. Након тога, представљена је виртуелизација производних система на основу приступа да се концепти виртуелизације креирани у рачунарству примењују на цео свет производних система, од производа до система, предузећа и друштва.

Виртуелизација је основа многих концепата и многи термини су сковани: виртуелна/дигитална машина алатка, виртуелна/дигитална фабрика, виртуелна/дигитална производња, виртуелна интелигентна/оптимална аутоматизација, виртуелна реалност, проширена стварност, дигитални близанац, виртуелни агент, виртуелно окружење, виртуелна организација, виртуелно предузеће, облак,...

За презентацију виртуелизације у производним системима, усвојени приступ прати „хијерархију“ концепата, почевши од производа, следећи ниво система, затим ниво предузећа и на крају ниво друштва. Док се апликације за производе и машине кратко помињу, за које је једна манифестација данас популарна деноминација дигитални близанац (ДБ) (Digital Twin - DT), више пажње се придаје нивоу система и предузећа.

Виртуелизација предузећа, односно питање „виртуелног предузећа“ може се схватити као апстракција надструктуре која подразумева сам производни систем, односно производни систем се може посматрати као подсистем. Апстрактно, када се користи формализација система, односно предузећа, не можемо разликовати машину алатку или пословног агента који се посматрају као сервери. На предавању су представљени и неки модели формализације виртуелизације система и предузећа. Као један конкретни виртуелни модел система/предузећа представљен је оригинални „БМ_Референтни Модел Архитектуре Виртуалног Предузећа“ (БМ_BEAPM) (BM_Virtual Enterprise

¹⁾ проф. др Горан Д. Путник, Центар АЛГОРИТМИ, Школа Инжењерства, Универзитет Мињо, Португалија, (Centro ALGORITMI, School of Engineering, Universidade do Minho, Portugal) (putnikgd@dps.uminho.pt)

Architecture Reference Model - VM_VEARМ) [7] (чији је развој започео већ на Машинском факултету у Београду, непосредно пре одласка аутора на Универзитет Мињо), а који је био основа бројних докторских пројеката на Универзитету Мињо.

На крају, предавање представља неке аспекте виртуелизације у вези са друштвом.

Као закључак, могло би се рећи да је виртуелизација моћан алат за побољшање бројних показатеља перформанси, као што су агилност, флексибилност, скалабилност, прецизност, уштеда оперативних трошкова, смањење застоја, повећање отпорности, повећање ефикасности и продуктивности, независност контроле, еколошки прихватљивији (организациони и еколошки) итд.

Додатно, и веома важно, виртуелизација је један од неколико основних инструмената Индустрије 4.0 (И4.0). У практично било којој шеми која представља главне „стубове“ И4.0, најмање два од њих су повезана са виртуелизацијом. (Иако „облак“ и „виртуелизација“ нису технички једнаки, у ствари, нема употребе „облака“ без неке врсте виртуелизације).

Виртуелизација се данас користи много пута у облицима које истраживачи и крајњи корисници не перципирају. Дакле, ово би се могло назвати неком врстом „мирне технологије“. У том контексту, вероватно је да виртуелизација још увек није искоришћена у пуном потенцијалу, или би се, у најмању руку, могло рећи да има још доста неискоришћеног потенцијала.

На крају, потребно је рећи да је питање технологије виртуелизације представљено само са такозваног технолошког, „сајбер-“ становишта, а не са становишта хуманистичких наука, што је посебно питање.

Кључне речи: Производни системи, Виртуелизација, Дигитализација производње

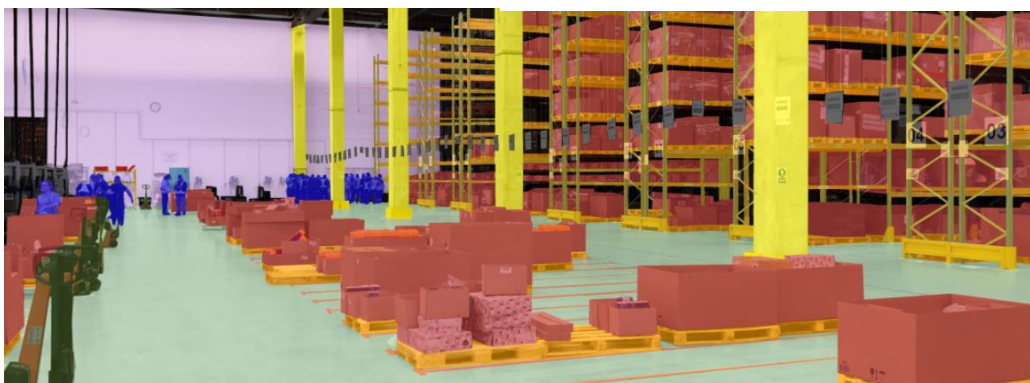
<https://www.sparkinnovations.com/how-virtual-reality-is-making-a-difference-for-product-design/>



Collaborative investigation of the simulated environment [8]



<https://stock.adobe.com/pt/images/industrial-factory-chief-engineer-wearing-ar-headset-designs-a-prototype-of-an-electric-motor-on-the-holographic-projection-blueprint-futuristic-virtual-design-of-mixed-technology-application/305628750>





Virtual Factory (<http://www.vrlab.buffalo.edu>)

(Извор изабраних фотографија за илустрацију виртуализације: Интернет)

LITERATURA

- [1] <https://www.vmware.com/solutions/virtualization.html>
- [2] <https://www.redhat.com/en/topics/virtualization/what-is-virtualization>
- [3] Cambridge Dictionary (n.d. a) Virtualization. In dictionary.cambridge.org. Retrieved August 2922. from <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/virtualization>
- [4] IBM Cloud Learn Hub (n.d. b) Virtual Machines. Retrieved August 2022. From <https://www.ibm.com/cloud/learn/virtual-machines>
- [5] Blokdijk, G.: Virtualization-The Complete Cornerstone Guide to Virtualization Best Practices: Concepts, Terms, and Techniques for Successfully Planning, Implementing and Managing Enterprise IT Virtualization Technology. Emereo Publishing, 2012.
- [6] IBM Cloud Learn Hub (n.d. a) Virtualization. Retrieved August 2022. From <https://www.ibm.com/cloud/learn/virtualization-a-complete-guide>
- [7] Putnik, G. D.: BM_virtual enterprise architecture reference model. *Agile manufacturing: 21st century manufacturing strategy*, Elsevier, pp 73-93, 2001.
- [8] Dorozhkin, D.-V., Vance, J.-M., Rehn, G.-D., Lemessi, M. (2012), Coupling of interactive manufacturing operations simulation and immersive virtual reality. *Virtual Reality*, 16:15-23.

Putnik, G. D.

VIRTUALIZATION OF PRODUCTION SYSTEMS: A TECHNOLOGY FOR DIGITALIZATION OF PRODUCTION *From computation and product to system, enterprise and society*

Abstract

The virtualization starts (in engineering) in computation as it is recognised that is “the single most effective way to reduce IT expenses while boosting efficiency and agility for all size businesses.” [1]. While virtualization technology (in IT) can be sourced back to the 1960s, it wasn’t widely adopted until the early 2000s [2].

There is number of definitions. E.g. in colloquial language virtualization means “the process of changing something that exists in a real form into a virtual version (= one that is created using a computer)” [3], having in its root “virtual”. E.g. in computer science “Virtualization is a process that allows for more efficient

utilization of physical computer hardware and is the foundation of cloud computing” [4], or “Virtualization, in its broadest sense is the emulation of one or more workstations/servers, within a single physical computer. In other words, it is the emulation of hardware within a software platform.” [5].

Also, “Virtualization uses software to create an abstraction layer over computer hardware that allows the hardware elements of a single computer—processors, memory, storage and more—to be divided into multiple virtual computers, commonly called virtual machines (VMs). Each VM runs its own operating system (OS) and behaves like an independent computer, even though it is running on just a portion of the actual underlying computer hardware.” In the simplest terms possible, a virtual machine (VM) is a virtual representation of a physical computer [6].

Concerning the structure of the lecture, the lecture starts with the presentation of the virtualization principles in the computer sciences, together with the some definitions. After that, the virtualization in production system is presented based on the approach that the concepts of virtualization created in computer science are applied to entire world of the production systems, from product to system, enterprise and society.

Virtualization is the basis of many concepts, and many terms are coined: virtual/digital machine tool, virtual/digital factory, virtual/digital manufacturing, virtual intelligent/optimal automation, virtual reality, augmented reality, digital twin, virtual agent, virtual environment, virtual organisation, virtual enterprise, cloud, ...

For the presentation of virtualization in production systems, the approach adopted follows the “hierarchy” of the concepts, starting from products, following the level of system, then the level of enterprise and at the end the level of society. While the applications to products and machines are shortly referred, for which one manifestation is nowadays popular Digital Twin (DT) denomination, the more attention is given to the level of system and enterprise.

The virtualization of an enterprise, i.e. the issue of “virtual enterprise” could be understood as an abstraction of a super-structure that implies the manufacturing system itself, i.e. the manufacturing system could be seen as a sub-system. Abstractly, when use a formalization of the system, or enterprise, we can not distinguish between the machine tool or business agent seen as a server. The lecture presents as well some models of formalization of virtualization of systems and enterprises. The specific virtual system/enterprise model presented is the original “BM_Virtual Enterprise Architecture Reference Model” (BM_VEARM) [7] (whose development started already at the Faculty of Mechanical Engineering, in Belgrade, just before the author’s leaving for the University of Minho), and which was the basis of a number of PhD projects at the University of Minho.

Finally, the lecture presents some aspects of virtualization related to society.

As conclusion, it could be said that the virtualization is a powerful tool for improving a number of performance indicators, such as agility, flexibility, scalability, precision, operating cost savings, reducing downtime, enhancing resiliency, increasing efficiency and productivity, control independence, more green-friendly (organizational and environmental), etc.

Additionally, and very important, virtualization is one of few basic instruments of Industry 4.0 (I4.0). In virtually any of the scheme representing the main “pillars” of I4.0, at least two of these are related to virtualization. (Although “cloud” and “virtualization” are not equal technically, in fact, no use of “cloud” without some type of virtualization).

The virtualization today, is used many times in forms not perceived by researchers and end users. So, these could be called a kind of “calm technology”. In that context, it is likely that virtualization still is not used in its full potential, or, at least, it could be said that there is still a lot of unexploited potential.

Finally, it is necessary to say that the issue of virtualization technology is presented only from a so-called technological, “cyber-“, view and not from the human sciences view, which is a particular issue.

(Source of the selected photos for illustration of virtualization: Internet)

Keywords: Production Systems, Virtualization, Digitalization of manufacturing

Tabaković, S.¹, Zeljković, M.²**DIGITALIZACIJA MAŠINA ALATKI – MOGUĆNOSTI I
PRIMENA U REPUBLICI SRBIJI ³⁾***Rezime*

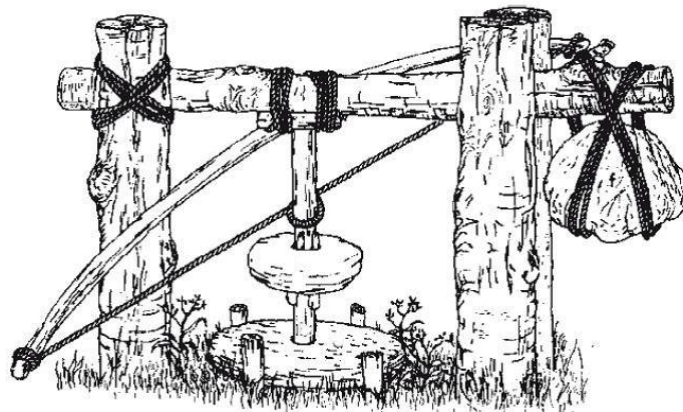
Istorijat usavršavanja mašina alatki od njihovog nastanka do danas ilustruje proces tehnološkog razvoja ljudskog društva. Takođe, njihov razvoj i usavršavanje direktno utiče na ispunjenje potreba tržišta u mnogim oblastima života. Proces razvoja mašina alatki je kroz istoriju obuhvatio više faza u kojima su se pojedini elementi značajno menjali i uticali na brzinu i kvalitet izrade proizvoda. Posle faza elektrifikacije i automatizacije razvoj mašina alatki značajno zavisi od podataka koje se generišu u toku njihove eksploatacije kao i u neposrednom proizvodnom okruženju. Tako je nastala faza digitalizacije koja predstavlja aktuelnu temu u svim planovima unapređenja proizvodnih sistema.

U radu se razmatraju ključna pitanja unapređenja proizvodnih sistema uvođenjem metoda digitalizacije na nivo mašina alatki. Tu se pre svega misli na mogućnosti implementacije metoda nastalih primenom Industrial Internet of Things tehnologija na mašine alatke, kao i prednosti i nedostatke koji pri tome nastaju. Ova pitanja se razmatraju sa stanovišta primene u industriji Republike Srbije koja sadrži više specifičnosti čije unapređenje zahteva strateški prilaz procesu integracije metoda digitalizacije u pojedine proizvodne sisteme.

Ključne reči: Mašine alatke, Digitalizacija, IIoT, Optimizacija proizvodnje, Fleksibilni tehnološki sistemi

1. UVOD

Istorija savremenog čovečanstva je neraskidivo povezana sa razvojem i usavršavanjem sredstava rada koja omogućuju bržu i efikasniju obradu materijala i izradu dobara. Prve faze evolucije ljudskog društva su između ostalog obuhvatile unapređenja oblika i funkcije alata koji su neophodni zanatlijama za realizaciju svakodnevnih aktivnosti. Na taj način se omogućila brža obrada materijala uz manje utrošene fizičke snage. Na slici 1 je prikazana prosta ručna mašina za bušenje [23].



Slika 1. Mašina za bušenje

Evolucijom društva i rastom potreba stanovništva su se stvorili zahtevi za razvojem mašina koje omogućuju

¹ Prof. dr Slobodan Tabaković, dipl. Ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tabak@uns.ac.rs

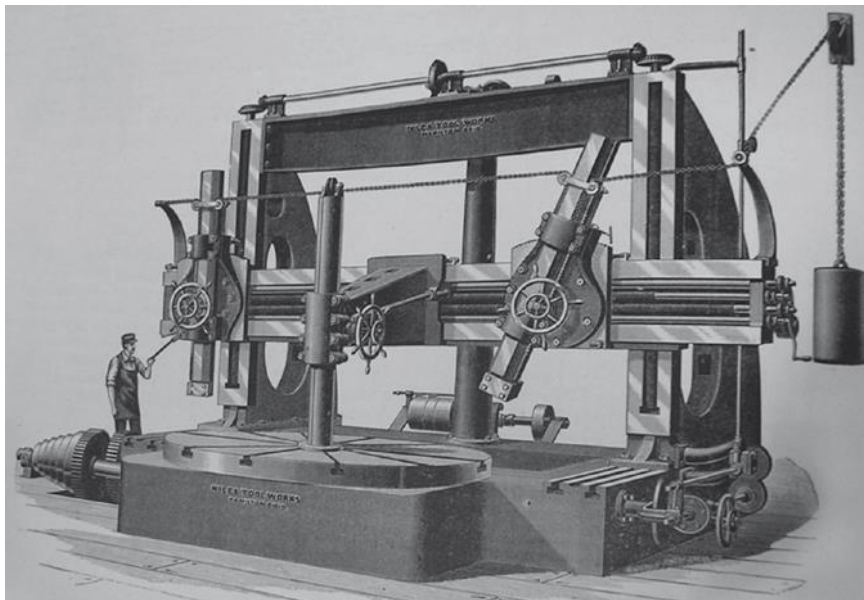
² Prof. dr Milan Zeljković, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, milanz@uns.ac.rs

³⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu „Primena savremenih metoda i tehnika obrazovanja i istraživanja“ Departmana za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka.

izradu proizvoda ujednačenog kvaliteta u većim serijama. Time su stvoreni preduslovi za prelazak sa zanatske na industrijsku proizvodnju.

Početak industrijske revolucije u XVIII veku i pojavom parne mašine kao izvora mehaničke energije sposobnog da pokreće mehanizme stvoreni su uslovi za nastanak čitavog niza mašina koje su omogućile razvoj tekstilne, prehrambene industrije, poljoprivrede i proizvodne mašinske industrije koja obezbeđuje funkcionisanje svih prethodno navedenih grana [23].

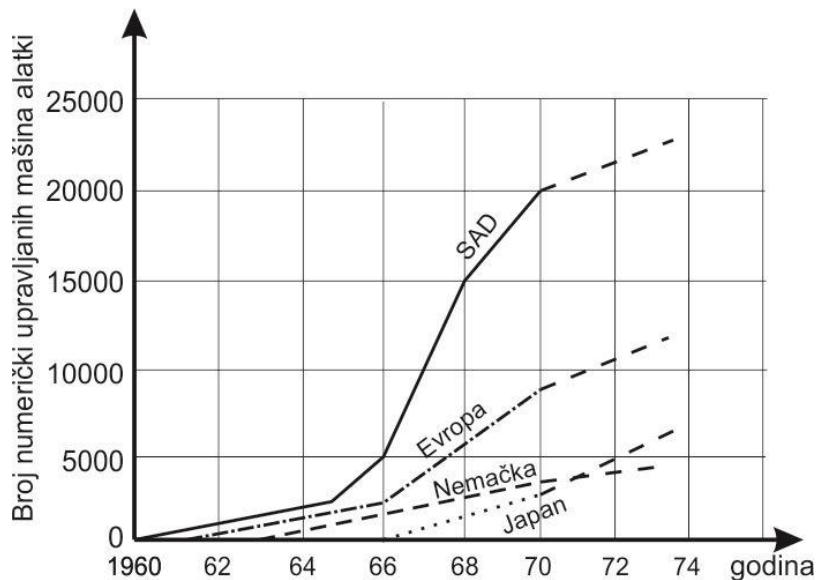
Najvažniji faktor razvoja i usavršavanja industrijske proizvodnje od početka industrijske revolucije do danas čine mašine koje omogućuju proizvodnju drugih mašina, mašine alatke [5]. One predstavljaju kombinaciju složenih mehanizama, pogonskih i upravljačkih elemenata čiji je zadatak realizacija proizvodnih procesa. Njihova evolucija je rezultat kontinuirane težnje da se transformacija sirovog materijala i energije u dobra realizuje u serijskoj proizvodnji, sa konstantnom tačnošću, uz ostvarivanja uslova bezbednosti. Pored toga omogućena je izrada i radnih predmeta velikih dimenzija što je direktno uticalo na razvoj transportnih i saobraćajnih sredstava i tekstilne industrije. Na slici 2 je prikazan jedan od prvih vertikalnih strugova namenjenih za izradu velikih rotaciono simetričnih radnih predmeta [24].



Slika 2. Vertikalni strug

Nastanak i razvoj mašina alatki kroz istoriju predstavlja pokušaj čoveka da primenom sopstvene kreativnosti i umešnosti razvije uređaje koji omogućuju jednostavniju i efikasniju izradu radnih predmeta. U srednjem veku to je obuhvatalo rešavanje pogona elemenata mašine i radnih predmeta, a u novije vreme njihovo upravljanje i optimizaciju [6].

U skladu sa razvojem industrije i mašine alatke su početkom XX veka prošle faze elektrifikacije a u drugoj polovini XX veka i automatizacije uvođenjem mikroprocesora što je omogućilo značajnu promenu u njihovim dimenzijama i karakteristikama uz konstantno povećanje tačnosti i kvaliteta obrade materijala. Automatizacija mašina alatki u XX veku je doprinela višestrukom uvećanju broja proizvedenih mašina i intenzivnom razvoju industrije [2]. Na slici 3 je prikazano povećanje broja instaliranih numerički upravljanih mašina alatki u periodu 1960-1974 godine [10] u najrazvijenijim industrijskim zemljama tog perioda.



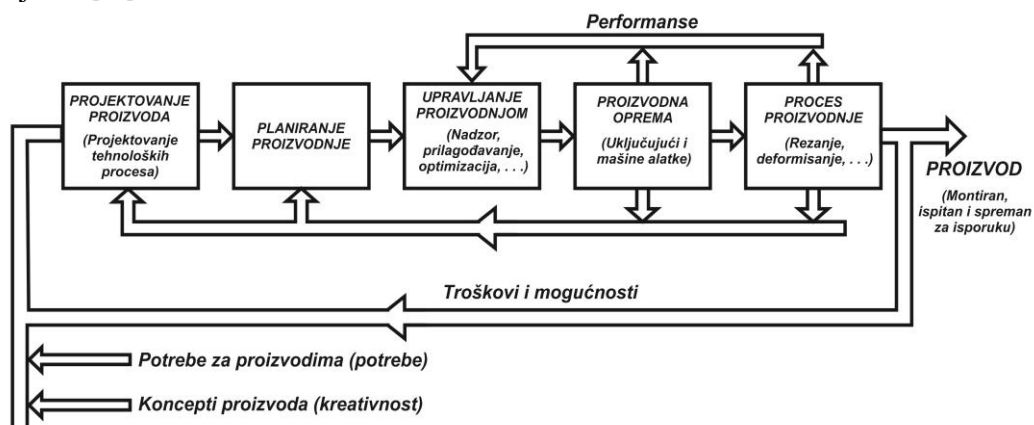
Slika 3. Rast broja automatizovanih mašina alatki u periodu 1960-1974 godine

Automatizacija mašina alatki uvođenjem računarskih sistema kao ključnog upravljačkog segmenta automatizacije je omogućila povećanje fleksibilnosti i integraciju mašina alatki u složenije proizvodne strukture [19].

Uvođenje automatizacije u proizvodne sisteme i njihovo integrisanje u fleksibilne tehnološke strukture dovelo je do stvaranja koncepta jedinstvene proizvodne celine sa nadzorom i upravljanjem koje obezbeđuje računarski sistem. Ovaj koncept je nazvan računarom integrisana proizvodnja (Computer Integrated Manufacturing – CIM). Ideja o integraciji proizvodnje u jednu celinu –CIM je nastala tokom šezdesetih godina XX veka sa ciljem unapređenja industrijskih kapaciteta proizvodnje u segmentima [3]:

- obezbeđenja obrade kompleksnih radnih predmeta uz eliminisanje ljudskih grešaka
- povećanje fleksibilnosti proizvodnje
- povećanje obima proizvodnje
- stvaranja novih proizvodnih mogućnosti

Početak osamdesetih godina dvadesetog veka definisan je prvi model CIM sistema (Slika 4). Računarom integrisana proizvodnja (CIM) je nov pristup u proizvodnim tehnologijama koje su integrisane na bazi računara i novih informacionih tehnologija. Koncept CIM sistema čini 5 osnovnih podsistema koji grade zatvoreni sistem sa povratnom spregom (regulacioni sistem) koji je fleksibilan, potpuno automatizovan i samooptimizujući.“ [20].

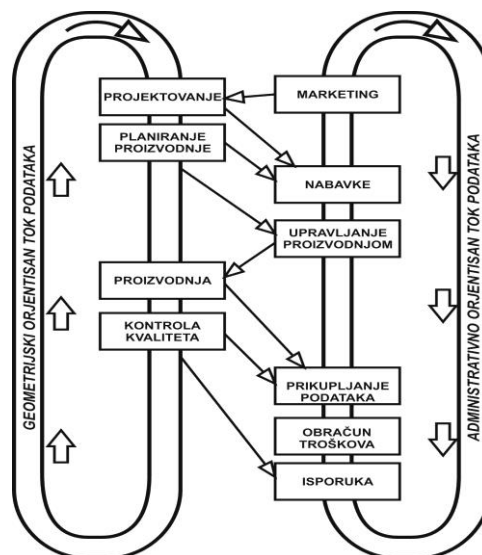


Slika 4. Model CIM-a sistema prema Merçantu [20]

Osnovu za uspešnu integraciju računara, odnosno informacionih tehnologija u proizvodnju čini integrisana obrada informacija vezanih za tehničke i administrativne zadatke postavljene unutar proizvodnog sistema [25]. To obuhvata aktivnosti:

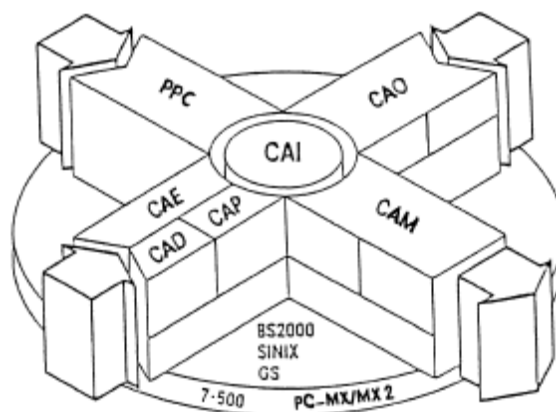
- definisanje koncepcije proizvoda,
- projektovanja proizvoda,
- planiranje proizvodnih procesa,
- programiranje numerički upravljanih mašina alatki, kao i
- realizaciju proizvodnje što obuhvata informacije nastale u procesu izrade delova, merenja i kontrole, montaže, izlazne kontrole kao i održavanja proizvodnih sistema.

Ovakav pristup, razgraničenje dva toka informacija se najbolje može videti na modelu CIM sistema koji je prikazan na slici 5. Navedeni model se može opisati na sledeći način: “Računarom integrisana proizvodnja (CIM) predstavlja integraciju tokova informacija u svim segmentima proizvodnje u kojoj informacione tehnologije imaju ključnu ulogu. Postoje dva osnovna toka informacija i to: inženjersko-tehnički (geometrijski orijentisan) i upravljački (administrativno orijentisan) tok informacija.“ [28].



Slika 5. Tokovi informacija u CIM sistemu prema [28]

Za realizaciju ovako kompleksnih aktivnosti integracije podataka generisanih u razvojnim i proizvodnim procesima na racionalan način neophodna je primena zatvorene informacione sprege koja omogućava kruženje informacija do svih učesnika u procesima razvoja i izrade proizvoda u realnom vremenu. Ovakvim pristupom se omogućava primena savremenih tehnologija u svom punom potencijalu samo ako je projektovano i korišćenje ljudskih resursa sistema, to jest, ako je projektovan da omogući svom osoblju da međusobno komunicira i u potpunosti saraduju jedni sa drugima [20]. Polazeći od prethodnog, nastanak računarskih sistema pogodnih za implementaciju u CIM sistem je obuhvatio koncipiranje i usavršavanje niza softverskih i hardverskih rešenja namenjenih pojedinim aktivnostima u proizvodnji. Na slici 6 je prikazana podela softvera koje obuhvata CIM sistem.



Slika 6. Elementi računarom podržane proizvodnje [26]

Zahvaljujući postavljenim modelima koji su nastali na osnovu analize potreba pojedinih elemenata

proizvodnog sistema u predhodnom periodu je razvoj obuhvatio module za razmenu informacija [29], kolaborativne i druge aktivnosti neophodne za integraciju u CIM sistem.

Uporedo sa porastom značaja industrije a samim tim i proizvodnje mašina alatki u Republici Srbiji kao delu SFR Jugoslavije je egzistiralo je više fabrika u kojima su se proizvodile i usavršavale mašine alatke u skladu sa svetskim trendovima. Na teritoriji republike Srbije krajem XX veka je egzistiralo osam proizvođača mašina alatki koji su bili specijalizovani za razvoj i proizvodnju mašina alatki namenjenim različitim operacijama obrade.

Fabrika Ivo Lola Ribar iz Beograda je nastala sredinom XX veka (osnovana 1948. godine) sa ciljem proizvodnje mašina alatki namenjenih složenoj mašinskoj obradi na radnim predmetima velikih dimenzija. To je uključivalo razvoj mašina alatki za obradu skidanjem materijala različitim operacijama obrade kao što su: horizontalne bušilice-glodalice, vertikalni strugovi i mašine za deformisanje[18].

Fabrika **Famil Potisje** u Adi (osnovana: 1947.g.) je proizvodila strugove i specijalne mašine bazirane na strugarskoj obradi. U početku su mašine razvijane na osnovu iskustava nastalih zanatskom proizvodnjom strugarskih mašina koje su se izrađivale pre II svetskog rata na tom području. U kasnijim fazama razvoja, mašina je primenom sopstvenih konstrukcionih kapaciteta i saradnje sa Fakultetom tehničkih nauka u Novom Sadu proizvodila oko 1200 univerzalnih strugova godišnje kao i veći broj specijalnih mašina za obradu struganjem [11].

Livnica Kikinda u Kikindi (ranije: LŽT Kikinda), je fabrika nastala proširivanjem zanatske radionice koja je osnovana još 1908 godine. U okviru Livnice Kikinda je otpočela proizvodnja mašina alatki 1952 godine. U početku su proizvodni program činile mašine za obradu struganjem i bušenjem. Od početka šezdesetih godina XX veka počele su se proizvoditi i mašine za obradu brušenjem. Inženjeri Livnice Kikinda su tokom vremena osvojili proizvodnju kompletne familije brusilica, koja obuhvata mašine za spoljašnje i unutrašnje okruglo i ravno brušenje

Pobeda – IMO u Novom Sadu (raniji naziv: **Pobeda**), je osnovana 1905.g. kao **Vojvodjanska livnica**. Ova fabrika je od 1949.g. proizvodni program koji se sastojao od mašinske i metaloprerađivačke obrade proširila na proizvodnju strugova, presa i okvirnih testera, određene tipove strugova (univerzalni, hidrokopirni, programski upravljani kao i numerički upravljani), familije ekscentar presa i okvirnih i trakastih testera i radijalne bušilice,

MI Majevisa u Bačkoj Palanci je u osnovana 1951 godine. Fabrika je u početku proizvodila kratkohodne rendisaljke i oštrilice za alat. Nakon unapređenja proizvodnje u proizvodni program su uključeni obradni centri za obradu prizmatičnih radnih predmeta. Proizvodni program je zaokružen proizvodnjom oštrilica-brusilica za alat (univerzalne i specijalne), brusilica za ravno brušenje, profilnih i specijalnih brusilica.

Firma **Sarlah** u Pirotu je nastala kao deo Lola korporacije sa prvenstvenom namenom proizvodnje stubnih bušilica

Metalprogres u Zrenjaninu (ranije: **Progres**), od svog postojanja prvenstveno je bio usmeren na proizvodnju specijalizovanih mašina za remont motora sa unutrašnjim sagorevanjem. To je obuhvatilo mašine za: bušenje, brušenje, honovanje. Pored toga fabrika je unapredila proizvodnju uvođenjem u proizvodni program i malih univerzalnih glodalica i strugova.

Mašinska industrija Niš (MIN) je nastala od radionice za održavanje i remont železničkih vozila koja je osnovana 1884 godine. Vrlo brzo po osnivanju su radionici dodate strugara, livnica, modelarnica, alatnica i odeljenje za montažu. Integracijom tih celina u MIN formirana je i jedinica za proizvodnju presa Minpres.

Razvoj pomenutih fabrika mašina alatki u drugoj polovini XX veka je tekao u skladu sa tendencijama na svetskom tržištu. Implementacijom numeričkog upravljanja su nastale NUMA koje su kasnije proširene dodatnim podsistemima za skladištenje i manipulaciju alatima i kasnije radnim predmetima koje čine osnovu fleksibilnih tehnoloških sistema. U tom periodu su i fabrike na našim prostorima počele da proizvode mašine alatke i obradne centre sa numeričkim upravljanjem.

Kao rezultat toga Ivo Lola Ribar je krajem 70 i početkom 80 ih godina XX veka je započela proizvodnju obradnih centara HBG i HMC kao i robota. Fabrika Potisje je razvila familiju strugarskih obradnih centara baziranih na Siemens Sinumerik, Hunor i Fagor upravljačkim sistemima a Livnica Kikinda brusilice sa Siemens Sinumerik upravljačkim sistemima. Pored razvoja samih mašina Lola Institut je kao deo korporacije Ivo Lola Ribar razvio i sopstvena rešenja programibilnih kontrolera (u više generacija od PA32 do PA 2000) i upravljačkih sistema (Lola 30CNC i Lola 300CNC) [13], [18].

Razvoj mašina alatki u pomenutim kompanijama je u potpunosti obuhvatao i implementirao CIM koncepciju do nivoa razvoja i proizvodnje Fleksibilnih tehnoloških ćelija kao osnova CIM fabrika. Ovakve sisteme su realizovali i Ivo Lola Ribar i Livnica Kikinda.

Zahvaljujući razvoju industrije kao i proizvodnje mašina alatki koji je bio realizovan u skladu sa modelima

CIM sistema omogućen je dalji razvoj industrije kroz digitalizaciju⁴. Respektujući trendove globalizacije proizvodnje koja obuhvata proizvodnju pojedinih delova i sklopova proizvoda distanciranih na globalnom nivou a sa druge zahtevima za sinhronizovanu proizvodnju individualizovanu za određenog kupca sa kratkim rokovima isporuke razvoj industrije je obuhvatio metode i sredstva za njihov koordiniran rad. To je donelo značajne izmene na svim nivoima primene u industriji od mašine alatke kao celine do poslovnog sistema.

U radu se opisuju osnovni principi digitalizacije proizvodnje kao i mogućnosti unapređenja koje ona omogućava na tržištima u kojima se industrija prerade metala obnavlja izgradnjom fabrika čiji je cilj serijska i veliko serijska proizvodnja oslonjena na određenu granu industrije ali i mala i srednja preduzeća bazirana na maloserijskoj proizvodnji što odgovara situaciji u našoj zemlji

2. OSNOVNI PRINCIPI DIGITALIZACIJE MAŠINA ALATKI

Intenzivan razvoj materijala, informatičkih i proizvodnih tehnologija kao i pratećih usluga poslednjih decenija su na globalnom nivou uticale na strukturu industrijske potrošnje. Da bi se u potpunosti ispunile trenutne (i stvorili preduslovi za buduće) zahteve tržišta koji uključuju prilagođavanje proizvoda kupcima (individualizaciju), kratak vek proizvoda na tržištu i nisku cenu [16] nastala je potreba za transformacijom industrijske proizvodnje. Tu se pre svega misli na:

- Intenzivnu primenu decentralizovane proizvodnje kod koje se proizvodnja pojedinih podsklopova pa i pojedinačnih delova jednog proizvoda često realizuje u većem broju pogona lociranih u više država ili kontinenata [22];
- Potrebu za povećanjem fleksibilnosti proizvodnje što omogućava prilagođavanje proizvoda zahtevima kupca, što je karakteristično za auto i avio industriju [15];
- Potrebu za pristupom informacijama koje se nastaju u proizvodnji i omogućuju upravljanje i planiranje korišćenja resursa do nivoa mašine alatke ili manipulacionih sistema [1], [4];
- Potrebu za racionalizacijom proizvodnje, smanjenjem troškova i povećanjem konkurentnosti [33];
- Razvoj informacionih tehnologija, interneta i protokola neophodnih za stvaranje i distribuciju informacija (računara, senzora⁵, mernih uređaja, memorija), su omogućili stvaranje tzv cyber fizičkih sistema. Time se omogućava skladištenje i obrada informacija na udaljenim lokacijama i izrada softverskih rešenja baziranih na veštačkoj inteligenciji koja omogućuju nadzor i upravljanje nad složenim decentralizovanim proizvodnim sistemima. Ovakav pristup razvoju industrije je obuhvaćen različitim nacionalnim i internacionalnim programima poznatim pod nazivom Industry Internet of Things, Industrie 4.0, Made in China 2025, Society 5.0, ... [17].

U oblasti industrijske proizvodnje digitalizacija je omogućila unapređenje karakteristika i upotrebe mašina alatki i drugih fleksibilnih tehnoloških sistema na nekoliko načina. Kao skup sredstava koje to omogućuju se najčešće navode tehnologije za sakupljanje podataka iz rada mašine i njihovu upotrebu u:

- Neposrednom proizvodnom procesu kroz optimizaciju rada elemenata mašine i neposrednog procesa izrade proizvoda stvaranjem zatvorene povratne sprege koju obezbeđuje veliki broj informacija sakupljenih u toku rada mašine [12],
- Nadzoru mašine i njenih elemenata u cilju optimizacije proizvodnog procesa [31],
- Predviđanje neželjenih događaja (kolizija, prekomernog habanja alata, oštećenja pribora i sl.), grešaka u pripremi [9],
- Održavanje elemenata i podsistema mašine [7].

U zavisnosti od karaktera i količina informacija koje se obrađuju razvijene su dve koncepcije kojima se realizuje sakupljanje i obrada informacija generisanih u okviru mašina alatki.

Prva tehnologija koristi lokalne hardverske kapacitete (deo upravljačke jedinice, namenski računarski sistem integrisan u upravljački sistem i sl.) za sakupljanje i obradu podataka koji nastaju u procesu eksploatacije mašine alatke [8]. Rezultati obrade podataka se vraćaju ka mašini za potrebe optimizacije funkcionisanja pojedinih podsistema ili distribuiraju korisnicima u vidu izveštaja putem interneta i zakupljenog

⁴ Digitalizacija mašina alatki je započela već sa uvođenjem kompjuterskog numeričkog upravljanja, ali se ovaj pojam, u stručnoj javnosti, odomaćio tek u poslednje vreme, i vezan je za umrežavanje mašina alatki u kompleksnije sisteme. Nažalost, srpski termin, za ovaj pojam, u našoj stručnoj javnosti ne postoji.

⁵ senzori, u srpskom jeziku više odgovara termin "davači", ali obzirom da se u stručnoj javnosti odomaćio ovaj termin on se koristio i u ovom radu.

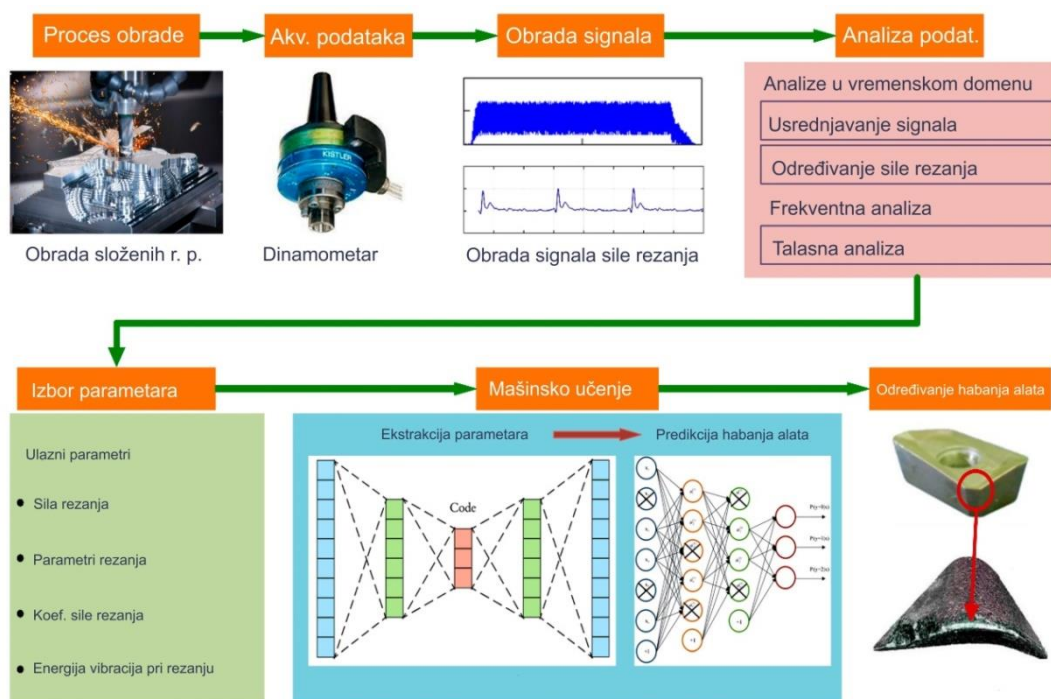
memorijskog prostora (cloud). Najčešće se sakupljaju:

- informacije o procesu obrade koji se realizuje, kao što su podaci iz upravljačkog programa (zadate brzine, posmaci, dubina obrade, dimenzije priprema, podaci o alatu), broj obrađenih delova, vreme obrade i sl.,
- informacije o stanju pojedinih podsistema mašine u koje spadaju: temperature elemenata, ostvarena snaga, lokalne vibracije, protok rashladnih sredstava i sl.

Lokalno sakupljanje i obrada informacija se koristi u neposrednoj kontroli mašine alatke ili proizvodnog procesa. Budući da se podaci generišu sa velikom frekvencijom (posebno kod podsistema koji upravljaju kretanjima mašine) ovoj oblik digitalizacije proizvodnih procesa generiše veliku količinu podataka. U tabeli 1 su prikazane orijentacione veličine paketa podataka izražene u memorijskim jedinicama kao i trajanje ciklusa u kojima one nastaju. Vrednosti su formirane za savremene numerički upravljane mašine alatke

Tabela 1. Veličine generisanih podataka kod NU mašina alatki		
Izvor informacija	Prosečno trajanje ciklusa generisanja informacija	Količina podataka u sekundi rada
Sklop mašine – periferni elementi mašine (izlazni podaci iz PLC-a)	~0.1÷10 s	~5Kb
Upravljanje putanjom alata (ciklus interpolatora)	~1÷10 ms	~0.1Mb
Upravljanje pojedinačnom NU osom mašine	~1÷2 ms	~1÷2Mb

Kao što se u tabeli može videti ovaj model sakupljanja i obrade podataka je neophodan u procesima koji podrazumevaju potrebu da informacije iz procesa obrade i rezultati njihove obrade budu deo upravljačkih sprega na mašini. To je najčešće slučaj sa informacijama koje nastaju u realnom vremenu [30] na sensorima koji su ugrađeni u mašinu (temperatura, vibracije, promene u energetskom bilansu, promena akustične emisije i sl.) [27]. Slika 7 prikazuje primer primene ove metode u cilju predikcije habanja alata na osnovu opterećenja na glavnom vretenu mašine [32].



Slika 7. Predikcija habanja alata na osnovu opterećenja na glavnom vretenu mašine [32]

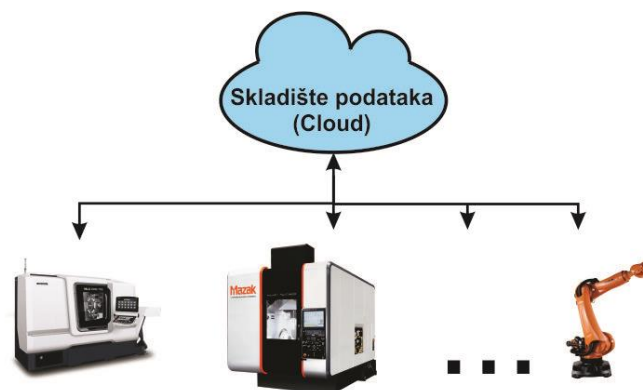
Model lokalnog sakupljanja i obrade podataka u procesu digitalizacije industrijskih proizvodnih sistema se naziva Edge computing (ili Industrial Edge) (Slika 8)



Slika 8. Šematski prikaz konceptije Industrial Edge

Koncept Industrial Edge (Edge Computing) se u industrijskim sistemima koristi za uvid u stanje, praćenje rada i optimizaciju komponenata fleksibilnih tehnoloških sistema (mašina alatki, obradnih centara, fleksibilnih tehnoloških ćelija i sl.). Njegova implementacija koristi Internet protokole za komunikaciju između mašine i lokalnih skladišta podataka (na mašini ili u okviru pogona) ali ne zahteva distribuciju podataka putem Interneta.

Druga tehnologija digitalizacije proizvodnje podrazumeva primenu protokola za distribuciju i obradu informacija koji se koriste za internet komunikacije. Podaci nastali u toku rada mašine alatke ili fleksibilnih tehnoloških sistema se distribuiraju i obrađuju se na udaljenim serverima. Obrada podataka i realizacija aktivnosti na osnovu rezultata se realizuju primenom specijalizovanog softvera kojim se pristupa skladištima podataka sa različitih uređaja: računara u odeljenjima pripreme proizvodnje, nabavke i kontrole, mobilnih telefona ili prenosnih uređaja i sl. U ovom slučaju se posebno zakupljaju skladišni prostor i nezavisno od toga i softveri. Ovakav pristup digitalizaciji se naziva Cloud computing (Slika 9).



Slika 9. Šematski prikaz Cloud computing konceptije

U industrijskim uslovima oba pristupa digitalizacije industrije se susreću sa više problema među kojima su najznačajniji velika količina podataka koje mašina alatka generiše u kratkom vremenskom periodu, brzina obrade podataka kao i bezbednost transfera informacija i pristupa podsistemima mašina.

3. REALIZACIJA U PRAKSI

Implementacija metoda za unapređenje proizvodnje koji su definisani različitim strategijama digitalizacije je usko povezana sa razvojem informacione infrastrukture i upravljačkih sistema. Zbog toga karakteristike postojećih rešenja dostupnih na tržištu u velikoj meri zavise od saradnje proizvođača mašina alatki i njihovih komponenata, upravljačkih sistema i razvoja aplikacija namenjenih primeni u industrijskoj digitalizaciji (Industry Internet of Things - IIoT).

Programska rešenja namenjena digitalnoj transformaciji mašinske proizvodnje razvijaju proizvođači: upravljačkih sistema, mašina alatki, komponenata ili specijalizovane softverske kompanije. Rešenja imaju

različite ciljeve kao i implementirane komunikacione protokole (namenske ili univerzalne). Većina dostupnih rešenja su razvijeni u vidu tzv. ekosistema koji sadrži neophodne komponente za realizaciju aktivnosti digitalizacije: sakupljanje podataka, njihovu obradu, formiranje izveštaja i ako je to predviđeno povratnu spregu sa upravljačkim informacijama na nivou mašine. Osnovne komponente čine:

- Industrijski računarski sistemi koji omogućuju sakupljanje (i obradu) informacije koje se generišu u toku rada mašine i njihovu distribuciju
- Aplikacije neophodne za lokalnu obradu informacija na mašinama i pripremu rezultata za dalju primenu u radu mašine. Poslednjih godina one najčešće sadrže metode mašinskog učenja i veštačke inteligencije neophodne za formiranje zaključaka na osnovu karakteristika konkretne mašine alatke
- Prostor za skladištenje dobijenih podataka na udaljenim serverima (Cloud) koji može da se zakupi preka potrebama mašine, fleksibilnog proizvodnog sistema ili kompletne fabrike,
- Namenske aplikacije neophodne za obradu podataka koji su skladišteni na Cloud serverima. Ove aplikacije su namenjene obradi manje količine informacija uz formiranje zaključaka, definisanje i distribuciju izveštaja.

U nastavku se pominju neka od dostupnih rešenja za digitalizaciju industrijske proizvodnje koji su namenjeni sakupljanju i obradi informacija nastalih u prerađivačkoj industriji.

3.1 Siemens Insights Hub (predhodno Mind Sphere)

Proizvođač industrijske elektronike Siemens je za potrebe digitalizacije mašina alatki baziranih na upravljačkim sistemima otvorene arhitekture Sinumerik (828D, 840D sl i One) razvio platformu namenjenu za praćenje i upravljanje proizvodnjom baziranu na kombinaciji lokalnog i udaljenog skladišta. Primena platforme podrazumeva korišćenje komunikacione kapacitete jednog dela upravljačkog sistema ili ugradnju računarskog sistema koji je namenjen za sakupljanje i distribuciju informacija (Slika 10) što omogućava selekciju, brzu obradu velikih količina informacija i po potrebi njihovu distribuciju na udaljena skladišta.



Slika 10. Namenski računarski sistem IoT 2050 za sakupljanje i distribuciju informacija

Preostali deo infrastrukture neophodne za korišćenje platforme predstavlja Cloud skladišni prostor sa softverom za upravljanje radom aplikacija kao i prodavnica aplikacija (Machine Tool Software Store) prikazana na slici 11 koja obezbeđuje programska rešenja za obradu informacija, izvođenje zaključaka o stanju mašine i proizvodnog sistema primenom veštačke inteligencije, formiranje izveštaja, itd.

Suchen

Machine Tool Software Store

Path to greater machine tool productivity

MACHINUM - our comprehensive and unique digitalization portfolio of application-specific software is tailored for machine tool builders and users to increase their productivity. Included are applications based upon a scaled IT infrastructure with functions for engineers and manufacturers. Our software portfolio facilitates the management, analysis and optimization of CNC machines in both greenfield and brownfield projects.

[Contact Us](#)
[Learn More](#)

Anzahl an Elementen
25 Ergebnisse

Area of Interest

Job Preparation & Execution

Machine Availability

Machining Process Improvement

Production Flexibility & Efficiency

Categories

Applications

Engineering

Services

Special Offerings

Free Software Trial

Access MyData /Platform V4

Enable the exchange of data between applications.

Access MyMachine /OPC UA 828/840 - WLM

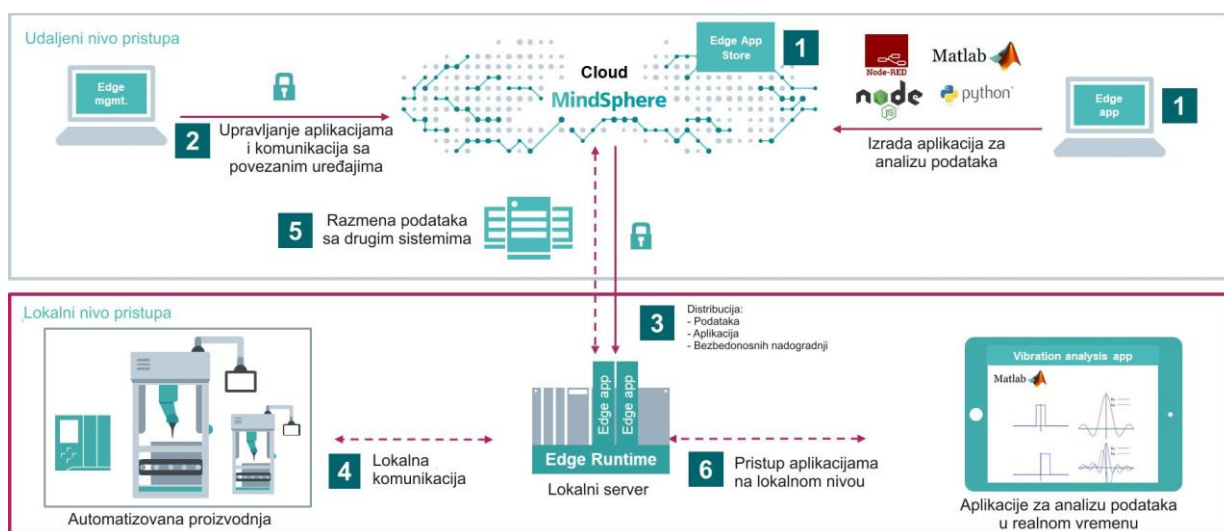
Operate as a runtime option for SINUMERIK 828D and 840D sl which provide an OPC UA server with translation capability to tags of the entire SINUMERIK.

Access MyMachine /OPC UA SIN ONE - WLM

Operate as a runtime option for SINUMERIK ONE which provide an OPC UA server.

Slika 11. Prodavnica aplikacija

Ovakva koncepcija omogućava da korisnici platforme prema svojim mogućnostima i potrebama odrede broj mašina koje će uključiti u platformu, obim informacija koje će koristiti iz procesa proizvodnje i da im odrede namenu prema svojim potrebama. Na slici 12 je prikazana šema toka informacija prilikom upotrebe elemenata Insight Hub platforme.



Slika 12. Šema toka informacija prilikom upotrebe platforme Insight Hub

U cilju efikasnije implementacije inženjerskog znanja u aplikacije pogodne za unapređenje proizvodnje one su razvijene u programskom jeziku Mendix koji je namenjen za razvoj aplikacija primenom simboličkih naredbi.

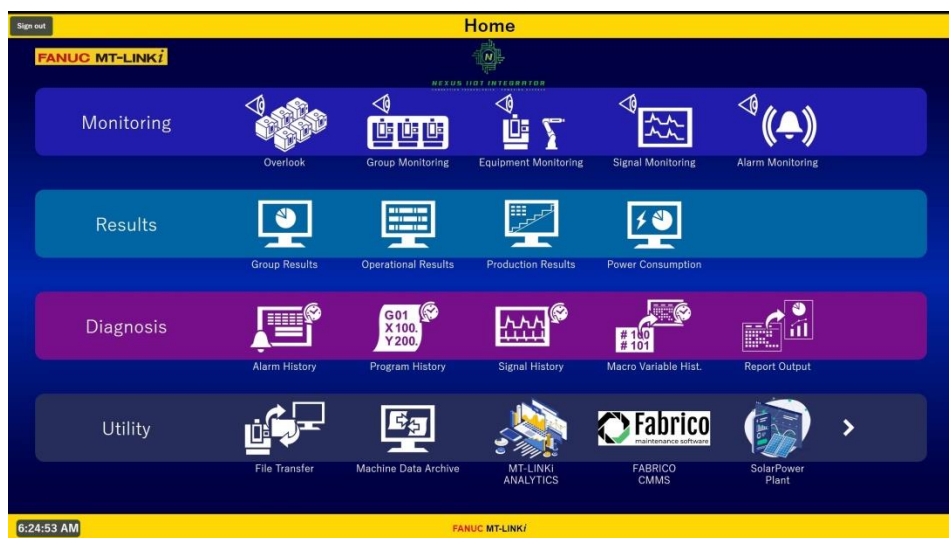
Pored fleksibilne strukture i velikog broja aplikacija ovakav koncept digitalizacione platforme ima i određene nedostatke:

- Visoki troškovi implementacije sistema u mala i srednja preduzeća;
- Zavisnost od internet infrastrukture. Insight Hub platforma zahteva da se realizacija svih analiza uključujući i one koje se realizuju na mašini sprovode u sinhronizaciji sa udaljenim skladištem pošto se softver za kontrolu rada svih aplikacija nalazi na njemu;
- Problem upotrebe u granama industrije koje zbog bezbedonosnih zahteva ne dozvoljavaju primenu udaljenih skladišnih prostora i softvera.

3.2 Fanuc MT-LINKi i Field platforme

Japanski proizvođač opreme za industrijsku proizvodnju (mašina alatki, robota, upravljačkih sistema, pogonskih motora i sl.), kompanija Fanuc je za potrebe unapređenja proizvodnje razvio dve platforme: MT-LINKi i (Machine Tool LINK interface) i Field (FANUC Intelligent Edge Link and Drive).

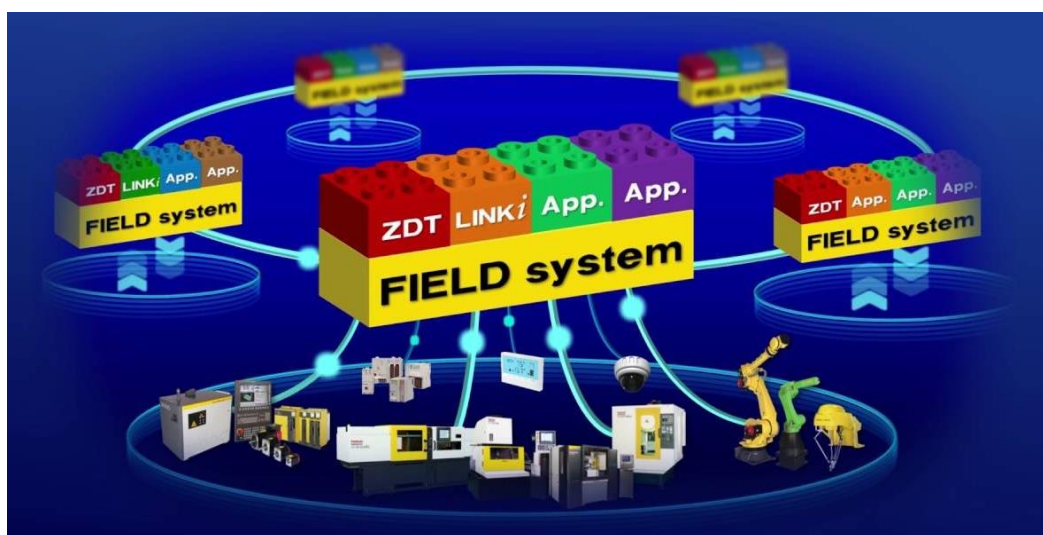
Platforma MT-LINKi predstavlja računarski softver predviđen za lokalno sakupljanje, skladištenje i obradu informacija generisanih na mašinama alatkama. Na slici 13 je prikazan uvodni dijalog prozor korisnikog interfejsa MT-LINKi sistema.



Slika 13. Prikaz korisničkog interfejsa MT-LINKi sistema

Za potrebe digitalizacije većih proizvodnih postrojenja sistem se postavlja na računar namenjen komunikaciji sa mašinama i sakupljanju informacija uz serverski računar namenjen formiranju izveštaja i distribuciji rezultata koji obuhvataju grafički prikaz informacija koji se mogu preuzeti sa mašine alatke ili grupe mašina, manipulacionih sistema, upravljačkih programa, alarma, itd.

Platforma Field predstavlja složeniji sistem za digitalizaciju industrije koji za potrebe sakupljanja i obrade informacija koriste udaljene i lokalne sisteme skladištenja. Osnovna namena ove platforme su nadzor, upravljanje proizvodnjom i optimizacija procesa u industrijskoj proizvodnji koji sadrže kompleksnije proizvodne linije sa većim brojem mašina alatki, mernih, manipulacionih i transportnih sistema kao i za upravljanje sa više prostorno dislociranih fabrika (Slika 14).



Slika 14. Simbolički prikaz platforme Field

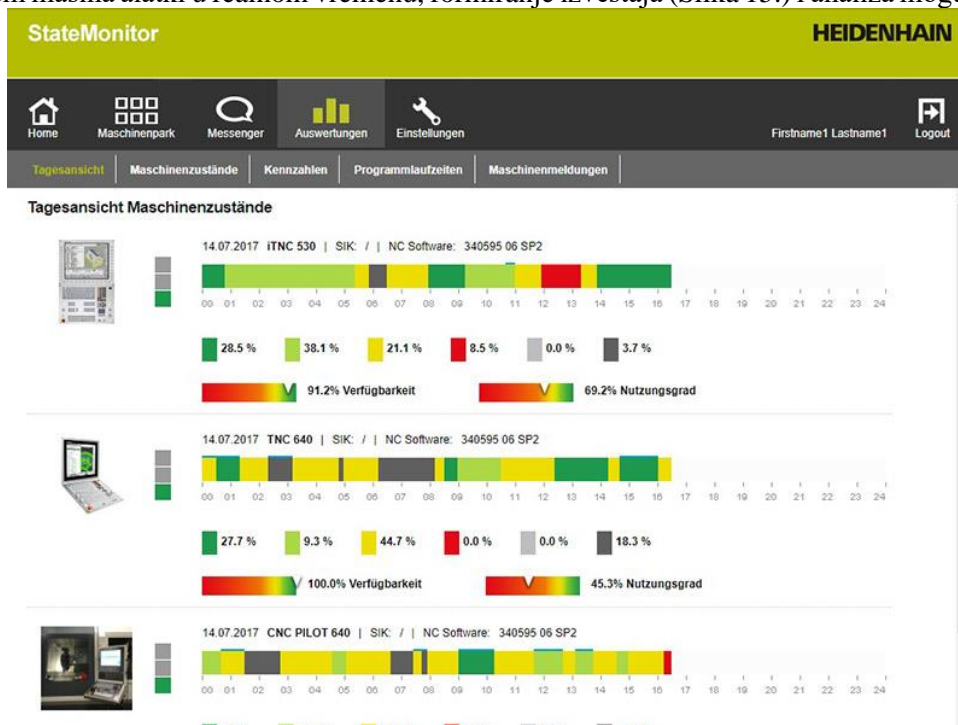
Platforma Field je bazirana na modularnim principima sa mogućnošću usklađivanja u skladu sa promenama koji nastaju u proizvodnji kao i za zahtevima korisnika (proširenje broja parametara koji se sakupljaju, izmene

u strukturi izveštaja i sl.). Ova platforma je kao i predhodno opisana pogodna za unapređenje i primenu aplikacija razvijenih od strane nezavisnih proizvođača mašina alatki, upravljačkih sistema ili ekspertskih grupa koje su prilagođene primeni na ovakvim platformama. Takođe, obe platforme podržavaju integrisanje integrisanje mašina alatki sa upravljačkim sistemima drugih proizvođača ili starije generacije.

Nedostatke platforme Field kao i u predhodnom slučaju predstavlja potreba za značajnom investicijom u proces digitalizacije uz predhodnu stručnu analizu strukture proizvodnje, definisanje strukture i metoda analize podataka i formiranje plana digitalizacije koji obuhvata i planirana proširenja proizvodnih kapaciteta.

3.3 Heidenhain – StateMonitor

Proizvođač upravljačkih sistema i komponenata za mašine alatke Heidenhain je razvio digitalizacionu platformu pod nazivom Digital Shop Floor čija je osnovna namena uvid u stanje proizvodnih sistema sa manjim brojem mašina alatki u realnom vremenu, formiranje izveštaja (Slika 15.) i analiza mogućnosti mašina.

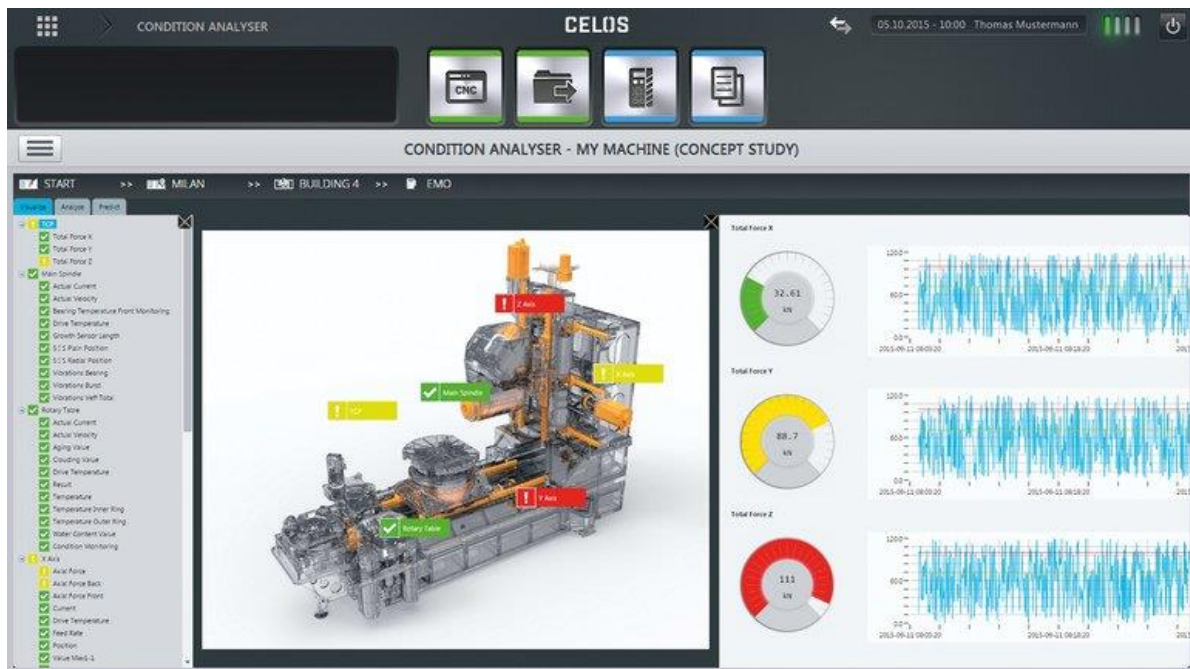


Slika 15. Prikaz izveštaja o stanju mašina

Platforma se sastoji od grupe softverskih rešenja za nadzor mašina alatki, obradu informacija, planiranje proizvodnje i upravljanje održavanjem kao i niza protokola za komunikaciju sa mašinama. U nedostatke platforme spadaju ograničene mogućnosti primene softvera za nadzor mašinama (moguće je preuzimanje do 5 signala sa maksimalno 5 mašina alatki), funkcija predviđanja potencijalnih problema baziranih na veštačkoj inteligenciji kao i ograničenu primenu Cloud aplikacija. Iz toga se može zaključiti da je platforma u trenutnom stepenu razvoja namenjena za digitalizaciju manjih proizvodnih sistema koji poseduju mašine alatke sa upravljačkim sistemima proizvođača Heidenhain pri čemu se skladištenje podataka realizuje lokalno na računaru odgovornog lica.

3.4 DMG MORI – CELOS

Jedan od najvećih proizvođača numerički upravljanih mašina alatki u svetu (2023 proizveo oko 25000 mašina) Deckel Maho Gildemeister Mori Seiki (DMG Mori) je za potrebe digitalizacije mašina alatki koje proizvodi razvio platformu Celos, koja je prilagođena upravljačkim sistemima i pratećim podsistemima različitih proizvođača. Zbog potreba za integrisanjem funkcija koje obezbeđuju: upravljanje proizvodnjom, nadzorom mašina alatki, preventivnim održavanjem i optimizacijom procesa baziranom na povratnoj sprezi ova platforma spada u grupu platformi baziranih na lokalnom skladištenju i obradi informacija. Na slici 16 je prikazana aplikacija u okviru Celos platforme namenjena za nadzor nad pojedinim podsistemima mašina alatki i optimizaciju njihovog rada u realnom vremenu.



Slika 16. Nadzor nad podsistemima mašine alatke u okviru platforme Celos

U nedostatke ove platforme spadaju smanjena mogućnost prilagođavanja korisniku, zavisnost od kvaliteta infrastrukture za internet, potrebom za obučavanje korisnika kao i ograničenim mogućnostima integrisanja mašina i opreme drugih proizvođača.

4. PRIMENA DIGITALIZACIJE U INDUSTRIJI REPUBLIKE SRBIJE

Prerađivačka industrija u Republici Srbiji je poslednjih dvadeset godina doživela značajne izmene koje su uticale i na koncepcije samih proizvodnih pogona kao i potencijale njihovog usavršavanja. Poslednjih dvadeset godina mašinska industrija u Srbiji je usmerena ka modernizaciji proizvodnih postrojenja u cilju postizanja kriterijuma za izvoz proizvoda. Taj razvoj je usmeren na privlačenje investicija i otvaranje novih industrijskih kapaciteta u određenim proizvodnim sektorima (autoindustrija, energetika, ...) kao i formiranju malih i srednjih preduzeća sa kapacitetima usmerenim na uslužnu mašinsku obradu u okvirima koje dozvoljava njihov tehnološki nivo. U današnjim uslovima izvoz koji ostvaruje mašinska industrija iznosi oko 20% izvoza republike Srbije [14].

Zbog potrebe za konkurentnosti na međunarodnim tržištima mogu se uočiti tendencije za unapređenje proizvodnje nabavkom novih mašina i modernizacijom postojećih kroz automatizaciju. Pored toga izražena je i potreba za digitalizacijom proizvodnih kapaciteta u cilju optimizacije njihove upotrebe. Primeri primene platformi namenjenih digitalizaciji mašinske proizvodnje sa prvenstvenim ciljem unapređenja i optimizacije rada mašina alatke se mogu sresti u našoj industriji. Neki od primera se navode u nastavku.

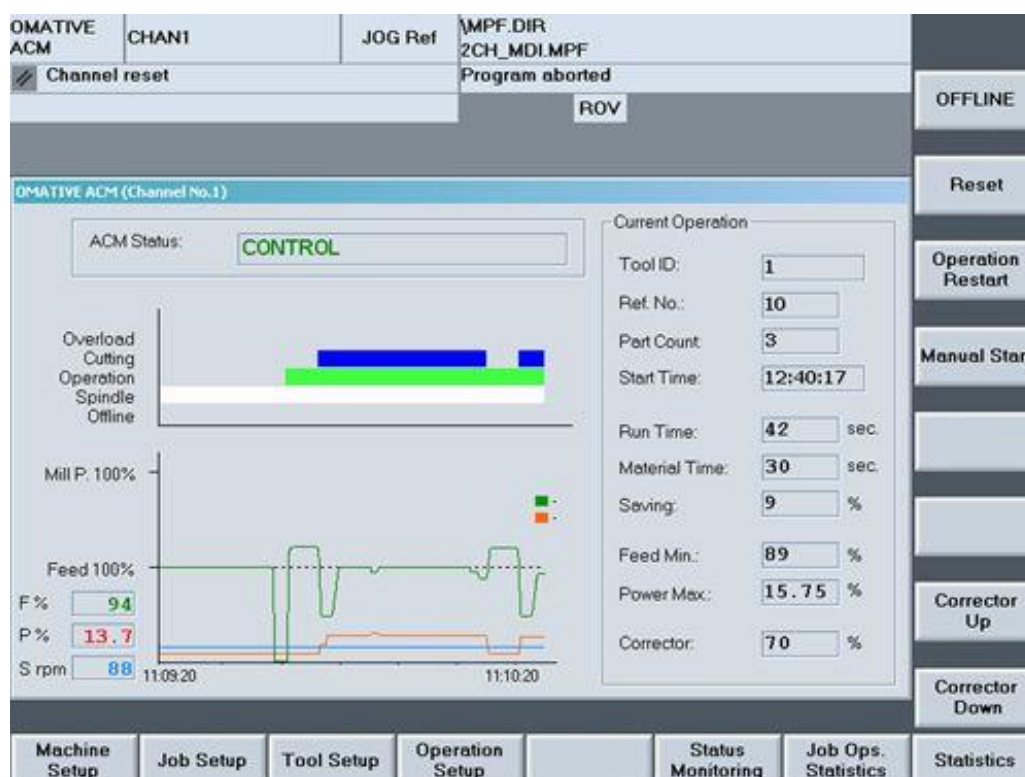
4.1 Mecafor Kikinda

Kompanija Mecafor iz Kikinde je deo francuske kompanije La Fonte Ardennaise Group koja se bavi obradom odlivaka. U pogonu u Kikindi (Slika 18) u kome se vrši mašinska obrada odlivaka kao i uslužna mašinska obrada za veliki broj proizvođača automobila se nalazi veći broj obradnih centara za glodanje i struganje različitih veličina.



Slika 18. Mecafor Kikinda

U okviru plana optimizacije proizvodnje u proizvodnom pogonu Mecafor je na obradne centre koji se koriste za tešku i vremenski dugotrajnu mašinsku obradu implementirali deo softvera proizvođača Siemens koji koristi Edge Computing tehnologiju za optimizaciju obrade u realnom vremenu. Radi se o softveru za optimizaciju procesa obrade: Adaptive Control & Monitoring suite (ACM) koji se implementira u upravljačku jedinicu (ili namenski računar koji se ugrađuje kao dodatak upravljačkoj jedinici). Primenom softvera sakupljaju se podaci o utrošenoj energiji u procesu obrade i silama koje se javljaju na glavnom vretenu i uzevši u obzir karakteristike materijala koji se obrađuje i geometrije alata vrši korekcija pomaka. Na slici 19 je prikazan deo korisničkog interfejsa mašine u okviru kog se prikazuju podaci o obradi



Slika 19. Prikaz korisničkog interfejsa ACM paketa za adaptivno upravljanje obradom

Pored toga je moguća i detekcija loma alata i automatizovano zaustavljanje procesa obrade ukoliko do takvog događaja dođe. ACM softver je integrisan u 8 obradnih centara za glodanje i prema režima rukovodioca proizvodnje u zavisnosti od zahvata obrade obezbeđuje uštede u vremenu obrade od 5 do 10%.

Koncepcija primenjena za razvoj ovog softvera je zasnovana na poznatim principima ali je integracija u Edge Computing platformu omogućila da se podaci o obradi skladište, kasnije obrađuju i da informacije o uštedama i neželjenim događajima budu automatski distribuirane službama pripreme alata, održavanja itd.

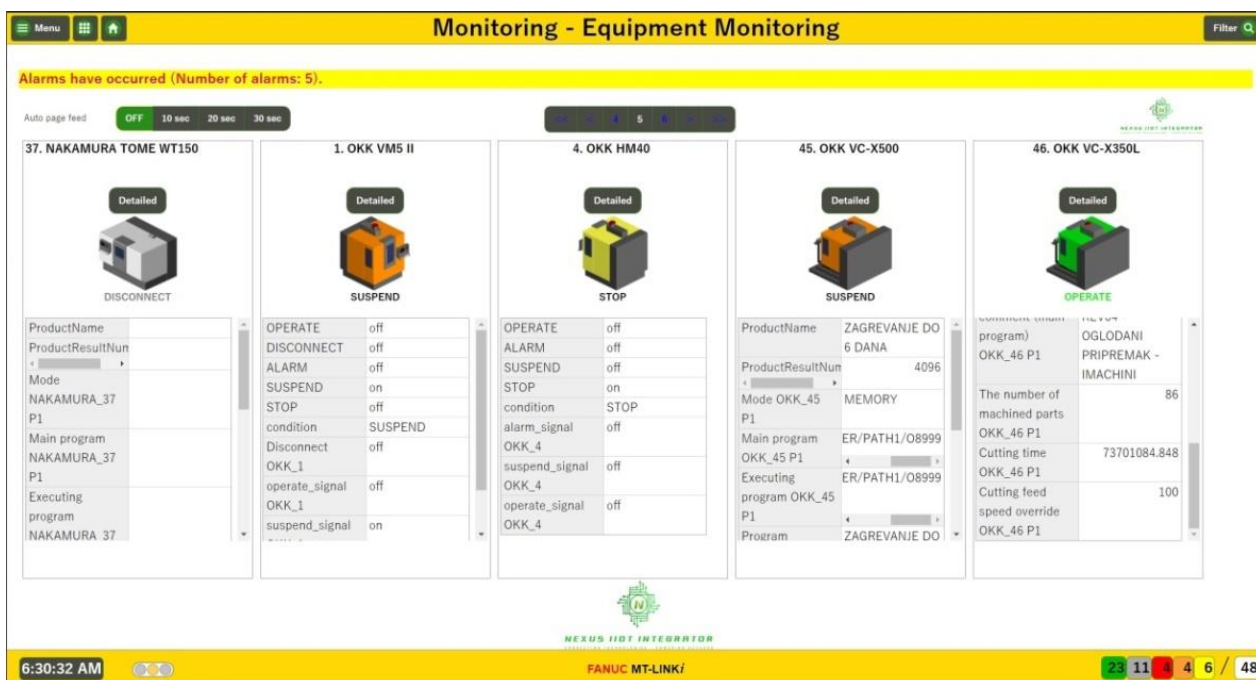
4.2 Unimet Kać

Unimet je kompanija iz Kaća je kompanija koja specijalizovana za izradu mašinskih delova i podsklopova sa kompleksnim geometrijskim i tolerancijskim karakteristikama. To su: pozicioneri i davači položaja namenjeni za upravljanje protokom fluida, ventili, laserski uređaji za građevinarstvo, podsklopovi za mašine za manipulaciju delovima u elektronskoj industriji, delovi mašina za pakovanje i pneumatskih uređaja kao i delovi za avio industriju (Slika 20).



Slika 20. Proizvodni pogon Unimet-Kać

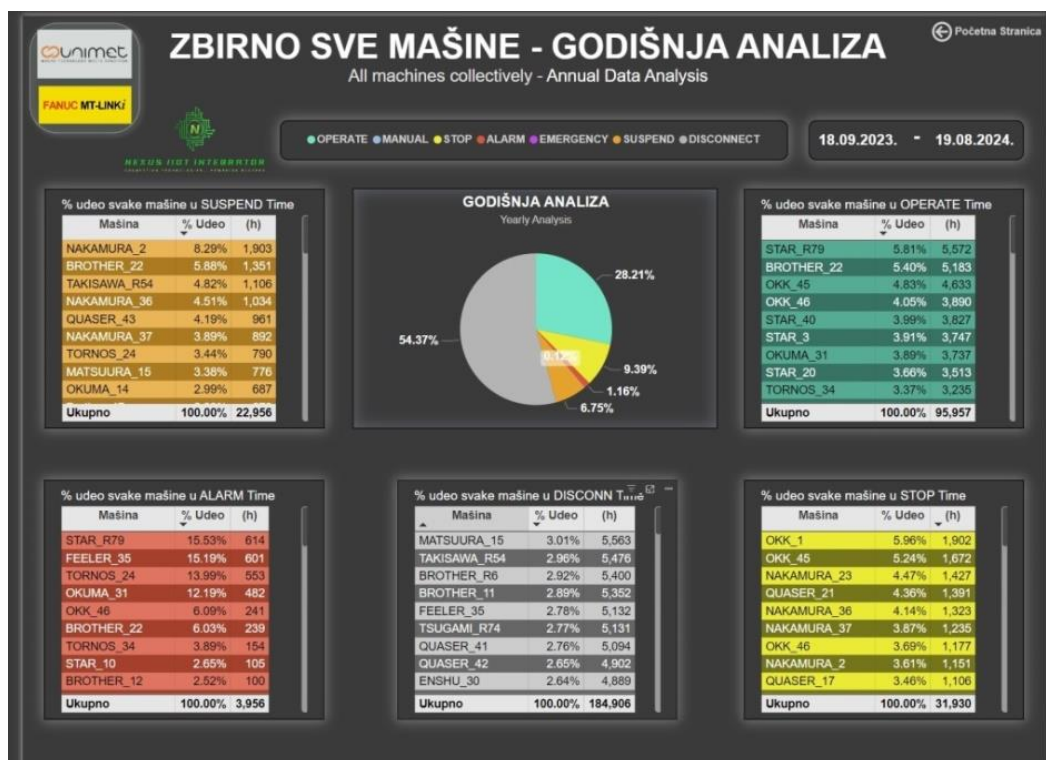
Kompanija poseduje oko 80 numerički upravljanih mašina alatki, obradnih centara i fleksibilnih tehnoloških modula. Zbog potrebe za optimizacijom proizvodnje i uvidom u stanje mašina alatki u kompaniji je implementirana Fanuc MT-LINKi platforma koja je u trenutnom stanju obuhvatila 50 numerički upravljanih mašina alatki sa pratećim posistemima (za manipulaciju radnim predmetima, alatima i sl.). Osnovnu specifičnost proizvodnog pogona je činjenica da veći deo mašina poseduje upravljačke sisteme čiji proizvođač nije Fanuc. Iz tog razloga su upotrebljeni standardni komunikacioni protokoli (OPC-UA i MTConnect) za vezu sa sistemom. MT-LINKi realizovano rešenje je bazirano na lokalnom skladištenju podataka (dva računarska sistema za sakupljanje podataka i jedan za obradu informacija, formiranje izveštaja i distribuciju) je trenutno integrisano oko 1500 parametara preuzetih sa mašina. Na slici 21 je prikazan izveštaj o trenutnom stanju pet mašina alatki.



Slika 21. Izveštaj o trenutnom stanju mašina

Podaci koji se dobijaju iz sistema MT-LINKi sistema predstavljaju niz diskretnih vrednosti koji se zbog preglednosti obrađuju i prezentuju kroz skup izveštaja. Na slici 22 je prikazan izveštaj o vremenskim

parametrima prema grupi mašina koncentrisanih u jednom pogonu kompanije. Vremenski parametri obuhvataju: vreme provedeno u radu, pripremi obrade (podešavanju), zastoju uzrokovanom alarmom i isključenom stanju.



Slika 22. Izveštaj MT-LINKi sistema o parametrima aktivnog rada mašina

5. ZAKLJUČCI

Usavršavanje proizvodnih postrojenja i povećanje konkurentnosti privrede na globalnim tržištima u današnjim uslovima predstavlja jedno od strateških opredeljenja svake države koja se oslanja na sopstvene tehničko tehnološke kapacitete. To je naročito važno na tržištima kod kojih postoji problem sa veličinom, kvalifikovanom radnom snagom, i sistematikom pristupa razvoju industrije. Podizanje tehnološkog nivoa proizvodnih postrojenja uvođenjem digitalizacionih platformi uz intenzivnu edukaciju korisnika u ovakvim slučajevima predstavlja jedan od mogućih pravaca razvoja industrije. Republika Srbija sa trenutnom industrijskom proizvodnjom i planovima daljeg razvoja privrede spada u kategoriju država kod kojih je neophodno intenzivno prilagođavanje trendovima u cilju dostizanja konkurentnosti i obima proizvodnje.

U uvodnom delu rada naglašeni su neki od događaja i metarmofosa u oblasti proizvodnih tehnika i tehnologija. Poseban interes predstavlja period od poslednjih šezdeset godina. Iako je značaj primene računara u proizvodnim tehnologijama uočen već sedamdesetih godina dvadesetog veka, pojam CIM sistema, nove filozofije u proizvodnoj tehnologiji, pojavio se sredinom osamdesetih godina, a značajnija primena u industrijskim pogonima tek krajem dvadesetog veka. Ovo se može ilustrovati podatkom da je početkom 21. veka u Evropi 38% obradnih sistema bilo vezano u automatske fleksibilne tehnološke sisteme. Kako je u radu naglašeno, poslednju fazu razvoja predstavlja „digitalna fabrika”. Digitalne fabrike su sve više realnost, posebno u industriji poluprovodnika, autoindustriji i drugim proizvodnim industrijama.

„Izgleda da će novi koncept proizvodnog sistema, razvijen kao jedinstvena, koordinirana i automatizovana celina, proizvesti revoluciju u oblasti proizvodnje kakvu danas poznajemo. Kao takav, ovaj koncept i njegov razvoj pružaju svima nama koji radimo u oblasti istraživanja proizvodnog inženjerstva ogroman izazov, povećan zamah i promenjen pristup našem istraživanju. Predstojeća era bi trebalo da bude najuzbudljivija za sve nas, kao i period veoma ubrzanog napretka. Svi tome možemo da se radujemo sa velikim entuzijazmom.” [21]. Ova izjava je primenljiva i danas kao i pre 40 godina!

Na kraju, u radu se ukazuje na neke moguće pravce razvoja mašina alatki. U bliskoj budućnosti mašine alatke će moći izvršavati aktivnosti “samo kalibracije” i “samo održavanja”, a imajući u vidu da je modularno projektovanje mašina alatki, kao i rekonfigurabilne mašine alatke realnost, očekuje se i mogućnost “samo rekonfiguracije mašina alatki”.

6. LITERATURA

- [1] Ali Laghari, R., Mekid, S.: *Comprehensive approach toward IIoT based condition monitoring of machining processes*, Measurement, 2023. 217: pp. 113004.
- [2] Altintas, Y.: *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. 2012: Cambridge University Press.
- [3] Ayres, R.U., Haywood, W., Merchant, M.E., Warnecke, J.: *Computer Integrated Manufacturing: The past, the present and the future Volume 2*. 2007: Springer Publishing Company, Incorporated.
- [4] Chen, J., et al.: *Toward Intelligent Machine Tool*, Engineering, 2019. 5(4): pp. 679-690.
- [5] Cirp. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. 2014.
- [6] de Lacalle, N.L., Mentxaka, A.L.: *Machine Tools for High Performance Machining*. 2008: Springer London.
- [7] Elkateb, S., Métwalli, A., Shendy, A., Abu-Elanien, A.E.B.: *Machine learning and IoT – Based predictive maintenance approach for industrial applications*, Alexandria Engineering Journal, 2024. 88: pp. 298-309.
- [8] Fertig, A., Weigold, M., Chen, Y.: *Machine Learning based quality prediction for milling processes using internal machine tool data*, Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2022. 4: pp. 100074.
- [9] Garcia-Carrillo, D., et al.: *Ad-hoc collision avoidance system for Industrial IoT*, Journal of Industrial Information Integration, 2024. 38: pp. 100575.
- [10] Gatalo, R.: *Numeričko upravljanje mašinama alatkama i NU tehnologija - Stanje i tendencije razvoja*, in *XVI Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije* 1982: Mostar. p. 293-326.
- [11] Gatalo, R., Zeljković, M.: *Enciklopedija Vojvodine*, 2008, Akademija nauka AP Vojvodine: Novi Sad.
- [12] Jaskó, S., Skrop, A., Holczinger, T., Chován, T., Abonyi, J.: *Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools*, Computers in Industry, 2020. 123: pp. 103300.
- [13] Kalajdžić, M.: *Proizvodno mašinstvo, nauka - obrazovanje - inženjerstvo*, in *25. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije* 1994, Mašinski fakultet Beograd: Beograd. p. 7-39.
- [14] Kovačević, M.: *Republika Srbija, Izveštaj, Bruto domaći proizvod, 2022.*, in *Saopštenje, Godišnji nacionalni racuni* 2023, Republički zavod za statistiku: Beograd. p. 9.
- [15] Leng, J., et al.: *Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part I): Design thinking and modeling methods*, Journal of Manufacturing Systems, 2024. 76: pp. 158-187.
- [16] Leng, J., et al.: *Towards resilience in Industry 5.0: A decentralized autonomous manufacturing paradigm*, Journal of Manufacturing Systems, 2023. 71: pp. 95-114.
- [17] Liu, Z., Lang, Z.-Q., Gui, Y., Zhu, Y.-P., Laalej, H.: *Digital twin-based anomaly detection for real-time tool condition monitoring in machining*, Journal of Manufacturing Systems, 2024. 75: pp. 163-173.
- [18] Lukić, L.: *Fleksibilni tehnološki sistemi - Monografija*. 2008, Kraljevo: Univerzitet u Kragujevcu.
- [19] Merchant, M.E.: *Manufacturing Systems in The 21st Century*, in *Cooperative Knowledge Processing for Engineering Design* 1999, Kluwer, B.V. p. 3–16.
- [20] Merchant, M.E.: *The precepts and sciences of manufacturing*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1988. 4(1): pp. 1-6.
- [21] Merchant, M.E., Dornfeld, D., Wright, P.K.: *Manufacturing - Its evolution and future*, Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME, 2005. 33: pp. 211-218.
- [22] Parhi, S., Kharat, M.G., Ghatak, R.R., Kharat, M.G.: *Quantifying the decentralization elements for robust smart manufacturing systems*, Procedia Computer Science, 2024. 232: pp. 2847-2856.
- [23] Paz, E.B., Ceccarelli, M., Otero, J.E., Sanz, J.L.M.: *A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms*. 2010: Springer Netherlands.
- [24] Richard, G.: *Traité des machines-outils*. 1895, Paris: Librairie polytechnique Baudry et Cie.
- [25] Scheer, A.-W., *ARIS — Architektur integrierter Informationssysteme*, in *Handbuch Informationsmanagement: Aufgaben — Konzepte — Praxislösungen*, A.-W. Scheer, Editor. 1993, Gabler Verlag: Wiesbaden. pp. 81-112.
- [26] Scheer, A.W.: *CIM: Computer Integrated Manufacturing : Towards the Factory of the Future*. 1991: Springer-Verlag.
- [27] Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R.: *Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools*,

- A review, Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2023. 2: pp. 100009.
- [28] Spur, G.: *Advanced manufacturing systems*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1988. 4(1): pp. 7-12.
- [29] Tabaković, S., Zeljković, M., Grujić, J. . *Savremene tehnike i tehnologije razvoja proizvoda u medicinskoj endoprotetici*, in *43 Jupiter Konferencija 2022*: Beograd. p. UR 30-41.
- [30] Tapia, E., Lopez-Novoa, U., Sastoque-Pinilla, L., López-de-Lacalle, L.N.: *Implementation of a scalable platform for real-time monitoring of machine tools*, Computers in Industry, 2024. 155: pp. 104065.
- [31] Tran, M.-Q., Doan, H.-P., Vu, V.Q., Vu, L.T.: *Machine learning and IoT-based approach for tool condition monitoring: A review and future prospects*, Measurement, 2023. 207: pp. 112351.
- [32] Zhang, X., Han, C., Luo, M., Zhang, D.: *Tool Wear Monitoring for Complex Part Milling Based on Deep Learning*, Applied Sciences, 2020. 10(19): pp. 6916.
- [33] Živanović, S., Tabaković, S., Zeljković, M.: *Collaborative robots in machining tasks application and programming*, in *6th International conference Cometa 2022*, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo: Jahorina, BiH. p. 56-62.

Tabaković, S., Zeljković, M.

DIGITALIZATION OF MACHINE TOOLS - POSSIBILITIES I APPLICATION IN THE REPUBLIC OF SERBIA

Abstract: *The history of the improvement of machine tools from their beginning to the present day illustrates the process of technological development of human society. Also, their development and improvement directly affect the fulfillment of market needs in many areas of life. Throughout history, the process of developing machine tools has included several stages in which certain elements changed significantly and affected the speed and quality of product manufacturing. After the phases of electrification and automation, the development of machine tools significantly depends on the data generated during their exploitation as well as in the immediate production environment. This is how the digitization phase was born, which is a current topic in all plans for the improvement of production systems.*

The paper discusses the key issues of improving production systems by introducing digitization methods at the level of machine tools. First of all, this refers to the possibility of implementing the methods created by applying Industrial Internet of Things technologies to machine tools, as well as the advantages and disadvantages that arise in doing so. These issues are considered from the point of view of application in the industry of the Republic of Serbia, which contains several specificities, the improvement of which requires a strategic approach to the process of integrating digitization methods into individual production systems.

Keywords: *Machine tools, Digitalisation, IIoT, Optimization of manufacturing, Flexible technological systems*

Randelović S.¹⁾, Zorić A., Trajković-Milenković M.²⁾, Mladenović S., Arandelović J., Kostić N.

PROJEKTOVANJE PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA SLOŽENIH NEROTACIONIH ELEMENATA

Rezime

Duboko izvlačenje nerotacionih elemenata je proces koji danas može da se prepozna kod različitih proizvoda kako u našem okruženju tako i mnogo šire. Posebno se ističe oblast nerotacionih elemenata po svojoj složenosti i kompleksnosti u pogledu određivanja stvarnih deformacija i napona, efekta ojačavanja materijala priprema tokom procesa, dostignuti koeficijent trenja, oblika i dimenzija priprema, uticaj brzine deformacija i brzine deformisanja, kriterijuma prelaska iz elastično u plastično stanje, anizotropiji samog materijala, veličini zaostalih napona ali i pojavi loma i nabora na gotovom delu. Posebno pitanje je FEM modeliranje procesa, konstrukcija alata za duboko izvlačenje i njegove korekcije u datim uslovima kako bi se dobio željeni oblik i geometrija a sve u cilju optimizacije procesa u industrijskim uslovima.

Ključne reči: duboko izvlačenje, nerotacioni elementi, deformacija, napon, FEM, optimizacija

1. UVOD

Industrijski procesi dubokog izvlačenja svakim danom dobijaju na kompleksnosti jer se neprekidno povećava nivo složenosti geometrije gotovih elemenata uz neprekidne suprostavljene zahteva da konstrukcije budu što lakše uz povećanu izdržljivost. Drugim rečima, to znači da se dobije gotov deo složenog oblika, sa što manje materijala, uz zadovoljavajuće naponsko deformacione odnose, niže zaostale napone uz maksimalnu deformabilnost, tačnost i kvalitet. I dok su kod rotacionih elemenata, jednostavne ali i složenije geometrije, mnoga pitanja eksplicitno rešena analitičkim metodama dotle kod nepravilnih elemenata, vrlo složene geometrije, to baš ne ide jednostavno. Zato se i kod rotacionih a naročito nerotacionih elemenata koriste specijalizovani FEM softveri za metodu konačnih elemenata (AutoFORM, ABAQUS, ANSYS, STAMPACK) koji uz pažljivo planirana eksperimentalna istraživanja i metode optimizacije daju vrhunske tehnološke rezultate i ovako složene zadatke uspešno rešavaju. Veliki broj autora bavio se problemima obrade lima dubokim izvlačenjem i kao rezultat je dao svoj doprinos kroz publikovane naučne radove i industrijska rešenja (SI.1).



Slika 1. Savremeni dizajn automobila zasnovan na deformisanju lima

Iako se zaostali naponi unutar deformabilnog kontinuuma uspešno mogu ukloniti procesom žarenja ide se ka tome da njihove vrednosti budu što niže u samom procesu dubokog izvlačenja [1]. Oni imaju veliki uticaj na dimenzije gotovog dela, izdržljivost, žilavost, statičku i dinamičku čvrstoću, period do zamora, otpornost na pucanje i prostiranje loma, magnetičnost i sl. Činjenica da zaostali naponi uvek postoje i da mogu dovesti do neželjenih efekata radi se na njihovoj predikciji putem FEM softvera i izabranih modela optimizacije.

¹⁾ prof. dr Saša Randelović, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (sassa@masfak.ni.ac.rs), dr Srđan Mladenović, (mladenovic@masfak.ni.ac.rs), Jovan Arandelović (jovan.arandelovic3@gmail.com), Nikola Kostić (kostic94nikola@gmail.com)

²⁾ prof. dr Andrija Zorić, Univerzitet u Nišu, Građevinski fakultet, (andrija.zoric@gaf.ni.ac.rs), prof. dr Marina Trajković Milenković Građevinski fakultet, (trajmarina@gmail.com)

Kuriyama i koautori su razvili poseban FEM sotver za određivanje zaostalih napona po deformabilnoj zapremini izvučenog elementa u obliku limenke [2]. Oni su dobili potpuno različitu raspodelu zaostalih napona s obzirom na međusobni položaj matrice i izvlakača. Incandela i koautori u svom radu predstavili su eksplicitni algoritam za kvazi statički model preko konačnih elemenata za određivanje zaostalih napona i deformacija [3]. Padmanabhan i koautori napravili su numerički FEM model koji su namenili za analizu procesa izvlačenja boca za tečni naftni gas [4]. Oni su razmatrali promenljivu silu držanja i uslove trenja na kontaktu u specifičnim tačkama izvučenog dela tokom procesa.

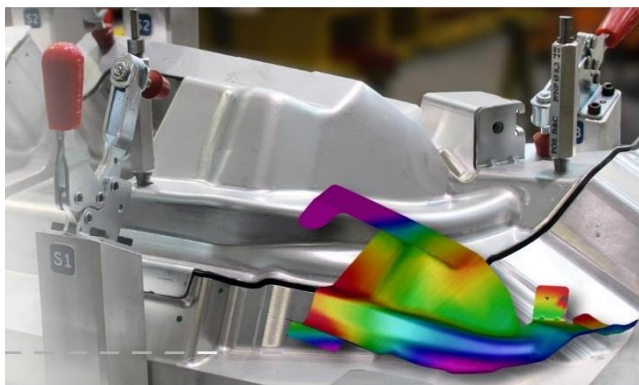
Pourkamali i koautori razmatrali su debljinu zida izvučenog element po visini, deformacionu silu i zaostale napone pri višeoperacijskom izvlačenju kako na FEM modelu tako i na samom izvučenom element [5]. Korišćenjem FEM simulacije Singh i koautori [6] su ispitivali kvalitet i zaostale napone u procesu izvlačenja sa stanjenjem s obzirom na raspored debljina po obimu zida izvučenog elementa. Đorđević i koautori [7] prepoznaju složenost procesa izvlačenja kod kompleksnih delova od legure aluminijuma, kako na pravolinijskim tako i na zaobljenim ivicama pravougaonog elementa u uglovima gde upravo dolazi do pravog procesa dubokog izvlačenja. Oni razvijaju fizički tribološki model klizanja između ravnih ploča pod promenljivim pritiskom u posebno projektovanom eksperimentalnom alatu koji se upravlja računarom analizirajući više uticajnih faktora. Menjanjući maziva na kontaktnim površinama oni prate uticaj na veličinu sile izvlačenja lima. U svom radu Padmanabhan i koautori [8] razmatrali su zaostale napone usled neujednačene deformacije kod predhodno krojenih i zavarenih limova od različitih čelika s obzirom na efekat elastičnog ispravljanja kod procesa dubokog izvlačenja.

Hassan i koautori napravili su predikciju elastičnog ispravljanja [9] za dvofazne čelične limove boljih mehaničkih karakteristika (HSS i AHSS) DP600 (0.122%C, 1.460%Mn, 0.055%Si) i DP1000 (0.14%C, 1.4%Mn, 0.03%Ni, 0.053%Si) i hladno valjani lim DC04 (0.08%C, 0.4%Mn, 0.08%Si) koji se koriste u automobilske industriji za poboljšanje performansi pri sudarima. Oni su predložili smanjenje efekta elastičnog ispravljanja sa promenljivom silom držanja lima. Sherbiny i koautori [10] su napravili poseban softverski podprogram u poznatom i proverenom softveru ABAQUS za metodu konačnih elemenata koji prati geometrijske i fizičke parametre na raspored zadebljanja i stanjenja kod izvučenog elementa, efekat stanjenja i maksimalne zaostale napone kod anizotropnih materijala pri uprošćenim graničnim uslovima. Rossini i koautori [11] su posebnu pažnju posvetili merenju zaostalih napona preko mernih traka na samom zidu izvučenog elementa naglašavajući fizička ograničenja destruktivnih, poludestruktivnih i ne destruktivnih metoda. Shuhui do detalja daje prikaz osnovnih principa dubokog izvlačenja [12], objašnjenje fundamentalnih parametara i naprednih tehnologija u ovoj oblasti. Daje objašnjenje pojedinačnih parametara, grešaka i defekata koji mogu da se jave i procenu deformabilnosti. U radu su dati i specijalni postupci dubokog izvlačenja kao što su hidroforming, oblikovanje gumom i drugim aktivnim medijumima kako na temperaturi okoline tako i na povišenim temperaturama.

Lingbeek i koautori su pokazali FEM simulacioni model procesa dubokog izvlačenja [13] gde se vide potpuno drugačiji rezultati ukoliko se modeli izvlakača i matrice izaberu kao kruto odnosno deformabilno telo iako se radi o relativno malim deformacionim silama duboko izvučenog kompleksnog osnosimetričnog prizmatičnog elementa. Ken-ichi i koautori [14] su izveli test izvlačenja cilindričnih elemenata od superplastičnih materijala, debljine 1mm, sproveden na povišenoj temperaturi kako bi se povećao odnos izvlačenja, tačnost i kvalitet gotovog dela a u zavisnosti od brzine deformacije. Uticaj sile držanja lima i njen efekat kao i brzine deformisanja, odnosno brzine kretanja izvlakača, na pojavu nabora na vencu elementa razmatrani su teoretski ali i eksperimentalno. Istovremeno variranje sile držanja lima ima veliki uticaj na izvodljivost procesa i ravnomernu debljinu zida izvučenog elementa dok povećana brzina izvlačenja ima uticaj na ukupno trajanje procesa odnosno njegovo skraćenje.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA PARAMETARA PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA

Proces dubokog izvlačenja je tehnološki vrlo kompleksna i osetljiva tehnologija jer zavisi od velikog broja parametara u vrlo uskim granicama. Sama poteškoća merenja i prikupljanja podataka prisutna je zbog geometrije alata koji gotovo da je potpuno zatvoren sklop tako da se veći broj parametara određuje u posebnim eksperimentalnim alatima i na modelima kako bi se u sam proces dubokog izvlačenja ušlo sa njihovom fizičkom predikcijom i tačnim opsegom u kome se nalaze.



Slika 2. Složeni izvučeni deo sa virtualnim FEM modelom, AutoFORM®

Deformacije alata (držač lima za nesimetrični deo) u oblasti elastičnosti evidentno su vrlo male ali i tako male one predstavljaju veliki uticaj na kontaktno trenje i dostignuti koeficijent trenja na svim dodirnim površinama. Pripremak ima neprekidan kontakt sa matricom u kojoj se deo izvlači, izvlačačem koji definiše unutrašnji oblik izvučenog dela i preko koga se najčešće prenosi deformaciona sila, držačem lima preko koga se prenosi posebna sila držanja odnosno pritisak potreban da stvori takvo naponsko stanje u materijalu elementa koje neće prouzrokovati nabore niti kidanje i lom deformabilne strukture materijala (Sl.2).

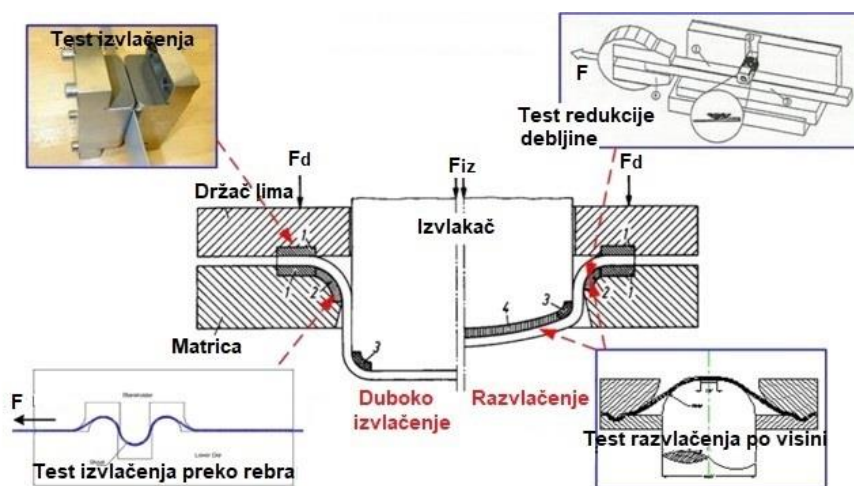
Neke pojave pri samom procesu dubokog izvlačenja složenog elementa teško je izmeriti a da samo merenje nema uticaj na plastično tečenje lima i kvalitet dela u toku samog procesa. Treba uzeti u obzir čak i relativno male deformacije alata i same prese na kojoj se odvija proces ali koje mogu da imaju relativno veliki uticaj na kvalitet dela. Iako male deformacije one imaju veliki uticaj na raspodelu pritiska na kontaktnoj površini. Tačno određivanje pritiska na kontaktu u daljem radu pomaže pri konstrukciji delova alata ali i smanjuje broj i vrstu oštećenja na njihovim površinama.

Parametri koji se analiziraju i prate su elastične deformacije alata, promena debljine lima i parametri na kontaktu priprema i delova alata. Kod industrijskih procesa izvlačenja nesimetričnih elemenata interakcija priprema i delova alata na kontaktnim površinama je vrlo nestacionarna i složena pa se iz tih razloga uočene pojave analiziraju na jednostavnim (osnosimetričnim) i eksperimentalnim alatima u laboratorijskim uslovima.

Ponašanje lima tokom procesa izvlačenja i razvlačenja može se proveriti kroz nekoliko specifičnih testova koji su karakteristični za odgovarajuće zone u alatu za duboko izvlačenje. Pre svega za oba postupka tu je test izvlačenja između dve ravne ploče (Sl. 3) na čijim dodirnim površinama sa limom može da se menja pritisak uz promenu koeficijenta trenja u karakterističnim granicama od 0.04 do 0.12. Trenje bi trebalo da bude što niže između matrice i lima dok između izvlačača i lima trenje treba biti nešto veće kako bi se sprečilo razvlačenje u zonama gde je neophodno duboko izvlačenje. Kod postupka razvlačenja imamo potpuno drugačiji zahtev da bi se omogućilo razvlačenje lima preko odlično podmazanog izvlačača dok je lim čvrsto uklješten na krajevima. Manje ili veće stanjenje lima na prelaznim radijusima javlja se i kod jednog i drugog postupka pa se primenjuje test razvlačenja gde se meri debljina lima i visina probnog uzorka, odnosno test redukcije debljine usled sile izvlačenja silom F gde dolazi do smanjenja debljine lima. Poseban test je određivanje granične sile F kada lim treba da pređe preko radijusa koji imaju ulogu kočćih rebara kako bi se povećali naponi u radijalnom i sprečili nabori u tangencijalnom pravcu.

Materijal eksperimentalnih uzoraka je isti kao i materijal traženog industrijskog proizvoda. Radi se o niskougleničnom prohromskom limu 304L (1.4307) debljine $s = 0.15\text{mm}$ koji se koristi za lake konstrukcije u auto industriji pri oblaganju izduvnih cevi sa termičkom izolacijom.

Dobro poznati Erichsen test (EN ISO 20482) za određivanje graničnog odnosa izvlačenja, cilindričnim izvlačačem $m = d_1 / D_0$, u ovom slučaju $\varnothing 30\text{mm}$, sastoji se u isecanju i pripremi kružnih priprema različitih prečnika, u ovom slučaju $\varnothing 58\text{mm}$, $\varnothing 55\text{mm}$ i $\varnothing 48\text{mm}$ (Sl. 4.) kako bi se utvrdilo, koji je to maksimalni prečnik priprema, koji može da se izvuče, na eksperimentalnom alatu, koji je postavljen na test hidrauličnoj presi, za specijalne metrološke namene kod tehnologija dubokog izvlačenja.



Slika 3. Provera tehnooških parametara u četiri zone kompleksnog elementa

Dobijeni odnosi izvlačenja su redom, u prvom slučaju 0.52, u drugom slučaju 0.55 i u trećem slučaju 0.62 koji je ujedno i minimalni odnos izvlačenja koji je dao zadovoljavajući kvalitet izvučenog gotovog dela. Prva dva odnosa izvlačenja nisu mogla da daju uspešno izvučen deo zbog probijanja dna i stvaranja nabora. Kako se u realnim uslovima radi o nepravilnoj geometriji, to bi trebalo da bude proba za kvadratni ili pravougaoni alat sa nekoliko prelaznih radijusa i eventualno podesivim prelaznim kočćim rebrima kojima se u većoj meri pokriva varijantnost oblika i geometrije u realnim uslovima.

Eksperimentalni postupci dubokog izvlačenja najčešće se zasnivaju na određivanju graničnog odnosa izvlačenja gde se izabranim izvlačačem proba da dobije deo sa što manjim prečnikom odnosno minimalni odnos izvlačenja. Granični odnos izvlačenja za izabrani materijal priprema je parametar koji ukazuje na mogućnost dobijanja što veće visine izvučenog cilindričnog dela dela pri zadatim eksperimentalnim uslovima. Povećanjem prečnika priprema dobija se mogućnost

dostizanja veće visine izvučenog dela ali njegove mehaničke karakteristike ograničavaju tu visinu do određene granice. Jasno je da će ta visina biti nešto veća upotrebom držača lima sa promenljivom silom držanja kakav se slučaj upravo javlja i u realnom procesu kod izvlačenja nepravilnih geometrijskih oblika.

Ovaj test podrazumeva merenje deformacione sile izvlačenja, uz promenu brzine deformisanja, promenu sile držanja kao i promenu parametara eksperimentalnih alata (radijusa matrice i izvlačka) a sve sa ciljem pokrivanja što šireg opsega alata koji se koriste u industrijskim uslovima. Činjenica da nerotacioni elementi složene geometrije, upravo imaju istovremeno nejednake stepene deformacije po svojoj geometriji (najrazličitije i sve složenije promene oblika) navodi na zaključak da su kod relanog dela, gotovo u istom trenutku, prisutni različiti stepeni deformacije.



Slika 4. Test izvlačenja za određivanje minimalnog odnosa izvlačenja

Površine uzorka mogu biti podmazane različitim sredstvima (specijalna kvalitetna sintetička ulja, mineralna i ulja, i sl.) kako bi se odredili najoptimalniji uslovi trenja kako u eksperimentalnim uslovima tako i u realnom industrijskom procesu. Samo podmazivanje može da smanji kontaktno trenje i omogući izvodljivost procesa dubokog izvlačenja čak i za veće odnose izvlačenja. Ovde treba naglasiti činjenicu, da kod ovakvih procesa, nije jednostavno postići isti stepen prijanjanja maziva u različitim kritičnim tačkama promenljive geometrije.

Test razvlačenja lima omogućuje određivanje maksimalne dubine razvlačenja lima bez mogućnosti izvlačenja (maksimalna sila držanja od samog početka procesa), odnosno maksimalna dubina razvlačenja a da se na spoljašnjoj površini lima još uvek ne pojavljuju pukotine i cepanje lima (Sl. 5). Pojave prvih linija tečenja na razvučenom centralnom delu ukazuju da će vrlo brzo doći do pojave loma. Već je rečeno da procesi dubokog izvlačenja i razvlačenja idu zajedno kod složenih nesimetričnih profila i da je dobro poznavati granicu do koje lim može biti razvučen kako bi se zadati nepravilni oblici dobili. Naravno, da se u realnim procesima do te granice ne može ići jer se zapravo proverava minimalno zadata debljina lima na kritičnim mestima razvučenog lima, koja zadovoljava zadatu namenu finalnog proizvoda i definisane kriterijume proizvođača. Za izabrani lim, pri tri ponovljena merenja, dostignuta visina bez i sa podmazivanjem je gotovo ista 11.7mm, kada se na obodima razvučenog lima javljaju pukotine (Sl. 5). Ova činjenica ukazuje da kritično mesto merenja deformacija mora da bude na obodu a ne na samom vhu razvučenog lima.



Slika 5. Rezultati testa razvlačenja do pojave loma

Ovakva ispitivanja, vrlo često, sprovode se i na povišenim temperaturama priprema i alata, do 500°C, čime se postiže povećana deformabilnost priprema i dobijaju nove tehnološke mogućnosti kako kod eksperimentalnih tako i složenih geometrija alata u realnim uslovima.

Posebna pažnja u procesima dubokog izvlačenja posvećuje se modelu ojačavanja materijala priprema koji zavisi od specifičnih karakteristika materijala priprema u različitim pravcima u odnosu na pravac valjanja (0°) upravno na pravac valjanja (90°) i pod uglom od (45°) (Sl. 6). Za tačniju aproksimaciju ojačavanja dobijeni rezultati probom na istezanje SHIMADZU AGS-X 10KN, sa tenzometrima za praćenje deformacija, se kombinuju sa rezultatima dobijenim testom na sferično izvlačenje ili naduvavanje lima (bulge test).

Izabrani lim ima relativno veliku zateznu čvrstoću ($\sigma_m = 694.35 \text{ N/mm}^2$) prema očekivanim vrednostima granice tečenja ($\sigma_{0.2} = 280 \text{ N/mm}^2$), početnu srednju debljinu uzorka $s_{sr} = 0.153 \text{ mm}$ i sa srednjom širinom $b_{sr} = 9.87 \text{ mm}$. Kao

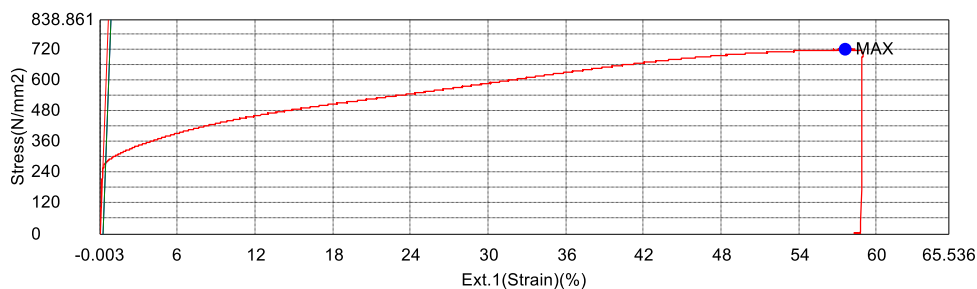
parametar deformabilnosti obično se uzima odnos napona tečenja i čvrstoće materijala ($a_\sigma = \sigma_{0.2} / \sigma_m$). Što je vrednost ovog parametra manja to materijal pokazuje bolje karakteristike u pogledu obradivosti i deformabilnosti (u ovom slučaju to je pravac valjanja 0°). U tom smislu naročito je poželjno da materijal ima što nižu granicu tečenja (Sl. 7) jer se u tom slučaju smanjuje deformacioni otpor i postiže ravnomernija deformacija (opasnost od lokalizacije deformacije je manja).



Slika 6. Epruvete isečene pod različitim uglovima za test na kidalici

Tabela 1. Mehaničke karakteristike pripreмка

	Napon $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	Napon σ_m (N/mm ²)	Izduženje Agt (%)	Odnos $a_\sigma = \sigma_{0.2} / \sigma_m$	b [mm]	s [mm]	Faktor r
00-01	274.6	719.5	57.5	0.381	7.41	0.124	1.36
00-02	282.3	700.7	57.7	0.403	7.46	0.128	1.33
90-01	299.2	684.1	51.6	0.437	7.37	0.119	1.16
90-02	290.6	689.3	58.2	0.422	7.41	0.125	1.42
45L-01	284.7	685.8	58.2	0.415	7.3	0.123	1.38
45L-02	285.0	686.7	57.8	0.415	7.37	0.128	1.64

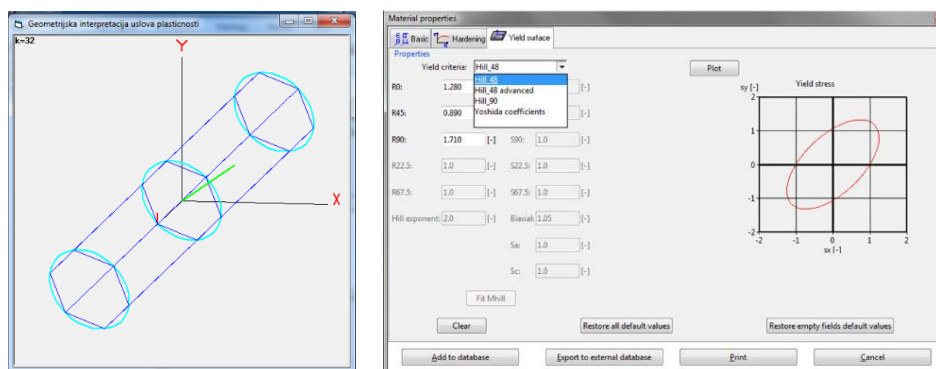


Slika 7. Kriva $\sigma - \epsilon$ za epruvetu isečenu pod uglom 0° snimljena na kidalici

Kada su u pitanju ostali parametri, potencijal deformabilnosti materijala raste sa povećanjem vrednosti eksponenta deformacionog ojačavanja n , ravnomernog izduženja φ_m i faktora normalne anizotropije r koji ukazuje na otpornost materijala ka stanjenju što pozitivno utiče na proces dubokog izvlačenja i dostizanje većih visina gotovog dela. U ovom slučaju njegova srednja vrednost $r_{sr} = 0.25(r_{00}+2r_{45}+r_{90})$ je za prva merenja $r_{sr} = 1.26$ odnosno za druga $r_{sr} = 1.45$ (tabela 1).

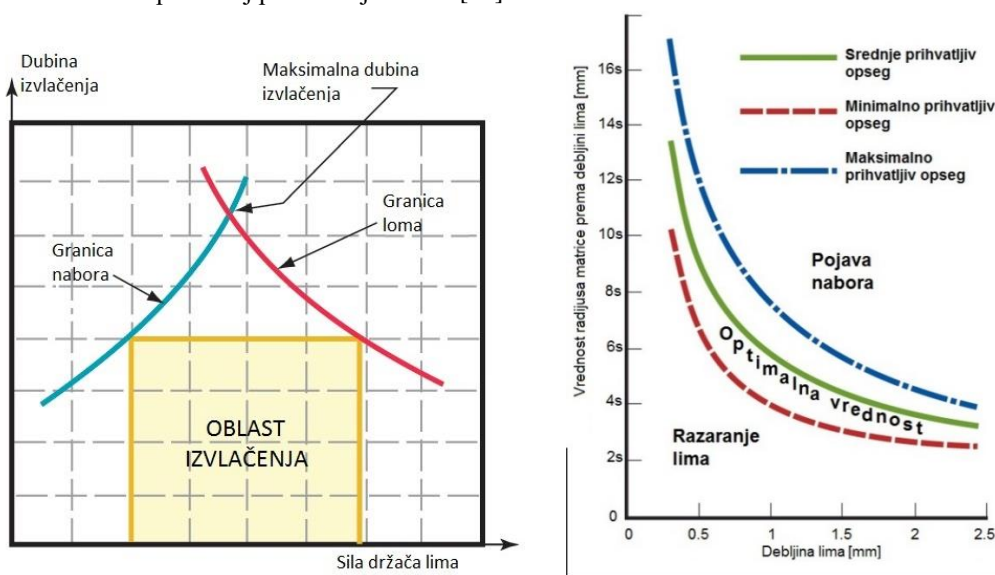
Prelazak iz elastično u plastično stanje definisan je za ravansko naponsko stanje pri deformisanju lima, koja za taj slučaj od prostornog cilindra, beskonačne dužine, u koordinatnom sistemu glavnih napona $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ prelazi u konturu plastičnosti po Hillu u koordinatnom sistemu $\sigma_1 - \sigma_2$ (Sl. 8). Problem početka plastične deformacije i kriterijuma prelaska iz elastičnog u plastično stanje predmet je istraživanja mnogih autora [15,16].

Kao rezultat tih istraživanja izvršena je implementacija pomenutog kriterijuma Yld2000-2d u komercijalni softver LS-Dyna [15]. Razlika u odnosu na standardne kriterijume je u činjenici da funkcionalni parametri zavise od ekvivalentne plastične deformacije kao i od brzine deformacije. Daje se detaljan opis modela i identifikacija parametara za apdejtovanje napona po zapremini pripreмка koji se modelira u procesu deformisanja dva različita materijala (aluminijum AA 5182 i čelik DC05) probom na istezanje i hidrauličko razvlačenje.



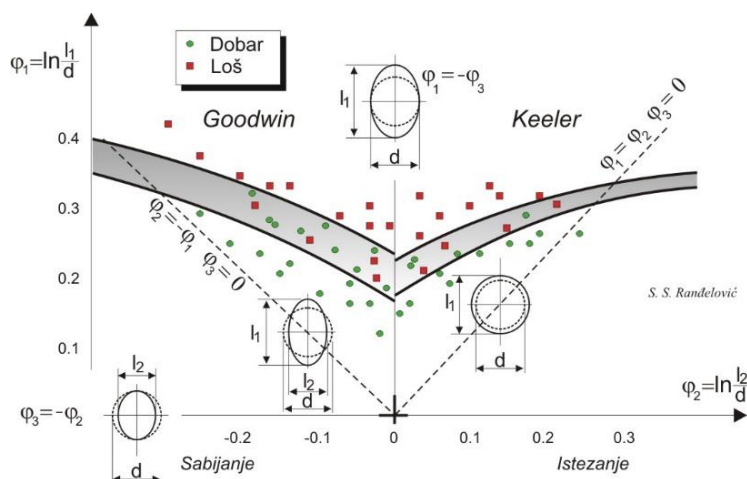
Slika 8. Kriterijum za početak plastičnog tečenja u izabranoj tački kontinuma

Da bi se dobio kompleksan gotov deo bez nabora odnosno bez pojave loma u strukturi metala neophodno je za dati materijal, u koordinatnom sistemu gde je x-osa potrebna sila držanja lima i y-osa dostignuta dubina izvlačenja, definisati oblast mogućeg (uspešnog) izvlačenja (Sl. 9). Glavni parametri koji utiču na proces su: ostvareni parcijalni pritisak držanja lima koji sprečava napore prilikom izvlačenja, veličina prelaznog radijusa alata i dostignuti parcijalni odnos izvlačenja pošto se radi o nepravilnoj prostornoj konturi [13].



Slika 9. Područje uspešnog procesa izvlačenja i preporuka za radijus matrice

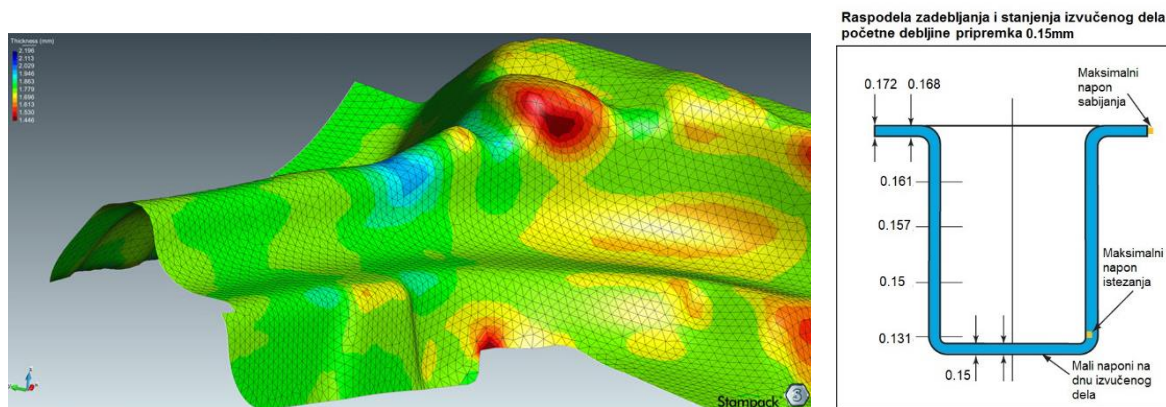
Samo određivanje dimenzija i oblika pripremk je poseban zadatak koji kod rotacionih elemenata može biti rešen vrlo jednostavno iz uslova konstantnosti zapremina koji se za lim svodi na uslov konstantnosti površina ukoliko nema znatne promene debljine lima u toku procesa deformisanja. Kod nerotacionih prostornih elemenata određivanje dimenzija i oblika pripremk danas neizostavno zahteva primenu softvera kojim će prostorna površina biti svedena na ravanski nepravilni oblik. Time se dobija na uštedi materijala uz racionalan raspored pripremk na ravnoj površini neprekidne trake lima.



Slika 10. Dijagram granične deformabilnosti

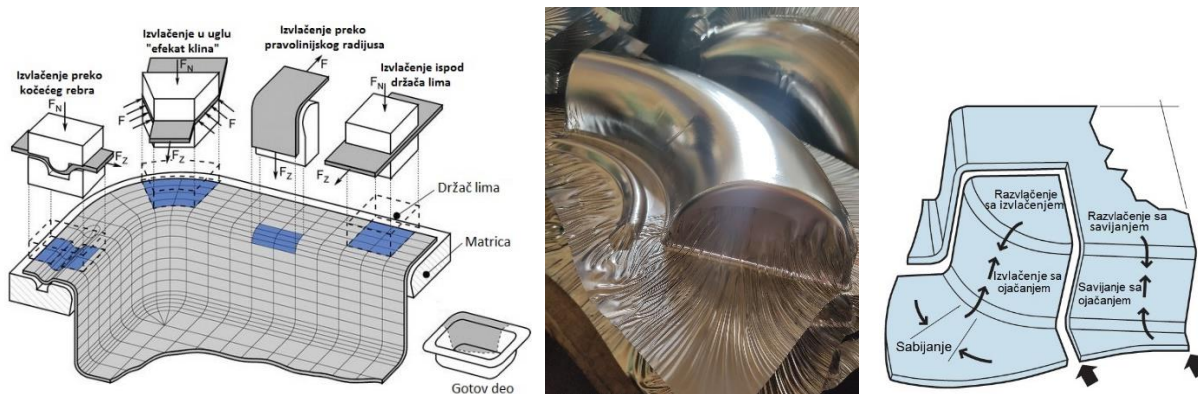
Zazor između izvlačača i matrice za izvlačenje zavisi od debljine materijala koji se izvlači i tehnološke operacije. Za prvu tehnološku operaciju taj zazor se kreće od 1.08s do 1.15s dok u narednim operacijama može da ide i do 1.2s. Pri konačnom izvlačenju, u završnoj tehnološkoj operaciji, na zadatu meru, zazor treba da je u granicama od 1.04s do 1.1s. Dijagram granične deformabilnosti za lim predstavlja važan pokazatelj sposobnosti procesa dubokog izvlačenja (Sl. 10). Test Nakazima podrazumeva izvlačenje sfernim izvlačačem (ISO 12004) specijalno pripremljenih i oslabljenih limenih epruveta, od najvećeg isečka na pripremu za izvlačenje (5mm širina uzorka) do punog kružnog priprema koji nema oslabljenih delova. Dostignute glavne deformacije unose se na Keeler Goodwinov dijagram i ukoliko su ispod krive predstavljaju deformaciono stanje gde se ne narušava struktura priprema.

U kritična oštećenja lima koja dovode do odbacivanja dela osim loma spadaju i pojave lokalnog stanjenja materijala, lokalizacije deformacije i nabiranja lima uz nedovoljno razvlačenja. Na Sl.10 prikazan je dijagram granične deformabilnosti u kome je dat položaj pomenutih zona. Može se videti da je veličina sigurne bezbedne zone u odnosu na ostale zone (zone otkaza) mnogo manja, naročito u delu koji se odnosi na procese dubokog izvlačenja. Debljina zida složenog 3D elementa i izvučenog cilindričnog elementa sa vencem, zavisi od više faktora i varira od slučaja do slučaja. Dok kod cilindričnih elemenata (Sl. 4) na dnu debljina po pravilu ostaje nepromenjena ($s = 0.15\text{mm}$), već iznad prelaznog radijusa ona ima minimalnu vrednost ($s = 0.131\text{mm}$) da bi na obodu venca čak i prešla u maksimalno zadebljanje ($s = 0.172\text{mm}$) što treba imati na umu ukoliko se radi o nepravilnim 3D elementima sa većim stepenima deformacije (Sl. 11).



Slika 11. Složeni 3D oblik i promena debljina, Stampack®, i veličina stanjenja

Kada je reč o naponsko deformacionom stanju unutar deformabilne zapremine tu su problemi veći jer treba prepoznati njihove trenutne vrednosti ali i kako se one menjaju tokom samog procesa. Naime kod rotacionih elemenata dobro su poznate matematičke zavisnosti za određivanje normalnih napona u radialnom i tangencijalnom pravcu [12]. U ovim obrascima može tačno da se prepozna porast napona usled plastične deformacije ($\approx 80\%$), porast usled sile držača lima ($\approx 15\%$) koji je gotovo neizbežan i porast napona usled savijanja i ispravljavanja na zaobljenim ivicama alata ($\approx 5\%$). Uz proizvod sa članom koji sadrži koeficijent trenja, koji direktno zavisi od primenjenog sredstva za podmazivanje i kojim se smanjuju sile trenja u alatu na kontaktu matrice i površine priprema ali i kontaktu površine priprema i držača lima dobija se maksimalna vrednost normalnog napona u radialnom pravcu. Upravo njegova maksimalna dostignuta vrednost određuje samu izvodljivost procesa jer on dovodi do kidanja na kritičnim delovima konture gde se prvo pojavljuje veliko izduženje a zatim pojava prvih znakova loma i sam lom. Uspešno izvučen deo treba da ima što niže zaostale napone koji ne dovode do preteranog stanjenja i kidanja strukture lima (Sl. 10). S druge strane, uvek prisutni normalni naponi u tangencijalnom pravcu uzrokuju pojavu nabora koja takođe nije dopustiva jer umanjuje kvalitet i tačnost izvučenog dela (Sl. 12).



Slika 12. Analiza sila na modelu alata i gotov deo sa naborima

Kod elemenata nepravilne geometrije (nerotacioni deo) može da se prepozna zona izvlačenja oko ugaonog radijusa i zona na pravim delovima gde ne postoji izvlačenje u pravom smislu već se javlja savijanje i ispravljanje preko radijusa matrice (Sl. 12). Analiza pokazuje da u zoni ugaonog radijusa postoji sabijanje materijala na vencu elementa gde se javljaju veće plastične deformacije, izvlačenje ojačalog elementa sa većim vrednostima zaostalih napona i razvlačenje na dnu pri većim silama istezanja. Na ravnim, pravolinijskim delovima izvučenog elementa javlja se izvlačenje preko pravolinijskih radijusa koje se svodi na savijanje i ispravljanje. Držač lima je element koji je neophodan za povećanje normalnih napona u radijalnom pravcu kako normalni naponi u tangencijalnom pravcu ne bi izazvali stvaranje nabora. Ukoliko to nije dovoljno primenjuju se i kočeća rebra koja na pravolinijskim delovima usporavaju relativno kretanje lima povećavajući dodatno normalne napone u radijalnom pravcu (Sl. 12).

Kvalitet i tačnost gotovog dela zavisi od trenutnog deformacionog stanja i zaostalih deformacija u materijalu gotovog dela. Plastične deformacije mogu biti prevelike i nekontrolisane na nekim delovima tako da gotov deo gubi u potpunosti svoju namenu i ispunjenje postavljenih zahteva.

Konstruktivno rešenje alata za duboko izvlačenje složenih nerotacionih elemenata direktno uslovljava nestacionarno deformaciono stanje u materijalu priprema tokom procesa izvlačenja ali i procesa razvlačenja lima koji je gotovo uvek prisutan. Ovakvi procesi neizostavno dovode do manjih ali i većih stanjenja lima koja narušavaju kvalitet i tačnost dela. To znači da relativna kretanja pokretnih elemenata alata i sama geometrija alata imaju direktan uticaj na veličinu i vrstu deformacija na površini lima. Ovde treba istaći radijuse izvlakača, prelazne radijuse matrice (Sl. 13) i zazor između izvlakača i matrice.



Slika 13. Sklop alata i prikaz držača lima sa kočecim rebrom na kojoj se postavlja pripremak

Vrednost radijusa matrice, preko koga se odvija ceo proces izvlačenja, je vrlo bitna veličina koja direktno utiče na uspešan proces izvlačenja ukoliko ima veličinu u predviđenom opsegu (Sl. 9). Naime, ukoliko je u maksimalno prihvatljivom opsegu ili iznad njega pojaviće se nabori na vencu elementa koji neće moći da se spreče nikakvom dodatnom silom držanja. S druge strane, mali radijus matrice u minimalnom opsegu neminovno vodi ka razaranju i cepanju lima trajno narušavajući kontinuitet gotovog dela. Ovi efekti mogu da se jave u jednom istom alatu na različitim mestima gotovog dela. To znači da složeni elementi zahtevaju parcijalno podešavanje parametara procesa koji ne moraju biti jednaki i istovetni za celokupnu složenu geometriju dela po obimu (Sl. 13). Pre svega promenljiva sila držača lima, prisustvo kočecih rebara, promenljiv prelazni radijusi matrice i izvlakača, promenljivi uslovi trenja na različitim delovima priprema i alata su neke od tehnoloških mogućnosti koje se mogu prilagođavati. Nije redak slučaj da promena karakteristika ulaznog materijala, u realnim uslovima, može da zahteva izmenu parametara alata ili samog procesa, kako bi uopšte bilo moguće da se deo izvuče u istom alatu koji je već bio u eksploataciji.

Kočeća rebra mogu biti povezana za pritiskivač ili izbaciivač prese kako bi se nezavisno i parcijalno upravljalo veličinom sile držanja što predstavlja zahtev prema skupljaj, potpuno upravljivoj hidrauličnoj presi dvostrukog dejstva [20], dok je jednostavnije rešenje fiksirano kočeće rebro (Sl.13) ili podesivo, čijom promenom visine može da se lim uspori ukoliko je to potrebno a u zavisnosti sa kakvim materijalom lima se trenutno radi.

3. OPTIMIZACIONI MODEL PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA

Tehnološko projektovanje kompleksnih procesa dubokog izvlačenja zahteva analizu svih navedenih tehničko - tehnoloških faktora procesa i primenu naučnih metoda u cilju modeliranja i definisanja optimalnih uslova obrade složenog nerotacionog elementa [17]. Modeliranjem se definiše matematički model dubokog izvlačenja koji u odgovarajućem stepenu tačnosti i validnosti adekvatno opisuju obradni proces sa ciljem:

- simulacije varijantnih rešenja, analize i predikcije stanja procesa još u fazi projektovanja tehnologije dubokog izvlačenja,
- definisanja matematičkih modela koji su neophodni za optimizaciju procesa dubokog izvlačenja i iznalaženje najoptimalnijih rešenja,
- kreiranje modela upravljanja za dati element u realnim industrijskim uslovima.

Matematičkim modelom se simulira ponašanje realnog sistema ili procesa, a izražava se jednačinom ili sistemom jednačina. U tu svrhu koriste se eksperimentalni podaci, realni podaci iz proizvodnje, podaci dobijeni FEM simulacijom

ili njihova kombinacija. Korišćenje realnih podataka iz proizvodnje i eksperimentalnih podataka čini matematičke modele robustnim. Dosadašnja istraživanja u oblasti modeliranja obradnih procesa pokazuju da su najpogodniji matematički modeli polinoma prvog i drugog stepena ali kada ne postoje odgovarajući analitički modeli, ili kada polinomi nižeg reda ne daju zadovoljavajuće rezultate, koriste se metode veštačke inteligencije. Tehnike određivanja korelacione krive kao što je regresiona analiza najčešće se koriste za uspostavljanje polinomske jednačine oblika $y_i = f(x_j)$ između izlazne i ulaznih promenljivih [18]. Regresiona analiza je konceptualno jednostavna metoda za ispitivanje funkcionalnih veza između promenljivih. Koristi se za: predikciju, određivanje uticaja faktora i upravljanje. Najčešće se uspostavljaju relacije između više nezavisnih (ulaznih) promenljivih i jedne zavisne (izlazne) promenljive, pa se onda govori o višestrukoj regresionoj analizi. Višestruka regresiona analiza se uopšteno može izraziti na sledeći način:

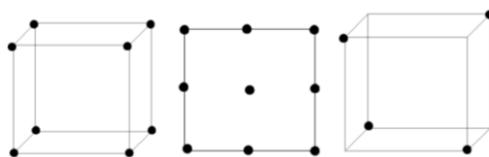
$$Y = f(X_1, \dots, X_n; b_0, \dots, b_p) + \varepsilon$$

gde je Y izlazna promenljiva, X_1, \dots, X_n ulazne promenljive, b_0, \dots, b_p regresioni koeficijenti i ε slučajna greška matematičkog modela. Za modeliranje i optimizaciju procesa dubokog izvlačenja najčešće se mogu naći pristupi koji koriste statistiku i teoriju planiranja eksperimenta (design of experiments - DOE), kao što je Tagučijeva metoda i metoda površine odziva (response surface method - RSM). Polazna tačka u kreiranju modela višestruke regresije je izbor nezavisnih promenljivih (parametara) koje će se koristiti za pronalaženje najboljeg oblika regresione jednačine [18]. Pronalaženje odgovarajućeg podskupa nezavisnih promenljivih modela se zove problem izbora promenljivih (variable selection problem). U cilju pronalaženja najboljeg podskupa nezavisnih promenljivih, neophodno je fitovanje modela višestruke regresije sa različitim kombinacijama potencijalnih parametara. Najbolji model višestruke regresije se obično bira na osnovu nekog od sledećih kriterijuma: koeficijent višestruke determinacije, korigovani koeficijent višestruke determinacije, Mallow-ov C_p koeficijent i Akaike-ov informacijski kriterijum. Računarske tehnike za generisanje regresionih modela obuhvataju dve kategorije: potpuni modeli (full fitted models) sa svim nezavisnim promenljivim i postupna regresija (stepwise regression). Postupna regresija se može izvršiti jednom od tri najčešće korišćene metode, a to su: selekcija unapred (forward selection), eliminacija unazad (backward elimination) i Efraymson postupna regresija.



Slika 14. Prikaz parametara uticajnih na zaostale napone

Pun faktorni eksperiment od šest faktora na dva nivoa 2^6 (stepen deformacije, prelazni radijusi, podmazivanje, sila držača, konstruktivno rešenje alata, stanje materijala priprema) što predstavlja 64 eksperimenta sa maksimalnim odnosno minimalnim vrednostima. Ukoliko se smanji jedan faktor (bez uticaja konstruktivnog rešenja alata jer je isti pri zadatoj geometriji i uslovima definisan) dobija se ispitivanje pet faktora na dva nivoa 2^5 što je 32 eksperimenta za dobijanje kompleksne geometrije u realnim uslovima. Daljim smanjenjem broja faktora dobijaju se četiri faktora na dva nivoa 2^4 što je 16 eksperimenta (i bez uticaja podmazivanja, ukoliko se izabere najbolje sredstvo u datim uslovima sa dobrim prijanjanjem na svim kontaktnim površinama). Ukoliko se od preostalih faktora zanemari stanje materijala priprema, za date uslove, dobija se 2^3 što je 8 eksperimenta, što već i može da se predstavi u virtuelnom trodimenzionalnom prostoru u kome se varira stepen deformacije, prelazni radijus i sila držanja na dva nivoa (Sl. 15). Ukoliko se ide ka daljem smanjenju dobija se dosta pojednostavljen proces u odnosu na početne pretpostavke.



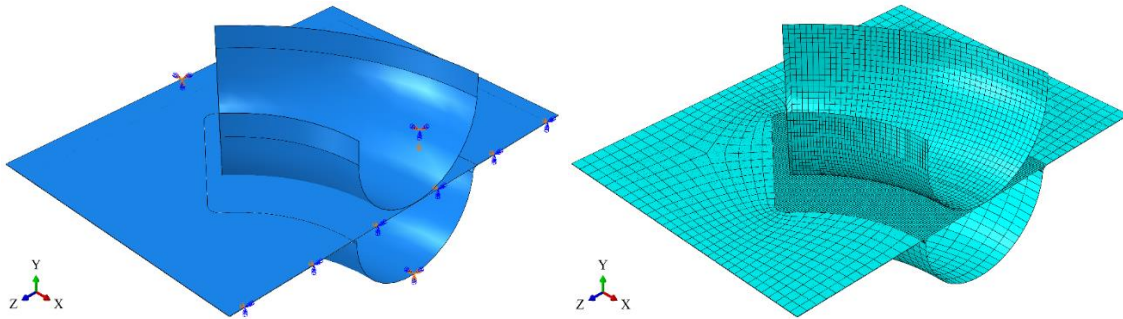
Slika 15. Model faktornog eksperimenta

Takođe, promena pristupa da se menjanju izabrani faktori na tri nivoa (primer 3^2) nije preporučljiva jer se povećava broj eksperimenta za fizičke parametre za koje je bolje varirati krajnje granice u užem opsegu. Tada se dolazi do dileme, da zapravo broj faktora i ne treba smanjivati, već se posvetiti njihovim interakcijama koje opet mogu da budu vrlo bitne i da tu treba tražiti put ka cilju koji se zove tačan i kvalitetan gotov deo. Ovakav pristup vraća nas na početak i dilemu da zapravo odmah treba uzimati u obzir i složene međusobne interakcije izabranih faktora kako bi se što bolje sagledali

realni procesi dubokog izvlačenja u eksperimentalnim uslovima. Broj ispitivanja za puni faktorni eksperiment, od 2 faktora na tri nivoa (Sl. 15) povećava se od 8 na 9 kada se planira i parcijalni faktorni eksperiment 2^{3-1} jer su bitnije međusobne interakcije i uticaji izabranih faktora uz moguće zanemarivanje jednog od tri preostala faktora (Sl.15). Traženjem prvog izvoda, po kritičnom parametru, dobijene regresione jednačine dobija se njegova optimalna vrednost u zadatim proizvodnim uslovima.

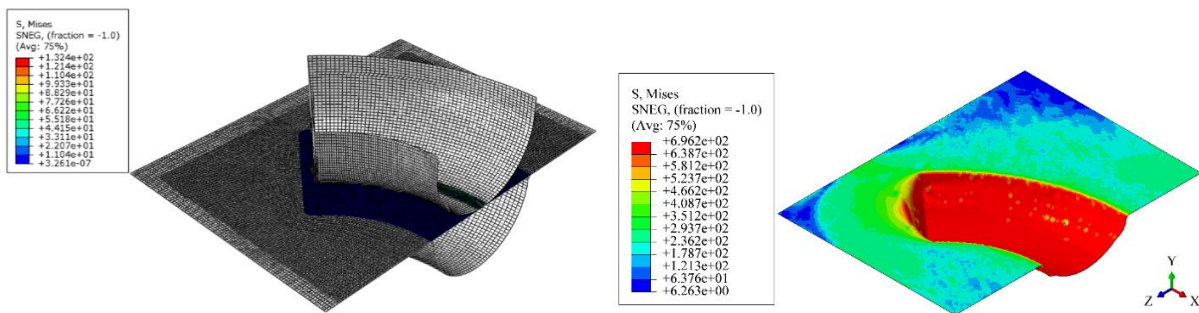
4. FEM ANALIZA PROCESA IZVLAČENJA SLOŽENOG ELEMENTA

U generisanom 3D modelu alata, SOLIDWorks, za simulaciju procesa metodom konačnih elemenata alati se obično predstavljaju kao kruta tela kako bi se njihov kontakt sa deformabilnim materijalom lakše i brže modelirao, odnosno proračunao napon na kontaktu. Zbog nepotpunih i pogrešnih pretpostavki za vrednosti kritičnih parametara kod proračuna napona u strukturi materijala i kontaktnih pritisaka sam model procesa dubokog izvlačenja ima manje ili veće netačnosti i odstupanja koja se njegovim prilagođavanjem kroz više iteracija eliminišu.



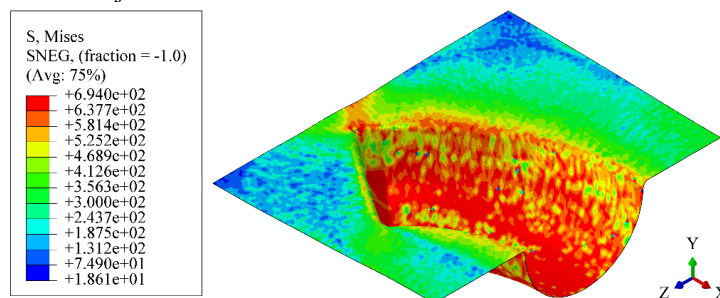
Slika 16. Granični uslovi i generisana mreža konačnih elemenata

Zbog složenosti modela i brzine dobijanja rezultata analizira se polovina zadatog modela ali i kako bi se pratio tok dubokog izvlačenja na središnjem preseku i u kritičnim uglovima. Materijal deformabilnog priprema je čelik ($\rho = 7850\text{kg/m}^3$, $E = 210\text{GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_v = 285\text{ N/mm}^2$), pravougaonog oblika veličine $550 \times 300\text{mm}$, modeliran je kvadratnim lineranim šel elementima S4, sa četiri čvora (21875 elemenata sa pripadajućih 22176 čvorova ABAQUS) [22]. Početna veličina stranice konačnog elementa je 2mm. Kruti pritiskivač alata, koji ima samo kretanje po y-osi, je modeliran linearnim kvadratnim elementima R3D4, 3127 elemenata sa 3217 pripadajućih čvorova (Sl. 16). Neophodni kruti držač lima za ovakve tehnologije modeliran je takođe kvadratnim elementom R3D4 (858 elemenata sa 949 čvorova). Ravan držač lima i kruti donji deo alata nemaju nikakvo kretanje tokom analize (Sl.17). Uslovi trenja na kontaktu priprema i donjeg dela alata definisani su koeficijentom trenja 0.05 dok na kontaktu sa izvlakačem je to 0.12.



Slika 17. Naponi plastičnog tečenja na početku i polovini hoda pritiskivača

U svakom slučaju rezultati FEM simulacionog modela (Sl.18) u mnogome zavise od izabranog tipa konačnog elementa za pripremak i numeričkih aproksimacija koje se koriste za modeliranje samog njegovog kontakta sa alatom. Sve to treba pažljivo izabrati ukoliko se želi tačniji simulacioni model.



Slika18. Naponi plastičnog tečenja na kraju hoda pritiskivača

Prethodno dobijene eksperimentalne vrednosti parametara predstavljaju osnovu za bolji FEM simulacioni model složenog nerotacionog elementa. Njihovim variranjem i promenama u opsegu relanih vrednosti, generisanim FEM modelom (SIMULIA) moguće je naći najoptimalnije rešenje za date realne uslove proizvodnje u kojima se proces dubokog izvlačenja realizuje. Iako ovakvi softverski paketi omogućavaju potpuno virtualno projektovanje tehnologije dubokog izvlačenja, bez realnih parametara, definisanjem njihovih opsega fizičkih granica samo doprinosi generisanju optimalnijeg rešenja.

5. ZAKLJUČAK

Prikazani pristup rešavanju problema koji se javljaju kod projektovanja tehnologija dubokog izvlačenja nerotacionih elemenata daje smernice kako spojiti teoretske, eksperimentalne i numeričke rezultate FEM analize u optimizacioni model kod jednog realnog industrijskog proizvoda. Analizom uticajnih parametara na eksperimentalnim modelima i generisanjem FEM numeričke simulacije izabranog proizvoda došlo se do tri parametra koji su ključni elementi regresione jednačine izabranog optimizacionog modela. Konstrukcija alata za izabrani proizvod, njegove korekcije i prilagođavanje trenutnim uslovima u proizvodnji samo su primer kako se može doći do rešenja i kod vrlo složenih proizvoda.

6. LITERATURA

- [1] Kardan M., Parvizi A., Askari A.: *Influence of process parameters on residual stresses in deep-drawing process with FEM and experimental evaluations*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol 40 (3), 157, 2018, pp. 245-257.
- [2] Kuriyama S., Yoshida Y., Takahashi T., Kumagaya S., Aoki T., Miyauchi K., *Development of simulation code for calculating residual stress distribution in D-I cans produced by both-sided ironing process*, J. Mater. Process. Technol. Vol. 140: 2003, pp. 13–18.
- [3] Incandela O., Tabourot L., Porret P., Balland P., Arrieux R., Ducher F. *Modelling and analysis of a deep-drawing operation: key factors for successful comparisons between experimental and simulated results*, J. Mater. Process. Technol. Vol. 155–156: 2004, pp. 1105–1110
- [4] Padmanabhan R., Oliveira M.C., Alves J.L., Menezes L.F., *Numerical simulation and analysis on the deep drawing of LPG bottles*, J. Mater. Process. Technol, Vol. 200, 2008, pp. 416–423
- [5] Pourkamali A. A., Shahabzadeh M, Babaee B., *Finite element simulation of multi-stage deep drawing processes & comparison with experimental results*, World. Acad. Sci. Eng. Technol. Vol. 6, 2012, pp. 1–21
- [6] Singh SK, Kumar V, Reddy PP, Gupta AK, *Finite element simulation of ironing process under warm conditions*, J. Mater. Process. Technol. Vol. 3(1), 2014, pp. 71–78
- [7] Đorđević M. T., Aleksandrović S., Sedmak A., Nikolić R., *Flat Die Sliding Model with Variable Contact Pressure in Deep Drawing Process*, 8th Inter. Conf. of TEAM Society, Trnava, Slovakia, 2016, pp. 255-258.
- [8] Padmanabhan R., Oliveira M.C., Laurent H., Alves J.L., Menezes L.F., *Study on springback in deep drawn tailor welded blanks*, Int. J. Mater. Form. 2009., 2: 829–832
- [9] Hassan H., Maqbool F., Guner A., Hartmaier A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., *Springback prediction and reduction in deep drawing under influence of unloading modulus degradation*, Int. J. Mater. Form. 2016., Vol. 9., pp.619–633
- [10] Sherbiny M.E., Zein H., Abd-Rabou M., Shazly M.E., *Thinning and residual stresses of sheet metal in the deep drawing process*, Mater. Des. 2014. Vol. 55, pp.869–879.
- [11] Rossini N., Dassisti M., Benyounis K., Olabi A., *Methods of measuring residual stresses in components*, Mater. Des., 2012, Vol. 35, pp.572–588
- [12] Shuhui Li, *Sheet metal Deep Drawing for Making Metallic Parts and Structures*, Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Vol. 4, 2022, pp.182-196
- [13] Lingbeek R.A., Meinders T., Rietman A., *Tool and Blank Interaction in The Cross-Die Forming Process*, International Journal of Material Forming, Symposium MS03, Sheet metal forming, 2008, vol. 1, pp. 161 -164.
- [14] Ken-ichi M., Kentaro S., Akinori S., *Effects of Variable Punch Speed and Blank Holder Force in Warm Superplastic Deep Drawing Process*, Metals 2021, 11(3), 493;
- [15] Peters P., Manopulo N., Lange C., Hora P., *A strain rate dependent anisotropic hardening model and its validation through deep drawing hardening tests*, Int. J. of Mater. Form., 2014., Vol. 7 2014., pp. 447-457
- [16] Banabic D., Carleer B., Comsa D.-S., Cam E., Krasivskyv A., Mattiasson K., Sester M., Sigvant M. and Zhang X.: *Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Springer, 2010. pp. XV, 301
- [17] Madić M., *Matematičko modeliranje i optimizacija procesa laserskog sečenja primenom metoda veštačke inteligencije*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, 2013. Str. 226
- [18] Salehi M., Hosseinzadeh M., Elyasi M.: *A Study on Optimal Design of Process Parameters in Tube Drawing Process of Rectangular Parts by Combining Box–Behnken Design of Experiment, Response Surface Methodology and Artificial Bee Colony Algorithm*, Trans. Indian Inst. Met. 2016., Vol. 69(6), pp.1223–1235
- [19] Kardan M., Parvizi A., Askari A., *Influence of process parameters on residual stresses in deep drawing process with FEM and experimental evaluations*, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 2018., Vol. 40, pp. 157-169
- [20] TSINFA®Deep drawing – The complete guide 2024
- [21] AutoForm Forming Reality,
- [22] ABAQYS Analysis User’s Manual, 2016

Randelović S., Zorić A., Trajković-Milenković M., Mladenović S., Arandelović J., Kostić N.

THE DEEP DRAWING PROCESS DESIGN OF COMPLEX NON-ROTATING ELEMENTS

Abstrakt: Deep drawing of non-rotating elements is a process that today can be recognized in various products both in our environment and much more widely. The area of non-rotating elements stands out in particular due to its complexity and complexity regarding the determination of actual deformations and stresses, the effect of strengthening the material of the blank during the process, the achieved coefficient of friction, the shape and dimensions of the blank, the influence of the strain rate and the rate of deformation, the yield criteria for transition from elastic to plasticity state, the anisotropy of the material itself, the size of residual stresses, but also the occurrence of crack and wrinkles on the finished part. A special issue is the FEM modeling of the process, the construction of the tool for deep drawing and its corrections in the given conditions in order to obtain the desired shape and geometry, all with the aim of optimizing the process in industrial conditions.

Key words: *deep drawing, nonrotation elements, strain, stress, FEM, optimization*

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



37. simpozijum

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2024.

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

Lukić, D., Milošević, M., Đurđev, M., Božić, D., Obradović, P. OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADE PROIZVODA PRIMENOM PRAVILA PRETHOĐENJA I SIMULACIONE TEHNIKE.....	1.1
Košarac, A., Zeljković, M., Tabaković, S. PRIMJENA MAŠINSKOG UČENJA ZA PREDIKCIJU HRAPAVOSTI OBRADENE POVRŠINE PRI OBRADI GLODANJEM BOKOMPATIBILNE LEGURE TITANIJUMA TI-6AL-4V	1.11
Spasojević Brkić, V., Perišić, M., Papić, N., Janev, N., Čosović, E. PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U ANALIZI BEZBEDNOSNIH I ERGONOMSKIH ASPEKATA KABINA RUDARSKIH MAŠINA	1.22
Trajković, A., Turudija, R., Arandelović, J., Stojković, M., Vitković, N. OPTIMIZACIJA PROCESA STRUGANJA PRIMENOM METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA: PIV I RAM METODE	1.30



← NAZAD



Lukić, D., Milošević, M., Đurđev, M., Božić, D., Obradović, P. ¹⁾

OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADA PROIZVODA PRIMENOM PRAVILA PRETHOĐENJA I SIMULACIONE TEHNIKE ²⁾

Rezime

Vreme i troškovi izrade proizvoda predstavljaju osnovne kriterijume optimizacije na osnovu kojih se vrši izbor tehnološkog procesa u okviru proizvodnih sistema. Problem projektovanja i optimizacije tehnoloških procesa na makro nivou obuhvata dva osnovna zadatka koji se sprovode simultano. Prvi zadatak se odnosi na izbor odgovarajućih zahvata obrade, proizvodnih resursa i parametara obrade, a drugi na određivanje optimalnog redosleda izvođenja ovih zahvata obrade i njihovo grupisanje u operacije obrade tehnološkog procesa.

U ovom radu razmatrana je problematika projektovanja i optimizacije tehnološkog procesa izrade dela, kroz definisanje izvodljivih redosleda zahvata obrade primenom dimenzionih, geometrijskih, tehnoloških i ekonomskih pravila prethođenja i njihova vremenska optimizacija primenom simulacione tehnike.

Ključne reči: Tehnološki proces, optimizacija vremena, zahvat obrade, pravila prethođenja, CAM simulacija

1. UVOD

Proizvodni sistem će dobro poslovati, ostvariti razvoj samo ako zadovolji uslove tržišta, odnosno ako proizvodi upotrebljiv, ekonomičan, kvalitetno dizajniran, ekološki podoban, štedljiv, konkurentan i za tržište prihvatljiv proizvod [1]. U okviru proizvodnih sistema dominantnu ulogu u ispunjavanju zahteva tržišta za novim i prilagođenim proizvodima imaju procesi projektovanja, planiranja, upravljanja i proizvodnje. Tehnološka priprema proizvodnje kao funkcija proizvodnog sistema, predstavlja osnovnu integracionu komponentu ovih procesa [2]. Osnovni zadatak tehnološke pripreme proizvodnje je da proučavanjem konstrukcije proizvoda i proizvodnih mogućnosti konkretnog proizvodnog sistema omogući što bolju tehnološkičnost konstrukcije proizvoda i odredi najbolje proizvodne metode i tehnike uz obezbeđenje tačnosti, kvaliteta, produktivnosti, ekonomičnosti [3].

Dva osnovna zadatka u okviru tehnološke pripreme proizvodnje su projektovanje i optimizacija tehnoloških procesa izrade proizvoda. U okviru projektovanja tehnoloških procesa rešavaju se brojne aktivnosti, kao što su izbor ili projektovanje priprema, prepoznavanje i izdvajanje tipskih oblika, definisanje i redosled zahvata i njihovo grupisanje u operacije, definisanje izvođenja operacija, izbor obradnih sistema, određivanje dodataka za obradu i odgovarajućih tolerancija zahvata, izbor tehnoloških baza i odgovarajućih pribora, izbor sistema alata, izbor metoda merenja i odgovarajućih merila, izbor parametara i strategije rada i mnogi drugi [4, 5]. Optimizacija tehnoloških procesa predstavlja pronalaženje najboljih rešenja za određene uslove koji se zasnivaju na brojnim tehnološkim i ekonomskim kriterijumima optimizacije [4, 6]. U praksi se uglavnom primenjuju dva prilaza u projektovanju tehnoloških procesa [4]:

- Prvi, tradicionalan prilaz se svodi na to da se na osnovu konstrukciono-tehnološke analize karakteristika dela definišu površine za obradu, potom na bazi iskustva prvo odredi vrsta i redosled operacija, a onda i vrsta i redosled zahvata unutar operacija sa svim drugim neophodnim podacima, kao što su proizvodni resursi i parametri obrade.
- Drugi prilaz se bazira na prepoznavanju i izdvajanju tipskih oblika, za koje se definišu mogući

¹⁾ prof. dr Dejan Lukić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, (lukicd@uns.ac.rs); prof. dr Mijodrag Milošević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, (mido@uns.ac.rs); doc. dr Mića Đurđev, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, (mica.djurdjev@tfzr.rs); MSc. Dejan Božić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, (bozic997dejan@uns.ac.rs); BSc. Predrag Obradović, Termovent SC doo, Temerin, (pedjaobradovic78@hotmail.com)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu: „Tendencije razvoja i primene modela Industrije 4.0 u malim i srednjim preduzećima“ (br. 000435212 2024 09418 003 000 000 000 000), koji finansijski podržava Pokrajinski sekretarijat za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost.

zahvati obrade sa potrebnim proizvodnim resursima i parametrima obrade a potom se vrši definisanje redosleda izvođenja zahvata i njihovo grupisanje u odgovarajuće operacije obrade.

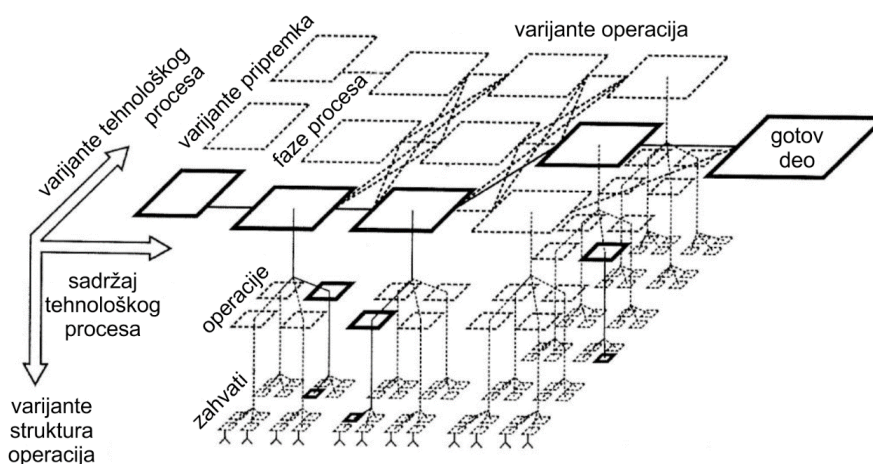
Prvi prilaz se zasniva na individualnom projektovanju tehnološkog procesa gde je uticaj projektanta veliki, ali ne nudi veliku mogućnost optimizacije. Drugi prilaz ima znatno bolje mogućnosti optimizacije i razvoja generativnih CAPP sistema koji se zasnivaju na primeni feature tehnologija, metoda veštačke inteligencije, STEP standarda i dr. [2-4].

Osnovni predmet i cilj istraživanja u ovom radu se odnosi na projektovanje i vremensku optimizaciju tehnoloških procesa izrade proizvoda primenom pravila prethođenja i CAD/CAM računarske simulacije. Pri projektovanju tehnoloških procesa u ovom radu primeniće se drugi prilaz, koji je prethodno objašnjen. Prvo će se definisati tipski oblici za obradu na samom proizvodu, a potom izabrati mogući zahvati, alati za njihovu realizaciju i drugi elementi obradnog sistema i procesa. Pravila prethođenja zahvata obrade će se definisati na osnovu dimenzionih, geometrijskih, tehnoloških i ekonomskih prioriteta njihovog izvođenja. Na osnovu ovih pravila kreiraće se matrice prethođenja, odakle će se izvršiti izbor varijanti redosleda izvođenja zahvata i njihovo grupisanje u operacije/podoperacije obrade. U okviru ovih zadataka pored izbora varijanti izvođenja zahvata, izvršiće se izbor resursa i parametara obrade. Računarska simulacija obrade usvojenih varijanti tehnoloških procesa realizovaće se u izabranom CAD/CAM sistemu. Na osnovu realizovane simulacije izabraće se najbolja varijanta na osnovu vremena obrade kao funkcije optimizacije.

2. TEORIJSKE POSATVKE PROBLEMA ISTRAŽIVANJA

Tehnološki procesi izrade proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji, karakterišu se varijantnošću rešenja u svim svojim fazama. Varijantnost je uslovljena mogućnostima izbora kombinacije različitih materijala priprema i tehnologija, usvajanja različitih rešenja operacija, njihovih redosleda i struktura, odnosno sadržaja u pogledu vrsta i redosleda zahvata. Prostor mogućih tehnoloških rešenja u kome se vrši izbor i projektovanje tehnološkog procesa izrade nekog proizvoda, generisan je sa tri osnovne ose: prva određuje varijante tehnoloških procesa, odnosno priprema i vrsta primenjenih tehnologija, druga obezbeđuje vrstu i redosled operacija, odnosno sadržaj tehnološkog procesa i treća obezbeđuje strukturu, odnosno sadržaj operacija izrade, kroz definisanje vrste i redosleda zahvata obrade, slika 1 [7, 8].

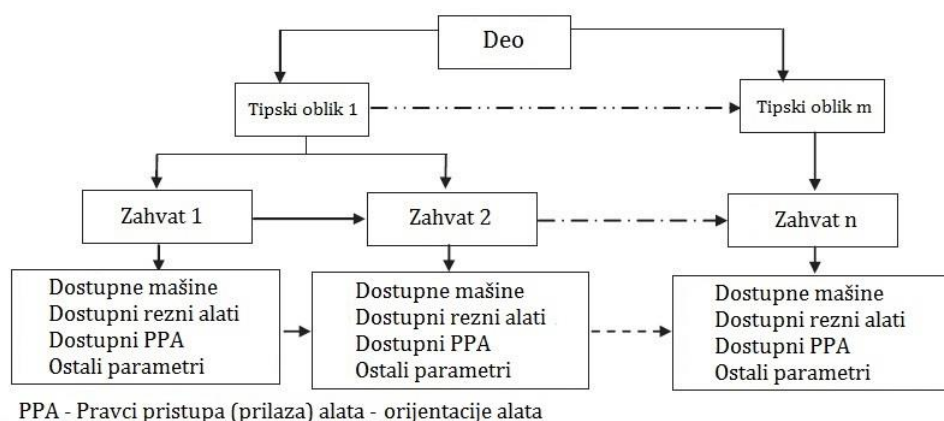
U okviru definisanja operacija i zahvata vrši se izbor proizvodnih resursa, odnosno mašina, pribora, alata, merila, kao i parametara obrade, odnosno režima i strategija obrade, što sve zajedno poslozjava proces odlučivanja pri projektovanju tehnološkog procesa i povećava varijantnost rešenja. Varijantnost rešenja tehnološkog procesa, odnosno složenost strukture tehnološkog procesa u velikoj meri zavisi od složenosti proizvoda, prvo sa aspekta broja i vrste tipskih oblika, potom sa aspekta tačnosti mera, oblika i odnosa površina, klase hrapavosti, zahtevane termičke obrade i površinske zaštite, i dr.



Slika 1. Varijantnost projektovanja tehnoloških procesa izrade proizvoda [7, 8]

Problematika optimizacije tehnoloških procesa, kao tema ovog rada, usmerena je na dva zadatka. Prvi je izbor i definisanje zahvata, a drugi predstavlja određivanje optimalnog redosleda izvođenja definisanih zahvata. Izbor zahvata baziran je na geometriji tipskih oblika, tehnološkim zahtevima u pogledu njihove obrade i dodeli odgovarajuće mašine, alata i pravca prilaza alata (orijentacije alata, eng. tool approach) koji će omogućiti obradu tipskih oblika. Sa druge strane, redosled zahvata podrazumeva optimalni niz (ili permutaciju)

zahvata kojim će se izraditi odgovarajući tipski oblici na delu uz zadovoljenje tehnoloških ograničenja zadatih na crtežu [9, 10]. Struktura definisanja tehnološkog procesa predstavljena je na slici 2.



Slika 2. Struktura tehnološkog procesa obrade delova [11, 12]

Optimizacija tehnoloških procesa pripada klasi NP teških problema zbog ekstremno velikog broja alternativnih rešenja koja se nalaze u prostoru rešenja. Imajući u vidu mnogobrojne solucije u pogledu izbora zahvata, mašina, alata, pribora, orijentacije alata i određivanja redosleda obrade, brojni autori izražavaju različite „fleksibilnosti“ koje su se pokazale ključnim za efikasnost proizvodnje i samog proizvodnog sistema. U nekim radovima ove stavke su označene kao „dimenzije“ rešenja. Prema [10] postoje sledeći tipovi fleksibilnosti:

- *Fleksibilnost procesa (process flexibility)* – mogućnost obrade istog tipskog tehnološkog oblika uz primenu različitih zahvata ili različitih redosleda zahvata;
- *Fleksibilnost mašina (machine flexibility)* – mogućnost izvođenja istog zahvata na različitim mašinama;
- *Fleksibilnost alata (tool flexibility)* – mogućnost izvođenja istog zahvata uz primenu različitih reznih alata;
- *Fleksibilnost orijentacije alata (TAD flexibility)* – mogućnost izvođenja istog zahvata uz primenu različitih orijentacija alata; odnosno načina stezanja
- *Fleksibilnost redosleda zahvata (sequence flexibility)* – mogućnost izmene redosleda zahvata koji su neophodni za izradu datog proizvoda.

Izuzev navedenih alternativa, odnosno fleksibilnosti koje utiču na složenost problema optimizacije tehnološkog procesa, geometrijski i tehnološki zahtevi i interakcije među tipskim oblicima generišu tzv. ograničenja prioriteta (eng. *precedence constraints*) među zahvatima koja čine problem znatno kompleksnijim. Prema autorima [13] ova ograničenja se mogu podeliti na tvrda (eng. *hard*) i meka (eng. *soft*). Tehnološki proces mora biti dosledan tvrdim ograničenjima jer ona direktno utiču na izvodljivost same obrade, dok sa druge strane meka ograničenja utiču na kvalitet, troškove ili efikasnost procesa i stoga mogu u nekim slučajevima biti narušena kako bi se ostvarili minimalni troškovi obrade. Od tvrdih ograničenja izdvajaju se sledeća [13]:

- *Interakcija pribora (eng. Fixture interaction)* – Prilikom obrade tipskih oblika pozicioniranje i stezanje ima vrlo bitnu ulogu jer u slučaju pogrešno postavljenih prioriteta zahvata može se javiti nemogućnost stezanje samog obratka za obradu svih tipskih oblika;
- *Interakcija alata (eng. Tool interaction)* – Prioriteti među tipskim oblicima moraju se odrediti kako bi se ostvarilo pravilno pozicioniranje i kretanje alata pri obradi jer bi u suprotnom ono takođe bilo nemoguće ili bi došlo do kolizije sa mašinom ili priborom;
- *Interakcija tehnološke baze (eng. Datum interaction)* – Kako bi se obradak tokom obrade pravilno orijentisao neophodno je definisati tehnološku bazu koja ima ulogu referentne površine prilikom obrade i prioritet u odnosu na druge površine
- *Prioriteti obrade tipskih oblika (eng. Feature priorities)* – Kod ovog ograničenja postoje dva slučaja. Prvi je kada primarni tipski oblik treba obraditi pre drugih vezanih tipskih oblika, dok je kod drugog slučaja neophodno prvobitno obraditi tipski oblik koji će obezbediti prilaz obradi drugih tipskih oblika;
- *Fiksni redosled zahvata obrade (eng. Fixed order of machining operations)* – Pod ovim se smatraju

posebna ograničenja koja određuju redosled zahvata pri obradi tipskih oblika, npr. prioritet pri obradi grube u odnosu na finu obradu.

Pravila prethođenja za izvođenje zahvata obrade se mogu grupisati i na osnovu tehničkih i ekonomskih ograničenja. Shodno tome definisane su sledeće grupe tehničkih i ekonomskih ograničenja prioriteta [14]:

- **Dimenziono prethođenje**

Svaka površina je geometrijski definisana preko kota kojima su utvrđene dimenzije površine, ali i odnosi prema drugim površinama na delu. Utvrđivanje prvenstva između zahvata obrade zbog dimenzionog razloga je vezano za kotiranje površina i može se definisati u obliku sledećeg pravila: "Pre neke površine obrađuje se površina u odnosu na koju je posmatrana površina dimenzionisana, a prioritet imaju površine dimenzionisane u odnosu na bazu". Na ovaj način se ostvaruje poklapanje tehnološke baze sa konstrukcionom bazom, često i sa mernom i montažnom bazom. U slučaju da iz nekih razloga ne može da se ispoštuje ovo pravilo neophodno je izvršiti transfer dimenzija što često može da dovede do smanjenja ostvarenih tolerancija.

- **Geometrijsko prethođenje**

Utvrđivanje prvenstva između zahvata zbog geometrijskog razloga vezano je za zahteve u pogledu međusobnog odnosa površina i osa, odnosno tolerancije položaja. Prvenstva u ovom slučaju se mogu definisati u obliku sledećeg pravila: "Površine u odnosu na koju je definisana tolerancija položaja neke površine imaju prioritet pri obradi".

- **Tehnološko prethođenje**

Redosled obrade treba da bude tehnologičan. Ova grupa ograničenja se najčešće odnosi na pravila redosleda izvođenja zahvata obrade tipskih oblika (feature) koji zahtevaju više zahvata. Najizraženije tehnološko prethođenje se odnosi na realizaciju grube obrade pre poluzavrše, a poluzavršne pre završne obrade (npr. za obradu otvora Ø12H6, potrebno je primeniti zahvate bušenja, proširivanja i razvrtanja)

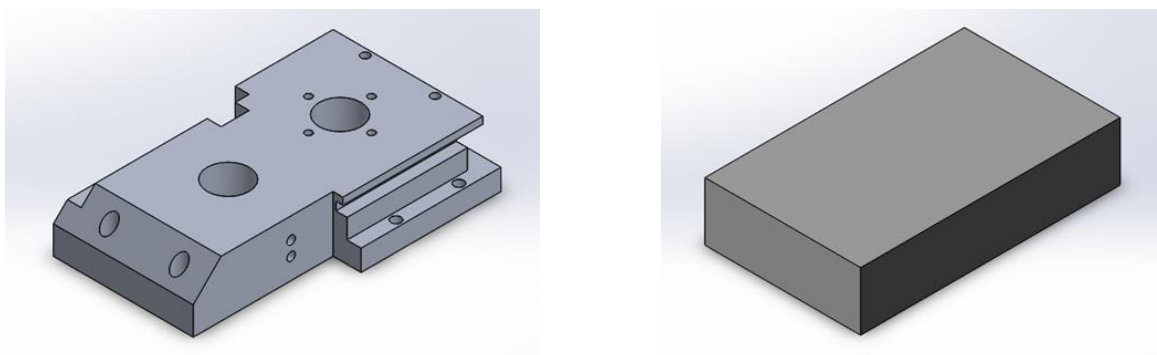
- **Ekonomsko prethođenje**

U cilju ostvarenja tehnoeekonomskih efekata, pre svega manjih troškova i vremena obrade neophodno je uzeti u obzir i pravila ekonomskog prethođenja. Ovo se vrlo često odnosi na primenu produktivnije ili ekonomičnije metode, mašine, pribora ili alata umesto ili pre manje produktivne ili ekonomične metode, mašine, pribora ili alata.

3. PROJEKTOVANJE I OPTIMIZACIJA TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADE PRIZMATIČNOG DELA - STUDIJA SLUČAJA

3.1 Ulazni podaci

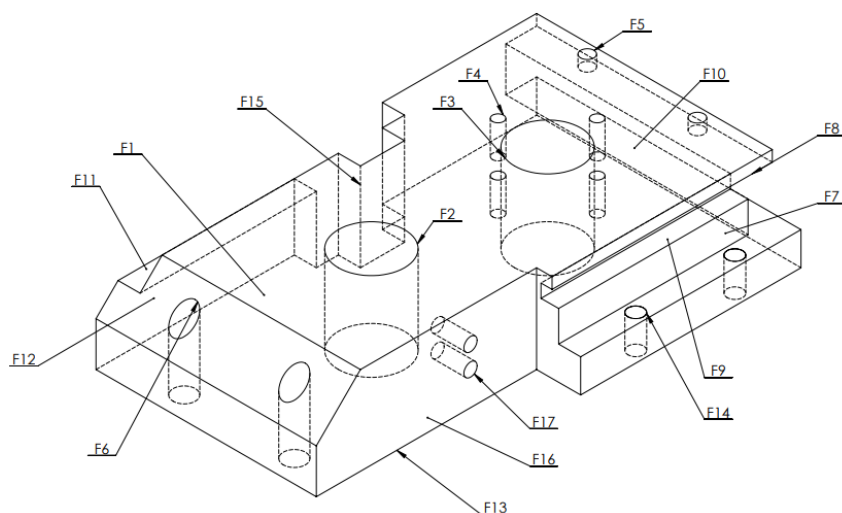
Osnovne ulazne podatke za projektovanje procesa izrade prizmatičnog dela od Al7075 (AlZnMgCu1,5) čine 3D model/2D crtež proizvoda, tip proizvodnje (serijska proizvodnja) i raspoloživa tehnološka oprema. Na slici 3 dat je 3D model dela i odgovarajućeg priprema.



Slika 3. 3D model dela i priprema

3.2 Definisane tipskih oblika (feature) i varijanti izvođenja zahvata obrade

Prvi korak se odnosi na izdvajanje tipskih oblika (machining feature), koji su prikazani na slici 4 i opisani u tabeli 1. Na osnovu izdvojenih tipskih oblika (dimenzije, kvalitet, tolerancije mera, oblika i položaja), izvršeno je definisanje odgovarajućih zahvata za njihovu obradu i odgovarajućih alata, tabela 1.



Slika 4. Izdvojeni tipski oblici na delu

Na bazi definisanih zahvata, definisani su raspoloživi alati za izvođenje zahvata obrade, tabela 2. Na osnovu definisanih tipskih blika, analize potrebnih zahvata obrade i raspoloživih alata definisani su zahvati obrade sa oznakama (OP), rezni alata za pojedine zahvate i TAD-smerovi prilaza ovih alata, tabela 3.

Tabela 1. Opis izdvojenih tipskih oblika, preporučeni zahvati obrade i odgovarajući alati

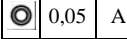
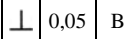
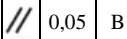
Tipski oblik	Naziv	Dimenzije [mm]	Kvalitet	Tolerancije	Vrsta obrade i alati		
					Gruba	Fina	Završna
F1	Ravna horizont. površina	200x120x2,5	N8	Baza B	Z: Čeono glodanje. A: Glava za glodanje		
F2/F3	Cilindrični otvor	2x \varnothing 30H9x45	N7	Baza A	Z:Zabušivanje Bušenje A: Zabušivač Burgija	Z: Proširivanje A: Proširivač	
F4	4xRupe	\varnothing 5H9x15	N6		Z: Zabušivanje Bušenje A: Zabušivač Burgija	Z: Proširivanje A: Proširivač	
F5	2xCilindrični otvor	\varnothing 6H7x5	N5	-	Z: Bušenje. A: Burgijaa		Z: Razvrtnje A: Razvrtač
F6	2xCilindrični otvor	\varnothing 10H8x42,5	N6	-	Z: Zabušivanje Bušenje A: Zabušivač Burgija	Z: Proširivanje A: Proširivač	Z: Razvrtnje. A: Razvrtač
F7	Stepenik	100x10x25	N8		Z: Glodanje stepenika. A: Vretenasto glodalo		
F8	Ravna površina	100x7x5	N8	-	Z: Glodanje stepenika. A: Vretenasto glodalo		
F9	T-Žljeb	100x10x6	N8	-	Z: Glodanje T žljeba A: Glodalo za T šljeb Vretenasto glodalo		
F10	T-Žljeb	110x14x20	N8	-	Z: Glodanje T žljeba A: Glodalo za T šljeb		
F11	Stepenik	90x10x10	N8		Z: Glodanje stepenika. A: Vretenasto glodalo		
F12	Zakošena površina 45°	20x100 / 45°	N8	-	Z: Glodanje zakošenja A: Ugaono glodalo		
F13	Ravna horizont. površina	200x120x2,5	N8	-	Z: Ravno čeono glodanje A: Glava za glodanje		
F14	2x Unutrašnji navoj	(M8x1)x15	N8	-	Z: Zabušivanje Bušenje A: Zabušivač Burgija	Z: Urezivanje navoja A: Ureznik	
F15	Žljebovi	40x10x42,5 ili 20x10x42,5	N8	-	Z: Glodanje stepenika A: Vretenasto glodalo		
F16	Ravna površina	100x20x42,5	N8	-	Z: Glodanje stepenika A: Vretenasto glodalo		
F17	2xRupe	\varnothing 6H7x15	N5	-	Z: Bušenje A: Burgijaa		Z: Razvrtnje A: Razvrtač.

Tabela 2. Definisani raspoloživi alati

Oznaka	Naziv alata	Specifikacija alata (Sandvik Coromant i Yamawa)	
TO1	Glava za glodanje Ø40	R245-040A32-12L	R245-12 T3 E-AL H10
TO2	Zabušivač Ø4	4x60°x10 YH64.00ZNEVJ	
TO3	Burgija sa izmenljivim pločicama Ø27	880-D2700L32-02	880-05 03 05H-C-LM N134
TO4	Burgija Ø4,5	860.1-0450-036A1-NM H10F	
TO5	Proširivač sa izm. pločicama Ø30H7	825-36TC06-A25	TCGX 06 T1 04-AL H10
TO6	Proširivač Ø5H9	R429.90-03-013-01-CBH10F	
TO7	Burgija Ø8	860.1-0800-064A1-NM H10F	
TO8	Proširivač Ø9,5	CXS-06-08 030TC05	TCEX 05 01 00L-F 1125
TO9	Razvrtač Ø10H6	435.T-0950-A1-XF H10F	
TO10	Burgija Ø5,5	860.1-0550-044A1-NM H10F	
TO11	Razvrtač Ø6H7	435.B-0600-A1-XF H10F	
TO12	Ugaono glodalo Ø20	495-020EH20-4509M	495-09T3M-PM 1130
TO13	Vretenasto glodalo Ø10	R216.33-10040-AC22U H10F	
TO14	Vretenasto glodalo Ø20	1K233-2000-400-NB H10F	
TO15	Glodalo za T žljebove Ø50	R331.35C-050A20CM060	N331.1A-04 35 05H-NL1130
TO16	Burgija Ø7	860.1-0700-021A1-NM H10F	
TO17	Ureznik M8X1	T400-NM102DB-M8X100 N1PC	
TO18	Vretenasto glodalo Ø6	1K223-0600-050-NH H10F	

Tabela 3. Definisani zahvati obrade, rezni alati i TAD za obradu tipskih oblika

TO	Naziv TO	Oznaka zahvata	Kandidat alata	TAD kandidat
F1	Ravna horizont. povr.	Grubo ravno čeonno glodanje (OP1)	TO 1	-Z
F2/F3	Cilindrični otvor	Zabušivanje otvora (OP2)	TO 2	-Z
		Bušenje otvora (OP3)	TO 3	-Z
		Proširivanje otvora (OP4)	TO 5	-Z
F4	4xRupe	Zabušivanje rupa (OP2)	TO 2	-Z
		Bušenje rupa (OP5)	TO 4	-Z
		Proširivanje rupa (OP6)	TO 6	-Z
F5	2xCilindrični otvori	Zabušivanje otvora (OP2)	TO 2	-Z
		Bušenje otvora (OP7)	TO 10	-Z
		Razvrtnje otvora (OP8)	TO 11	-Z
F6	2xCilindrični otvor	Zabušivanje otvora (OP2)	TO 2	-Z
		Bušenje otvora (OP9)	TO 7	-Z
		Proširivanje otvora (OP10)	TO 8	-Z
		Razvrtnje otvora (OP11)	TO 9	-Z
F7	Stepenik	Glodanje stepenika (OP12)	TO 13, TO 14	-Z,-Y
F8	Ravna površina	Glodanje stepenika (OP13)	TO 13, TO 14	-Z,-Y
F9	T-Žljeb	Glodanje T-šljeba (OP14)	TO 15, TO 18	-Z,-Y
F10	T-Žljeb	Glodanje T-šljeba (OP15)	TO 15	-Z
F11	Stepenik	Glodanje stepenika (OP16)	TO 14, TO 13	-Z,+Y
F12	Zakošena površina 45°	Glodanje zakošene površine (OP17)	TO 12	-Z
F13	Ravna horizont. povr.	Grubo ravno čeonno glodanje (OP18)	TO 1	+Z
F14	2x Unutrašnji navoj	Zabušivanje (OP19)	TO 2	+Z
		Bušenje otvora (OP20)	TO 16	+Z
		Urezivanje navoja (OP21)	TO 17	+Z
F15	Žljebovi	Glodanje žljebova 1 (OP22)	TO 13, TO 14	+Y
		Glodanje žljebova 2 (OP23)	TO 13, TO 14	+Y
F16	Ravna površina	Glodanje ravne površine (OP24)	TO 14	-Y
F17	2xRupe	Zabušivanje (OP25)	TO 2	-Y
		Bušenje rupa (OP26)	TO 10	-Y
		Razvrtnje rupa (OP27)	TO 11	-Y

3.3 Određivanje redosleda zahvata obrade u skladu sa pravilima prioriteta

Uzimajući u obzir dimenzione, geometrijske, tehnološke i ekonomske prioritete prethođenja zahvata definisana je tabela 4, sa relacijama prethođenja zahvata obrade. Na osnovu relacija prethođenja iz prethodne tabele 4 definisana je matrica prethođenja zahvata obrade (tabela 5), na osnovu koje je moguće odrediti redosled izvođenja zahvata. U tabeli 6 prikazana je jedna od mogućih varijanti izvođenja redosleda zahvata (ovde nazvana varijanta 2), na bazi prethodno definisane matrice prethođenja (tabele 5).

Tabela 4. Relacije prethodenja zahvata obrade

ZAHVAT	VRSTA PRETHODENJA ZAHVATA OBRADE			
	DIMENZIONO	GEOMETRIJSKO	TEHNOLOŠKO	EKONOMSKO
OP1				
OP2			OP 1	
OP3			OP 2	OP 2
OP4			OP 3	
OP5	OP 3	OP 4	OP 2	OP 2
OP6			OP 5	
OP7			OP 2	OP 2
OP8			OP 7	
OP9			OP 2	OP 2
OP10			OP 9	
OP11			OP 10	
OP12		OP 1		
OP13			OP 12	
OP14			OP 13	
OP15				
OP 16		OP 1		
OP 17	OP 1		OP 11	
OP 18				
OP 19			OP 18	
OP 20			OP 19	
OP 21			OP 20	
OP 22				
OP 23			OP 22	
OP 24				
OP 25			OP 24	
OP 26			OP 25	
OP 27			OP 26	

Tabela 5. Matrica prethodenja zahvata obrade

	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	OP9	OP10	OP11	OP12	OP13	OP14	OP15	OP16	OP17	OP18	OP19	OP20	OP21	OP22	OP23	OP24	OP25	OP26	OP27
OP1																											
OP2	x																										
OP3		x																									
OP4			x																								
OP5	x	x	x																								
OP6					x																						
OP7		x																									
OP8						x																					
OP9		x																									
OP10									x																		
OP11										x																	
OP12	x																										
OP13												x															
OP14													x														
OP15																											
OP16	x																										
OP17	x										x						x										
OP18																											
OP19																				x							
OP20																					x						
OP21																						x					
OP22																											
OP23																											
OP24																											
OP25																										x	
OP26																										x	
OP27																											x

Tabela 8. Rezultati simulacije varijanti izvođenja tehnološkog procesa izrade dela u SolidCAM sistemu

Podoperacija obrade	Varijanta tehnološkog procesa izrade proizvoda		
	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3
SET 1	00:04:42	00:04:11	00:04:12
SET 2	00:00:49	00:00:49	00:00:39
SET 3	00:00:19	00:00:28	00:02:15
SET 4	00:01:10	00:02:15	00:00:49
Ukupno vreme obrade Σ	00:07:00	00:07:43	00:07:55

4. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj tehnološke pripreme proizvodnje je da se omogući projektovanje kvalitetnih tehnoloških procesa iz skupa velikog broja mogućih varijanti u što kraćem vremenskom periodu. Najčešće funkcije optimizacije tehnološkog procesa u proizvodnoj praksi su vreme obrade, odnosno proizvodnost i troškovi obrade, odnosno ekonomičnost.

Jedan od osnovnih problema pri projektovanju tehnoloških procesa je taj što se višedimenzioni zadaci planiranja, definišu u linearnom obliku, što se posebno odnosi za definisanje redosleda zahvata i operacija obrade sa svim neophodnim resursima (mašine, pribori, alati, merila) i parametrima obrade. Na ovaj način se dobija ograničeno rešenje koje je vrlo često daleko od optimalnog. Broj varijanti tehnoloških rešenja sa posmatranog aspekta u velikoj meri zavisi od raspoloživosti mašina i pribora, od vrste mogućih zahvata za obradu tipskih oblika, varijantosti alata kojima se mogu izvoditi pojedini zahvati i raznovrsnosti smera prilaza alata. Isto tako varijantnost se ogleda i u izboru režima i strategija obrade zahvata, primene SHP i dr.

Projektovanje tehnoloških procesa u ovom radu je bazirano na savremenom prilazu koje bazira na primeni feature tehnologija, definisanju zahvata za njihovu obradu sa svim neophodnim podacima kao što su mašine, alati, pribori, parametri obrade i dr. Shodno tome razmatrana je problematika definisanja izvodljivih redosleda zahvata obrade primenom pravila prethođenja i njihova optimizacija na bazi vremena obrade kao funkcije cilja, simulacijom dobijenih varijanti tehnoloških procesa u CAD/CAM sistemu. Pravila prethođenja su definisana na osnovu dimenzionih, geometrijskih, tehnoloških i ekonomskih ograničenja analizom konstrukciono-tehnoloških karakteristika posmatranog dela. Na osnovu ovih pravila kreirana je matrica prioriteta zahvata, na osnovu koje su kreirane varijante izvođenja zahvata obrade, koji su potom grupisani u odgovarajuće operacije/podoperacije obrade i na izlazu dobijene racionalne/moguće varijante mogućeg tehnološkog procesa izrade. Pretraživanje optimalnog rešenja je izvršeno simulacijom obrade postavljenih varijanti tehnoloških procesa u SolidCAM programskom sistemu, na bazi vremena obrade kao funkcije cilja.

Definisana matrica prethođenja i vremena zahvata obrade predstavljaju osnovnu podlogu za optimizaciju tehnoloških procesa primenom neke od brojnih metaheurističkih metoda kojima se dobijaju kvalitetnija rešenja složenih zadataka optimizacije, što bi predstavljao skladan nastavak ovog istraživanja. Prema teoriji kompleksnosti, problemi optimizacije inteligentnih tehnoloških procesa pripadaju klasi NP teških problema kombinatorne optimizacije usled ekstremno velikog broja alternativnih rešenja koja se nalaze u prostoru potencijalnih rešenja. Rešavanje problema optimizacije inteligentnih tehnoloških procesa vrši se pomoću savremenog algoritamskog rešenja koji ima zadatak da iterativnim putem istraži prostor pretraživanja i pronađe optimalno rešenje za dati kombinatorni problem u što kraćem vremenu. Savremeni algoritmi bazirani su na metaheuristikama, odnosno metodama koje iterativnim putem dolaze do rezultata problema, kao što su evolutivni algoritmi, algoritmi na bazi inteligencije rojeva, algoritmi na bazi fizičkih procesa, biološki inspirisani algoritmi i prirodom inspirisani algoritmi [15-18].

5. LITERATURA

- [1] Unger, D., Eppinger, S.: *Improving product development process design: a method for managing information flows, risks, and iterations*, Journal of Engineering Design, Vol. 22, No. 10, 2011, pp. 689-699.
- [2] Xu, X., Wang, L., Newman, S.T. *Computer-Aided Process Planning - A Critical Review of Recent Developments and Future Trends*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 24, No. 1-3, 2011, pp. 1-31.
- [3] Lukić, D., Milošević, M., Antić, A., Borojević, S., Ficko, M.: *Multi-criteria selection of manufacturing processes in the conceptual process planning*, Advances in Production Engineering and Management, Vol. 12, No. 2, 2017, pp.151-162.

- [4] Lukić, D.: *Razvoj opšteg modela tehnološke pripreme proizvodnje*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2012.
- [5] Feng, S.C., Song, E.Y.: *A manufacturing process information model for design and process planning integration*, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 22, No.1, 2003: pp. 1-15.
- [6] Liu, X., Yi, H., Ni, Z.: *Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 24, No. 1, 2013: pp. 1-13.
- [7] Todić, V.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2004.
- [8] Lukić, D., Milošević, M.: *Integrirani CAPP sistemi i PDM*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2022.
- [9] Huang, W., Hu, Y., Cai, L.: *An effective hybrid graph and genetic algorithm approach to process planning optimization for prismatic parts*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 9-12, 2012, pp. 1219-1232.
- [10] Lian, K., Zhang, C., Shao, X.: *Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 5-8, 2011, pp. 815-828.
- [11] Salehi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R.: *Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, No. 8, 2009, pp. 1179-1187.
- [12] Wang, J.F., Fan, X.L., Wan, S. (2014): *A graph-based ant colony optimization approach for process planning*, The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 271895, pp. 1-11.
- [13] Li, W. D., Ong, S. K., Nee, A.Y.C.: *Integrated and Collaborative Product Development Environment – Technologies and Implementations*, Series on Manufacturing Systems and Technology, Vol. 2, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, ISBN 981-256-680-5, 2006.
- [14] Halevi, G., Weill, R.D. *Principles of Process Planning – A Logical Approach*, Chapman & Hall, Inc., 1995.
- [15] Lukić, D.; Milošević, M.; Erić, M.; Đurđev, M.; Vukman, J.; Antić, A.: *Improving Manufacturing Process Planning Through the Optimization of Operation Sequencing*, Machine Design, Vol. 9, No. 4, 2017, pp.123–132.
- [16] Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z.: *Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning*, International Journal Advanced Manufacturing Technology, Vol. 95, No. 9-12, 2016, pp. 2535-2555.
- [17] Milosevic M, Cep R, Cepova L, Lukic D, Antic A, Djurdjev M.: *A Hybrid Grey Wolf Optimizer for Process Planning Optimization with Precedence Constraints*, Materials, Vol. 14, No. 23, 2021, pp.7360.
- [18] Djurdjev M, Cep R, Lukic D, Antic A, Popovic B, Milosevic M. *A Genetic Crow Search Algorithm for Optimization of Operation Sequencing in Process Planning*, Applied Sciences, Vol. 11, No. 5, 2021, pp.1981.

Lukić, D., Milošević, M., Đurđev, M., Božić, D., Obradović, P.

OPTIMIZATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF PRODUCT USING THE RULES OF OPERATIONS PRECEDENCE AND SIMULATION TECHNIQUES

Abstract: *The time and costs of products manufacturing represent the basic optimization criteria on the basis of which the selection of the manufacturing processes within the production systems is made. The problem of design and optimizing manufacturing processes at the macro level includes two basic tasks that are carried out simultaneously. The first task refers to the selection of suitable processing operations, production resources and processing parameters, and the second to determining the optimal order of execution of these processing operations and their grouping into manufacturing process.*

In this paper, the problem of designing and optimizing the manufacturing process the part was discussed, through defining feasible sequences of processing operations using dimensional, geometric, technological and economic rules of precedence and their time optimization using simulation techniques.

Key words: *Manufacturing process planning, optimization machining time, machining operation, rules of operations precedence, CAM simulation*



Košarac, A.¹⁾, Zeljković, M., Tabaković, S.²⁾

PRIMJENA MAŠINSKOG UČENJA ZA PREDIKCIJU HRAPAVOSTI OBRADENE POVRŠINE PRI OBRADI GLODANJEM BIOKOMPATIBILNE LEGURE TITANIJUMA Ti-6Al-4V

Rezime

Mašinsko inženjerstvo ima značajnu ulogu u proizvodnji medicinskih uređaja, implantata, proteza i druge medicinske opreme, gdje obrada biokompatibilnih materijala zauzima posebno mjesto. Koriste se različite metode obrade ovih materijala, a glodanje je jedan od najčešćih. Prvi dio istraživanja, prikazanih u radu, se bavi optimizacijom parametara obrade s ciljem minimizacije hrapavosti površine pri obradi glodanjem legure titanijuma Ti-6Al-4V. Uz četiri ulazna parametra (brzina rezanja, pomak po zubu glodala, dubina rezanja i sredstvo za hlađenje i podmazivanje), svaki na tri nivoa, i jednim izlaznim (srednja aritmetička hrapavost Ra), puni faktorni plan podrazumijeva 81 eksperimentalnu tačku. Primjenom metode planiranja eksperimenta Tagučići, broj eksperimentalnih tačaka se smanjuje sa 81 na 27. Na osnovu odnosa signal/šum te analize varijanse (ANOVA), konstatovano je da pomak po zubu ima najveći uticaj na hrapavost površine. Koristeći prethodno dobijene skupove podataka, drugi dio prikazanih istraživanja se odnosi na mogućnosti primjene različitih tehnika mašinskog učenja za kreiranje prediktivnog modela za srednju aritmetičku hrapavost površine. Prikazana je komparativna analiza nekoliko tehnika koje su se pokazale efikasnim pri radu sa malim skupovima podataka u rješavanju regresionih problema. Rezultati pokazuju da algoritam Random Forest ima najveću efikasnost.¶

Ključne reči: hrapavost površine; biokompatibilni materijali; legura Ti-6Al-4V; Tagučići metoda; ANOVA; neuronske mreže; Random Forest

1. UVOD

Mašinsko inženjerstvo ima ključnu ulogu u dizajnu i proizvodnji medicinskih uređaja, implantata, proteza i druge medicinske opreme, s posebnim naglaskom na obradu biokompatibilnih materijala [1,2]. Biokompatibilni materijali su prihvatljivi za kontakt s biološkim tkivom, kao što su ljudska koža, mišići, kosti ili organi. Nakon integracije u tijelo, ne uzrokuju odbacivanje, oštećenje okolnog tkiva niti druge štetne efekte na organizam.

Postoje različite vrste konvencionalne i nekonvencionalne obrade biokompatibilnih materijala. Najčešće korištene konvencionalne metode obrade su struganje, bušenje i glodanje, dok su najrasprostranjenije nekonvencionalne metode obrada: vodenim mlazom, ultrazvučna obrada, obrada laserom, elektroerozivna obrada (EDM) i obrada elektronskim snopom [5]. Ovaj rad analizira obradu glodanjem biokompatibilne legure titanijuma Ti-6Al-4V koja pripada grupi teško obradivih materijala. Naime, velika čvrstoća i niska toplotna provodljivost otežavaju obradu ove legure. Ti-6Al-4V se koristi za izradu endoproteza, zubnih implantata i hirurških alata, dok se u avioindustriji ova legura koristi zbog svoje velike čvrstoće, otpornosti na koroziju i male specifične težine [6].

2. PRIKAZ DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U okviru prvog dela istraživanja se analizira uticaj parametara obrade: brzine rezanja v , pomaka po zubu s_z , aksijalne dubine rezanja i načina hlađenja/podmazivanja na hrapavost površine pri obradi glodanjem

¹⁾ prof. dr Aleksandar Košarac, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, (aleksandar.kosarac@ues.rs.ba)

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

legure Ti-6Al-4V. Optimizacija parametara obrade rezanjem je ključna za postojanost alata i poboljšanje kvaliteta obrađene površine, odnosno smanjenje srednje aritmetičke hrapavosti (Ra). Prvo se daje grubi prikaz uticaja navedena četiri parametra, a nakon toga se daje nešto detaljniji prikaz rezultata pojedinih autora.

Legure titanijumaimaju nisku toplotnu provodljivost, pa je važno kontrolisati generisanje toplote. Proizvođači alata obično preporučuju obradu pri nižim brzinama rezanja, često u opsegu od 30 do 90 m/min. U istraživanjima [7-16], se primjenjuju, uglavnom, brzine rezanja od 30 m/min.

Pomak po zubu igra značajnu ulogu u postizanju ravnoteže između količine strugotine i postojanosti alata. Ovaj faktor, najčešće, ima najveći uticaj na srednju aritmetičku hrapavost (Ra) pri obradi rezanjem. Uobičajene vrijednosti pomaka po zubu pri obradi glodanjem legura titanijuma su u rasponu od 0,05 do 0,15 mm/zubu [7,11-13].

Kod obrade legura titanijuma primjenjuju se manje vrijednosti dubine rezanja, zbog niske toplotne provodljivosti. Kao alati se, vrlo često, koriste vretenasta glodala, integralna ili sa izmjenjivim pločicama [7-16]. Radijalna dubina rezanja obično je približno jednaka polovini prečnika alata [9, 11], dok je aksijalna dubina rezanja različita.

S obzirom da legura titanijuma Ti-6Al-4V spada u grupu teško obradivih materijala, način hlađenja/podmazivanja ima značajan uticaj na postojanost alata i kvalitet obrađene površine. Emulzije obezbjeđuju dobre osobine hlađenja i podmazivanja. Ipak, s obzirom na brojne dokaze da emulzije imaju negativan uticaj na ljudsko zdravlje i životnu sredinu, ulažu se naponi da se zamijene drugim načinima hlađenja/podmazivanja [17].

Tokom posljednjih decenija, pojavila su se nova rješenja za prevazilaženje osnovnih ograničenja emulzija. Glavne alternative su suvo rezanje, minimalno podmazivanje (MQL Minimum Quantity Liquid), kriogeno hlađenje, čvrsto podmazivanje, te ekološki prihvatljive metode obrade, kao i nanofluidi.

Suvo rezanje pruža određene prednosti u odnosu na emulzije, kao što su smanjenje uticaja na životnu sredinu i smanjenje troškova vezanih sa nabavkom, održavanjem i zbrinjavanjem rashladnih sredstava. Danish i saradnici [10] su ispitivali performanse presvučenih pločica od tvrdog metala pri suvom glodanju. Zaključili su da srednja aritmetička hrapavost površine (Ra) ima niže vrijednosti pri većim brzinama rezanja i manjim pomacima po zubu, s tim da je habanje ledne površine intenzivnije pri manjim vrijednostima pomaka. Ginting i saradnici [11] koriste pločice od tvrdog metala bez prevlake pri obradi glodanje loptastim glodalom legure titanijuma Ti-6242S i u uslovima suve obrade. Sun sa saradnicima [13] izvodi obradu struganjem legure titanijuma u uslovima suve obrade koristeći PCD i PCBN pločice. Autori zaključuju da je postojanost PCBN alata bila znatno kraća od PCD alata uz iste uslove obrade.

Prikaz dosadašnjih istraživanja pokazuje da se veliki broj istraživača opsežno bavio obradom glodanjem legure titanijuma Ti-6Al-4V. Tabela 1 daje pregled parametara obrade u relevantnim studijama. Analiza ovih podataka pokazuje varijacije u nivoima parametara obrade.

Narasimhulu i saradnici [18] proučavaju uticaj parametara obrade i grudnog ugla na srednju aritmetičku hrapavost površine (Ra) i silu rezanja pri obradi glodanjem legure titanijuma. Na osnovu istraživanja konstatovali su da na silu rezanja najveći uticaj ima pomak po zubu, pa dubina rezanja, dok pomak po zubu i brzina rezanja značajno utiču na hrapavost obrađene površine. Odsustvo hlađenja i podmazivanja može dovesti do viših temperatura u zoni rezanja, što potencijalno uzrokuje termička oštećenja na obratku i alatu. Obrada legure Ti-6Al-4V u suvim uslovima je moguća, ali zahtijeva pažljivo planiranje, izbor odgovarajućih alata i parametara obrade, uz odgovarajuće odvođenje strugotine.

Minimalna količina sredstva za podmazivanje (MQL) podrazumijeva primjenu male količine rashladne tečnosti direktno u zoni rezanja. Iqbal sa saradnicima [8] istražuju uticaj MQL-a i različitih vrsta kriogenih rashladnih sredstava na habanje alata, sile rezanja i hrapavost obrađene površine. Autori dolaze do zaključka da je MQL efikasniji od LN₂ i CO₂ kada je u pitanju habanje alata i kvalitet obrađene površine.

Kriogeno hlađenje je tehnika koja uključuje izlaganje obratka i reznog alata ekstremno niskim temperaturama tokom rezanja, i posebno je interesantna pri obradi teško obradivih materijala. Ovakav način hlađenja pruža određene prednosti u poređenju sa drugim. Pri ovom hlađenju stvaraju se veoma niske temperature a sredstvo brzo isparava pri kontaktu s toplotom koja se generiše tokom obrade. Osim toga kriogeno hlađenje smanjuje rizik od termičkog oštećenja alata i obratka, značajno produžava postojanost alata, dovodi do manjeg habanja alata, omogućava bolji kvalitet obrađene površine zbog smanjenog trenja, te smanjuje sile rezanja. Kriogena rashladna sredstva su ekološki prihvatljiva jer brzo isparavaju bez ostavljanja ostataka ili generisanja štetnog otpada. Negativni aspekti primene ove tehnologije se odnose na visoke troškove.

Tabela 1. Predikcija srednje aritmetičke hrapavosti pri obradi glodanjem Ti-6Al-4V		
Autor, godina	Alat za obradu	Uslovi obrade
Shokrani (2006) [7]	Integralno vretenasto glodalo Ø8 od TM	Brzina rezanja 30, 115, 200 m/min, pomak 0.03, 0.055, 0.1 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 1, 3, 5 mm, uslovi hlađenja/podmazivanja: kriogeno, emulzija, suvo rezanje
Iqbal (2020) [8]	Integralno vretenasto glodalo Ø8 od TM	Brzina rezanja 100, 175 m/min, ugao zavojnice glodala 30°, 42°, istosmjerna i suprotnosmjerna obrada, uslovi hlađenja/podmazivanja: LN ₂ , CO ₂ , MQL
Tešić (2020) [9]	Vretenasto glodalo Ø16 sa izmjenjivim pločicama	Brzina rezanja 40, 80, 160 m/min, pomak 0.05, 0.1, 0.2 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 8 mm, aksijalna dubina rezanja 0.5, 1.0 i 2 mm
Danish (2022) [10]	Vretenasto glodalo sa izmjenjivim pločicama	Brzina rezanja 140, 150 m/min, pomak 0.1, 0.2 mm/zubu, aksijalna dubina rezanja 0.5 mm, suvo rezanje
Ginting (2006) [11]	Loptasto glodalo Ø16 sa izmjenjivim pločicama	Brzina rezanja 60, 75, 100, 125, 150 m/min, pomak 0.1, 0.15 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 8,8 mm, aksijalna dubina rezanja 2 mm, suvo rezanje
Paschoalinoto (2020) [12]	Vretenasto glodalo sa izmjenjivim pločicama	Brzina rezanja 80, 90, 100 m/min, pomak 0.06, 0.08, 0.1 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 0.5, 0.75, 1 mm, uslovi hlađenja/podmazivanja: vazduh, MQL, MQL+grafit
Sun (2009) [13]	Integralno vretenasto glodalo od TM	Brzina rezanja 50, 65, 80, 95, 110 m/min, pomak 0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 2, 3, 4, 5, 6 mm, aksijalna dubina rezanja 1,5 mm
Rahman Al Mazedur (2021) [14]	Glavazaglodanje	Brzina rezanja 50, 57.5, 65 m/min, pomak 0.2, 0.25, 0.3 mm/zubu, radijalna dubina rezanja 7,5, 10, 12 mm, aksijalna dubina rezanja 2,54 mm
Karkalos (2016) [15]	Integralno vretenasto glodalo Ø6 od TM	Brzina rezanja 26.39, 32.05, 37.70 m/min, brzina pomoćnog kretanja 75, 100, 125 mm/min, radijalna dubina rezanja 0,3, 0,6, 0,9 mm
Bai (2019) [16]	Vretenasto glodalo	Broj obrtaja 1200 o/min, brzina pomoćnog kretanja 500 mm/min, aksijalna dubina rezanja 0,25 mm, radijalna dubina rezanja 10mm, uslovi hlađenja/podmazivanja: nanofluid

Ne mali broj istraživača proučava efekte kriogenog hlađenja pri obradi glodanjem legura titanijuma. Jerold sa saradnicima [19] se bavi istraživanjem uticaja kriogenih rashladnih sredstava LN₂ i CO₂ pri obradi Ti-6Al-4V, analizirajući pri tome njihov uticaj na hrapavost obrađene površine, temperaturu i sile rezanja, odnosno habanje alata. Kriogeno hlađenje značajno smanjuje silu i temperaturu rezanja u poređenju s obradom uz primjenu emulzija i suvim rezanjem. Takođe, pri obradi uz primenu LN₂ postižu se niže temperature i manje sile rezanja u poređenju sa primenom CO₂. Shokrani i saradnici [7] izvode istraživanja efekata kriogenog hlađenja na hrapavost obrađene površine pri glodanju legure Ti-6Al-4V. Autori konstatuju da je primjenom kriogenog hlađenja hrapavost površine 39% manja u poređenju sa suvim rezanjem i 31% manja u poređenju s hlađenjem uz upotrebu emulzija. Xiufang i saradnici [16] ispituju performanse podmazivanja različitih nanočestica u sredstvima za hlađenje i podmazivanje pri obradi glodanjem legure Ti-6Al-4V. Autori koriste različite nanočestice, kao što su: grafit, Al₂O₃, MoS₂, SiC, SiO₂ i CNTs, razmatrajući efekte njihove primene na hrapavost obrađene površine i sile rezanja.

Vortex cijev (vrtložna cijev) nudi alternativu tradicionalnim rashladnim sredstvima pružajući strujanje čistog vazduha za hlađenje reznog alata i obratka tokom obrade. Vortex cijev (Ranque–Hilsch vortex cijev) je mehanički uređaj koji razdvaja komprimovani gas u dvije odvojene struje, i to toplu i hladnu. Vortex cijev može smanjiti temperaturu okoline za 40°C, zavisno o pritisku gasa koji se dovodi u cijev. Ovaj uređaj nema pokretnih elemenata niti vanjskog izvora toplote za postizanje temperaturne separacije. Valić sa saradnicima [20] istražuje uticaj hlađenja korišćenjem MQL-a u kombinaciji s vortex cijevi na hrapavost obrađene površine i postojanost alata pri struganju nerđajućeg čelika. Yüksel i saradnici [21] koriste vortex cijev kako bi istražili efekte hlađenja na parametre obrade struganjem. Oni konstatuju da niže temperature značajno

smanjuju hrapavost obrađene površine, dok je uticaj na silu rezanja zanemarljiv.

Singh i saradnici [22] koriste MQL implementiran sa vortex cijevi (VMQL) pri struganju legure titanijuma. Istraživanje se fokusira na srednju aritmetičku hrapavost površine, potrošnju energije, silu rezanja i habanje rezne ivice alata. Autori zaključuju da je tehnologija VMQL smanjila hrapavost obrađene površine za 15–18% u poređenju s MQL-om, te je postignuto i smanjenje sile rezanja.

Primjena različitih tehnika vještačke inteligencije može značajno doprinijeti predviđanju površinske hrapavosti u obradi metala rezanjem, čineći ovo područje sve zanimljivijim i aktuelnijim za istraživanje. Jedan od ključnih izazova u ovoj oblasti je veličina skupa podataka dostupnog za treniranje, validaciju i testiranje modela. Eksperimenti u obradi rezanjem često se planiraju i izvode s manjim brojem eksperimentalnih tačaka u odnosu na puni faktorni plan, koristeći različite metode i tehnike planiranja eksperimenata. Ovakav pristup smanjuje vrijeme i troškove eksperimenta, ali manji broj eksperimentalnih tačaka može predstavljati izazov za razvoj pouzdanih modela.

Izbor odgovarajuće tehnike vještačke inteligencije u ovom kontekstu je od izuzetnog značaja, jer postoji širok spektar opcija koje treba razmotriti. Primjena malih skupova podataka je posebno interesantna i uobičajena u obradi metala zbog brojnih ograničenja, uključujući visoke troškove i složenost eksperimenata. Pojedini autori [23 – 27] koriste neuronske mreže s jednim ili dva skrivena sloja za predviđanje hrapavosti obrađene površine koristeći relativno mali broje eksperimentalnih tačaka, konkretno 27. Autori variraju broj skrivenih slojeva, broj neurona unutar tih slojeva, te primjenjuju različite algoritame kako bi došli do optimalne konfiguracije neuronske mreže.

Dubey sa saradnicima [28] obrađuje čelik AISI 304, te trenira neuronske mreže na osnovu 27 eksperimentalnih tačaka. Autori pri tome variraju ulazne parametare: dubinu rezanja, pomak, brzinu rezanja i koncentracija nanofluida. Na osnovu eksperimentalnih podataka, razvijaju tri modela mašinskog učenja za predviđanje hrapavosti obrađene površine: linearna regresija (LR), random forest (RF) i metoda potpornih vektora (SVM, Suport Vector Machine). Studija je pokazala da je Random Forest (RF) model nadmašio druga dva sa stanovišta tačnosti predviđanja hrapavosti obrađene površine.

Agrawal i saradnici [29] provode eksperimente obrade čelika AISI 4340. Variraju dubinu, pomak, i brzinu rezanja i mjere srednju površinsku hrapavost. Eksperimentalnim putem je određen skup 39 eksperimentalnih tačaka i razvijena tri modela: višestruku regresiju, random forest i kvantilnu regresiju. Rezultati studije su pokazali da model Random Forest pokazuje bolje rezultate u poređenju sa ostalim.

3. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Kako je već ranije napomenuto, analizira se uticaj četiri parametra na hrapavost obrađene površine (brzine rezanja (v), pomaka (f), aksijalne dubine rezanja (a) i načina hlađenja/podmazivanja), i svaki na tri nivoa. Izbor nivoa parametara rezanja proizilazi iz preporuka proizvođača alata, u skladu s karakteristikama materijala obratka i alata. U tabeli 2 prikazani su parametri i njihovi nivoi.

Parametri	Nivoi		
	-1	0	1
Brzina rezanja (m/min)	50	100	150
Pomak po zubu (mm/zubu)	0,05	0,125	0,2
Aksijalna dubina rezanja (mm)	0,5	0,8	1,2
Način hlađenja/podmazivanja	Emulzija	Suvo rezanje	Vortex cijev

Eksperimentalno istraživanje je izvedeno na obradnom centru Emco Concept Mill 250. Radni predmet dimenzija $35 \times 25 \times 20$ mm, je stegnut u paralelne stege. Obrada se izvodi sa obje strane uzoraka (gornje i donje) primjenom istosmjernog glodanja, u cilju boljeg kvaliteta obrađene površine. Za obradu se koristi vretenasto glodalo HF 16E2R030A16-SBN10-C proizvođača PRAMET, sa pločicama BNGX 10T308SR-MM: M8345, namijenjenim za obradu superlegura. Mjerenje srednje aritmetičke hrapavosti R_a se izvodi uređajem Mitutoyo SJ-210. Parametri mjerenja su podešeni prema očekivanoj vrijednosti R_a na $\lambda_f = 2,5 \mu\text{m}$, $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, $l_n = 4 \text{ mm}$. Nakon obrade, na svakom obratku se vrše tri mjerenja, svako na različitoj poziciji. Za hlađenje emulzijom odabran je polusintetički fluid BIOL MIN-E, s nivoom kvaliteta prema standardu ISO 6743/7 [30].

4. PRIMJENA METODE TAGUCHI ZA OPTIMIZACIJU PARAMETARA REZANJA I ANALIZA VARIJANSE (ANOVA)

Puni faktorski plan zahtijeva izvođenje eksperimenta sa maksimalnim brojem eksperimentalnih tačaka, definisanim brojem faktora i njihovih nivoa. Primjena punog faktorskog plana u planiranju i izvođenju eksperimenta dovodi do povećanja troškova i vremena. Nasuprot tome, metoda Taguci, kao široko prihvaćen pristup u planiranju eksperimenata, omogućava smanjenje broja eksperimentalnih tačaka. Glavni cilj metode Taguchi je utvrditi minimalan broj eksperimentalnih tačaka potreban za identifikaciju optimalne kombinacije faktora i njihovih nivoa. Kvalitet rezultata se ocjenjuje putem odnosa signal-šum, koji kvantifikuje odstupanje od željene vrijednosti. Prema metodi Taguchi, prema karakteristici kvaliteta, metoda za mjerenje se može grupisati u tri grupe: „manje je bolje“, „veće je bolje“ i „definisana fiksna vrijednost je najbolja“. U ovom eksperimentu, cilj je bio utvrditi srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine (Ra) fokusirajući se na kriterijum „manje je bolje“ (jednačina 1) za odabrani odnos S/N.

$$\frac{S}{N} = -100 \cdot \log(\sum_{i=1}^n y_i^2) \quad (1)$$

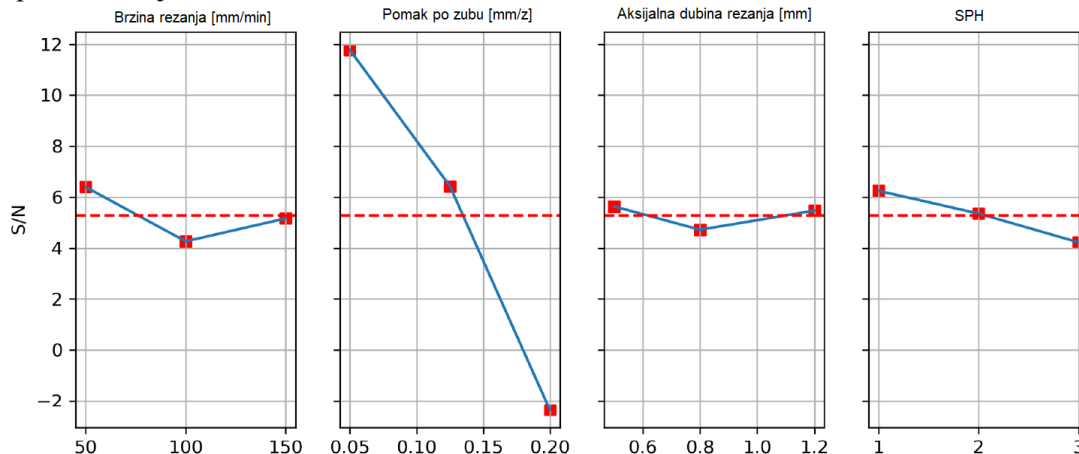
U prethodnoj jednačini S/N predstavlja odnos signal-šum, “n” označava broj eksperimentalnih tačaka, a “y_i” izmjerenu vrijednost karakteristike kvaliteta.

U datom slučaju, sa 4 faktora, svaki na 3 nivoa, puni faktorni plan zahteva 81 eksperimentalnu tačku, dok je primjenom metode Taguchi, broj eksperimentalnih tačaka smanjen sa 81 na 27. Plan izvođenja eksperimenta dizajniranog prema metodi Taguchi dat je u Tabeli 3.

Posljednja kolona u Tabeli 2, odnos signal – šum S/N dobijena je na osnovu mjerenjem utvrđene vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti Ra, te primjenjujući kriterijum „manje je bolje“. S/N vrijednosti su ključne za identifikaciju parametara koji imaju najveći uticaj na srednju aritmetičku hrapavost.

Eksp. tačka	Brzina rezanja (m/min)	Pomak po zubu (mm/zubu)	Aksijalna dubina rezanja (mm)	Hlađenje/podmazivanje	Ra ₁ μm	Ra ₂ μm	Ra ₃ μm	Ra _{sr.} μm	S/N dB
1	50	0,05	0,5	Emulzija	0.173	0.211	0.199	0.194	14.229
2	50	0,05	0,8	Suvo rezanje	0.233	0.257	0.277	0.255	11.846
3	50	0,05	1,2	Vortex cijev	0.234	0.26	0.254	0.2493	12.064
4	50	0,125	0,5	Suvo rezanje	0.327	0.378	0.307	0.337	9.4388
5	50	0,125	0,8	Vortex cijev	0.467	0.521	0.509	0.499	6.037
6	50	0,125	1,2	Emulzija	0.326	0.33	0.292	0.316	10.006
7	50	0,2	0,5	Vortex cijev	1.345	1.225	1.32	1.296	-2.256
8	50	0,2	0,8	Emulzija	1.341	1.315	1.402	1.352	-2.623
9	50	0,2	1,2	Suvo rezanje	1.225	1.106	1.094	1.141	-1.150
10	100	0,05	0,5	Emulzija	0.232	0.278	0.248	0.252	11.949
11	100	0,05	0,8	Suvo rezanje	0.286	0.233	0.297	0.272	11.308
12	100	0,05	1,2	Vortex cijev	0.34	0.271	0.334	0.315	10.033
13	100	0,125	0,5	Suvo rezanje	0.668	0.657	0.498	0.607	4.3266
14	100	0,125	0,8	Vortex cijev	0.607	0.489	0.505	0.533	5.4545
15	100	0,125	1,2	Emulzija	0.446	0.519	0.602	0.522	5.6410
16	100	0,2	0,5	Vortex cijev	1.479	1.556	1.565	1.533	-3.712
17	100	0,2	0,8	Emulzija	1.662	1.337	1.673	1.557	-3.8476
18	100	0,2	1,2	Suvo rezanje	1.279	1.272	1.57	1.373	-2.7576
19	150	0,05	0,5	Emulzija	0.21	0.21	0.21	0.21	13.555
20	150	0,05	0,8	Suvo rezanje	0.412	0.22	0.169	0.267	11.469
21	150	0,05	1,2	Vortex cijev	0.351	0.36	0.291	0.334	9.525
22	150	0,125	0,5	Suvo rezanje	0.494	0.572	0.491	0.519	5.696
23	150	0,125	0,8	Vortex cijev	0.703	0.707	0.624	0.678	3.375
24	150	0,125	1,2	Emulzija	0.298	0.429	0.487	0.404	7.858
25	150	0,2	0,5	Vortex cijev	1.492	1.187	1.317	1.332	-2.490
26	150	0,2	0,8	Emulzija	0.804	1.194	1.188	1.062	-0.522
27	150	0,2	1,2	Suvo rezanje	1.168	1.421	1.176	1.255	-1.972

Optimalni parametri rezanja mogu se odrediti analizom odnosa S/N prikazanog na slici 1. Uticaj pojedinih parametara na rezultate može se procijeniti na osnovu nagiba linija na graficima, gdje veći nagib ukazuje na veći uticaj razmatranog parametra na srednju aritmetičku hrapavost obrađene površine Ra. Može se vidjeti da pomak ima najizraženiji uticaj na Ra u odnosu ostale parametre, brzinu, dubinu rezanja i način hlađenja/podmazivanja.



Slika 1. Odnos S/N – parametri rezanja

Takođe, može se vidjeti da brzina rezanja od 50 m/min (nivo 1), pomak od 0,05 mm/zub (nivo 1), aksijalna dubina rezanja 0,5 mm (nivo 1) i hlađenje/podmazivanje emulzijom (nivo 1) imaju najmanju S/N vrijednost, što predstavlja optimalne parametre za minimalnu srednju aritmetičku hrapavost Ra.

U ovom slučaju optimalna kombinacija 1-1-1-1 je sastvani dio eksperimenta, pa se verifikacija ne mora izvoditi. Za kombinaciju 1-1-1-1 minimalna vrijednost srednje aritmetičke hrapavosti dobijena eksperimentalnim putem je $Ra = 0,194 \mu\text{m}$. Rezultati analize varijanse dati su u Tabeli 4.

Faktor	Stepenislobode	Suma kvadrata	Varijansa	F
A	2	0.102	0.051	5.490
B	2	5.615	2.808	302.467
C	2	0.018	0.009	0.989
D	2	0.051	0.026	2.760
Greška	18	0.17	0.009	
Ukupno	26	5.95		

S obzirom da je računski vrijednost F-testa za parametar obrade dubina rezanja manji od 1, ovaj faktor se odbacuje, te je konačna ANOVA tabela, tabela 5.

Faktor	Stepenislobode	Suma kvadrata	Varijansa	F	%
A	2	0.0833	0.051	5.490	1,4
B	2	5.596	2.808	302.8	94
D	2	0.032	0.026	2.73	0,55
Greška	20	0.241	0.00927		4,05

5. PRIMJENA MAŠINSKOG UČENJA ZA PREDIKCIJU SREDNJE ARITMETIČKE HRPAVOSTI PRI OBRADI GLODANJEM

U oblasti mašinskog učenja (ML), veličina skupa podataka predstavlja bitno ograničenje, budući da mnogi ML modeli zahtijevaju velike količine podataka za obuku. Veličina skupa podataka potrebna za obuku ML modela može značajno varirati u zavisnosti od nekoliko faktora, uključujući složenost problema i specifične zahtjeve modela. Ne postoji fiksni prag za „idealnu“ veličinu skupa podataka, ali postoje opšte smjernice za različite ML algoritme. S obzirom na specifične karakteristike skupa podataka, koji obuhvata skromnih 27 uzoraka i uključuje regresioni problem sa četiri ulazna parametra i jednim izlaznim, u ovom istraživanju se razmatraju različiti algoritmi mašinskog učenja: neuronske mreže, Decision trees, Random Forest, Linear regression, K-Nearest Neighbors (KNN), Ridge, Lasso, Elastic Net Regression regularization, Support Vector Machine (SVM), Gradient boosting. Navedeni algoritmi su manje skloni prekomjernom prilagođavanju i mogu se efikasno koristiti sa malim skupovima podataka. Prikladnost svakog algoritma

zavisi od specifičnih karakteristika skupa podataka i inherentnih odnosa među promjenljivima. Ovaj rad procjenjuje svaki od pomenutih algoritama, analizom njihovih performansi, te određuje najpogodniji izbor za rad sa malim skupom podataka. Procjena kvaliteta modela uključuje različite metrike koje ocjenjuju njegovu efikasnost. Za ocjenjivanje kvaliteta ML modela najčešće korišćene metrike su:

- Srednja kvadratna greška (Mean Squared Error, MSE) i srednja apsolutna greška (Mean Absolute Error, MAE), kao mjere veličine grešaka u predikciji;
- Koeficijent determinacije (R-squared), koji ukazuje na udio varijanse u zavisnoj promjenljivoj koja se može predvidjeti iz nezavisnih promjenljivih;

Skup podataka za obuku, validaciju i testiranje sadrži 27 parova podataka, pri čemu svaki par uključuje 4 ulazne i 1 izlaznu vrednost. Ukoliko se skup podataka raspodijeli u procentualnom odnosu 70-15-15, to znači da se treniranje izvodi sa 19, a validacija i testiranje sa po 4 para podataka. Pri tome se koriste uvijek isti parovi za trening, validaciju i testiranje kako bi se smanjile varijacije u performansama mreže. Tehnike hlađenja i podmazivanja obuhvataju emulziju, suvo rezanje i vortex cevi. Međutim, ovate hlike nisu pogodne za mašinsko učenje. Da bi postale upotrebljive, koristi se funkcija “get_dummies”, koja pretvara tekstualne prikaze tih tehnika u numeričke kodove, omogućavajući da se kategorizovane promjenljive predstavljaju kao binarne vrijednosti. Na ovaj način se omogućava korišćenje tih tehnika kao ulaznih karakteristika za algoritme mašinskog učenja, čime se poboljšava ukupna prediktivna sposobnost modela.

5.1. Evaluacija neuronskih mreža

Neuronske mreže mogu biti izazovne za korištenje ukoliko je raspoloživ mali skup podataka, tako da je potrebno pažljivo pristupiti procesu treniranja te primijeniti odgovarajuće podešavanje hiperparametara.

U radu je analiziran i poređen uticaj dvije specifične tehnike unakrsne validacije na performanse modela:

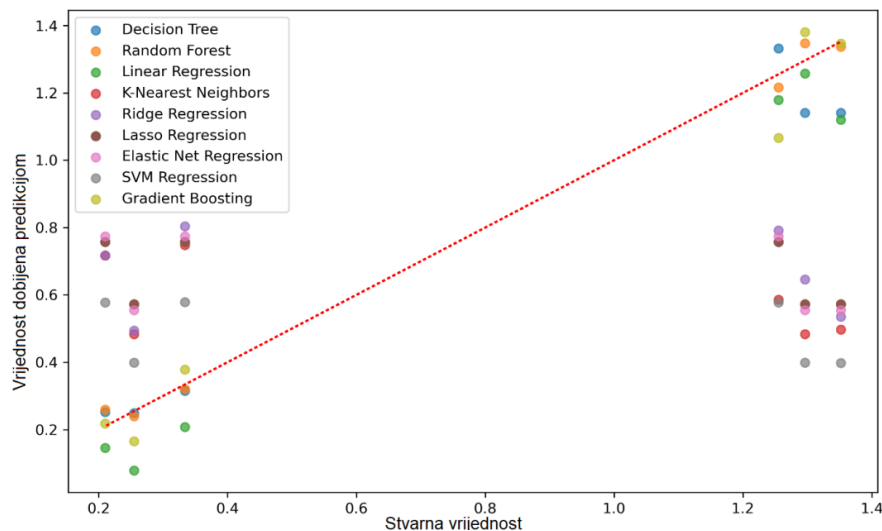
1. Tehnika Holdout unakrsne validacije: Ovaj pristup podrazumijeva podjelu skupa podataka na dva različita podskupa: jedan za obuku i drugi za validaciju. Model se trenira na skupu za obuku, a njegova se performansa zatim procjenjuje na skupu za validaciju. Ova tehnika je poznata po svojoj jednostavnosti i brzini, što je čini čestim izborom za inicijalnu procjenu modela.
2. Tehnika K-Fold unakrsne validacije: Za razliku od prethodne, K-Fold unakrsna validacija uključuje podjelu skupa podataka na “K” jednako velikih podskupova ili “foldova”. Model se trenira “K” puta, pri čemu se svaki put koristi drugi fold za validaciju, a preostali foldovi za obuku. Ovaj proces se ponavlja “K” puta, čime se osigurava da svaki fold jednom služi kao skup za validaciju. K-Fold unakrsna validacija je naročito korisna za procjenu konzistentnosti modela i smanjenje rizika od pretreniranosti.

Izbor između ovih tehnika unakrsne validacije može značajno uticati na performanse i pouzdanost modela mašinskog učenja. Rad, između ostalog, ima za cilj poređenje efekata Holdout i K-Fold tehnika na ishode modela. Skupovi uzoraka za treniranje i testiranje variraju u zavisnosti od različitih slučajnih stanja, što može rezultirati promjenljivim performansama neuronske mreže. Da bi se ovo pitanje riješilo, ispitivanje više nasumičnih početnih vrijednosti (seeds) kroz petlju omogućava određivanje najboljih performansi mreže, uključujući metrike kao što su MSE i R-kvadrat. U tabeli 6 se prikazuju testirane topologije neuronskih mreža. Sve arhitekture neuronskih mreža sadrže jedan ili dva skrivena sloja, trenirana koristeći Adam optimizacijski algoritam. Parametar učenja, postavljena na 0,001, usmjerava ažuriranje parametara mreže. Svaki skriveni sloj sadrži 8, 10 ili 12 neurona, a ReLU aktivacijska funkcija omogućava nelinearne transformacije i ekstrakciju karakteristika mreže. Kao što je prikazano u Tabeli 6, Holdout unakrsna validacija je pružila jasniju indikaciju performansi mreže na skupu podataka za testiranje. Topologija neuronske mreže 4-12-1 sa Holdout unakrsnom validacijom pokazala se kao model sa najboljim performansama za postojeći skup podataka kada se posmatraju R-kvadrat i MSE na skupu podataka za testiranje.

Tabela 6. Rezultati različitih topologija neuronske mreže kod Holdout i K-fold unakrsne validacije					
Holdout unakrsna validacija			K-fold unakrsna validacija		
Topologija mreže	R ²	MSE	Topologija mreže (broj foldova)	R ²	MSE
4-8-1	0.9599	0.0093	4-12-1 (5)	0.5562	0.0819
4-10-1	0.9507	0.0144	4-12-1 (10)	0.3052	0.1181
4-12-1	0.9710	0.0071	4-12-12-1 (5)	0.2623	0.1195
4-8-8-1	0.9591	0.0058	4-12-12-1 (10)	-0.5683	0.0803
4-10-10-1	0.9100	0.0186			
4-12-12-1	0.8603	0.0310			

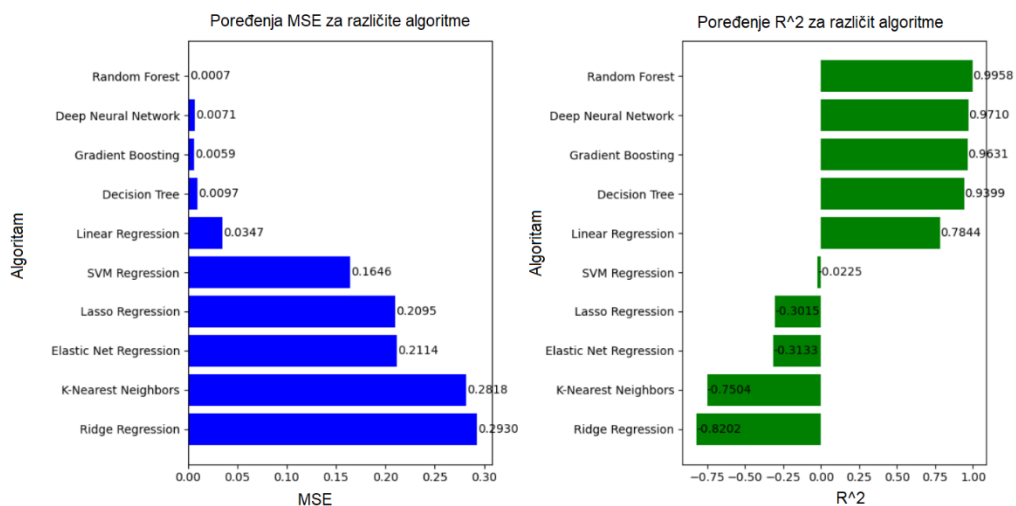
5.2 Komparativna evaluacija performansi: analiza algoritama regresije

Uzimajući u obzir da je najbolji model pronađen kroz petlju s ciljem minimizacije MSE i maksimizacije R-kvadrata, te uzimajući u obzir varijabilnost performansi modela između različitih pokretanja, kao i eksperimentisanje s različitim procesima treniranja, konfiguracijama slojeva i metodama optimizacije, jasno je da je u pitanju složen i iterativan proces. Istraživanje alternativnih algoritama ili metodologija prirodan je korak kada se suočavamo s ovakvim izazovima. Iako su neuronske mreže pokazale veliki potencijal u različitim domenama, ponekad nisu najbolji izbor za određene probleme. Slika 2 pruža komparativni prikaz stvarnih i predviđenih vrijednosti za niz regresijskih algoritama, svaki dizajniran da odgovori na problem pretreniranosti. Kroz iterativni proces, uključujući trening petlje, izabrani su modeli s najboljim performansama. Među ovim modelima, najbolji algoritam Random Forest se izdvaja sa niskim MSE od 0,0007, i visokim R-kvadratom od 0,9958, što ukazuje na visoku sposobnost predviđanja. Nizak MSE i visok R-kvadrat naglašavaju efikasnost metode Random Forest u prepoznavanju kompleksnih odnosa unutar skupa podataka, uz istovremeno izbjegavanje pretreniranja. Drugi algoritmi takođe pokazuju različite nivoe performansi, što naglašava važnost odabira metode na osnovu specifičnih karakteristika problema.



Slika 2. Poređenje stvarne i vrijednosti dobijene predikcijom

Slika 3 prikazuje evaluaciju performansi različitih regresijskih algoritama koji su prošli optimizaciju kroz iterativne petlje. Dijagram vizualno prikazuje srednju kvadratnu grešku (MSE) i R-kvadrat vrijednosti za svaki algoritam. Ovi optimizovani modeli su podešeni da postignu ravnotežu između preciznosti i generalizacije, a njihova reprezentacija na slici ilustruje njihovu efikasnost u rješavanju problema pretreniranosti i prepoznavanju odnosa unutar skupa podataka.



Slika 3. Uporedna analiza R² i MSE za različite algoritme regresije

7. ZAKLJUČAK

Rad se sastoji od dve celine.

U okviru prve celine analiziran je uticaj parametara rezanja na hrapavost obrađene površine pri glodanju biokompatibilne legure titanijuma Ti-6Al-4V. Razmatrani parametri su brzina rezanja, pomak po zubu, aksijalna dubina rezanja i način hlađenja/podmazivanja. Primena Taguchi metode u dizajnu eksperimenta dovela je do izvođenja eksperimenta sa 27 eksperimentalnih tačaka.

Rezultati su pokazali da je značajan uticaj pomaka na srednju aritmetičku hrapavost površine (Ra), što je evidentno iz ANOVA analize.

Kroz drugu celinu, skup podataka iz eksperimenta je korišćen za treniranje različitih modela mašinskog učenja. Provedena je opsežna komparativna analiza za procjenu performansi nekoliko algoritama u rješavanju problema regresije. Među analiziranim algoritmima, Random Forest je pokazao najbolje performanse prema metrikama, postigavši izuzetno nisku srednju kvadratnu grešku (MSE) 0.0007 uz relativno visok R-kvadrat koji iznosi 0.9958. Sa druge strane, neuronske mreže su pokazala nešto slabije performanse, postigavši MSE = 0.0071 i R-kvadrat = 0.9710. Na osnovu ovih nalaza, algoritam Random Forest se izdvaja kao poželjniji izbor, s obzirom na konzistentnije i pouzdanije performanse, ističući svoj potencijal kao alat za slične zadatke. Algoritam Gradient Boosting je pokazao relativno solidne rezultate sa niskom srednjom kvadratnom greškom MSE= 0.0059 i respektabilnim R-kvadratom 0.9631. Iako algoritmi Decision Tree i Linear Regression pokazuju zadovoljavajuće performanse, oni zaostaju za vodećim algoritmima. Nasuprot tome, perspektiva drugih algoritama se čini manje obećavajućom, jer nisu pokazali konkurentne rezultate. Ipak, važno je naglasiti da odabir optimalnog algoritma zavisi od specifičnog problema, što ističe važnost pažljivog izbora modela i njegovog podešavanja na osnovu karakteristika problema.

Ukratko, prezentovano istraživanje, nastalo na bazi dva realizovana projektna zadatka, te na osnovu njih publikovanih zapaženih naučnih radova, naglašava svestranost različitih regresijskih tehnika, te služi kao vodič za donošenje odluka pri odabiru i evaluaciji modela.

10. LITERATURA

- [1] Mihov, D., Katerska, B.: *Some biocompatible materials used in medical practice*, Trakia J. Sci. 2010, 8 (Suppl. S2), 119–125.
- [2] Kiradzhyska, D.D., Mantcheva, R.D.: *Overview of Biocompatible Materials and Their Use in Medicine*. Folia Med. 2019, 61, 34–40.
- [3] Parida, P., Behera, A., Mishra, S.C.: *Classification of Biomaterials used in Medicine*, Int. J. Adv. Appl. Sci. (IJAAS) 2012, 1, 31–35.
- [4] Binyamin, G., Shafi, B.M., Mery, C.M.: *Biomaterials: A primer for surgeons, In Seminars in Pediatric Surgery*, WB Saunders: Philadelphia, PA, USA, 2006; Volume 15.
- [5] Saptaji, K., Gebremariam, M.A., Azhari, M.A.M.: *Machining of biocompatible materials: A review*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018, 97, 2255–2292.
- [6] Liu, Z., He, B., Lyu, T., Zou, Y. A.: *Review on Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Aerospace Applications*, Directed Energy Deposition and Beyond Ti-6Al-4V. In Processing-Microstructure-Property Relationships in Additive Manufacturing of Ti Alloys; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021.
- [7] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T.: *Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC endmilling of Ti-6Al-4V titanium alloy*, J. Manuf. Process. 2016, 21, 172–179.
- [8] Iqbal, A., Suhaimi, H., Zhao, W., Jamil, M., Nauman, M.M., He, N., Zaini, J.: *Sustainable Milling of Ti-6Al-4V: Investigating the Effects of Milling Orientation, Cutter's Helix Angle, and Type of Cryogenic Coolant*, Metals 2020, 10, 258.
- [9] Tešić, S., Zeljković, M., Čiča, Đ.: *Optimizacija i ispitivanje uticaja parametara rezanja na hrapavost obrađene površine pri glodanju biokompatibilne legure Ti-6Al-4V*, Teh. Mašinstvo 2019, 74, 677–682.
- [10] Danish, N.H.D., Musfirah, A.H.: *Optimization of Cutting Parameter for Machining Ti-6Al-4V Titanium Alloy*, J. Mod. Manuf. Syst. Technol. (JMMST) 2022, 6, 53–57.
- [11] Ginting, A., Nouari, M.: *Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material*, Int. J. Mach. Tools Manuf. 2006, 46, 758–768.
- [12] Paschoalinoto, N.W., Batalha, G.F., Bordinassi, E.C., Ferrer, J.A.G., de Lima Filho, A.F., de L. X. Ribeiro, G., Cardoso, C.: *MQL Strategies Applied in Ti-6Al-4V Alloy Milling—Comparative Analysis between Experimental Design and Artificial Neural Networks*, Materials 2020, 13, 3828.

- [13] Sun, J., Guo, Y.B.: *A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V*, J. Mater. Process. Technol. 2009, 20, 4036–4042.
- [14] Rahman, A.M., Rob, S.A., Srivastava, A.K.: *Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis*, Procedia Manuf. 2021, 53, 204–212.
- [15] Karkalos, N.E., Galanis, N.I., Markopoulos, A.P.: *Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques*, Measurement 2016, 90, 25–35.
- [16] Bai, X. Li, C., Dong, L., Yin, Q.: *Experimental evaluation of the lubrication performances of different nanofluids for minimum quantity lubrication (MQL) in milling Ti-6Al-4V*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019, 101, 2621–2632.
- [17] Benedicto, E., Carou, D., Rubio, E.M.: *Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes*, Procedia Eng. 2017, 184, 99–116.
- [18] Andriya, N., Rao, P.V., Ghosh, S.: *Dry Machining of Ti-6Al-4V using PVD Coated TiAlN Tools*, In Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012, London, UK, 4–6 July 2012.
- [19] Jerold, B.D., Kumar, M.P.: *The Influence of Cryogenic Coolants in Machining of Ti-6Al-4V*, J. Manuf. Sci. Eng. 2013, 135, 031005.
- [20] Šterpin Valić, G., Kostadin, T., Cukor, G., Fabić, M.: *Sustainable Machining: MQL Technique Combined with the Vortex Tube Cooling When Turning Martensitic Stainless Steel X20Cr13*, Machines 2023, 11, 336.
- [21] Yüksel, S., Onat, A.: *Investigation of CNC Turning Parameters by Using a Vortex Tube Cooling System*, In Proceedings of the 4th International Congress APMAS 2014, Fethiye, Turkey, 24–27 April 2014.
- [22] Singh, G., Pruncu, C.I., Gupta, M.K., Mia, M., Khan, A.M., Jamil, M., Pimenov, D.Y., Sen, B., Sharma, V.S.: *Investigations of Machining Characteristics in the Upgraded MQL-Assisted Turning of Pure Titanium Alloys Using Evolutionary Algorithms*, Materials 2019, 12, 999.
- [23] Hossain, M.I., Amin, A.N., Patwari, A.U.: *Development of an artificial neural network algorithm for predicting the surface roughness in end milling of Inconel 718 alloy*, In Proceedings of the 2008 International Conference on Computer and Communication, Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 13–15 May 2008; pp. 1321–1324.
- [24] Benardos, P., Vosniakos, G.C.: *Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments*, Robot Comput.-Integr. Manuf. 2002, 18, 343–354.
- [25] Eser, A., Askar Ayyıldız, E., Ayyıldız, M., Kara, F.: *Artificial intelligence-based surface roughness estimation modelling for milling of AA6061 alloy*, Adv. Mater. Sci. Eng. 2021, 2021, 5576600.
- [26] Rajesh, A.S., Prabhuswamy, M.S., Rudra Naik, M.: *Machine Learning Approach: Prediction of Surface Roughness in Dry Turning Inconel 625*, Adv. Mater. Sci. Eng. 2022, 2022, 6038804.
- [27] Kosarac, A., Cep, R., Trochta, M., Knezev, M., Zivkovic, A., Mladjenovic, C., Antic, A.: *Thermal Behavior Modeling Based on BP Neural Network in Keras Framework for Motorized Machine Tool Spindles*, Materials 2022, 15, 7782.
- [28] Dubey, V., Sharma, A.K., Pimenov, D.Y.: *Prediction of Surface Roughness Using Machine Learning Approach in MQL Turning of AISI 304 Steel by Varying Nanoparticle Size in the Cutting Fluid*, Lubricants 2022, 10, 81.
- [29] Agrawal, A., Goel, S., Bin Rashid, W., Price, M.: *Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC)*, Appl. Soft Comput. 2015, 30, 279–286.
- [30] ISO 6743-7: *Lubricants, Industrial Oils and Related Products (Class L)*, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1986.
- [31] Kosarac, A., Mladjenovic, C., Zeljkovic, M., Tabakovic, S., Knezev, M.: *Neural-Network-Based Approaches for Optimization of Machining Parameters Using Small Dataset*, Materials 2022, 15, 700.
- [32] Kumar, P., Sharma, M., Singh, G., Singh, R.P.: *Experimental investigations of machining parameters on turning of Ti6Al4V: Optimisation using Taguchi method*, Int. J. Interact. Des. Manuf. (IJIDeM) 2023, 1–11.
- [33] Pal, S.K., Chakraborty, D.: *Surface roughness prediction in turning using artificial neural network*, Neural Comput. Appl. 2005, 14, 319–324.
- [34] Beatrice, B.A., Kirubakaran, E., Thangaiah, P.R.J., Wins, K.L.D.: *Surface roughness prediction using artificial neural network in hard turning of AISI H13 steel with minimal cutting fluid application*, Procedia Eng. 2014, 97, 205–211.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR SURFACE ROUGHNESS PREDICTION IN MILLING OF THE BIOCOMPATIBLE TITANIUM ALLOY TI-6AL-4V

Abstract: Mechanical engineering plays an important role in the design and manufacture of medical devices, implants, prostheses, and other medical equipment, where the machining of bio-compatible materials have a special place. There are a lot of different conventional and non-conventional types of machining of biocompatible materials. One of the most frequently used methods is milling. The first part of this research explores the machining parameters optimization minimizing surface roughness in milling titanium alloy Ti-6Al-4V. A full factorial design involving four factors (cutting speed, feed rate, depth of cut, and the cooling/lubricating method), each having three levels, implies the 81 experimental runs. Using the Taguchi method, the number of experimental runs was reduced from 81 to 27 through an orthogonal design. According to the analysis of variance (ANOVA), the most significant parameter for surface roughness is feed rate. The second part explores the possibilities of using different ML techniques to create a predictive model for average surface roughness using the previously created small datasets. The paper presents a comparative analysis of several commonly used techniques for handling small datasets and regression problems. The best results indicate that the widely used machine learning algorithm Random Forest excels in handling regression problems and small datasets.

Key words: surface roughness; biocompatible materials; alloy; Ti-6Al-4V; Taguchi method; ANOVA; neural networks; Random Forest



Spasojević Brkić, V., Perišić, M., Papić, N., Janev, N., Čosović, E.¹⁾

PRIMENA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U ANALIZI BEZBEDNOSNIH I ERGONOMSKIH ASPEKATA KABINA RUDARSKIH MAŠINA²⁾

Rezime

Prethodna istraživanja su ukazala na značaj uticaja ergonomskih i ponašajnih faktora na bezbednost i zdravlje na radu rukovalaca rudarskim mašinama. U ovom istraživanju analiziraju se bezbednosni aspekti rada koristeći podatke o fizičkim karakteristikama rukovaoca i ergonomskim uslovima rada u rudarskoj industriji, tačnije u kabinama šest različitih tipova rudarskih mašina (buldozer, bager, damper, kombinirka, bušilica i utovarivač). Analiza je sprovedena nad podacima prikupljenim anketiranjem 61 rukovaoca rudarskim mašinama o ergonomskim faktorima, koji utiču na mogućnost povreda na radu. Primenom veštačkih neuronskih mreža, izvršeno je predviđanje pojave povreda. Rezultati pokazuju visok stepen tačnosti modela, što sugeriše mogućnosti unapređenja bezbednosti i zdravlja na radu kroz ergonomske intervencije i daje preporuku za dalju primenu veštačke inteligencije u rudarskoj industriji.

Ključne reči: bezbednost, rudarska mašina, veštačka inteligencija, veštačka neuronska mreža, ergonomija

1. UVOD

Radna okruženja u rudarskoj industriji predstavljaju jedno od najopasnijih okruženja za zaposlene i shodno tome, bezbednost i zdravlje na radu bi jednoznačno morali da predstavljaju prioritet [1]. Zbog visokih rizika povezanih sa upotrebom rudarskih mašina i složenim radnim procesima, važno je da se stalno unapređuju sigurnosni protokoli i tehnologije za unapređenje bezbednosti i zdravlja na radu [2]. Efektivno upravljanje rizicima i minimalizacija broja i težine povreda na radu zahteva detaljno proučavanje faktora koji utiču na bezbednost rada rukovalaca rudarskih mašina [3]. Osim fizičkih karakteristika radnika, važni su i drugi faktori kao što su prilagođavanje radnog mesta ergonomske potrebama rukovalaca, prisustvo bezbednosne opreme, ali i uslovi rada unutar i van kabina rudarskih mašina [4]. Posebno je važno uzeti u obzir ergonomske karakteristike kabina u kojima operateri rade, jer neadekvatan dizajn može značajno povećati rizik od povreda [5]. Kabine bi trebalo da budu opremljene odgovarajućim sistemima za kontrolu klime i ergonomske sedišta kako bi se smanjili rizici povezani sa dugotrajnim radom u zatvorenim prostorima [5]. Takođe, praćenje karakteristika radnih uslova u realnom vremenu, kao što su temperatura i ventilacija u kabini, može pomoći u poboljšanju radnog okruženja i prevenciji nesreća [2].

Ovaj rad se bavi analizom bezbednosnih aspekata rada rukovaoca rudarskim mašinama koristeći podatke o njihovim fizičkim karakteristikama i subjektivnim uslovima rada. Primenom veštačkih neuronskih mreža modelirani su faktori koji mogu uticati na mogućnost povreda i predviđanje potencijalnih opasnosti, a sve sa ciljem poboljšanja bezbednosti i zdravlja na radu u rudarskoj industriji.

¹⁾ prof. dr Vesna Spasojević Brkić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (vspasojevic@mas.bg.ac.rs), Martina Perišić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mperisic@mas.bg.ac.rs), Neda Papić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (npapic@mas.bg.ac.rs), Nemanja Janev, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (njanev@mas.bg.ac.rs), Ermina Čosović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ecosovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru o finansiranju naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini br. 451-03-65/2024-03/200105 od 5.2.2024. godine i bilateralne saradnje između Republike Srbije i Republike Austrije broj 337-00-216/2023-05/244, Procena klime bezbednosti i performansi članova lanca snabdevanja teškom mehanizacijom u Austriji i Srbiji kao alat za unapređenje organizacione otpornosti - SAFECORNER
Istraživanje sprovedeno uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, BROJ PROJEKTA 5151, Support System for Smart, Ergonomic and Sustainable Mining Machinery Workplaces – SMARTMINER

2. PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

Veliki broj rukovalaca rudarskim mašinama se usled nepravilnih radnih položaja, odnosno neadekvatnih ergonomskih uslova rada, suočava sa velikim rizikom od mišičnoskeletnih poremećaja [6]. Takođe, rizik se dodatno uvećava i usled vibracija koje se prenose preko celog tela prilikom rukovanja rudarskim mašinama [7]. Ovi problemi predstavljaju ozbiljan izazov za rudarsku industriju, jer osim narušenog zdravlja radnika, mogu dovesti do smanjenja produktivnosti i povećanih troškova zbog njihovog odsustva sa posla i lečenja [8,9]. Gubitak radne snage zbog zdravstvenih problema ima dalekosežne posledice, kako za kompanije, tako i za lokalne zajednice koje zavise od rudarskih operacija [10].

Pored rizika od mišičnoskeletnih poremećaja usled neadekvatnih ergonomskih uslova, rukovaoci rudarskim mašinama suočavaju se i sa velikim brojem teških nezgoda sa smrtnim ishodom ili trajnim invaliditetima. U studiji koja je sprovedena u radu [11] u kojoj su analizirane 562 nezgode koje su se dogodile u Sjedinjenim Američkim Državama, 41% ukupnog broja činile su nezgode povezane sa rudarskim mašinama i to prilikom rukovanja ili održavanja. Naime, nezgode se veoma često događaju usled ljudskog faktora, koji zapravo predstavlja izvor velikog broja problema povezanih sa pouzdanošću rudarskih mašina [12]. Istraživanje sprovedeno među 828 zaposlenih u rudniku zlata u Gani pokazalo je da stopa nezgoda opada sa povećanjem svesti o bezbednosti i zdravlju na radu [13]. To sugeriše da su edukacija i obuka radnika jedna od ključnih komponenti u prevenciji nesreća i poboljšanju uslova rada u rudnicima [14].

Još jedna od ključni komponenti u prevenciji nezgoda predstavlja digitalna transformacija rudarske industrije, Zbog toga je važno da se preduzmu proaktivne mere koje će smanjiti rizike, poput uvođenja inovativnih tehnoloških rešenja i unapređenje bezbednosnih aspekata organizacione kulture. Integracija veštačke inteligencije, mašinskog učenja, internet stvari i automatizacija predstavljaju ključ četvrte industrijske revolucije u rudarskoj industriji [15]. Poslednjih godina primetan je porast istraživanja na polju bezbednosti u rudarskoj industriji, međutim i dalje ne postoji dovoljan broj istraživanja vezanih za kvantifikaciju mehanizama nezgoda, praćenje nezgoda u realnom vremenu kao ni i njihovo precizno predviđanje. Integracija veštačke inteligencije, mašinskog učenja, internet stvari i automatizacija predstavljaju ključ četvrte industrijske revolucije u rudarskoj industriji [16], jer omogućavaju naprednije sisteme praćenja i analize rada rudarskih mašina, kao i predviđanje nezgoda u realnom vremenu, što je ključno za povećanje bezbednosti [17].

U istraživanju sprovedenom u okviru rada [18] na osnovu 1800 podataka sakupljenih od 40 rukovalaca dampera modelirana je veštačka neuronska mreža koja predviđa da li će se dogoditi nezgoda ili ne. Ovi rezultati pokazuju veliki potencijal za dalji razvoj tehnologija koje mogu unaprediti bezbednost na radu i smanjiti rizik od nezgoda.

U ovom radu je primenom veštačkih neuronskih mreža izvršeno modelovanje faktora koji utiču na mogućnost povreda i izvršeno je predviđanje pojave povreda na osnovu podataka prikupljenih od strane 61 rukovaoca 6 različitih rudarskih mašina.

3. METODOLOGIJA I REZULTATI

3.1 Anketni upitnik i deskriptivna statistika

Sprovedena je analiza deskriptivne statistike odgovora 61 rukovaoca rudarskih mašina (N). Pitanja iz ankete su data u tabeli 1. Za pitanja 1.5 do 1.21 je korišćena Likertova skala 1-5.

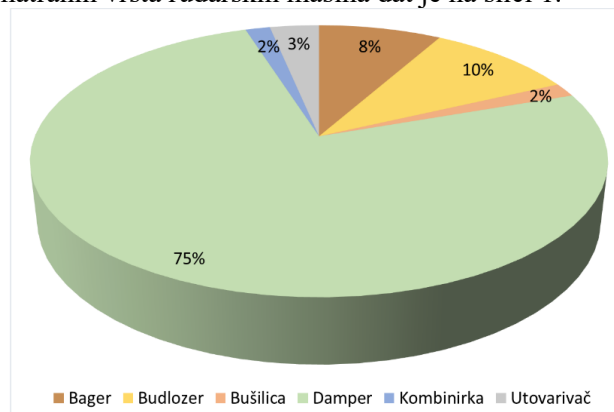
Tabela 1. Lista pitanja korišćenih u formiranju veštačke neuronske mreže	
Oznaka	Pitanje
1.1	Starost rukovaoca
1.2	Visina rukovaoca
1.3	Težina rukovaoca
1.4	Radni staž rukovaoca
1.5	Da li je sedište podesivo po visini?
1.6	Da li sedište može da se podešava horizontalno?
1.7	Da li je sedište postavljeno na odgovarajućoj visini?
1.8	Da li sedište ima lumbalnu podršku?
1.9	Da li postoje nasloni za ruke?
1.10	Da li su podesivi nasloni za ruke?
1.11	Da li su nasloni za ruke postavljeni na odgovarajućoj visini?
1.12	Da li se sedište može nagnuti unazad?
1.13	Da li se lokacija komandnih organa ili ručica može podešavati?

1.14	Da li možete lako dohvatiti komandne organe ili ručice?
1.15	Da li možete lako pokretati komandne organe ili ručice?
1.16	Da li je kabina dovoljno velika za vas (prostor koji vas ne sputava)?
1.17	Da li imate dovoljnu vidljivost u svim smerovima?
1.18	Da li možete da lako otvorite/zatvorite vrata kabine?
1.19	Da li možete da lako da uđete/izađete iz kabine?
1.20	Zbog loših radnih uslova često izostajem sa posla (bolovanje)
1.21	Da li Vam smetaju izduvni gasovi mašine kojom rukujete?
1.22	Da li ste imali povrede na radu?

U tabeli 2 dati su rezultati deskriptivne statistike starosti, visine, težine, radnog staža i starosti mašine kojom upravljaju, odnosno njihova srednja vrednost (Sr. vred.), medijana (Mediana), minimum (Min), maksimum (Max), raspon, standardna devijacija (St. dev.) i koeficijent varijacije (Koef. var.).

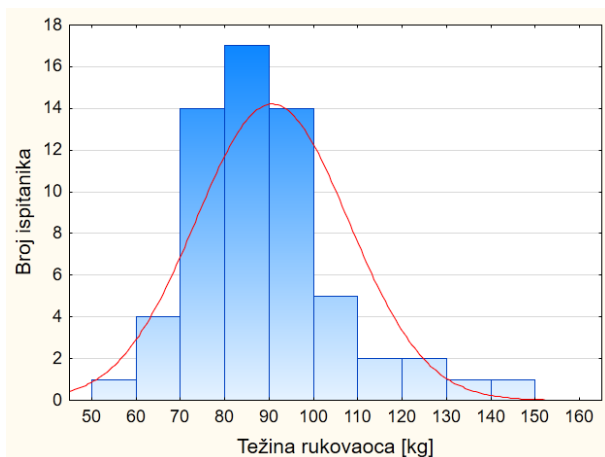
	N	Sr. vred.	Mediana	Min	Max	Raspon	St. dev.	Koef. var.
Starost	61	35,3115	35,0000	19,0000	54,0000	35,00000	8,78738	24,88534
Visina	61	179,1148	180,0000	166,0000	190,0000	24,00000	5,69531	3,17970
Težina	61	90,4754	90,0000	60,0000	150,0000	90,00000	17,12367	18,92633
Radni staž	61	11,1967	10,0000	1,0000	38,0000	37,00000	9,86039	88,06499
Starost mašine	61	5,7213	4,0000	1,0000	13,0000	12,00000	3,97547	69,48531

U istraživanju je učestvovalo 5 rukovalaca bagerom, 6 rukovalaca buldozerom, 1 rukovalac bušilicom, 46 rukovalaca damperom, 1 rukovalac kombinirkom i 2 rukovalaca utovarivačem, ukupno 61 rudarska mašina. Procentualni udeo svih posmatranih vrsta rudarskih mašina dat je na slici 1.

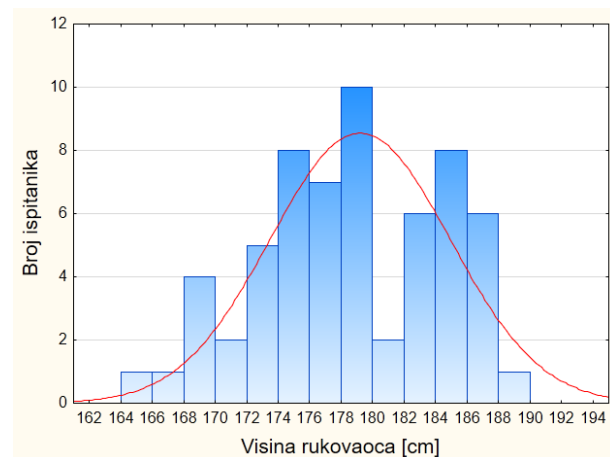


Slika 1. Procentualna udeo rudarskih mašina korišćenih u istraživanju

Na slici 2a dat je histogram težine rukovaoca koji su učestvovali u ispitivanju, dok je slici 2b prikazana njihova visina.



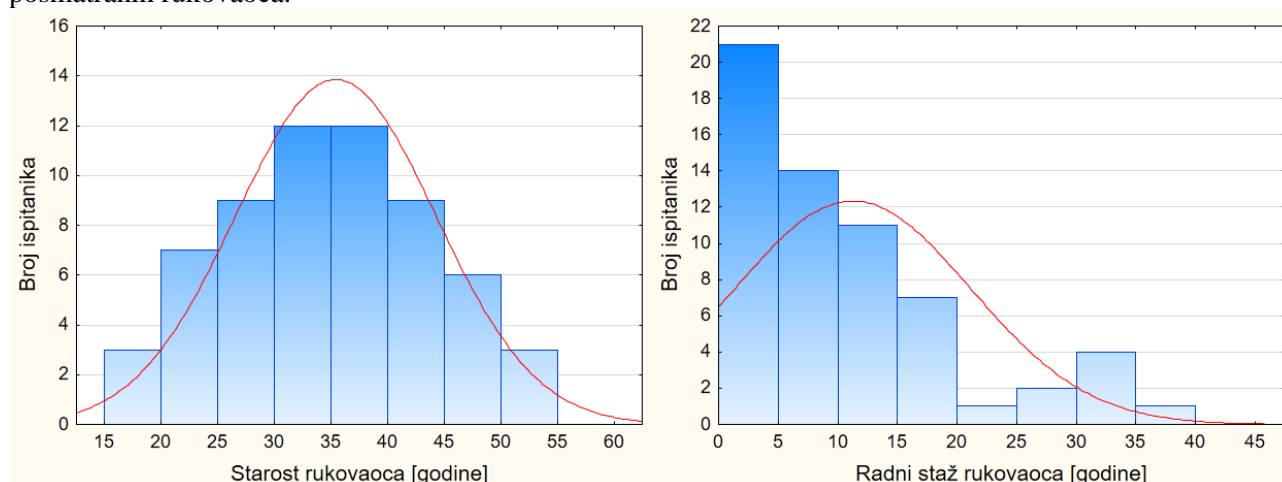
a)



b)

Slika 2. Histogrami **a)** težine i **b)** visine rukovaoca rudarskih mašina

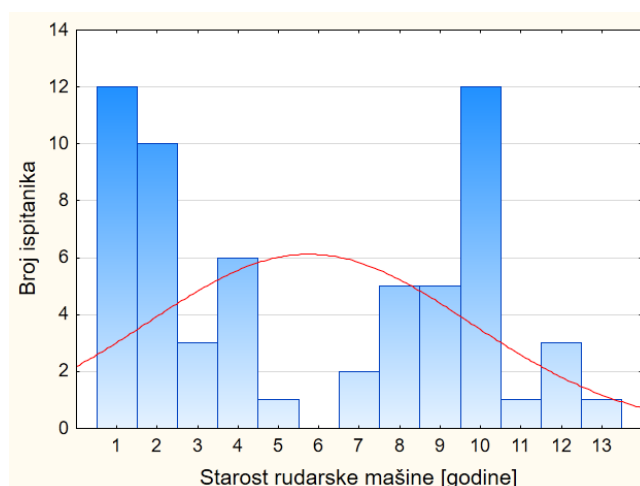
Slika 3a prikazuje histogram starosti rukovaoca, dok je na slici 3b dat histogram dužina radnog staža posmatranih rukovaoca.



Slika 3. Histogrami *a)* starosti rukovaoca i *b)* radnog staža rukovaoca

Histogram starosti rudarskih mašina uključenih u istraživanje prikazan je na slici 4.

Slika 4. Histogram starosti posmatranih rudarskih mašina



U uzorku je 8% anketiranih imalo povrede na radu. U tabeli 3 je prikazana deskriptivna statistika ostalih indikatora.

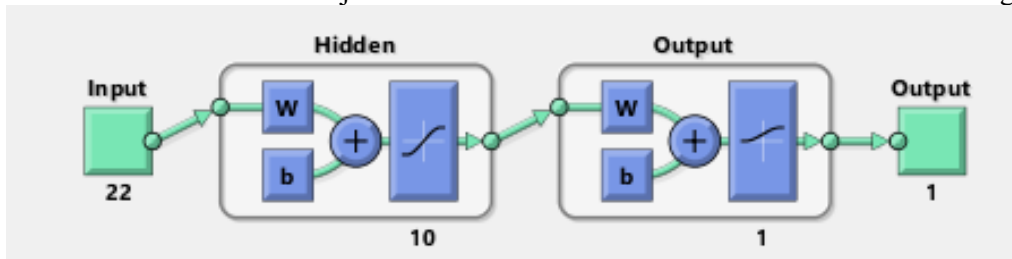
Tabela 3. Deskriptivna statistika ergonomskih karakteristika								
	N	Sr. vred.	Mediana	Min	Max	Raspon	St. dev.	Koef. var.
1.5	61	3,918033	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,173245	29,94473
1.6	61	3,950820	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,230531	31,14623
1.7	61	4,016393	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,087686	27,08115
1.8	61	2,655738	2,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,537154	57,88048
1.9	61	2,459016	1,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,756642	71,43679
1.10	61	2,475410	1,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,849383	74,71019
1.11	61	2,475410	1,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,766414	71,35845
1.12	61	3,967213	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,251229	31,53924
1.13	61	3,311475	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,555003	46,95800
1.14	61	4,245902	5,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,010870	23,80813

Tabela 3. Deskriptivna statistika ergonomskih karakteristika								
	N	Sr. vred.	Mediana	Min	Max	Raspon	St. dev.	Koef. var.
1.15	61	4,278689	5,000000	2,000000	5,000000	3,000000	0,878088	20,52236
1.16	61	4,032787	5,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,303421	32,32061
1.17	61	3,327869	3,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,136094	34,13880
1.18	61	3,754098	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,247073	33,21898
1.19	61	3,836066	4,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,171613	30,54205
1.20	61	1,983607	1,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,596786	80,49915
1.21	61	2,442623	2,000000	1,000000	5,000000	4,000000	1,443660	59,10284

3.2 Modeliranje bezbednosnih i ergonomskih aspekata veštačkim neuronskim mrežama

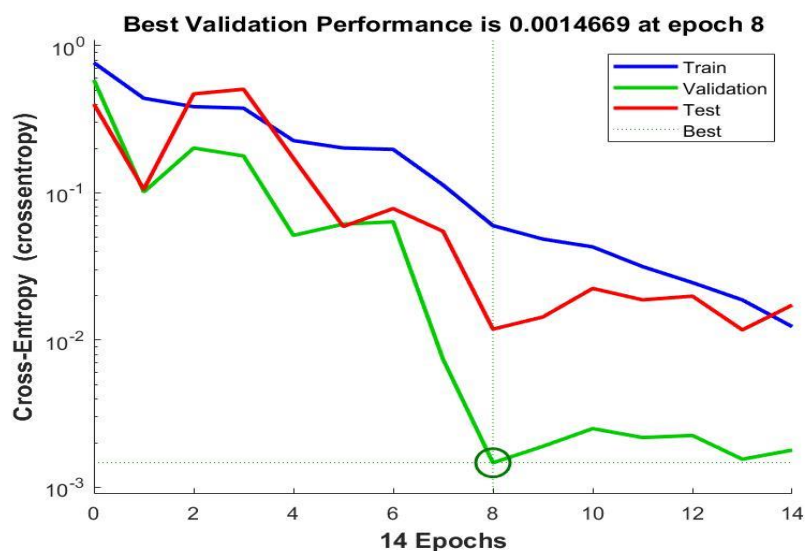
Sprovedeno istraživanje oslanja se na istraživanje sprovedeno od strane Spasojević Brkić i drugih [19], u kome je predložen model od ukupno 17 indikatora na osnovu podataka dobijenih istraživanjem 10 različitih tipova kabina rudarskih i građevinskih mašina, odnosno 102 kabine. Na osnovu odgovora rukovalaca rudarskih mašina na pitanja iz tabela 2 i 3, formirani su obučavajući parovi za trening veštačkih neuronskih mreža.

Veštačke neuronske mreže su trenirane kako bi se na osnovu pitanja u tabeli 2 izvršila klasifikacija da li će doći do povrede rukovalaca rudarskih mašina. Za obučavanje veštačkih neuronskih mreža korišćeno je 70% ukupnih podataka, 15% iskorišćeno je za validaciju, a preostalih 15% koristilo se za testiranje. Sama arhitektura veštačke neuronske mreže sadržala je 1 skriveni sloj u kome se nalazilo 10 neurona i ona je prikazana na slici 5. Aktivacione funkcije korišćene u okviru veštačke neuronske mreže su tansig i logsig.



Slika 5. Arhitektura veštačke neuronske mreže

Na slici 6 date su performanse obučene mreže, dok su na slici 7 prikazane matrice odlučivanja.



Slika 6. Performanse veštačke neuronske mreže



Slika 7. Matrice odlučivanja

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Prethodna istraživanja pokazala su da ljudski faktor, kao i ergonomski uslovi u kojima se rukovalac rudarskom mašinom nalazi, značajno utiču na rizike pojave nezgoda na radu. Takođe, ukazala su na potrebu dalje integracije veštačke inteligencije, mašinskog učenja, internet stvari i automatizacije u rudarskoj industriji.

Evidentno, veštačka inteligencija može biti korišćena kako bi se uspešno mogle predvideti potencijalne nezgode. U ovom istraživanju učestvovao je 61 rukovalac 6 različitih vrsta rudarskih mašina. Deskriptivna statistika pokazala je da je prosečan rukovalac starosti 35,3115 godina, a sa histograma njihove starosti može se zaključiti da je raspodela približna Gausovoj. Prosečna visina rukovalaca u ovom istraživanju je 179,1148 cm, težina 90,4754 kg, a radni staž 11,1967 godina. Može se primetiti da visina rukovalaca dosta varira, dok se njihova težina u najvećem broju slučajeva kreće ispod 100 kg. Takođe, većina rukovalaca nema veliko radno iskustvo.

Primena veštačkih neuronskih mreža je pokazala značajne rezultate pri klasifikaciji povreda. Greška na skupu za validaciju iznosi manje od 10^{-2} , odnosno 0,0014669 i to je postignuto u osmoj, od ukupno četrnaest epoha obučavanja. Tačnost treninga mreže je 97,7%, dok je tačnost testa i validacije 100%. Ukupna tačnost obučavanja iznosi 98,4%.

Pravci daljih istraživanja se mogu ogledati u primeni složenijih modela veštačkih neuronskih mreža, kao što su duboke neuronske mreže ili konvolucione mreže, što bi moglo poboljšati predikciju povreda i dodatno unaprediti sigurnost radnika.

5. LITERATURA

- [1] Tibane M., Niemand L.: *Investigation into Challenges Faced by Employees in Implementing a Safety Strategy in a South African Platinum Mine*, International Journal of Research in Business Studies and Management, Vol 4, No 2, 2017, pp. 1–15.
- [2] Yedla A., Kakhki F. D., Jannesari A.: *Predictive Modeling for Occupational Safety Outcomes and Days Away from Work Analysis in Mining Operations*, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol 17, No 19, 2020, pp. 7054.
- [3] Kasap Y., Subaşı E.: *Risk Assessment of Occupational Groups Working in Open Pit Mining: Analytic Hierarchy Process*, Journal of Sustainable Mining, Vol 16, No 2, 2017, pp. 38–46.
- [4] Misita M., Brkić A., Mihajlović I., Đurić G., Stanojević N., Bugarić U., Spasojević Brkić V.: *Decision Support System for Mining Machinery Risk Mitigation Driven by Ergonomics and Contextual Theory*, Applied Sciences, Vol 14, No 15, 2024, pp. 6413.
- [5] Chen D., Zhu M., Qiao Y., Wang J., Zhang X.: *An Ergonomic Design Method of Manned Cabin Driven by Human Operation Performance*, Advanced Design Research, Vol 1, No 1, 2023, pp. 12–20.
- [6] Sakinala V., Paul P. S., Fissaha Y.: *Promoting Safety of Underground Machinery Operators through Participatory Ergonomics and Fuzzy Model Analysis to Foster Sustainable Mining Practices*, Scientific Reports, Vol 14, No 1, 2024, pp. 16319.
- [7] Ghaneh S., Shahrnavard Y., Karami M., Karami Z.: *The Impact of Ergonomic Interventions on the Whole Body Vibration of Mining Machinery Drivers in Sarcheshmeh Copper Complex*, International Journal of Occupational Hygiene, Vol 10, No 2, 2018, pp. 101–107.
- [8] Asay G. R. B., Roy K., Lang J. E., Payne R. L., Howard D. H.: *Absenteeism and Employer Costs Associated With Chronic Diseases and Health Risk Factors in the US Workforce*, Preventing Chronic Disease, Vol 13, 2016, pp. E141.
- [9] Asare B. Y.-A., Makate M., Powell D., Kwasnicka D., Robinson S.: *Cost of Health-Related Work Productivity Loss among Fly-In Fly-Out Mining Workers in Australia*, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol 19, No 16, 2022, pp. 10056.
- [10] Donoghue A. M.: *Occupational Health Hazards in Mining: An Overview*, Occupational Medicine, Vol 54, No 5, 2004, pp. 283–289.
- [11] Ruff T., Coleman P., Martini L.: *Machine-Related Injuries in the US Mining Industry and Priorities for Safety Research*, International Journal of Injury Control and Safety Promotion, Vol 18, No 1, 2011, pp. 11–20.
- [12] Papić L., Kovacevic S.: *Human Factor in Mining Machines Maintenance Operations*, Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO), 2016.
- [13] Stemm E.: *Analysis of Injuries in the Ghanaian Mining Industry and Priority Areas for Research*, Safety and Health at Work, Vol 10, No 2, 2019, pp. 151–165.
- [14] Chinniah, Y.: *Analysis and Prevention of Serious and Fatal Accidents Related to Moving Parts of Machinery*, Safety Science, Vol 75, 2015, pp. 163–173.
- [15] Singh G., Singh S. K., Chaurasia R. C., Jain A. K.: *THE PRESENT AND FUTURE PROSPECT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MINING INDUSTRY*, Machine Learning, Vol 53, No 4, 2024, pp. 58–66.
- [16] Guo Y., Yang F.: *Mining Safety Research in China: Understanding Safety Research Trends and Future Demands for Sustainable Mining Industry*, Resources Policy, Vol 83, 2023, pp. 103632.
- [17] Zhang H., Li B., Karimi M., Saydam S., Hassan M.: *Recent Advancements in IoT Implementation for Environmental, Safety, and Production Monitoring in Underground Mines*. IEEE Internet of Things Journal, Vol 10, No 16, 2023, pp. 14507–14526.
- [18] Papić N., Misita M., Spasojević Brkić V., Perišić M., Janev N.: *Dumper Operator's Workplace Risks: Preliminary Study*. AHFE International, Nice, France, 2024.
- [19] Spasojević Brkić, V., Misita M., Perišić M., Brkić A., Veljković Z.: *Validating Measurement Structure of Checklist for Evaluating Ergonomics Risks in Heavy Mobile Machinery Cabs*, Mathematics, Vol 11, No 1, 2023, pp. 23.

Spasojević Brkić, V., Perišić, M., Papić, N., Janev, N., Čosović, E.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ANALYSIS OF SAFETY AND ERGONOMIC ASPECTS OF CABS OF MINING MACHINES

Abstract: Previous research has indicated the importance of the impact of ergonomic and behavioral factors on the safety and health at work of operators of mining machines. In this research, the safety aspects of work are analyzed using data on the physical characteristics of the operator and ergonomic working conditions in the mining machinery, more specifically in the cabins of six different types of mining machines (bulldozer, excavator, dumper, combine harvester, drill and loader). The analysis was conducted on data collected by surveying 61 mining machine operators on ergonomic factors that affect the possibility of injury at work. Using artificial neural networks, the occurrence of injuries was predicted. The results show a high degree of accuracy of the model, which suggests the possibility of improving safety and health at work through ergonomic interventions and gives a recommendation for the further application of artificial intelligence in the mining industry.

Key words: safety, mining machine, artificial intelligence, neural network, ergonomics



Trajković, A., Turudija, R., Arandelović, J., Stojković, M., Vitković, N.¹⁾

OPTIMIZACIJA PROCESA STRUGANJA PRIMENOM METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA: PIV I RAM METODE²⁾

Rezime

U mašinskim radionicama ključno je postići visoku produktivnost uz optimalnu hrapavost površine i nisku potrošnju energije. Različiti parametri rezanja različito utiču na ove faktore, što otežava izbor optimalne kombinacije. Ovaj rad koristi metode višekriterijumskog odlučivanja (MCDM) za izbor najboljih parametara rezanja u struganju, uz kriterijume minimalne potrošnje energije (MPE), minimalne hrapavosti površine (MHP) i maksimalne produktivnosti (MP). Metoda vrednosti indeksa preferencije (PIV) i metoda procene korena (RAM) su korišćene za identifikaciju najbolje alternative. Inspiracija za rad bio je proizvod iz industrije, sa zahtevom za normalnu tačnost i kvalitet površine N7.

Ključne reči: MCDM metode, PIV, RAM, struganje, AISI 1045 čelik.

1. UVOD

Tokom programiranja operacija struganja za računarski upravljane mašine i alatke, moguće je promeniti razne parametre rezanja s ciljem dobijanja delova koji zadovoljavaju nominalne mere i tolerancije prikazane na tehničkim crtežima. Pored toga, važno je da struganje bude što produktivnije. Cilj svih inženjera je postizanje željenih rezultata u najkraćem mogućem roku. Međutim, s rastućom ekološkom svešću, procesi obrade moraju biti energetski efikasni kako bi se smanjilo zagađenje okoline i potrošnja energije. Konstantna težnja da se produktivnost proizvodnje podigne na što viši nivo, neminovno vodi povećanju potrošnje energije, s tim u vezi, neophodno je naći optimalno rešenje koje daje željenu proizvodnost sa što manjom potrošnjom energije. Zahtevi za postizanjem odgovarajuće hrapavosti površine dodatno komplikuju proces odlučivanja o izboru parametara rezanja. Stoga je primarna motivacija ovog istraživanja olakšavanje izbora parametara rezanja, uzimajući u obzir ključne aspekte kao što su maksimizacija produktivnosti (MP), minimizacija potrošnje energije (MPE) i minimizacija hrapavosti površine (MHP). Primena metoda višekriterijumskog odlučivanja je obimno dokumentovana u različitim industrijskim sektorima, uključujući proizvodnju [1], logistiku [2] i finansije [3], gde se ove metode koriste za optimizaciju i poboljšanje efikasnosti procesa. Postoji dosta metoda višekriterijumskog odlučivanja, a kako su se one razvijale, tako su naučnici počeli da ih kombinuju, gradeći bazu hibridnih metoda koje koriste najbolje karakteristike individualnih metoda [4], [5].

Pregled postojeće literature otkriva nekoliko ključnih zapažanja. Istraživači su u poslednjim godinama pokazali izuzetnu sklonost prema hibridnim MCDM pristupima, nastojeći da kombinuju različite metode kako bi rešili složene probleme donošenja odluka [6]. Hibridni pristupi nude dragocene uvide u pitanja vezana za evaluaciju kriterijuma i upravljanje težinama, čime obogaćuju proces donošenja odluka. Pojava hibridnih MCDM pristupa predstavlja značajan korak napred u oblasti donošenja odluka, spreman da otključa mnoštvo mogućnosti i praktičnih primena u stvarnim scenarijima [7]. U nastavku, ovaj rad će se baviti izborom najoptimalnijeg režima struganja, hibridnom analizom, uz pomoć dva metoda višekriterijumskog odlučivanja (PIV i RAM), uzimajući u obzir različite težine dodeljene svakom kriterijumu, na osnovu njihove relativne važnosti metodom direktnog određivanja težina.

¹⁾ Aleksandar Trajković, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (aleksandar.trajkovic@masfak.ni.ac.rs), Rajko Turudija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (rajko.turudija@masfak.ni.ac.rs), Jovan Arandelović, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (jovan.arandelovic@masfak.ni.ac.rs), prof. dr Miloš Stojković, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (milos.stojkovic@masfak.ni.ac.rs), prof. dr Nikola Vitković, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, (nikola.vitkovic@masfak.ni.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koji su finansijski podržani od strane Ministarstva Nauke, Tehnološkog Razvoja i Inovacija Republike Srbije (Grant 451-451-03-66/2024-03).

2. METODE

U diskretnom okruženju, više-kriterijumsko odlučivanje (MCDM) odnosi se na ocenjivanje ili rangiranje konačnog skupa alternativa u odnosu na sukobljene i međusobno teško uporedive (različite jedinice) kriterijume. Zbog rastuće složenosti okruženja za donošenje odluka, nemoguće je da bilo koja opcija zadovolji sve sukobljene kriterijume. Kao rezultat toga, MCDM metode predstavljaju neizostavan alat u rešavanju stvarnih problema gde je neophodno razmotriti kompromisna rešenja. Pristup višekriterijumskog odlučivanja privlači sve veću pažnju u različitim oblastima ljudskih aktivnosti, a njegov razvoj se ubrzano nastavlja formiranjem novih metoda ili kombinovanjem postojećih metoda u okviru hibridnih metoda. Identifikacija najbolje alternative među dostupnim opcijama predstavlja složen zadatak koji zavisi od prioriteta korisnika, koji se mora oceniti na skali rangiranja uz pažljivo razmatranje svih uticajnih karakteristika pojedinačnih alternativa. Dostupno je mnogo tehnika višekriterijumskog odlučivanja koje pomažu donosiocu odluke da dođe do najbolje alternative rangirajući ih po redosledu važnosti.

Cilj ove studije je odabrati optimalne kombinacije parametara struganja koje omogućuju postizanje maksimalno moguće produktivnosti (MP), pri čemu, se troši najmanje energije (MPE) i postiže najmanja vrednost hrapavosti površine (MHP).

2.1 PIV

Metoda vrednosti indeksa preferencije (PIV) [8], primenjena je u našoj studiji za rangiranje alternativa za operacije struganja. Ova metoda uzima u obzir blizinu alternativa najboljem mogućem ili idealnom rešenju koristeći indeks blizine, koji izračunava linearnu razliku između normalizovanih vrednosti svake alternative i one najbolje dostupne alternative. Ove vrednosti indeksa blizine se zatim otežavaju dodeljenim težinama, i linearno sakupljaju kroz sve kriterijume kako bi se dobila ukupna vrednost indeksa blizine za svaku alternativu, određujući ukupnu otežanu, normalizovanu udaljenost od najbolje opcije. Za razliku od drugih MCDM metoda, koje uzimaju u obzir i pozitivna i negativna idealna rešenja, PIV metoda se fokusira na apsolutno rasipanje, uzimajući u obzir samo pozitivno idealno rešenje (PIS). Ova pojednostavljenja su efikasna jer, u većini slučajeva, opseg svakog kriterijuma je isti za sve alternative, a odstupanja od jednog ekstrema neposredno reflektuju suprotnu vrednost sa drugog. Tako PIV metoda pruža direktniji i efikasniji način za ocenu rasipanja alternativa oko najboljeg rešenja. PIV metoda nudi jednostavan i pouzdan mehanizam za rangiranje alternativa, koristeći blizinu idealnom rešenju kako bi se osiguralo da se najpovoljnija alternativa identifikuje na robustan način.

2.2 RAM

Metoda procene korena (RAM) [9], primenjena je u našoj studiji za rangiranje alternativa za operacije struganja. RAM ima za cilj da izvede vrednost korisnosti svake opcije sakupljanjem njenih rezultata preko više kriterijuma odlučivanja. Ukupno rangiranje se zatim postiže na osnovu ovih vrednosti korisnosti. Da bi se to postiglo, RAM koristi jednostavnu funkciju sakupljanja koja je direktno proporcionalna efektu koji generišu svi korisni kriterijumi (kao što su maksimalno povećanje produktivnosti ili postizanje najmanje vrednost hrapavosti površine) i obrnuto proporcionalna efektu koji generišu svi nekorisni kriterijumi (kao što su potrošnja energije ili troškovi).

U RAM metodi, alternative se prvo strukturiraju u matricu odlučivanja, gde redovi predstavljaju alternative, a kolone predstavljaju kriterijume. Vrednosti performansi za svaku alternativu se normalizuju, čime se osigurava uporedivost između različitih skala kriterijuma. RAM koristi funkciju sakupljanja koja kombinuje kompenzatorne i delimično kompenzatorne karakteristike na dosledan i informativan način, omogućavajući uravnoteženu zamenu između kriterijuma. Ova funkcija efikasno hvata suštinu odlučivanja tako što kompenzuje niže rezultate u nekim kriterijumima višim rezultatima u drugim, dok i dalje prepoznaje nekompenzatornu prirodu određenih ključnih faktora.

Nakon normalizacije, najbolja moguća vrednost za svaki kriterijum se određuje i koristi kao referenca za evaluaciju. Metoda primenjuje težine kako bi reflektovala važnost svakog kriterijuma, osiguravajući da najkritičniji faktori imaju jači uticaj na konačno rangiranje. Performanse svake alternative se ocenjuju maksimizacijom njene vrednosti korisnosti, koja se izračunava sakupljanjem normalizovanih vrednosti prema RAM funkciji. Kompenzatorna priroda RAM metode omogućava joj da na robustan i fleksibilan način obradi i korisne i nekorisne kriterijume, nudeći efikasan način za rangiranje alternativa. RAM metoda pruža pouzdan pristup za donosiocu odluka generisanjem vrednosti korisnosti koje odražavaju ukupnu poželjnost svake alternative.

3. PRIKAZ STUDIJE SLUČAJA

U ovom istraživanju cilj je bio odrediti optimalnu kombinaciju parametara rezanja za struganje čelika AISI 1045, uzimajući u obzir kriterijume maksimalne produktivnosti, minimalne potrošnje energije i minimalne hrapavosti površine, koristeći hibridni MCDM pristup sa PIV i RAM metodama. Podaci korišćeni za ovu studiju potiču iz dva prethodna istraživačka rada, [10], [11]. U prvom istraživanju [11], fokus je bio na optimizaciji ulaznih parametara kako bi se postigla minimalna potrošnja energije uz održavanje ciljanog nivoa produktivnosti. Iz ovog istraživanja su izvučeni podaci vezani za MP i MPE. Drugo istraživanje [10] specifično je istraživalo uticaj parametara rezanja na hrapavost površine. Iz ovog istraživanja su dobijeni podaci o MHP. Oba istraživanja koristila su isti set ulaznih parametara:

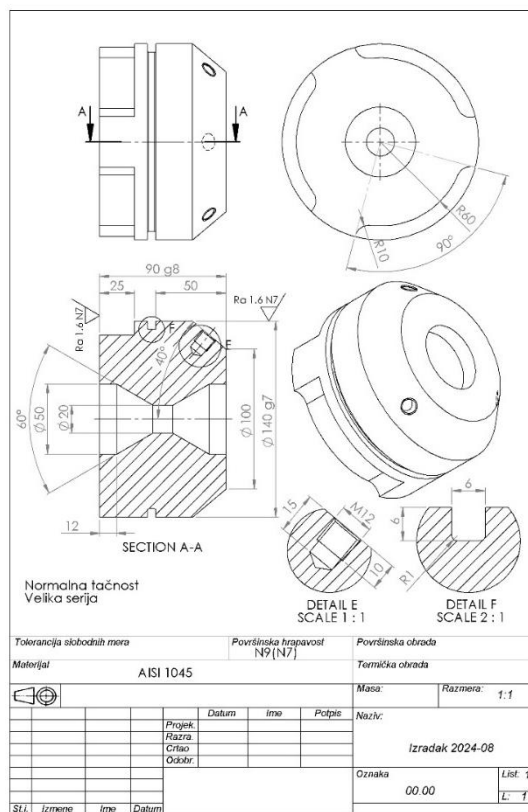
- dubina rezanja (a_p) vrednosti {1, 1.75, 2.5} mm,
- brzina pomaka (f_n) vrednosti {0.1, 0.2, 0.3} mm/o,
- brzina rezanja (V_c) vrednosti {240, 270, 300} m/min.

Eksperimenti su sprovedeni na strugu Gildemeister NEF 520 koji poseduje motor od 12 kW, maksimalnom brzinom vretena od 3000 rev/min i kontrolnim jedinicama Heidenhain Manual Plus 4110. Korišćen alat bio je Sandvik Coromant DCLNL 2020K 12 držač alata sa ZCC-CT CNMG120408-PM insertom. U oba istraživanja korišćen je pun faktorski plan eksperimenata kako bi se istražili efekti različitih kombinacija parametara rezanja. Ovaj pristup omogućio je sveobuhvatnu analizu procesa struganja. Ukupno je dobijeno 27 jedinstvenih kombinacija, svaka predstavljajući različite vrednosti MP, MPE i MHP (Tabela 1). Sve predstavljene kombinacije su u okviru višekriterijumskog odlučivanja razmatrane kao alternative.

#	a_p [mm]	V_c [m/min]	f_n [mm/o]	#	a_p [mm]	V_c [m/min]	f_n [mm/o]
1	1	0.1	240	15	1.75	0.2	300
2	1	0.1	270	16	1.75	0.3	240
3	1	0.1	300	17	1.75	0.3	270
4	1	0.2	240	18	1.75	0.3	300
5	1	0.2	270	19	2.5	0.1	240
6	1	0.2	300	20	2.5	0.1	270
7	1	0.3	240	21	2.5	0.1	300
8	1	0.3	270	22	2.5	0.2	240
9	1	0.3	300	23	2.5	0.2	270
10	1.75	0.1	240	24	2.5	0.2	300
11	1.75	0.1	270	25	2.5	0.3	240
12	1.75	0.1	300	26	2.5	0.3	270
13	1.75	0.2	240	27	2.5	0.3	300
14	1.75	0.2	270				

Primenjene metode višekriterijumskog odlučivanja zahtevaju unapred određene težinske koeficijente, sama priroda određivanja težinskih koeficijenata koji će se koristiti prilikom odlučivanja unosi subjektivnost u samo odlučivanje. Obzirom da je inspiracija za rad došla direktno iz privrede, gde je bilo potrebno rešiti problem izbora parametara obrade za predmet prikazan na Slici 1., koji se radi u normalnoj tačnosti u visokoserijskoj proizvodnji. Kao takav, vrednost težinskih koeficijenata je bila određena od strane inženjera iz privrede, kome je najvažnije bila površinska hrapavost, pa produktivnost (zbog masovne proizvodnje), a kao najmanje važna je bila energija koja je utrošena za proizvodnju, tako da su težinski koeficijenti imali sledeće vrednosti:

- w_1 (težinski koeficijent za MPH) = 0.5
- w_2 (težinski koeficijent za MP) = 0.3
- w_3 (težinski koeficijent za MPE) = 0.2



Slika 1. Izradak korišćen za određivanje optimalnih parametara obrade

Na osnovu težinskih koeficijenata i definisanih alternativa, dodavanjem kriterijuma i njihovih vrednosti za svaku od alternativa, može se formirati matrica odlučivanja koja je prikazana u Tabeli 2.

Tabela 2. Matrica odlučivanja						
Alternative	ap (mm)	fn (mm/o)	Vc (mm/min)	MPE (Wh/s)	MPH (μm)	MP (mm^3/min)
1	1	0.1	240	1.37	3.628	393.1
2	1	0.1	270	1.49	2.207	442.24
3	1	0.1	300	1.64	2.37	491.38
4	1	0.2	240	1.55	1.522	786.21
5	1	0.2	270	1.72	1.466	884.48
6	1	0.2	300	1.91	1.3983	982.76
7	1	0.3	240	1.8	2.789	1179.31
8	1	0.3	270	2.02	2.767	1326.72
9	1	0.3	300	2.23	2.775	1474.14
10	1.7	0.1	240	1.51	3.666	649.97
11	1.7	0.1	270	1.64	0.9787	731.22
12	1.7	0.1	300	1.74	1.66	812.47
13	1.7	0.2	240	1.71	1.491	1299.95
14	1.7	0.2	270	1.91	1.475	1462.44
15	1.7	0.2	300	2.12	1.468	1624.93
16	1.7	0.3	240	2.05	2.697	1949.92
17	1.7	0.3	270	2.3	2.6927	2193.66
18	1.7	0.3	300	2.56	2.6843	2437.4
19	2.5	0.1	240	1.81	0.978	955.36
20	2.5	0.1	270	1.98	0.969	1074.78
21	2.5	0.1	300	2.13	2.623	1194.2
22	2.5	0.2	240	2.28	1.3133	1910.71
23	2.5	0.2	270	2.52	1.308	2149.55
24	2.5	0.2	300	2.78	1.2283	2388.39
25	2.5	0.3	240	2.78	2.368	2866.07
26	2.5	0.3	270	3.07	2.36	3224.33
27	2.5	0.3	300	3.47	2.332	3582.59

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu prikazane matrice odlučivanja i dodeljenih težinskih koeficijenata, primenom MCDM metoda RAM i PIV, dobijena su rangiranja alternativa prikazana u Tabeli 3.

Rank	Alternative – RAM	Alternative – PIV
1	27	24
2	24	23
3	23	22
4	26	20
5	22	19
6	25	11
7	15	15
8	20	14
9	14	13
10	19	27
11	13	6
12	11	5
13	18	26
14	6	4
15	17	25
16	5	12
17	16	18
18	4	17
19	12	16
20	9	2
21	8	3
22	21	21
23	7	8
24	2	9
25	3	7
26	10	10
27	1	1

U okviru Tabele 3. prikazana su rangiranja alternativa dobijena metodima RAM i PIV, najbolje rangirana alternativa prema RAM metodi je alternativa 27, dok su druga i treće najbolje rangirane alternative, redom, alternative 24 i 23. Alternativa rangirana kao najnepogodnija prema RAM metodi je alternativa 1, dok su kao druga i treće rangirana najnepogodnija alternativa, redom, alternative 10 i 3.

Na osnovu PIV metode, najbolje rangirana alternativa je alternativa 24, dok su drugo i treće najbolje rangirane alternative, redom, alternative 23 i 22. Alternativa rangirana kao najnepogodnija prema PIV metodi je alternativa 1, dok su drugo i treće rangirana najnepogodnija alternativa, redom, alternative 10 i 7.

Na osnovu Tabele 3. može se zaključiti da su oba metoda dala adekvatne rezultate, oba metoda su saglasna sa rangiranjem najnepogodnijih alternativa, pri čemu su najnepogodnije alternative prema oba metoda, alternative 1 i 10. Razlika se javlja prilikom rangiranja treće najnepogodnije alternative kod oba metoda, međutim, razlika u rangiranju nije velika. Metoda RAM je alternativu 3 rangirala kao treću najnepogodniju alternativu, dok je metoda PIV alternativu 3 rangirala kao sedmu, po redu najnepogodniju alternativu, posmatrano sa dna tabele. Metoda PIV je kao treće rangiranu alternativu rangirala alternativu 7, dok je metoda RAM, alternativu 7, rangirala kao petu najnepogodniju alternativu. Slične razlike u rangiranju alternativa mogu se primetiti i u okviru najbolje rangiranih alternativa, pri čemu se tu javio jedan specifičan slučaj.

Metoda RAM je alternativu 27 rangirala kao najbolju analiziranu alternativu, dok je metoda PIV alternativu 27 rangirala kao desetu najbolju alternativu. U okviru najbolje rangiranih alternativa, nema više značajnih razlika u rangiranju alternativa, metoda RAM je rangirala alternative 24 i 23, redom, kao drugo i treću najbolju

alternativu, dok je, metoda PIV, alternative 24 i 23, redom, rangirala kao prvu i drugu najbolju alternativu. Metoda RAM je alternativu 22 rangirala kao petu najbolju alternativu, dok je metoda PIV alternativu 22 rangirala kao treću najbolju alternativu.

Na osnovu prikazanog rangiranja alternativa, može se zaključiti da je najbolje rangirana alternativa alternativa 24 jer je metodom RAM rangirana kao druga, a metodom PIV kao najbolja moguća alternativa, alternativa 27, ne može se smatrati najboljom alternativom zato što je metodom PIV rangirana kao sedma najbolja alternativa. Oba metoda su saglasni po pitanju najgore alternative, najgore rangirana alternativa je alternativa broj 1. Rangiranje nam omogućava da izdvojimo najbolji režim za obradu struganjem u datom primeru, za postizanje željenih rezultata, neophodno je da dubina rezanja (ap) bude 2.5mm, korak (fn) 0.3mm/o i brzina rezanja (Vc) 300mm/min.

5. ZAKLJUČAK

Analizom rangiranja alternativa dobijenog metodama RAM i PIV u Tabeli 3, može se zaključiti da obe metode nude korisne uvide u evaluaciju alternativa, s posebnim naglaskom na prepoznavanje najnepovoljnijih opcija. Metode su pokazale značajnu saglasnost u identifikaciji najlošijih alternativa, konkretno alternativa 1 i 10, koje su dosledno rangirane kao najnepovoljnije u oba pristupa. Ova saglasnost ukazuje na robusnost metoda u prepoznavanju nepoželjnih rešenja, što može biti od velike važnosti u odlučivanju u kontekstu više-kriterijumskih analiza.

Međutim, u analizi najboljih alternativa, pojavljuju se značajnije razlike između metoda. Dok metoda RAM rangira alternativu 27 kao najbolju, metoda PIV je postavlja na deseto mesto, što ukazuje na različite pristupe u oceni i prioritizaciji opcija. Slične, manje značajne razlike u rangiranju su uočene i kod alternativa 24 i 23, što sugerise da metodološki pristup može značajno uticati na rangiranje, posebno u kontekstu srednje rangiranih alternativa.

Ove razlike ukazuju na to da izbor metode može imati značajan uticaj na krajnji poredak alternativa, što je ključno za donošenje odluka u više-kriterijumskim analizama. Preporuka je da se pri donošenju odluka razmotri korišćenje više metoda za obezbeđivanje sveobuhvatnijeg i pouzdanijeg uvida u rangiranje alternativa. Dodatna analiza i upotreba drugih metoda za validaciju rangiranja mogu doprineti boljoj razumljivosti i pouzdanosti donetih odluka, čime se može povećati efikasnost i efektivnost odlučivanja u kompleksnim situacijama.

6. LITERATURA

- [1] T. Van Dua, D. Van Duc, N. C. Bao, and D. D. Trung, "Integration of objective weighting methods for criteria and MCDM methods: application in material selection," *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 2, pp. 131–148, Mar. 2024, doi: 10.21303/2461-4262.2024.003171.
- [2] S. K. Sahoo, S. S. Goswami, and R. Halder, "Supplier Selection in the Age of Industry 4.0: A Review on MCDM Applications and Trends," *Decision Making Advances*, vol. 2, no. 1, pp. 32–47, Jan. 2024, doi: 10.31181/dma21202420.
- [3] A. T. Alsanousi, A. Y. Alqahtani, A. A. Makki, and M. A. Baghdadi, "A Hybrid MCDM Approach Using the BWM and the TOPSIS for a Financial Performance-Based Evaluation of Saudi Stocks," *Information*, vol. 15, no. 5, 2024, doi: 10.3390/info15050258.
- [4] D. Trung, "Application of TOPSIS and PIV methods for Multi - Criteria Decision Making in hard turning process," *Journal of Machine Engineering*, vol. 21, Sep. 2021, doi: 10.36897/jme/142599.
- [5] D. Trung and H. Thinh, "A multi-criteria decision-making in turning process using the MAIRCA, EAMR, MARCOS and TOPSIS methods: A comparative study," *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 16, pp. 443–456, Dec. 2021, doi: 10.14743/apem2021.4.412.
- [6] E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and S. Kildienė, "State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods," *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 20, no. 1, pp. 165–179, Jan. 2014, doi: 10.3846/20294913.2014.892037.
- [7] T. Van Dua, D. Van Duc, N. C. Bao, and D. D. Trung, "Integration of objective weighting methods for criteria and MCDM methods: application in material selection," *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 2, pp. 131–148, Mar. 2024, doi: 10.21303/2461-4262.2024.003171.
- [8] S. Mufazzal and S. M. Muzakkir, "A new multi-criterion decision making (MCDM) method based on proximity indexed value for minimizing rank reversals," *Comput Ind Eng*, vol. 119, pp. 427–438, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.045>.
- [9] A. Sotoudeh-Anvari, "Root Assessment Method (RAM): A novel multi-criteria decision making method and its applications in sustainability challenges," *J Clean Prod*, vol. 423, p. 138695, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138695>.

- [10] R. Turudija, P. Janković, M. Stojković, M. Madić, and M. Ivanović, "Investigation of the Cutting Parameters Influence on Surface Roughness in Turning AISI 1045 Steel," *INNOVATIVE MECHANICAL ENGINEERING*, vol. 1, no. 2, pp. 22–33, 2022.
- [11] M. Stojković, M. Trifunović, M. Madić, R. Turudija, and M. Manić, "Partial effect of cutting parameters on engaged power and energy consumption: The case of external turning of an AISI1045 steel workpiece," vol. 2, pp. 34–47, Nov. 2022.

Trajković, A., Turudija, R., Arandjelović, J., Stojković, M., Vitković, N.

OPTIMIZATION OF THE TURNING PROCESS USING MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING METHODS: PIV AND RAM METHODS

Abstract: *In machine workshops, achieving high productivity with optimal surface roughness and low energy consumption is crucial. Different cutting parameters affect these factors, complicating the selection of the optimal combination. This study applies multi-criteria decision-making (MCDM) methods to select the best cutting parameters in turning processes, considering given criteria. The parameters used in the research are cutting speed (V_c), depth of cut (a_p), and feed rate (f_n), while the criteria are minimal energy consumption (MEC), minimal surface roughness (MSR), and maximum productivity (MP). MCDM methods proximity indexed value (PIV) and root assessment method (RAM) were used to identify the best alternative. The study was inspired by an industrial product requiring large-series production with normal accuracy, where the desired surface quality was N7.*

Key words: *MCDM methods, PIV, RAM, turning, AISI 1045 steel.*

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



31. simpozijum

CAD/CAM

Beograd, oktobar 2024.

CAD/CAM

Sesija 1

Movrin, D., Pjević, M., Popović, M., Milutinović, M. ADITIVNE TEHNOLOGIJE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA	2.1
Erić Obućina, J., Karić, M., Djordjević, V. PRIMENA STANDARDA ZA RAZMENU GRAFIČKIH INFORMACIJA U 3D MODELIRANJU HIDRAULIČKOG SERVOUPRAVLJAČA	2.7
Jovičić, A., Ikodinovic, M., Baralić, J., Mitrović, A., Nikitović, A. PRIMENA CAD/CAE/CAM SISTEMA PRI LIVENJU ODLIVAKA U PESKU.....	2.13
Jotić, M., Popović, M., Pjević, M., Bojović, B. PRIKAZ ADITIVNE TEHNOLOGIJE EKSTRUDIRANJEM MATERIJALA ZA IZRADU DELOVA OD KOMPOZITA	2.19
Krezovic, N., Bojović, B., Pjević, M., Popović, M. PROJEKTOVANJE I IZRADA OKVIRA BESPILOTNE LETELICE PRIMENOM GENERATIVNOG DIZAJNA I ADITIVNIH TEHNOLOGIJA	2.25



CAD/CAM

Sesija 2

Lazarević, N., Andelić, K., Lazić, A., Popović M., Pjević, M., Milovanović, A. UTICAJ PROMENE PARAMETARA NA MEHANIČKA SVOJSTVA PROIZVODA DOBIJENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA	2.31
Majstorović, M., Bojović B., Mladenović G., Golubović Z. INTEGRACIJA ADITIVNE TEHNOLOGIJE I MEHANIČKE ANALIZE ZA EPRUVETU AUKSETIČKE STRUKTURE	2.38
Milutinović, M., Dačević, B., Stefanović, Lj, Panić, M., Movrin, D. UTICAJ MODELA TRENJA NA TAČNOST REZULTA NUMEČKIH SIMULACIJA U PROCESU KOMBINOVANOG ISTISKIVANJA	2.44
Pejčić, D., Mišković, Ž., Popović, M., Pjević, M., Mitrović, R., Magdolen L., Danko J. PROCENA RIZIKA ADITIVNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA PRIMENOM KINIJEVE METODE.....	2.52
Vorkapić, M., Ilić, S., Spasenović, M. , Vasić, M. PRIMENA 8R STRATEGIJE U REALIZACIJI NOSIVIH SENZORA	2.58





Movrin, D., Pjević, M., Popović, M., Milutinović, M. ¹⁾

ADITIVNE TEHNOLOGIJE KAO ALAT ZA UNAPREĐENJE PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA

Rezime

U današnjem industrijskom okruženju, zahtevi za poboljšanjem kvaliteta proizvoda, većom efikasnošću procesa i potrebom za malim serijama uz smanje troškova, postavljaju izazove proizvođačima plastičnih proizvoda. Aditivne tehnologije, nude rešenja koja omogućavaju bržu izradu prototipa, prilagođavanje dizajna, a u poslednjih nekoliko godina i direktnu izradu alata. U početku ove tehnologije su bile limitirane samo na mali broj pretežno polimernih materijala pravljenih posebno za svrhu izrade prototipova, međutim danas je spektar materijala značajno proširen i naročiti akcenat se stavlja na metalne materijale i temperaturno otporne polimere. U ovom radu biće analizirana mogućnost upotrebe aditivnih tehnologija za optimizaciju alata za injekciono presovanje na primerima upotrebe konformnih kanala za hlađenje kod metalnih alata, kao i fabrikaciju polimernih umetaka za izradu malih serija.

Ključne reči: Injekciono presovanje, aditivne tehnologije, konformni kanali, polimerni umeci.

1. UVOD

Injekciono presovanje plastike je jedan od najvažnijih i najčešće korišćenih procesa u proizvodnji plastičnih delova. Ovaj proces omogućava masovnu proizvodnju delova sa visokim nivoom preciznosti i složenosti, što ga čini idealnim za širok spektar industrijskih primena.

U protekle tri decenije, proces injekcionog presovanja beleži brz rast zahvaljujući razvoju automobilske i transportnog sektora, elektronike i kućnih aparata, medicine itd. S obzirom na kompleksnost procesa injekcionog presovanja potrebno je mnogo bolje razumevanje ponašanja materijala tokom osnovnih faza procesa, fizičkih fenomena koji se odvijaju, kao i njihove povezanosti sa svojstvima i performansama konačno oblikovanog dela. Jedan od glavnih ciljeva procesa injekcionog presovanja je unapređenje kvaliteta proizvedenih delova uz minimalne troškove [1].

Trenutna proizvodna industrija nije u stanju da obezbedi promenljivu potražnju u uslovim gde individualna i pojedinačna proizvodnja postaje sve veći prioritet. Ovo znači da je potrebno ponuditi proizvode ili usluge koji zadovoljavaju jedinstvene zahteve svakog pojedinačnog kupca, ali koji se ipak mogu proizvesti sa ekonomskom efikasnošću [2].

Tradicionalne proizvodne tehnike, kao što je i brizganje plastike, zahtevaju previše kapitalnih ulaganja kako bi pojedinačna proizvodnja bila ekonomična. Kao rešenje za prevazilaženje problema ekonomske isplativosti pri pojedinačnoj proizvodnji plastičnih delova, nametnula se upotreba aditivnih tehnologija [3].

Od 1986. godine, tehnologije aditivne proizvodnje su promenile proces razvoja novih proizvoda, posebno u fazi prototipa, omogućavajući dizajnerima da proizvode višestruke iteracije 3D CAD modela svojih proizvoda u brzom nizu bez potrebe za uslugama proizvodnih kompanija. Tehnologije prvenstveno nazvane Rapid Prototyping, radile su kao alat za rešavanje problema u razvoju novih proizvoda, omogućavajući dizajnerima da provere funkcionalnost svog proizvoda pre nego što se obavežu na ulaganje u alate potrebne za proizvodnju proizvoda u punom obimu. Shodno tome, neki autori tvrde da korišćenjem tehnika brze izrade prototipa, troškovi razvoja novih proizvoda mogu da se smanje do 70%, sa smanjenjem vremena do pojave na tržištu do 90% [3]. U današnje vreme, sa razvojem novih materijala i tehnologija, tehnologijama aditivne

¹⁾ Vanr. prof. dr Dejan Movrin, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (movrin@uns.ac.rs), Doc. dr. Miloš Pjević (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Vanr. prof. dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Prof. dr Mladomir Milutinović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (mladomil@uns.ac.rs).

proizvodnje moguće je proizvesti ne samo gotove proizvode (delove), već i alate za masovnu proizvodnju u konvencionalnim proizvodnim procesima kakav je i injekciono presovanje. Ovakav pristup ima za cilj smanjenje troškova proizvodnje i isplativost pri malim serijama, pa čak i pri pojedinačnoj proizvodnji. Način dobijanja alata upotrebom tehnologija aditivne proizvodnje naziva brza izrada alata ili *Rapid Tooling*.

S obzirom da se tehnologije aditivne proizvodnje odlikuju mogućnošću izrade složenih struktura uz manje ograničenja nego u slučaju konvencionalnih tehnologija izrade, njihova upotreba u poboljšanju procesa injekcionog presovanja je dodatno proširena. Naime, brzine hlađenja u procesu je ključ za poboljšanje efikasnosti proizvodnje i postizanje najboljih mehaničkih i dimenzionih karakteristika proizvedenih delova. Da bi se poboljšala efikasnost hlađenja i kvalitet hlađenja kalupa, autori su se bavili ispitivanjem konformnih kanala za hlađenje, tj. kanala složene geometrije koje je jedino moguće izraditi tehnologijama aditivne proizvodnje [4].

Kroz rad će biti prikazana najnovija dostignuća iz oblasti upotrebe tehnologija aditivne proizvodnje u procesima injekcionog presovanja i to sa dva aspekta: (i) upotreba tehnologija aditivne proizvodnje u izradi umetaka i (ii) izrada alata sa konformnim kanalima za poboljšanje odvođenja toplote u cilju optimizacije procesa i dobijanja tačnih delova.

2. PREGLED ADITVNIH TEHNOLOGIJA POGODNIH ZA BRZU IZRADU ALATA

Tehnologije aditivne proizvodnje su komercijalno prvi put primenjene 1987. godine od strane proizvođača 3D Systems. Kompanija je proizvela i komercijalizovala prvi stereolitografski uređaj u kome tečni polimer nanesen u tankom sloju očvršćava pomoću UV lasera. Nakon toga počeo je i razvoj ostalih postupaka; vezivna 3D štampa 1989. (MIT), deponovanje istopljenog filameta 1991. (Stratasys), laminacija folija 1991. (Helisys), selektivno lasersko sinterovanje 1992. (DTM), a nakon toga dolazi do razvoja i ostalih tehnologija [5].

Osim pomenutih tehnologija do danas je razvijen veliki broj postupaka koji se po određenim karakteristikama mogu svrstati u zajedničke grupe. Radi uvođenja sistematizacije, standardi ISO i ASTM su klasifikovali ove mnogobrojne procese u sedam osnovnih grupa prikazanih u tabeli 1.

Tabela 1. Sistematizacija tehnologija aditivne proizvodnje na osnovu ISO/ASTM standarda [6]			
Grupa	Način generisanja konture	Komercijalni naziv tehnologije	Skr.
Fotopolimerizacija u kadi	Laser, projektor, printerska glava	Stereolitografija	(SLA)
Fuzija praškastog supstrata	Laser, mlaz elektrona	Selektivno lasersko sinterovanje Selektivno lasersko topljenje Topljenje mlazom elektrona Direktno lasersko sinterovanje metala	(SLS) (SLM) (EBM) (DMLS)
Laminacija folija	Laser, nož	Proizvodnja laminiranih obj. Laminacija plastičnih folija	(LOM) (PSL)
Vezivna 3D štampa	Printerska glava	Vezivna 3D štampa	(3DP)
Ekstrudiranje materijala	Glava ekstrudera	Deponovanje istopljenog filameta	(FDM)
Direktna 3D štampa	Printerska glava i UV lampa	PolyJet, PolyJet Matrix	(PJ)
Nanošenje materijala primenom usmerene energije	Mlaz elektrona	3D lasersko oblaganje Direktno taloženje metala	(DED)

Paralelno sa razvojem tehnologija, razvijali su se i materijali koji se koriste u procesu, što je dalje dovelo do njihove upotrebe u industrijskoj proizvodnji. U početku ove tehnologije su bile limitirane samo na mali broj pretežno polimernih materijala pravljenih posebno za svrhu izrade prototipova, međutim danas je spektar materijala značajno proširen i naročiti akcenat se stavlja na metalne materijale i temperaturno otporne

polimere.

Za izradu delova alata za injekciono presovanje nisu sve tehnologije navedene u tabeli 1 podjednako pogodne. U zavisnosti od vrste elementa alata za injekciono presovanje kao, zahteva materijala i dostupnosti i cene tehnologije potrebno je izabrati najbolju tehnologiju za konkretan slučaj.

Postoji više procesa aditivne proizvodnje koji se mogu koristiti pri proizvodnji komponenti alata za injekciono presovanje. Svaki proces ima svoj jedinstveni skup prednosti i mana koje mogu uticati na finalni (odbrizgani) deo ili na eksploatacioni vek izrađenog dela alata. Deponovanje istopljenog filameta (FDM) je najpristupačnije oblik štampe, međutim delovi dobijeni ovom tehnologijom imaju nisku otpornost na temperature i pritiske, što znači kratak eksploatacioni vek pri korišćenju u procesu injekcionog presovanja. Sa druge strane delovi dobijeni stereolitografijom (SLA) i selektivnim laserskim sinterovanjem/topljenjem (SLS/SLM) mnogo bolje podnose visoke temperature i pritiske koji se javljaju u procesu. Za razliku od visoke hrapavosti površine delova dobijenim SLS/SLM tehnologijom i potrebom za njihovom daljom doradom, SLA tehnologija ima superiornu završnu hrapavost površine. SLA je takođe daleko pristupačniji cenovno.

Kroz uvid u poslednja istraživanja u cilju optimizacije procesa injekcionog presovanja, može se zaključiti da se istraživanja kreću u dva pravca. Prvi jeste izrada polimernih delova alata (umetaka) radi smanjenje troškova pri pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji [3, 7-10]. Drugi pravac predstavlja izradu metalnih delova alata sa optimizovanim kanalima za hlađenje, takozvanim konformnim kanalima [4, 11, 12]. Primena obe metode biće prikazana u nastavku rada.

3. BRZA IZRADA ALATA ZA BRIZGANJE PLASTIKE

3.1 Brza izrada umetaka alata za injekciono presovanje

Pri pojedinačnoj proizvodnji ili izradi male serije delova potrebna je visoka fleksibilnost procesa, što u konvencionalnom smislu injekciono presovanje ne poseduje. Svaka promena proizvodnog programa sa sobom nosi visoke troškove izrade novih delova alata i utrošak velikog broja radnih sati. Kako bi se postupak učinio što fleksibilnijim mogu se primeniti postupci aditivne proizvodnje za izradu delova alata. Najčešći se postupcima aditivne proizvodnje izrađuju umeci, tj. gravure alata za brizganje, ali se mogu izraditi i drugi elementi kao što su npr. izbacivačke ploče.

FDM tehnologija izrade, iako je najjednostavnija za korišćenje i najdostupnija, ne omogućava potrebne osobine umetaka pri korišćenju u bilo kakvoj serijskoj proizvodnji. Iako postoji veliki spektar materijala koji su danas u upotrebi u FDM tehnologiji, samo mali broj njih zadovoljava eksploatacione uslove injekcionog presovanja, a to su ABS, ABS-X, ASA, PEEK, ULTEM i neki najloni. Međutim, izrada delova od ovih materijala zahteva uređaje koji mogu da postignu visoke temperature mlaznice (preko 300°C), grejne ploče (preko 100°C), a neki čak i visoku temperaturu radne sredine od preko 170°C [13]. Na slici 1 prikazan je polimerni umetak izrađen FDM tehnologijom od materijala ABS-X (3D Republika), ugrađen u alat za brizganje standardne epruvete za zatezanje. Najveći problem pri izradi umetaka na ovaj način predstavljaju visoka hrapavost površine i ušće, u kome vladaju visoke temperature i pritisci. Ovakvi umeci ne mogu da izdrže više od 10 ciklusa brizganja bez pojave oštećenja, prvenstveno na ušću.



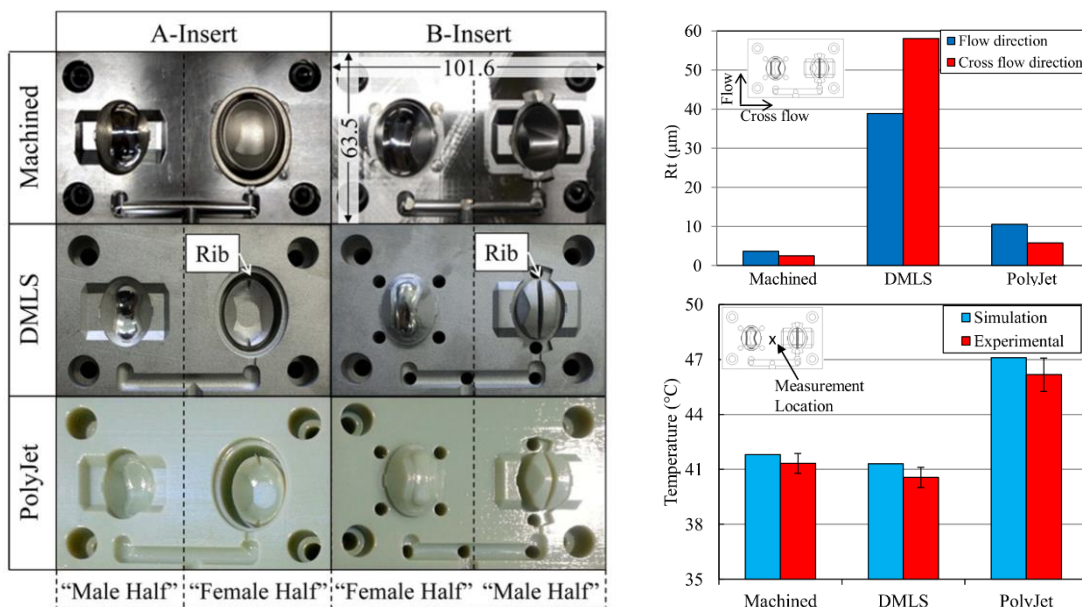
Slika 1. Umetak za brizganje epruvete izrađen od ABS-X filameta

Za razliku od delova dobijenih FDM tehnologijom SLA i MSLA tehnologije aditivne proizvodnje pružaju veće mogućnosti za izradu umetaka za injeksiono presovanje. Prva prednost takvih umetaka jeste visok finiš (niska hrapavost) površine umetka, što direktno utiče na kvalitet brizganog dela. Sledeća prednost se ogleda u primenjenim materijalima, jer se u poslednje vreme na tržištu pojavljuju materijali koji imaju otpornost na visoke temperature i pritiske. Tako na primer materijal za SLA tehnologiju proizvođača Form Labs (SAD) sa oznakom *High Temperature* ima otpornost na temperature do 238°C. Zbog te osobine i visokog modula elastičnosti i zatezne čvrstoće (2.8 GPa i 49 MPa), ovaj materijal je izuzetno pogodan za izradu polimernih umetaka. Međutim, potrebno je prilagoditi kako konstrukciju alata tako i parametre procesa injeksionog presovanja kako bi se dobio ispravan otpresak. Naime, usled elastičnosti polimera, koja je znatno izraženije nego kod metala, dolazi do deformisanja umetka i na podeonoj ravni može doći do curenja materijala (slika 2).



Slika 2. Umetak izrađen SLA tehnologijom a) i pojava curenja materijala na spoju alata [3]

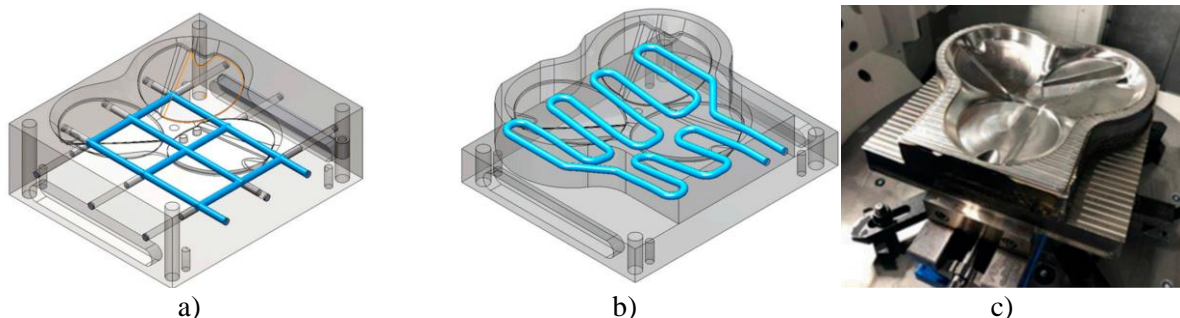
U radu [7] Mendible i dr. su istraživali razlike između konvencionalno proizvedenih metalnih umetaka i umetaka izrađeni DMLS (metalni) i Polyjet tehnologijom (polimerni). Na slici 3a prikazana su tri tipa ispitivanih umetaka kod kojih se može uočiti i visok stepen geometrijske složenosti. Sa dijagrama na slici 3b može se uočiti različito ponašanje umetaka u zavisnosti od načina izrade. Očekivano, najvišu hrapavost imaju delovi dobijeni DMLS tehnologijom zbog same prirode procesa (početni materijal je u vidu praha), dok umetak izrađen Polyjet tehnologijom pokazuje visok kvalitet završne površine, veoma blizak obradi rezanjem. Sa dijagrama 3b dole, uočava se prava problematika polimernih kalupa kroz problem odvođenja toplote. Bez obzira na kanale za hlađenje, plastični materijali imaju nizak koeficijent provođenja toplote i zbog toga se tokom procesa injeksionog presovanja sporije hlade, što može da dodatno utiče na pojavu oštećenja [7].



Slika 3. Umetci izrađeni rezanjem, DMLS i Polyjet tehnologijom a) i prikaz njihove hrapavosti i temperatura tokom procesa injeksionog presovanja [7]

3.2 Izrada konformnih kanala za hlađenje pomoću tehnologija aditivne proizvodnje

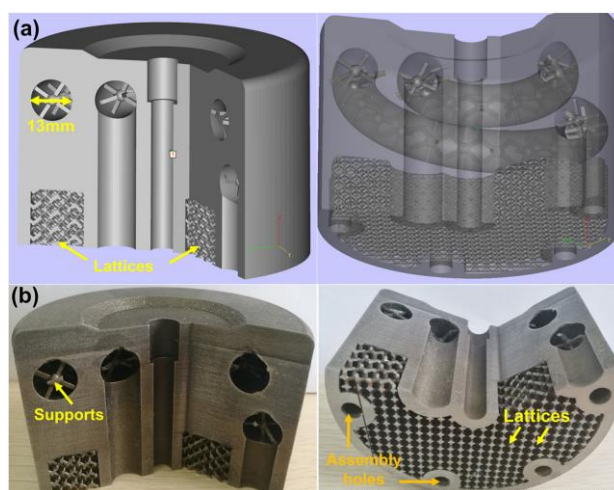
Kanali za odvođenje toplote sa radnog komada (hlađenje) koji se obično koriste u alatima za injekciono presovanje, ponekad nisu dovoljno efikasni kako bi se toplota uspešno odvela i ne bi došlo do neželjenih deformacija izrađenih delova. U današnje vreme, upotrebom softvera za simulaciju procesa injekcionog presovanja, može se veoma lako i uspešno izvršiti njihova optimizacija. Međutim, optimizovani oblik i poprečni presek kanala za hlađenje nije uvek moguće proizvesti na današnjim mašinama (slika 4).



Slika 4. Pravi kanali za hlađenje a) konformni kanali b) finalni alat sa konformnim kanalima izrađen DED tehnologijom c) [14]

Izrada kanala za hlađenje kompleksnog oblika i poprečnog preseka moguća je korišćenje nekom od tehnologija aditivne proizvodnje koja kao polazni materijal koristi metal. To se može postići tehnologijama iz tabele 1: SLS, SLM, DMLS, EBM i DED.

Izrada konformnih kanala korišćenjem praha kao polaznog materijala nosi sa sobom probleme svojstvene postupcima iz grupe fuzije praškastog supstrata. Generalno, glavni problem pri izradi otvora i šupljina u delovima pri korišćenju praha predstavljaju potpore koje je potrebno generisati kako bi se sprečila ulegnuća praha i nepravilnosti u gotovim komadima pri izradi šupljina i kanala velikih dimenzija. Potpore se uklanjaju nakon izrade dela i čišćenja od praha. Međutim, uklanjanje metalnih potpora iz kanala nije moguće zbog njegovog oblika i nepristupačnosti. Ako bi potpore ostale u kanalu ometale bi protok fluida za hlađenje i umanjile njegovu efikasnost. Ovaj problem može se umanjiti tako što se umesto generičkih potpora postave oslonci dizajnirani u CAD modelu (slika 5a), a koji su projektovani tako ne utiču u velikoj meri na protok fluida kroz kanal i na taj način ne umanjuju njegovu efikasnost [4].



Slika 5. CAD model konformnog kanala a) i presek izrađenog dela alata [4]

4. ZAKLJUČAK

Tehnologije aditivne proizvodnje se danas mogu uspešno koristiti ne samo pri izradi prototipova i gotovih proizvoda već i za izradu delova alata za konvencionalnu proizvodnju, kakva je i proizvodnja injekcionim presovanjem. Upotrebom aditivnih tehnologija, proces koji je predviđen samo za velikoserijsku i masovnu proizvodnju dobija novu dimenziju i postaje mnogo fleksibilniji i primenljiviji čak i pri pojedinačnoj proizvodnji.

Sa razvojem uređaja za aditivnu proizvodnju, a naročito osnovnih materijala, pre svega polimernih, mogu se izraditi i delovi alata za injekciono presovanje (umeci) koji dolaze u direktan kontakt sa rastopljenim polimerom i koji tokom eksploatacije mogu da proizvedu par desetina do par stotina brizganih delova. Visoke mehaničke karakteristike, otpornost na povišene temperature kao i kvalitet završne površine, niska cena i vreme izrade, omogućavaju uspešnu proizvodnju plastičnih delova korišćenjem polimernih umetaka i čine tehnologiju injekcionog presovanja fleksibilnijom. Sa druge strane, tehnologije aditivne proizvodnje kojima se izrađuju metalni delovi, u kombinaciji sa softverima za simulaciju, omogućavaju izradu kanala za hlađenje kompleksnog oblika i poprečnog preseka, što omogućava optimizaciju proizvodnje i izradu komplikovanih komada.

5. LITERATURA

- [1] Fernandes, C., Pontes, A., Viana, J., & Gaspar-Cunha, A.: *Modeling and Optimization of the Injection-Molding Process: A Review*, Advances in Polymer Technology, Vol 37 No 2, 2018, pp. 429–449.
- [2] Da Silveira, G., Borenstein, D. and Fogliatto, F.S.: *Mass customization: Literature review and research directions*. International journal of production economics, Vol 72 No 1, 2001, pp.1-13.
- [3] Whlean, C., & Sheahan, C.: *Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production*, Procedia Manufacturing, Limerick, Ireland, 2019, pp. 60–68.
- [4] Tan, C., Wang, D., Ma, W., Chen, Y., Chen, S., Yang, Y., & Zhou, K.: *Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds*, Materials & Design, 2020, Vlo 196, pp. 109147.
- [5] Gibson I, Rosen DW., Stucker B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer 2010.
- [6] ISO/ASTM 52900:2015 (en) *Additive manufacturing — General principles — Terminology*, 2015.
- [7] Mendible, G. A., Rulander, J. A., & Johnston, S. P.: *Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding*, Rapid Prototyping Journal, Vol 23, No 2, 2017, pp. 344–352.
- [8] Habrman, M., Chval, Z., Ráž, K., Kučerová, L., & Hůla, F.: *Injection Moulding into 3D-Printed Plastic Inserts Produced Using the Multi Jet Fusion Method*, Materials, Vol 16, No 13 2023, pp. 4747.
- [9] Gülçür, M., Couling, K., Goodship, V., Charmet, J., & Gibbons, G. J.: *Rapid tooling: investigation of soft-tooled micro-injection moulding process characteristics using in-line measurements and surface metrology*, Rapid Prototyping Journal, Vol 29, No 7, 2023, pp.1420–1437.
- [10] Basile, V., Modica, F., Surace, R., & Fassi, I.: *Micro-texturing of molds via Stereolithography for the fabrication of medical components*, Procedia CIRP, Vol 110 No C, 2022, pp. 93–98.
- [11] Venkatesh, G., Ravi Kumar, Y., & Raghavendra, G.: *Comparison of Straight Line to Conformal Cooling Channel in Injection Molding*. *Materials Today*, Materials Today: Proceedings 4, 2017 pp. 1167–1173.
- [12] Kanbur, B. B., Suping, S., & Duan, F.: *Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 106, No 7–8, 2022, pp. 3253–3271.
- [13] <https://3dgence.com/filaments/ultem/> [pristup: oktobar 2024].
- [14] Feldhausen, T., Paramanathan, M., Heineman, J., Hassen, A., Heinrich, L., Kurfess, R., Fillingim, K., Saleeby, K., & Post, B.: *Hybrid Manufacturing of Conformal Cooling Channels for Tooling*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol 7 No 2 2023.

Movrin, D., Pjević, M., Popović, M., Milutinović, M.

ADDITIVE TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR IMPROVING THE INJECTION MOLDING PROCESS

Abstract: In today's industrial environment, demands for improved product quality, greater process efficiency, and the need for small batches while reducing costs pose challenges to plastic product manufacturers. Additive technologies offer solutions that enable faster prototyping, design customization, and, in the last few years, direct tooling. Initially, these technologies were limited only to a few predominantly polymeric materials made specifically to make prototypes. However, the materials spectrum has been significantly expanded today, and special emphasis is placed on metal materials and temperature-resistant polymers. This paper will analyze the possibility of using additive technologies to optimize injection molding tools using examples of the use of conformal cooling channels for metal tools, as well as the manufacture of polymer inserts for the production of small series.

Key words: Injection molding, additive technologies, conformal channels, polymer inserts.



Erić Obućina, J., Karić, M., Djordjević, V.¹⁾

PRIMENA STANDARDA ZA RAZMENU GRAFIČKIH INFORMACIJA U 3D MODELIRANJU HIDRAULIČKOG SERVOUPRAVLJAČA

Rezime

U mašinskom inženjerstvu CAD se odnosi na proces projektovanja proizvoda uz pomoć kompjutera i obuhvata aktivnosti koje se odvijaju između elektronskog crtanja i rada sa softverskim sistemima koji podržavaju automatsko projektovanje proizvoda. Kompjuterski sistem pomaže da se poboljša efektivnost i produktivnost procesa projektovanja preciznim grafičkim prikazima koji se lako modifikuju, prikazujući složene analize relativno brzo, memorisanjem i ponovnim pozivanjem informacija. CAD sistemi integrišu najbolje osobine projektanata i karakteristike kompjutera s ciljem da se dostigne najviši mogući nivo automatizacije projektovanja proizvoda. CAD/CAM integracijom informacija generisana u CAD-u učestvuje u svim fazama projektovanja, od funkcionalnih zahteva do realizacije proizvoda.

Ključne reči: geometrijsko modeliranje, hidraulički servo upravljač

1. UVOD

Prvi grafički sistem razvijen je 1950. za potrebe Američkog ratnog vazduhoplovstva. To je bio sistem protiv vazdušne odbrane (polu-automatizovano okruženje). Sistem je razvijen na Masačusets institutu kod Linkoln tehnološke laboratorije koji je takođe uključivao upotrebu CRT (Cathode Ray Tube) monitora da bi se prikazale informacije dobijene od radara, a i mnoge druge informacije.

Početni razvici CAD/CAM sistema su izvršeni 1960. godine u avionskoj i automobilskoj motornoj industriji u oblasti 3D površinske konstrukcije i NC programiranja.

U mašinskom inženjerstvu CAD se odnosi na proces projektovanja proizvoda uz pomoć kompjutera i obuhvata aktivnosti koje se odvijaju između elektronskog crtanja i rada sa softverskim sistemima koji podržavaju automatsko projektovanje proizvoda. Važno je naglasiti da primena kompjutera u inženjerskim aktivnostima ne menja osnovnu prirodu procesa projektovanja. To znači da inženjer projektant, na bazi znanja i kreativnosti, učestvuje u odvijanju faza procesa projektovanja počevši od problema indentifikacije (specifikacija funkcionalnih zahteva) pa do izvršenja (detaljno projektovanje). Međutim, i funkcije koje obavlja kompjuter u procesu projektovanja su podjednako važne. Kompjuterski sistem pomaže da se poboljša efektivnost i produktivnost procesa projektovanja preciznim grafičkim prikazima koji se lako modifikuju, prikazujući složene analize relativno brzo, memorisanjem i ponovnim pozivanjem informacija. Na osnovu ovoga, CAD sistemi integrišu najbolje osobine projektanata i karakteristike kompjutera s ciljem da se dostigne najviši mogući nivo automatizacije projektovanja proizvoda u toku njegovog životnog veka.

CAD sistemi ranije generacije imaju za izlaz izradu radioničkih crteža i ostalih inženjerskih dokumenata. Zbog toga je ispravno reći da CAD sisteme treba smatrati partnerom u timu inženjerskog projektovanja. U primeni programa novije generacije, postiže se CAD/CAM integracijom da informacija generisana u CAD-u učestvuje u svim fazama projektovanja, od funkcionalnih zahteva do realizacije proizvoda.

Danas u svetu postoji veći broj CAD/CAM sistema koji su hardverski i softverski zaokruženi. Njihova primena postaje neophodnost kako tokom projektovanja tako i tokom procesa proizvodnje.

¹⁾ mr Jelena Erić Obućina, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek Trstenik, (jobucina@asss.edu.rs), dr Marina Karić, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek Trstenik, (mkaric@asss.edu.rs), Violeta Djordjević, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek Trstenik, (vdjordjevic@asss.edu.rs).

2. PREGLED STANJA ISTRAŽIVANJA STANDARDA ZA RAZMENU GRAFIČKIH INFORMACIJA

2.1 CAD - projektovanje proizvoda primenom kompjutera

Teorijska osnova za nastanak softvera kompjuterske grafike leži u pionirskom radu Ivana Saterlenda (Ivan Sutherland, 1963). On u svojoj doktorskoj tezi opisuje sistem koji se naziva podloga za skiciranje – sketch pad. Ovaj sistem nije zasnovan kao interaktivna grafika, već je omogućio da se primeni ekranska informacija sa slikama intergisanim pomoću kompjutera. Fleksibilnost izbora informacija postiže se tako što se kursor, kojim se jednostavno upravlja, uperi na željeno mesto na ekranu. Sketch pad je razvijen u okviru SAGE–Semi-Automatic Ground Environment projekta. [8]

Razvoj trodimenzionalnog modeliranja proizvoda, tj. modeliranje telima tokom 70-ih godina prošlog veka, dramatično je izmenio scenario projektovanja proizvoda, zbog toga što se sada ista informacija generisana u ovoj CAD tehnologiji mogla koristiti kako za izradu inženjerskih crteža tako i za inženjerske analize.

CAD sistemi zasnovani na objektno orijentisanom modeliranju i objektno orijentisanom programiranju poseduju značajne prednosti u odnosu na druge sisteme. Prednost se ogleda u većoj brzina rada, većoj memoriji i manjim gabaritnim veličinama. Ovo je znatno uticalo na to da su CAD sistemi, zasnovani na ovim osnovama, sada dostupni širokom krugu korisnika i to po pristupačnim cenama.

Budući pravac u razvoju ovih tehnologija ide ka intenzivnijem povezivanju pravila veštačke inteligencije sa CAD objektno orijentisanim sistemima u nastojanju da se dostigne visok nivo ekspertnosti u automatskom projektovanju.

Danas, u eri formiranja i razmene informacija u elektronskom obliku, u okviru proizvodnje naglasak je na komunikacijama bez dokumentacije na papiru. Na ovaj način se stvaraju uslovi da se digitalna geometrijska informacija iz baze podataka CAD-a prenese u bazu podataka CAM-a, koristeći se pravilima integracije i translacije a u cilju efikasne realizacije proizvodnje dela. Na ovaj način izvršena razmena informacija značajno skraćuje vreme razvoja i vreme proizvodnje. Ovaj funkcionalni zahtev, postavljen pred sisteme za geometrijsko modeliranje, stvorio je uslove za efikasno predstavljanje jedinstvene informacije o delu, koja se kasnije može lako koristiti u drugim projektantskim celinama.

Geometrijsko modeliranje odnosi se na skup tehnika koje se, u krajnjoj analizi, tiču razvoja efikasnog prikazivanja geometrijskog aspekta proizvoda i proizvodnje. Upravo zbog ovoga, geometrijsko modeliranje je osnovna aktivnost svih CAD sistema. Na bazi geometrijskih modela proizvoda generišu se parametri za mnoge druge aplikacije, kao što su proračuni momenata inercije, mase, zapremine i mase proizvoda, analize mehanizama, modeliranje konačnim elementima i NC programiranje. Uvažavajući ove okolnosti, geometrijsko modeliranje ima veliki uticaj na procese razvoja inženjerskog projektovanja proizvoda. Navode se tri uticaja: Prvi uticaj se odnosi na celokupnost prezentacije proizvoda sa mogućnošću direktnog pristupa pojedinačnim komponentama. To znači da se od prezentacije zahteva pružanje dovoljno podataka o svim pitanjima o proizvodu koje može da postavi korisnik, odnosno projektant u razvoju. Ovo se odnosi na topološke i geometrijske podatke. Topološki podaci predstavljaju odnos između celina, a geometrijski opisuju geometriju celina. Na primer, za segment linije geometrijski podaci su dužina i orijentacija, a topološki podatak je sa kojom linijom je ona povezana. Drugi uticaj se odnosi na metode modeliranja. Uslov je da metoda bude laka za korišćenje projektantima. Neke od metoda su moćne, ali teške za korišćenje. Treći uticaj se odnosi na kvalitet softverskog rešenja programa u odnosu na kriterijum izdržljivosti. Pored izdržljivosti, veoma je značajno koliko brzo računar može da pristupi celinama i prikaže ih. Ovaj uticaj se posebno odnosi na modeliranje velikih i kompleksnih proizvoda.

Već duži niz godina, savremeno projektovani i realizovani CAD sistemi se uspešno koriste u širokom dijapazonu primene, u integraciji procesa projektovanja i u povećanju produktivnosti projektanata. Za većinu CAD softverskih paketa novije generacije može se konstatovati da su dobro projektovani i testirani. Kod pojedinih CAD sistema projektant i ne zna mnogo o unutrašnjosti softvera, a može da ga uspešno koristi zahvaljujući tzv. korisničkom interfejsu.

Programski paketi namenjeni 2D crtanju, omogućavaju da se mnoge funkcije izmena, kao što su brisanje, pozivanje memorisanog i kopiranje, koje se tradicionalno smatraju dosadnim i dangubnim, sada efikasno koriste u okviru CAD sistema. Ovo očigledno povećava produktivnost projektanta. Kod prikazivanja složenijih delova, sa višestrukim pogledima i presecima, znanje projektanta predstavlja osnovu crtanja. Još jedan problem povezan sa 2D postupkom crtanja je taj da ovaj postupak da ne podržava analizu konačnim elementima (FEA) ili NC programiranje.

U pokušajima da se prevaziđu ovi problemi u poslednje dve dekade prošlog veka razvijen je veliki broj novih metoda geometrijskog modeliranja. Ovim metodama direktno se kreira 3D model dela. Sada 2D crtež može biti generisan iz 3D modela, pomoću računara, ukoliko se to zahteva. Šta više, ovi 3D modeli podržavaju

mnoge inženjerske aplikacije kao što su FEA, proračun/analiza mnogih osobina i planiranje procesa. Ovo nas vodi korak bliže potpuno automatizovanom inženjerstvu. U ovoj kategoriji osnovni pristupi geometrijskom modeliranju su: žičani model, modeliranje površinama i modeliranje telima. [2, 6, 8]

2.2 Parasolid

Parasolid omogućuje projektantima formiranje matematičkih modela predmeta, od jednostavnih blokova, cilindara i sfera do estetskih kontura modernih kola i funkcionalnih vrlo preciznih, na primer, rotacionih elisa helikoptera. Parasolid predstavlja trodimenzionalnu geometrijsku komponentu CAD softvera, jezgro ili kernel modeler, koji omogućava suštinsku funkcionalnost u procesu projektovanja proizvoda, tj. obezbeđuje uslove za veoma efektivno kreiranje asocijativnih modela visokog stepena kompleksnosti. [1, 3] Zasnovan je na tehnologiji predstavljanja pomoću graničnih površina BREP (Boundary representation), i podržava modeliranje telima (Solid modeling), ćelijsko modeliranje (Cellular modeling), modeliranje proizvoda od lima i modeliranje složenih površina.

Parasolid je razvijen na univerzitetu Cambridge, pod pokroviteljstvom firme UGS koja se bavi razvojem softverskih alata za podršku PLM konceptu. Parasolid obezbeđuje opsežnu bazu procesa modeliranja za veliki broj CAD/CAM/CAE softvera i predstavlja ključni alat u podršci PLM-u. Praktično potvrđen primenom u vrhunskim CAD softverima (NX, Solid Edge, Femap, Teamcenter...), Parasolid je integrisan i u sisteme srednje klase i nalazi široku primenu na nezavisnim CAD, CAM i CAE sistemima. Parasolid se odlikuje širinom pristupa koja korisnicima iz raznih industrijskih područja omogućava kvalitetnu razmenu geometrijskih informacija u izvornom XTformatu.

Parasolid nalazi svoju primenu u preduzećima koja imaju potrebu za kreiranjem i manipulacijom matematičkih modela realnih objekata. Pri tome, Parasolid utiče na povećanje efektivnosti modeliranja, pre svega uvažavajući integraciju sa drugim sistemima baziranim na ovom kernelu. Ti sistemi su:

- CAD (Computer Aided Design) sistemi - kreiraju apstraktne modele zasnovane na podacima koje dobijaju od korisnika. Pojedini model može biti kombinovan sa drugima, kao komponenta kompleksnog proizvoda. Namenjenost Parasolid-a za podršku PLM konceptu, ogleda se u kreiranju informacija o modelu, prilagođenih modeliranju životnog veka proizvoda.
- CAE (Computer Aided Engineering) sistemi - bave se analizom proizvoda kreiranih u CAD sistemu. Ovo podrazumeva analize karakteristika kao što su: analize napona, termodinamičkih osobina, vibracija, aerodinamike. Proizvod se optimalizuje analizom, izmenom pojedinih geometrijskih karakteristika i re-analizom. Geometrijski i topološki integritet, koje Parasolid u komunikaciji CAD i CAE sistema obezbeđuje, od suštinskog je značaja za kvalitetno odvijanje opisanih inženjerskih aktivnosti.
- CAM (Computer Aided Manufacturing) sistemi - generišu instrukcije za računarski podržane mašine alatke u cilju izrade proizvoda čiji je model kreiran u CAD sistemu. CAM sistemi pokrivaju veoma široko područje tehnoloških procesa, od jednostavnog struganja do petoosnog glodanja složenih površina. Integracija CAD/CAM na nivou Parasolid kernela omogućava veoma pouzdano prepoznavanje tehnoloških primitiva, što je osnovni zahtev za ispravno generisanje tehnoloških instrukcija, tj. NC koda.

2.3 Modeliranje inženjerskim primitivima

Ideja inženjerskih primitiva je zasnovana na težnji da omogući predstavljanje inženjerskih crteža, koji informaciono opisuju dati deo, na jednom višem nivou. Primitiv u sebi grupiše osnovne geometrijske oblike u jednoj shvatljivoj formi koja odgovara načinu inženjerskog razmišljanja projekatata proizvoda i tehnologije. Oni predstavljaju viši konceptualni nivo od nivoa koji predstavljaju linije, lukovi i tekst koji se, takođe, koriste u CAD/CAM sistemima jer u sebi sadrže veću količinu informacija. Još jedna prednost njihovog korišćenja je mogućnost parametarskog prikazivanja i grupisanja prema geometrijskim oblicima, što je mnogo pogodnije nego pojedinačno prikazivanje linija i lukova.

Modeliranje pomoću inženjerskih primitiva je zasnovano na ideji „gradnje pomoću blokova“. Umesto korišćenja analitičkih oblika, projektant kreira model proizvoda koristeći najviši nivo entiteta (primitiva) koji odgovaraju specifičnostima primene. Ovaj pristup se danas zasniva na sistemima parametarskog prostornog modeliranja (Parasolid modeling). Opšta karakteristika ovih sistema je da su vrlo jednostavni za primenu u okviru simultanog projektovanja proizvoda i tehnologije. [3, 6]

Inženjerski značaj primitiva (engineering primitive) obuhvaćen je funkcijom kojoj primitiv i služi. Na primer, kako je moguće primitiv tehnološki izraditi i koje sve projektantske aktivnosti treba preduzeti da bi se inicirala realizacija. Upravo ova osobina direktne povezanosti sa tehnologijom izrade je i dovela do naziva inženjerski primitiv. U srpskom jeziku pored izraza primitiv koriste se i drugi, poput forma, tehnički element, tehnološki element, geometrijski entitet i drugi.

CAPP sistemi obično služe kao veza između CAD-a i CAM-a. U većini slučajeva to je delimična veza upravo zbog toga što većina postojećih CAD sistema ne obezbeđuje potrebne informacije o primitivima dela, a te informacije predstavljaju podatak značajan za projektovanje tehnoloških procesa, CAPP. Drugim rečima,

CAPP sistemi ne razumeju trodimenzionalnu geometriju u projektovanju proizvoda (definisano pomoću CAD sistema), kada se imaju u vidu njihova inženjerska značenja povezana sa tehnologijama izrade i montaže. To je zajednički problem svih CAPP metoda projektovanja procesa i uglavnom se razmatra kao aktivnost prepoznavanja primitiva.

2.4 Translatore, DKSF standard, IGES standard, PDES standard, STEP standard

IGES je prvi put objavljen 1980 godine, a zatim ažuriran 1983, 1986, 1988, 1990. To je prvi široko prihvaćeni standardni format razmene koji je korišćen za komunikacije baza podataka modela između različitih CAD/CAM sistema. IGES je takođe korišćen za transfer podataka između kompanije, njenih dobavljača i korisnika. IGES možemo smatrati sredstvom za generisanje modela proizvoda i procesa. [6] Pošto su primitivi/entiteti IGES -a superset uobičajenih primitiva/entiteta svih modula CIM sistema, proizilazi da svi moduli sistema mogu da komuniciraju sa njim. Prema tome, IGES pomaže u razvijanju komunikacione mreže među sistemima. Osnovni elementi IGES-a su primitivi/entiteti. Entiteti su klasifikovani kao i ne geometrijski.

Iako IGES obuhvata entitete koji se najčešće pojavljuju u opštim CAD/CAM sistemima, ima slučajeva da neki od njih nisu uključeni u IGES standard. U takvim slučajevima se generišu približne zamene da bi se generisali ciljni entiteti sa najbližim odgovarajućim entitetima. Kao što je slučaj sa mnogim drugim standardnim formatima, strukturu IGES fajlova formiraju sledeći sektori: taksativni, početni, globalni, ulazni direktorijum, sektor parametarskih podataka i završni sektor. Taksativni (indikatorski) sektor se koristi u razmeni informacija kao što su ime standarda, verzija i javljanje greške razmene. Ovaj sektor direktno ukazuje korisniku da li je razmena uspešna. Početni sektor memoriše informacije kao što su ime poslatog (izvornog) i ime primljenog (ciljnog) CAD/CAM sistema. [3] Globalni sektor opisuje opštu informaciju koja se tiče svih entiteta koji se čuvaju za naredna dva sektora: sektor ulaznog direktorijuma i sektor parametarskih podataka. Sektor ulaznog direktorijuma je osnova IGES fajla koji sadrži imena entiteta. Podaci u sektoru parametarskih podataka definišu entitete. Završni sektor sadrži jedinstvene podatke radi provere.

PDES predstavlja standard za razmenu podataka o proizvodu (Product Data Exchange Standard ili Product Data Exchange) koji u osnovi koristi STEP (standard za transfer i razmenu podataka modela proizvoda). STEP je korak ka globalnoj standardizaciji razmene informacija koje su u relaciji sa automatizovanim tehnologijama. Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) duži niz godina radi na razvoju ovog sveobuhvatnog i kompleksnog STEP standarda, projektovanog za podršku različitim primenama. Fundamentalna razlika između IGES i PDES je u tome što se u PDES standardu razmena podataka vrši u vidu aplikacija, dok IGES standard koristi entitete kao osnovne elemente. Ovaj pristup se reflektuje u PDES troslojnoj arhitekturi definisanoj preko aplikacione, logičke i fizičke ravni.

STEP je nezvaničan naziv za standard. Pravi naziv za STEP standard je ISO 10303. Uobičajeno je, naročito u CAD, pozivanje na standard kao PDES, premda je u jednom trenutku ovaj akronim značio specifikaciju o razmeni informacija o proizvodu (Product Data Exchange Specification), potencirajući razdvajanje između međunarodnog standarda i standarda CAD-a. Interpretacija akronima je promenjena početkom 1990. godine. Novo značenje je glasilo razmena informacija o proizvodu putem STEP -a (Product Data Exchange using STEP). Na ovaj način su, sada, pripisane aktivnosti SAD-u na razvijanju međunarodnog standarda. [3]

Nakon deset godina od prvog pojavljivanja STEP standard je suštinski promenio pristup u razmeni podataka za potrebe industrije. Osnovni zahtev definisan 1984. godine bio je potreba za standardom koji bi mogao da zameni IGES, SET, VDA-FS itd., odnosno za standardom koji je efektivniji i sa uspešnijim mehanizmom za razmenu CAD/CAM podataka. Međutim, danas se STEP usmerio i proširio na industrijske potrebe za sistemski nezavisnim menadžmentom informacija o proizvodu tokom celog njegovog životnog veka.

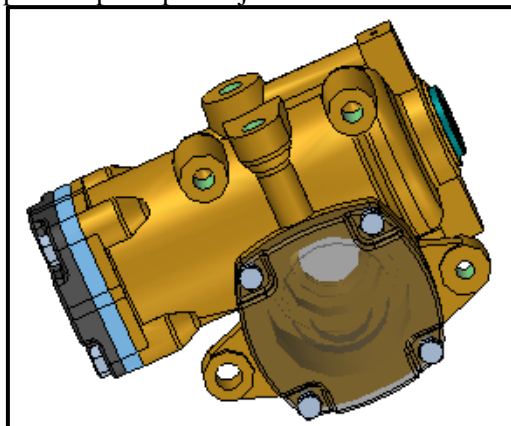
3. MODELIRANJE HIDRAULIČKOG SERVOUPRAVLJAČA KORIŠĆENJEM STANDARDA ZA RAZMENU GRAFIČKIH STANDARDA

U osnovi analize formiranja primitiva montaže polazi se od funkcije navedenog sklopa. Na bazi funkcionalnih zahteva potrebno je prepoznati nosioce funkcija, odnosno izvršne organe za nivo na kojem se definiše primitiv, a zatim formirati skelet podsklopa odnosno sklopa. Definisavanje montažne strukture zasniva se na postavkama projektovanja za montažu DFA (Design for Assembly) kao glavne strategije simultanog projektovanja. Cilj ove strategije je proizvoditi lakše i jeftinije proizvode, pa se prema nekim autorima DFA smatra ključem uspešnog projektovanja u konkurentnom okruženju.

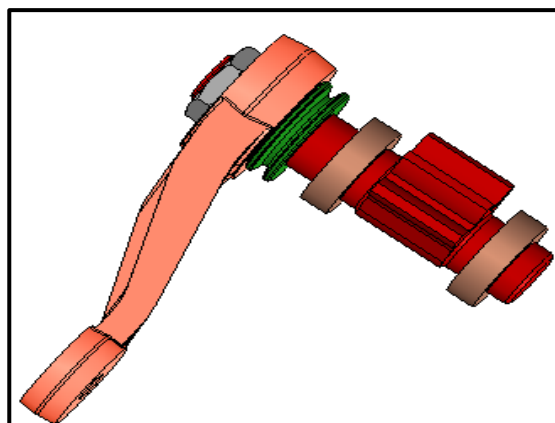
Pri modeliranju za montažu definišu se i montažni primitivi, predstavljeni relacijama između funkcionalnih i efektivnih površina definisanih na komponentnom nivou, uz uvažavanje hijerarhijskog strukturisanja proizvoda. Sledeći korak pri modeliranju hidrauličkog servoupravljača jeste modeliranje podsklopova, kao elemenata višeg nivoa u hijerarhijskoj strukturi proizvoda u okviru montažnog (assembly) okruženja Solid Edge-a. [1]

U modeliranju krajnjeg sklopa hidrauličkog servoupravljača, učestvuju navedeni podsklopovi: podsklop kućišta, podsklop klipa i podsklop segmentnog vratila.

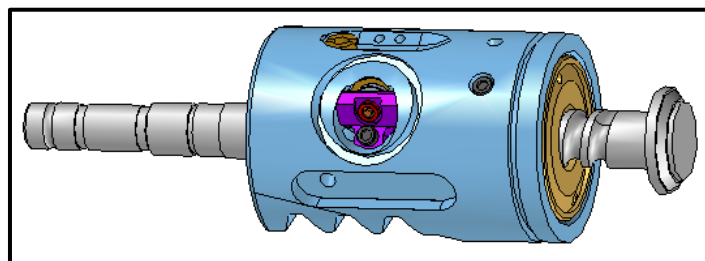
Modeliranje podsklopa kućišta zasniva se na povezivanju, odnosno sklapanju elemenata podsklopa kućišta: poklopaca kućišta, vijaka i zatvarača, u montažnom okruženju (slika 1). Modeliranje podsklopa segmentnog vratila u okviru montažnog okruženja podrazumeva povezivanje: segmentnog vratila, dva ležaja, poluge, remenice i navrtke (slika 2.). Modeliranje podsklopa klipa obuhvata integraciju elemenata klipa, pužnog vratila, navrtke sa obrtačem, klipa povratnog dejstva naredbom mate u montažnom okruženju Solid Edge-a. Model podsklopa klipa dat je na slici 3.



Slika 1. Podsklop kućišta [1]

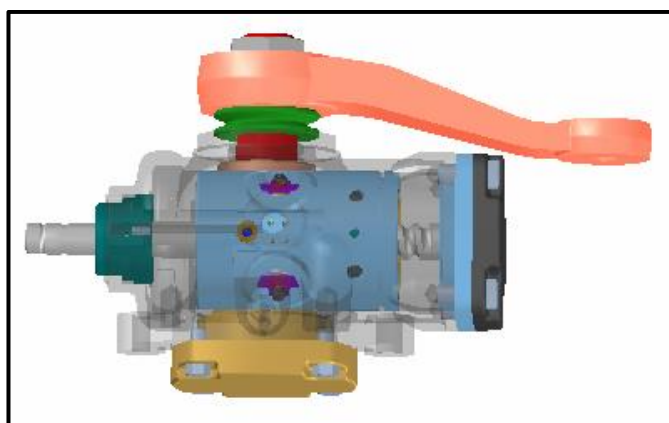


Slika 2. Podsklop segmentno [1]

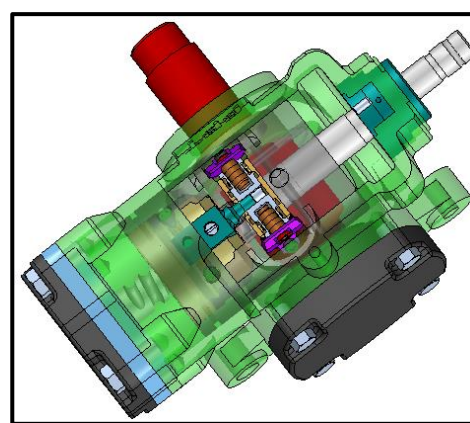


Slika 3. Podsklop klipa [1]

Na kraju kao završni proces u montažnom okruženju javlja se modelovanje sklopa hidrauličkog servoupravljača (slika 4. i slika 5.) koji predstavlja poslednji element hijerarhijske strukture posmatranog hidrauličkog servoupravljača.



Slika 4. Sklop hidrauličkog servoupravljača [1]



Slika 5. Model servoupravljača

Integrirano projektovanje montažno strukturisanih proizvoda prema CAD/CAM tehnologiji dato na primeru hidrauličkog servoupravljača ukazuje na veliki uticaj projekatnata na povećanje kvaliteta proizvoda i smanjenje troškova projektovanja i montaže.

Osnovni cilj u procesima integrisanog projektovanja jeste da obezbedi kvalitetnu saradnju projekatnata proizvoda i tehnologa montaže. Integracija i kooperacija znanja su preduslov za uspešnu primenu ekspertnih znanja. Kada saradnja izostane gubi se značajno na kvalitetu proizvoda i povećavaju se troškovi proizvodnje.

4. ZAKLJUČAK

Digitalni podaci proizvoda moraju sadržavati dovoljno informacija za obuhvatanje, proizvodnje, testiranja kontrole kvaliteta, inspekcije i funkcija podrške proizvodu. Da bi sve to bilo moguće uraditi STEP standard morao bi uhvatiti geometriju, topologiju, tolerancije, povezanost, atribute, sklopove konfiguraciju i još mnogo drugih relacija. Za postizanje ovako ambicioznog cilja STEP standard je, kao ISO standard, sastavljen iz više delova. Najvažniji aspekt STEP standarda jeste proširivost. STEP je izgrađen na posebnom jeziku koji može formalno opisati strukturu i uslove korektnosti bilo koje inženjerske informacije koju je potrebno razmeniti.

Primena računara danas je prisutna kod projektovanja proizvoda, inženjerskih proračuna i analiza, projektovanja tehnološkog procesa (CAPP – Computer Aided Process Planning), upravljanja informacijama (EDM – Engineering Data Management, PDM – Product Data Management). Uopšte, kompletna proizvodnja je integrirana i podržana računarom. Razvoj novih sredstava, kako softverskih i hardverskih, tako i mašina i robota, kao i njihovo usavršavanje, ima za cilj da se smanji direktno angažovanje čoveka u procesima rada. Njihovom primenom u procesu proizvodnje oslobađa se ljudska snaga kao izvor energije i čovek kao izvršilac određenog rada, a ulogu izvora energije i neposrednog izvršioca rada preuzima mašina. Razvijajući pomoćna sredstva, čovek razvija i njihove sisteme upravljanja. Sistemi upravljanja treba da ga zamene u upravljanju mehanizmima i mašinama. Mašine i procesi izrade se tako automatizuju, čime se menja i uloga čoveka u procesu proizvodnje: čovek od izvršioca postaje organizator i kontrolor radnog procesa.

Jedan od načina podizanja kvaliteta procesa projektovanja proizvoda i tehnologija se zasniva na primeni i razvoju CA tehnologija i njihovoj integraciji prema konceptu simultanog inženjerstva. Modelovanje proizvoda je koncept za prezentaciju svih inženjerskih informacija potrebnih u procesima projektovanja proizvoda i predstavlja osnovu te integracije. Računarsko modelovanje omogućava kreiranje modela na računaru tako da se istraživanja odvijaju na njima umesto na fizičkom modelu. U cilju bržeg i kvalitetnijeg ispunjavanja velikih i raznovrsnih zahteva koji dolaze sa tržišta, neophodno je ostvariti skraćanje ciljnog vremena vezanog za rađanje varijantnog ili potpuno novog proizvoda. Uvažavajući napred navedeno, tema ovog rada se i odnosi na hidraulički servoupravljač.

5. LITERATURA

- [1] J. Erić, *Diplomski rad*, Mašinski fakultet Kraljevo Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2004.
- [2] J. Erić, *Magistarski rad*, Mašinski fakultet Kraljevo Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2007.
- [3] V. Obućina, *Diplomski rad*, Mašinski fakultet Kraljevo Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2005.
- [4] Katalog uređaja Prva Petoletka Trstenik
- [5] M. Minić, *Sistemi za upravljanje teretnih vozila*, ABC Glas, Beograd, 1992.
- [6] A. Babić, *Tehnologija montaže*, Mašinski fakultet Kraljevo Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2005.
- [7] Lj. Lukić, *Fleksibilni tehnološki sistemi*, monografija, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet Kraljevo, 2008.
- [8] B. Erić, *Specijalistički rad*, Visoka tehnička mašinska škola strukovnih studija Trstenik, 2013.
- [9] M. Kalajdžić, *Tehnologija mašinogradnje*, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.

Erić Obućina, J., Karić, M., Djordjević, V.

APPLICATION OF GRAPHIC INFORMATION EXCHANGE STANDARDS IN 3D MODELING OF HYDRAULIC POWER STEERING

Abstract: *In mechanical engineering, CAD refers to the process of computer-aided product design and includes activities that take place between electronic drafting and working with software systems that support automatic product design. The computer system helps to improve the effectiveness and productivity of the design process with accurate graphical displays that are easy to modify, displaying complex analyzes relatively quickly, by memorizing and recalling information. CAD systems integrate the best features of designers and computer features in order to reach the highest possible level of automation of product design. By integrating CAD/CAM information generated in CAD, it participates in all phases of design, from functional requirements to product realization.*

Key words: *geometrics modeling, hydraulic servo steering gear*



PRIMENA CAD/CAE/CAM SISTEMA PRI LIVENJU ODLIVAKA U PESKU

Rezime

Odlivci guseničnih članaka koji se koriste za formiranje sklopa gusenice, kao komponente guseničnog kretača tenkova su odgovorne komponente i sa aspekta njihove izrade, livenje se može smatrati neprevaziđenim tehnološkim procesom. Kao rešenje u ovakvim slučajevima nameće se korišćenje specijalizovanih CAD/CAE/CAM alata za simulaciju, optimizaciju i geometrijsko modeliranje proizvoda i alata za livenje. Unapredjenje procesa livenja guseničnih članaka sprovedeno je primenom softverskog paketa „Altair Inspire Cast“ 2022.2. Koncept primenjen u ovom radu obuhvata virtuelnu proizvodnju, praktičnu realizaciju uspostavljenog tehnološkog procesa, unapređenje postojeće tehnologije i konačnu proveru kvaliteta odlivaka kroz mehanička ispitivanja.

Ključne reči: livenje, gusenični članak, CAD/CAE/CAM tehnologije

1. UVOD

Odlivci guseničnih članka najčešće su izrađeni od visoko-legiranog manganskog čeličnog liva otpornog na habanje (X120Mn12). Ovaj materijal naziva se još i Hadfieldov čelik. Karakterističan je po tome što mu u procesu eksploatacije, pri kontaktu sa drugim materijalom otvrdnjavanja površina, čime se značajno poboljšavaju radne karakteristike odlivka, u ovom slučaju guseničnog članka [1].

Kroz unapredjenje kvaliteta odlivka i procesa livenja, akcenat je stavljen na livenje odlivka bez unutrašnjih grešaka (poroznost i pojava gasnih mehurova) i mehaničke karakteristike odlivka, nakon čega, ukoliko iste zadovolje zahtevane karakteristike, vršice se geometrijsko usaglašavanje odlivka [2]. U ovom radu, za izradu guseničnog članka, dela složene prostorne geometrije, velike metalurške kompleksnosti i visoke geometrijske tačnosti mera i oblika, biće korišćena tehnologija livenja metala u peščanim kalupima. Za simulaciju procesa livenja koristiće se programski paket „Altair Inspire Cast“ 2022.2. Biće urađen 3D CAD model svih elemenata kalupne šupljine koju popunjava tečni metal, odnosno ulivni sistem (ulivna čaša, sprovodnik, kolektor, razvodnik i ulivnici), odlivak sa jezgroma, hranitelji i odvodnici gasova. Ispravno konstruisan ulivni sistem trebalo bi da osigura da se tečni metal uliva u kalupnu šupljinu brzo i bez turbulencija [3-6].

Metodologija unapredjenja kvalitet odlivka - guseničnog članka zasnovana je na primeni CAD/CAE/CAM sistema. Predložena metodologija podrazumeva projektovanje tehnologije livenja, numeričku simulaciju procesa livenja primenom „Altair Inspire Cast“ 2022.2 programskog paketa, izradu peščanog kalupa, i kontrolu odlivenog dela - guseničkog članka [7-8].

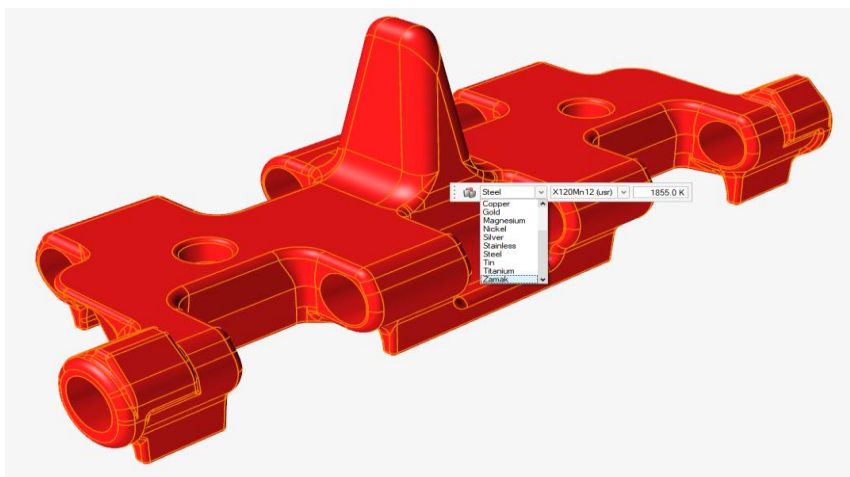
2. DIZAJNIRANJE MODELA

2.1 Predloženi sistem livenja

Prilikom izrade delova livenjem u pesku, primenom savremenih CAD alata, neophodno je poštovati određene tehnološke zahteve koji se odnose na neophodne livačke konuse i veličinu radijusa u unutrašnjim uglovima. Ugao livačkog konusa najviše zavisi od dva parametra, visine stranice u tom delu i načina

¹⁾ doc. dr Aleksandar Jovičić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (aleksandar.jovicic@ftn.kg.ac.rs), inž.maš. Milojko Ikodinovic, IKL Industrijski kombinat livnica doo Guča, (milojko.ikodinovic@ikl.rs), van. prof. dr Jelena Baralić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs), doc. dr Andjelija Mitrović, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (andjelija.mitrovic@ftn.kg.ac.rs), asist. Msc Aleksandra Nikitović, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku (aleksandra.nikitovic@ftn.kg.ac.rs).

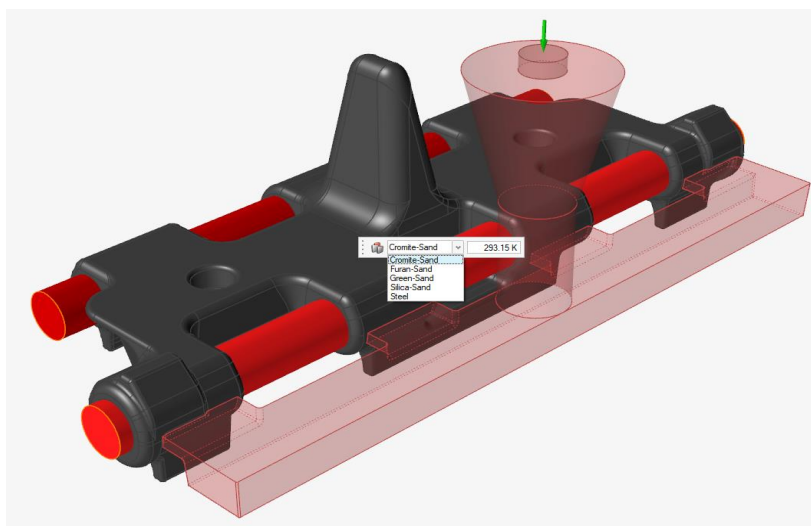
kalupovanja. Savremeni CAD alati pored dizajniranja omogućavaju i proveru modela po svim parametrima potrebnim za livenje u pesku (proveru kalupa, jezgara i dela koji se lije) (slika 1).



Slika 1. Odlivak - gusenični članak

2.2 Dizajniranje ulivnog sistema i jezgara

Ulivni sistem kao kompleksan konstruktivni element pred kojim su veliki tehnološki zahtevi treba da obezbedi ravnomerno ulivanje rastopljenog metala po najpovoljnijem redosledu za popunjavanje šupljine u kalupu. Takođe, treba da obezbedi pravilno hranjenje tokom kristalizacije pa se stoga u njega postavljaju i hranitelji radi ostvarivanja ovog zahteva. Ulivni sistem mora imati zadovoljavajuću čvrstoću, da ne erodira pod uticajem kretanja rastopljenog metala, kao i da svojim oblikom spreči vrtloženje rastopljenog metala i time dovede do uvlačenja vazduha zajedno sa rastopljenim metalom.

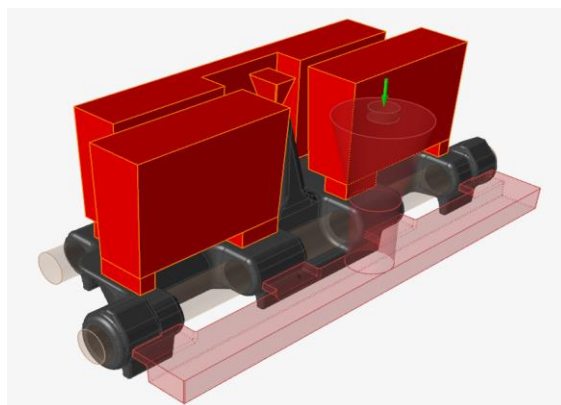


Slika 2. Dizajniranje ulivnog sistema i jezgara

U konkretnom slučaju potrebno je ostvariti otvore koji su poprečno postavljeni na pravac otvaranja kalupa pa se pribegava postavljanju dva jezgra koja će ispuniti šupljinu u kalupu i neće dozvoliti rastopljenom metalu da je popuni u tom delu a odlivak će na navedenim mestima imati šupljine (slika 2).

2.3 Dizajniranje hranitelja i kalupa

Hranitelji imaju značajnu ulogu u procesu kristalizacije metala jer treba da obezbede homogenu strukturu odlivka, a poroznosti uzrokovane hlađenjem izmesti unutar sebe. Kalup ima značajnu ulogu u procesu kristalizacije jer se glavno hlađenje odvija kroz njega, takođe treba da obezbedi stabilnost formiranih šupljina, zadržavanje jezgara na predviđenim pozicijama i da podnese pritiske koji se stvaraju tokom ulivanja rastopljenog metala (slika 3).



Slika 3. Dizajnirani hranitelji

2.4 Određivanje parametara livenja, faktorskih nivoa i plana eksperimenta

U cilju određivanja najpovoljnijih parametara za dobijanje odlivka zahtevanih karakteristika odnosno odlivka u pogledu kvaliteta biće sprovedena simulacije primenom „Altair Inspire Cast“ 2022.2 programskog paketa, a u obzir će biti uzeta i dosadašnja iskustava iz livačke prakse. Vrednosti faktora koji utiču na poroznost odlivka i izbor faktorskih nivoa usvojeni su na osnovu dosadašnje prakse, literature, iskustva i pojedinačnih preliminarnih ispitivanja koja su prikazana u tabeli 1 [9].

Nivoi	Vreme livenja	Temperatura livenja	Temperatura kalupa
	t/s	T/°C	T"/°C
Gornji nivo	10	1600	40
Osnovni nivo	8	1550	30
Donji nivo	6	1500	20

Plan matrica izvođenja eksperimenta data je u tabeli 2. Tokom izvođenja eksperimenta svi ostali parametri od uticaja na pojavu poroznosti u odlivku održavani su konstantnim: hemijski sastav za X120Mn12, sastav i vlažnost kalupne smeše, sastav i vlažnost jezgarne smeše kao i visine livenja.

Tačka plana	Matrica plana				Radni parametri		
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	t/s	T/°C	T"/°C
1	1	-1	-1	-1	6	1500	20
2	1	+1	-1	-1	10	1500	20
3	1	-1	+1	-1	6	1600	20
4	1	+1	+1	-1	10	1600	20
5	1	-1	-1	+1	6	1500	40
6	1	+1	-1	+1	10	1500	40
7	1	-1	+1	+1	6	1600	40
8	1	+1	+1	+1	10	1600	40
9	1	0	0	0	8	1550	30

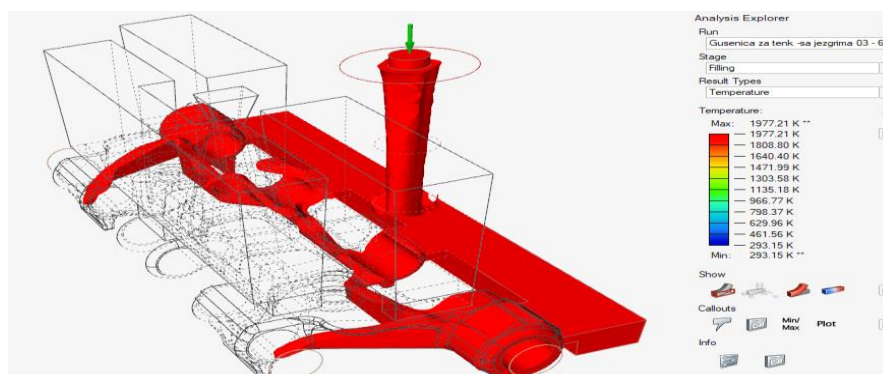
Merenje vremena livenja vršeno je štopericom. Merenje temperature liva vršeno je potapajćim pirometrom. Merenje temperature livačke forme vršeno je beskontaktnim IC termometrom. Vrednost pojave poroznosti u karakterističnim presecima utvrđena je pregledima simulacija moguće pojave poroznosti za svaki uzorak koji je rađen korišćenjem programskog paketa Altair Inspire Cast.

3. REZULTATI SIMULACIJE LIVENJA

3.1 Prikaz rezultata simulacije punjenja kalupa

Simulacije su rađene prema utvrđenim parametrima (vreme livenja, temperatura livenja i temperatura livačke forme), uz održavanje ostalih parametara konstantnim a u cilju dobijanja najpovoljnijih parametara

za livenje dela koji zadovoljava zahteve kvaliteta. Prikazivanje rezultata simulacije livenja u korišćenom programskom paketu omogućeno je po više parametara od rasporeda temperatura, fronta rastopljenog metala, pritiska u kalupu, mestima poroznosti, erozije kalupa i drugih parametara bitnih za procese popunjavanja kalupne šupljine, mesta hladnih zavara i hlađenja odlivka. Na slici 4. prikazano je punjenje kalupa za tip rezultata promene temperature.



Slika 4. Punjenje kalupa

Kao veoma bitni kriterijumi u simulaciji procesa livenja pratiće se maksimalne vrednosti Niyama kriterijuma i kriterijuma poroznosti [10]. Iz programskog paketa određena je vrednost poroznosti na 2% na osnovu čega se može zaključiti da u karakterističnim presecima nema poroznosti. Niyama kriterijum poznat po predviđanju skupljanja u čeličnim odlivcima, zasnovan je na temperaturnom gradijentu i brzini očvršćavanja. Niyama kriterijum koju je izračunat tokom simulacije sa podešenom vrednošću na 0,9%. Ukupno zapreminsko povlačenje u odlivku dobijenog sa parametrima livenja iz prve tačke plana iznosi 69.514,38 mm³. Maksimalna vrednost Niyama kriterijuma prikazane posle simulacije u programu sa parametrima livenja iz prve tačke plana iznosi 18,52.

3.2 Utvrđivanje najpovoljnijih parametara procesa livenja

Pregledom karakterističnih preseka bez poroznosti izdvojio se presek preko otvora kao najkritičniji, tako da se on uzima kao merodavan za dalju analizu. Utvrđivanje najpovoljnijih procesnih parametar livenja se vrši po tačkama plana a rangiraju se zapremina ukupnog povlačenja i maksimalne vrednosti Niyama kriterijuma nakon procesa simulacije livenja. Rezultati su rangirani u rasponu od 1 do 9 i prikazani su u tabali 3. Rang 1 predstavlja minimalnu vrednost, a rang 9 maksimalnu vrednost u simulacijama.

Tabela 3. Pregled rezultata iz simulacija				
Tačka plana	Radni parametri	Zapremina ukupnog povlačenja	Maksimalna vrednost Niyama kriterijuma	Rang
1	6 s; 1500 °C; 20 °C	69.514,38 mm ³	18,52	1
2	10 s; 1500 °C; 20 °C	80.305,27 mm ³	18,75	4
3	6 s; 1600 °C; 20 °C	124.397,80 mm ³	47,17	8
4	10 s; 1600 °C; 20 °C	118.750,74 mm ³	46,03	6
5	6 s; 1500 °C; 40 °C	69.557,87 mm ³	18,66	2
6	10 s; 1500 °C; 40 °C	80.104,87 mm ³	18,54	3
7	6 s; 1600 °C; 40 °C	123.606,53 mm ³	56,53	7
8	10 s; 1600 °C; 40 °C	105.240,26 mm ³	55,01	5
9	8 s; 1550 °C; 30 °C	124.584,29 mm ³	36,94	9

Na osnovu pregleda rezultata simulacije, na osnovu radnih parametara i posmatranih kriterijuma može se zaključiti da na veličinu ukupne zapremine povlačenja, vreme ulivanja ima najmanji uticaj, povećanje temperature kalupa ima nešto veći uticaj dok najveći uticaj ima povećanje temperature liva. Maksimalna vrednost Niyama kriterijuma povećava se sa porastom zapremine ukupnog povlačenja. Najmanju vrednost povlačenja i maksimalne vrednosti Niyama kriterijuma dobijamo u prvoj tački plana tako da ti parametri treba da budu korišćeni prilikom procesa livenja u realnim uslovima.

4. DISKUSIJA

Na osnovu tehnoloških parametara datih u toku procesa simulacije u kalupima odliven je gusenični članak. Iz karakterističnog preseka (slika 5) vidi se da odlivak nema unutrašnjih grešaka.



Slika 5. Članak presečen u karakterističnom preseku - potvrda da nema unutrašnjih grešaka

Provera guseničnih članaka na savijanje vrši se na presama ili sličnim uređajima, u ovom slučaju provera na savijanje vršena je na mašini za ispitivanje zatezanjem koja omogućava kontinualan porast i merenje sile, uz zadovoljenje ostalih zahteva koji se tiču rasporeda oslonaca, položaja guseničnih članaka i delovanja sile. Provera savijanjem guseničnih članka sa grebenom prema gore vrši se u toku serijske proizvodnje, na dva članka iz svake livačke šarže. Pri tome, rastojanje oslonaca treba da bude 350 mm, a članak na osloncima mora ležati horizontalno. Kad se na članku koji se ispituje dobije sila savijanja manja od propisane, ispituje se dvostruka količina članaka. U slučaju da se dobije zadovoljavajući rezultat na dva članka, livačka šarža se prihvata. Ako rezultat ponovo bude negativan, šarža može da se prijavi ponovo za prijem tek nakon ponovljene termičke obrade. Livačka šarža sa ponovnim nezadovoljavajućim rezultatom savijanja smatra se neispravnom i definitivno se odbacuje. Parametar koji je, takođe, pokazatelj mehaničkih karakteristika odlivaka guseničnih članaka je otpor pri savijanju. Pri savijanju odlivaka guseničnih članak posle termičke obrade moraju se dobiti sile ne manje od 300 kN, 320 kN i 240 kN respektivno. U slučaju da pri savijanju dođe do loma guseničnih članaka, navedene vrednosti sila moraju se dobiti pre nastanka loma. Ispitivanje je realizovano tako što je pomoću namenskog adaptera oslonjen članak gusenice na donji deo ispitnog uređaja – mašine za ispitivanje zatezanjem, dok je u gornjem delu uređaja postavljen pritiskivač. Izgled postavke ispitivanja sa člankom gusenice postavljenim na alatu je prikazan na slici 6. Iz dobijenih rezultata merenja su određene karakteristične vrednosti: maksimalna dostignuta sila $F_{max} = 349,5$ kN, i deformacija pri maksimalnoj sili koja iznosi $s_{F_{max}} = 52$ mm.



Slika 6. Izgled postavke za ispitivanje

Prema zahtevanim uslovima, izvršeno je ispitivanje na savijanje livenog članka gusenice na ispitnom uređaju SCHENCK-TREBEL RM400. Ispitivanje je izvršeno postepenim uvođenjem sile, konstantnom brzinom čeljusti mašine za ispitivanje zatezanjem od 5 mm/min. Tokom ispitivanja su zabeleženi podaci za silu i hod čeljusti, koji predstavlja i deformaciju (ugib) članka gusenice u osi dejstva sile.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu korištenjem CAD/CAE/CAM sistema potvrđeni su najpovoljniji parametri livenja radi dobijanja odlivka - guseničnog članka. CAD sistemi su od velike pomoći prilikom dizajniranja livačkog

modela i kontrole njegovog oblika i obavezne geometrije za livenje u pesku. CAE sistem služi za njihovo projektovanje usaglašavanje njihovih dimenzija i oblika kroz računarske simulacije procesa livenja. CAM sistemi omogućavaju izradu elemenata na numerički upravljanim mašinama što omogućava veći kvalitet delova izrađenih ovim postupkom nego tradicionalnim postupcima izrade na alatnim mašinama. Što kao posledicu ima bolje formiranje kalupne šupljine, a time i podizanje kvaliteta odlivenog dela. Provera predložene tehnologije livenja ostvarena je primenom simulacionog i optimizacionog alata „Altair Inspire Cast“ 2022.2 specijalizovanog za modeliranje i simulaciju svih faza procesa livenja metala. Verifikacija i konačna provera kvaliteta izvršena je mehaničkim ispitivanjima. Proveren je i kvalitet dobijenog dela kao potvrda o uspešno urađenim simulacijama i ispravno odabranim parametrima za livenje.

Kriterijum poroznost, ukupna zapremina povlačenja i Niyama kriterijum dobijeni simulacijom sa velikom verodostojnošću se podudaraju sa realnim stanjem. Veliki broj rezultata simulacije kao i mogućnost promene parametara livenja uz laku i jednostavnu promenu konfiguracije ulivnog sistema, hranitelja i ostalih delova kalupa daje ogromne mogućnosti u simulacijama i analizi rezultata.

6. LITERATURA

- [1] Petrović P., Radiša R., Petrović V., Lukić N., Danilov I.: Tehničko rešenje, Nova tehnologija livenja guseničnog članka, Beograd, CMSysLab 2016-01.
- [2] Nimbalkar S.L., Dalu R.S.: *Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate*, Perspectives in Science, Vol. 8, 2016, pp. 39-42.
- [3] Jie Z., Dongqi Z., Pengwei W., Gang W., Feng L., Penglong D.: *Numerical simulation research of investment casting for TiB₂/A356 aluminum base composite*, Rare Metal Materials and Engineering, Vol. 43, 2014, pp. 47-51.
- [4] Dabade U.A., Bhedasgaonkar R.C.: *Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique*, Procedia CIRP, Vol. 7, 2013., pp. 616-621.
- [5] Dučić N., Čojbašić Ž., Manasijević S., Radiša R., Slavković R., Milićević I.: *Optimization of the gating system for sand casting using genetic algorithm*, International Journal of Metalcasting, Vol. 11, 2017, pp. 255–265.
- [6] Slavković R., Dragičević S., Milićević, I., Jovičić A., Dučić N., Popović M.: *Integrisan proces proizvodnje abrazivnih reznih elemenata bagera u rudarskoj industriji*, IMK-14 – Istraživanje i razvoj u teškoj mašinogradnji Vol. 24, No 2, 2018, pp. 35-41.
- [7] Sourav D.: Learn Casting and Solidification with Altair Inspire Cast, 2019.
- [8] Harshwardhan L., Kaushik R., Bheda T., Somasundaram M., Narendrakumar U.: *Simulation of Sand-Casting Process Using Altair Inspire Cast*, Recent Advances in Materials Technologies, 2022, pp. 447-456., https://doi.org/10.1007/978-981-19-3895-5_36
- [9] Malik I., Sani A. A., Medi A.: *Study on using Casting Simulation Software for Design and Analysis of Riser Shapes in a Solidifying Casting Component*, Journal of Physics: Conference Series, 3rd Forum in Research, Science, and Technology International Conference 9-10 October, South Sumatera, Indonesia, 2019, pp.1-7., <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012036>
- [10] Zenon I.: *Discussion on Usability of the Niyama Criterion for Porosity Predicting in Cast Iron Castings*, Archives of Foundry Engineering, Vol. 17, 2017, pp. 196-204, <http://dx.doi.org/10.1515/afe-2017-0115>

Jovičić, A., Ikodinović, M., Baralić, J., Mitrović, A., Nikitović, A.

APPLICATION OF CAD/CAE/CAM SYSTEMS IN SAND CASTING

Abstract:

Track link castings that are used for composing a caterpillar track assembly, as the components of a caterpillar tank drive, are vital components. Therefore, as far as their production is concerned, casting is regarded as the most convenient methodological process. CAD/CAE/CAM tools that are used for simulation, optimisation and geometric product modelling, and casting tools appear as an ideal production solution. The track link casting process improvement has been conducted by application of the software package Altair Inspire Cast 2022.2. The concept that is established in this paper consists of virtual production, practical realisation of the applied technological process, the existing technology improvement, and finally, the quality control of the castings through mechanical testing.

Key words: casting, track link, CAD/CAE/CAM technology



Jotić, M.¹, Popović, M., Pjević, M., Bojović, B.²

PRIKAZ ADITIVNE TEHNOLOGIJE EKSTRUDIRANJEM MATERIJALA ZA IZRADU DELOVA OD KOMPOZITA

Rezime

U radu je prikazan proces aditivne tehnologije koja se bazira na ekstrudiranju materijala uz upotrebu ojačanja sa dugim vlaknima (karbon, fiberglas ili kevlar). Primena aditivnih tehnologija, odnosno 3D štampe, postala je jedna od najrasprostranjenijih metoda za dobijanje gotovih delova i prototipova. Glavni cilj ove tehnologije je brza i efikasna proizvodnja delova, međutim, često se postavlja pitanje kvaliteta finalnih proizvoda. Brojne kompanije fokusiraju se na razvoj specijalizovanih obradnih sistema, kao i inovativnih materijala i softvera. Kako bi se unapredili atributi kvaliteta i brze proizvodnje, izdvaja se kompanija Markforged sa hardverom na bazi tehnologije ekstrudiranja materijala i podrškom specijalizovanog softvera. Njihovom tehnologijom omogućavaju korišćenje specifičnih baznih materijala i mogućnosti dodavanja ojačanja u cilju dobijanja kompozita, čime se poboljšavaju mehaničke sposobnosti i performanse gotovih proizvoda.

Ključne reči: aditivna tehnologija - 3D štampa, kvalitet proizvodnje, Markforged, Eiger, kompozitni materijali

1. UVOD

Ekstrudiranje materijala je postupak aditivne proizvodnje u kome se materijal selektivno dozira kroz mlaznicu ili otvor. Polazni materijal je u obliku žice – filament ili pasta, a mehanizam vezivanja zasniva se na termičkoj ili hemijskoj reakciji sa aktivacijom toplotom, ultrazvukom ili hemijskom reakcijom među komponentama [1]. Ova tehnologija omogućava visoku fleksibilnost u izboru materijala i omogućava efikasnu proizvodnju delova sa kompleksnim geometrijama. Osnovni tehnološki parametri procesa su debljina sloja, temperatura ekstrudiranja, brzina i geometrijski parametri sloja, što sve zajedno utiče na kvalitet gotovog proizvoda, kvalitet obrade i mehaničke osobine.

Metoda ekstrudiranja može se primeniti na različite načine, od kojih je najčešći korišćenje standardizovanih polufabrikata u obliku žice-filamenta prečnika 1.75, 2.85 ili 3 mm, kao i granulata ili recikliranog materijala. Pored toga, metoda se koristi i u industriji prehrambenih proizvoda, betona, pa čak i za napredne biomedicinske aplikacije. Što se tiče samih filamenata, koriste se čisti polimerni filament, kompoziti od čistih polimera i kratkih karbonskih vlakana, kao i metalni prah sa polimernim nosiocem koji se koristi za posredno dobijanje metalnih delova putem sinterovanja. Ovakva raznovrsnost materijala omogućava aditivnoj tehnologiji da se primeni u širokom spektru industrija, od proizvodnje prototipova do serijske proizvodnje delova.

Markforged, kao jedna od vodećih kompanija u ovoj oblasti, koristi jedinstveni sistem polaganja ojačanja sa dugim vlaknima između slojeva osnovnog materijala, koji je takođe kompozit na bazi poliamida (PA) i kratkih karbonskih vlakana. Ova tehnologija omogućava značajno poboljšanje mehaničkih svojstava proizvoda, uključujući veću čvrstoću i otpornost na habanje, čime se omogućava primena ovih kompozitnih delova u zahtevnim industrijskim okruženjima. Inovativna rešenja poput ovih unapređuju sposobnost aditivne proizvodnje da konkuriše tradicionalnim metodama, naročito u aplikacijama gde su potrebni lagani, ali izuzetno izdržljivi delovi.

U radu je prikazan princip rada pri izradi standardnih epruveta metodom ekstrudiranja na štampaču Mark Two [2], kompanije Markforged od kompozitnih materijala sa dugim vlaknima.

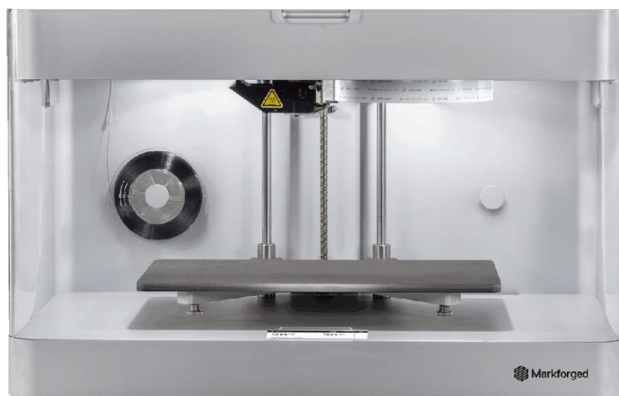
¹ Milica Jotić, master inženjer maš., Robert Bosch, Šimanovci, (milica.jotic@bosch.com)

² prof.dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc.dr. Miloš Pjević (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof.dr. Božica Bojović (bbojovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Boeogradu - Mašinski fakultet

2. EKSTRUDIRANJE KOMPOZITNIH MATERIJALA

Proces aditivnih proizvodnih tehnologija podrazumeva upotrebu odgovarajućeg hardvera (odnosno 3D štampača), podršku softvera i odgovarajućih materijala. U radu je prikazan princip rada štampača Markforged *Mark 2* i softver za pripremu štampe, tj. slojeva *Eiger*, razvijen takođe od kompanije Markforged, koji nudi posebne mogućnosti prilikom definisanja procesa štampanja u odnosu na uobičajene softvere koje koriste drugi proizvođači. Opisani štampač ima mogućnost štampanja delova posebnim kompozitnim materijalima čime se omogućava kreiranje mašinskih delova male mase a koji su dovoljno čvrsti, u cilju zamene metalnih komponenti.

Na slici 1 prikazan je fizički izgled štampača *Mark 2* na kojoj se uočava i kotur sa dugim vlakom materijala za ojačanje. Štampač koristi dvostruku glavu za štampanje čime naizmenično nanosi dva različita materijala prilikom štampanja – Onyx, tj. PA sa kratkim karbonskim vlaknima i ojačanje u vidu dugih vlakana (karbon, fiberglas ili kevlar). Osnovni materijal (Onyx) se nalazi u posebnoj kutiji koja čuva materijal od vlage i spoljnih uticaja, a duga vlakna su na koturu u prostoru štampača.



Slika 1. Fizički izgled štampača Markforged Mark 2 [2]

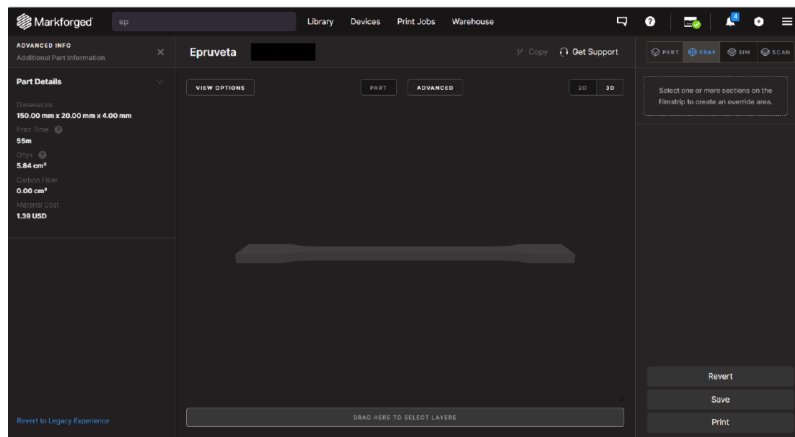
2.1 Korišćenje ojačanja prilikom pripreme procesa štampanja

Eiger softver za pripremu štampe, pored inovativnog dizajna i simulacionog prikaza procesa štampanja, sadrži podršku za korišćenje posebnih kompozitnih materijala uključujući karbonska vlakna i fiberglas ojačanja [4]. Korisnici mogu dodavati ojačanja nakon definisanja osnovnih parametara štampe, pomoću posebne kartice pod nazivom X-RAY za vizualizaciju modela. U nastavku je prikazan postupak pripreme modela za štampanje od osnovnog (baznog) materijala na bazi PA sa kratkim ugljeničnim vlaknima (Onyx) i ojačanja u vidu neprekidnih karbonskih (carbon) i staklenih (fiberglass) vlakana. Za model je izabrana i korišćena epruveta koja je modelirana prema standardu ISO 527-1, dužine 150 mm i debljine 4 mm [3].

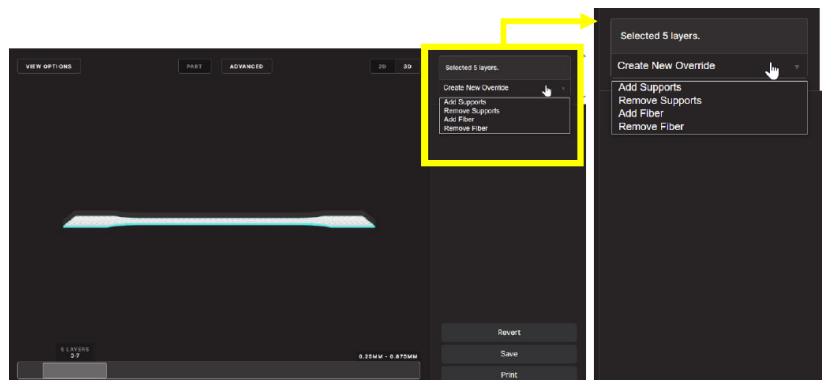
U tabeli 1, prikazani su bazni parametri štampe koji su korišćeni kao primer za pripremu štampe epruvete.

Tabela 1. Definisane parametara štampe za ojačanje u vidu fibreglasa	
Materijal	Onyx
Ojačanje	Fiberglass (osam, dvanaest, šestnaest slojeva)
Visina slojeva	0.1 mm
% ispune	50%
Debljina zidova	0.8 mm
Debljina površinskog zida	0.4 mm

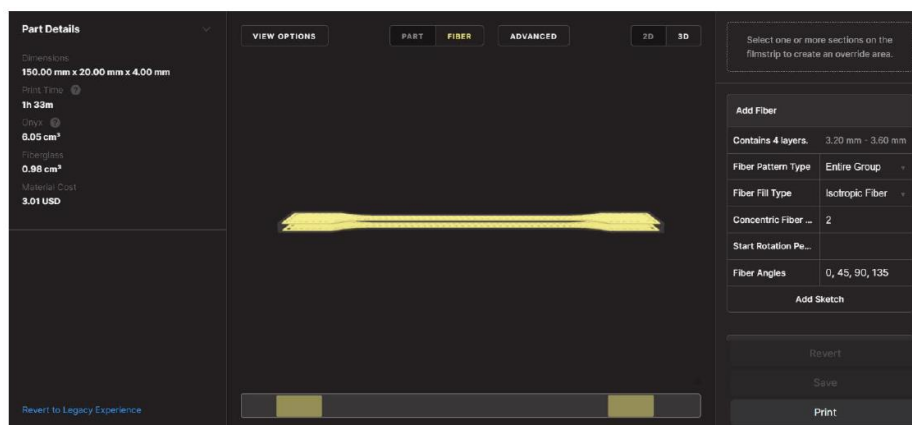
Korišćenjem kartice koja je prikazana na slici 2. omogućava se definisanje broja slojeva koji će biti ojačani, a softver pruža mogućnost simulacije raspoloživih ojačanja. Proces uključuje nekoliko koraka: definisanje slojeva koji će biti ojačani, izbor tipa ojačanja i podešavanje parametara ojačanja kao što su pravac štampe i način ispune. Korisnici mogu da dodaju ojačanja bez ograničenja, a na slici 3. i slici 4. prikazan je način dodavanja slojeva ojačanja.



Slika 2. Kartica X RAY



Slika 3. Generisanje slojeva ojačanja



Slika 4. Prvo varijantno rešenje, osam slojeva ojačanja

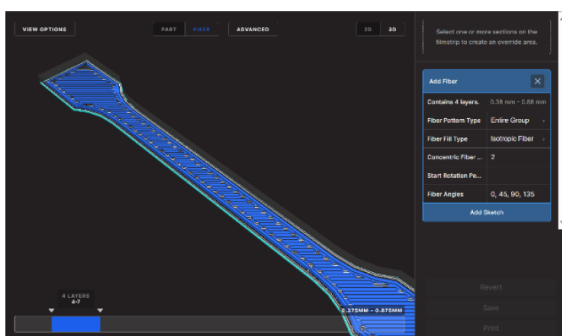
Dalje je prikazano nekoliko varijantnih rešenja u pogledu dodavanja slojeva ojačanja. Varijacije u broju slojeva ojačanja i izboru odgovarajućeg tipa mogu se posle štampe eksperimentalno ispitati na standardnoj kidalici radi definisanja mehaničkih sposobnosti i performansi samih materijala [5]. Prvo varijantno rešenje odnosi se na dodavanje osam slojeva ojačanja u vidu fiberglasa koji su ravnomerno raspoređeni u dva dela (Slika 5.).

Prvi slojevi koji se nanose na radnu platformu su u softveru prikazani sivom bojom i predstavljaju bazni materijal odnosno Onyx, dok se prvi slojevi ojačanja u vidu fiberglasa dodaju nakon četvrtog sloja baznog materijala i prikazani su žutom bojom.

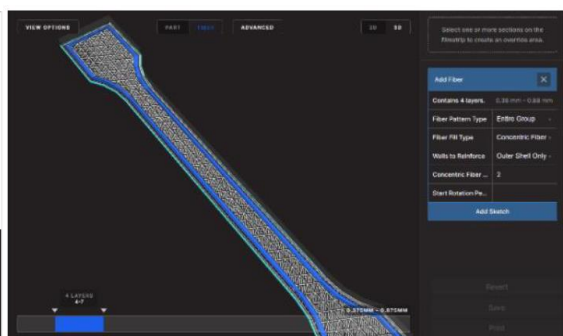


Slika 5. Prikaz osam slojeva ojačanja u vidu fiberglasa

Nakon definisanja slojeva koji će biti ojačani, softver nudi mogućnost definisanja parametara štampe za samo ojačanje. Razmatraće se dva načina postavljanja ojačanja duž celog modela. Prva opcija je izotropsko nanošenje materijala što podrazumeva da se materijal ravnomerno raspoređuje u svim pravcima (Slika 6.). Druga opcija podrazumeva koncentrično nanošenje materijala, odnosno samo po zidovima modela, u ovom slučaju standardne epruvete (Slika 7.). Ovakva razlika u metodama nanošenja materijala može značajno da utiče na mehaničke karakteristike gotovih proizvoda, što je važan aspekt u procesu dizajniranja i izrade ojačanih komponenti.



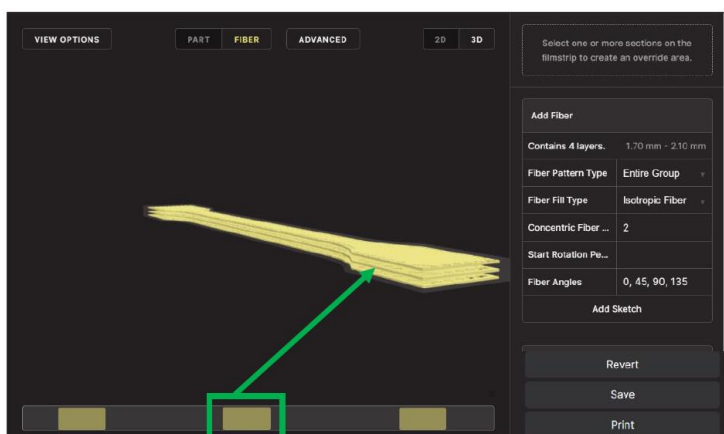
Slika 6. Izotropsko nanošenje materijala



Slika 7. Koncentrično nanošenje materijala

Pored načina nanošenja materijala, softver nudi mogućnost definisanja uglova pod kojim se nanosi materijal. Izabrani uglovi su redom 0, 45, 90 i 135 stepeni pomoću kojih se stvara mreža koja osigurava ravnomerno izotropsko raspoređivanje materijala duž celog modela epruvete. Ovakva opcija takođe doprinosi mehaničkim svojstvima finalnih proizvoda, a varijacija uglova pod kojim se nanosi materijal takođe može da varira.

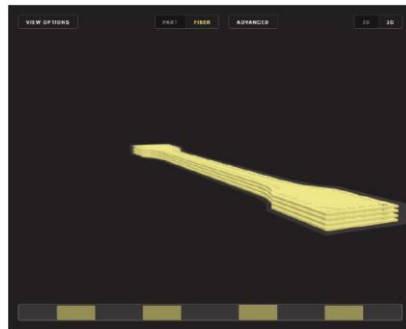
Drugo varijantno rešenje odnosi se na povećan broj slojeva ojačanja, odnosno još četiri sloja ojačanja u vidu fiberglasa dodaju se na sredini epruvete kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Drugo varijantno rešenje ojačanje u vidu fiberglasa

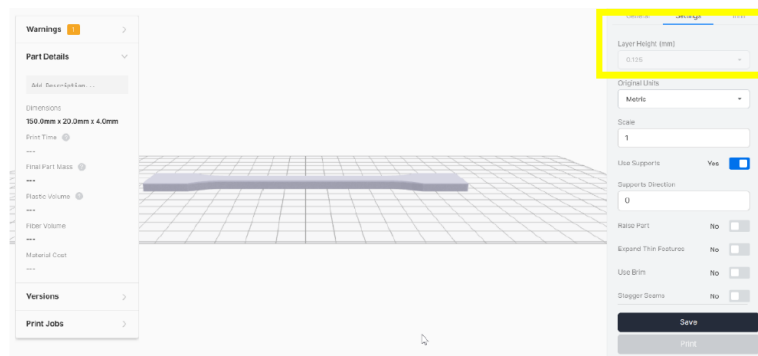
Parametri štampe koji su definisani u okviru prvog varijantnog rešenja su nepromenjeni. Jedina varijacija koja je rađena u okviru ovog rada jeste u broju slojeva ojačanja koji se dodaju radi mogućnosti ispitivanja već

pomenutih mehaničkih karakteristika materijala. U vezi sa tim, navodi se i treće varijantno rešenje koje podrazumeva šesnaest slojeva ojačanja u vidu fiberglasa. Dakle, slojevi ojačanja su sada ravnomerno raspoređeni po celoj dužini epruvete, kako je prikazano na slici 9.



Slika 9. Treće varijantno rešenje, ojačanje u vidu fiberglasa

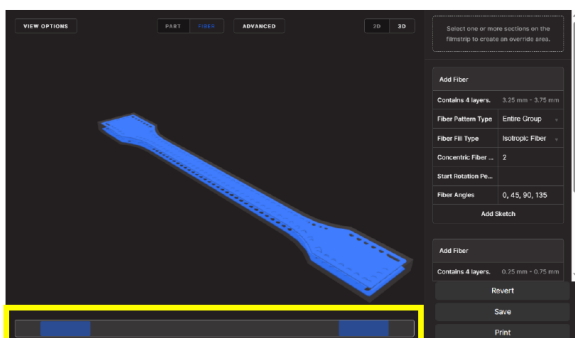
Pored ojačanja dugim vlaknima od fiberglasa, dalje je prikazan još jedan tip ojačanja, odnosno ojačanje karbonskim vlaknima. Procedura za definisanje slojeva ojačanja je ista, odnosno rađena su već definisana tri varijantna rešenja (osam, dvanaest i šesnaest slojeva ojačanja). Osnovna razlika je u tome što prilikom korišćenja karbonskih vlakana za ojačanja, visina slojeva može biti isključivo 0.125 mm (slika 10).



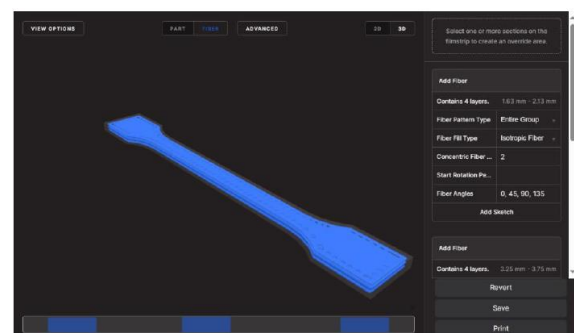
Slika 10. Visina slojeva ojačanja u vidu karbonskih vlakana od 0.125 mm

Parametri štampe za definisanje slojeva ojačanja, osim materijala, su takođe nepromenjeni i prikazani tabelom 2, odnosno koristi se izotropski tip nanošenja materijala pod već definisanim uglovima nanošenja, redom 0, 45, 90 i 135 stepeni. Na slikama 11-13 daje se prikaz tri varijantna rešenja prilikom korišćenja slojeva ojačanja u vidu karbona.

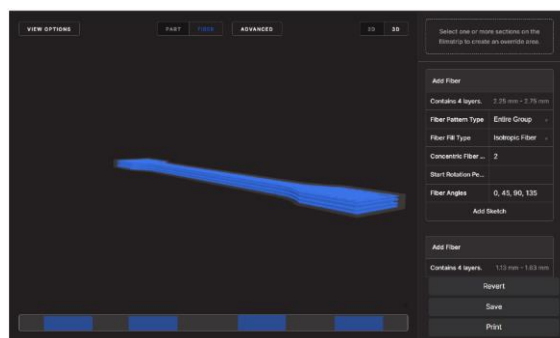
Tabela 2. Definisanje parametara štampe za ojačanje u vidu karbona	
Materijal	Onyx
Ojačanje	Carbon (osam slojeva, dvanaest, šestnaest slojeva)
Visina slojeva	0.125 mm
% ispune	50%
Debljina zidova	0.8 mm
Debljina površinskog zida	0.4 mm



Slika 11. Osam slojeva ojačanja u vidu karbona



Slika 12. Dvanaest slojeva ojačanja u vidu karbona



Slika 13. Šestnaest slojeva ojačanja u vidu karbona

Posle uspešne simulacije u okviru programa za pripremu slojeva i pripreme samog štampača, može se započeti i sa procesom samog fizičkog štampanja epruveta.

ZAKLJUČAK

Savremeno tržište zahteva brzu, efikasnu i pouzdanu izradu mašinskih delova, pri čemu je ključno obezbediti i brzinu i kvalitet proizvodnje, što predstavlja značajan izazov u industriji. Aditivne tehnologije tj. 3D štampa, uspešno ispunjavaju zahteve za brzom proizvodnjom. Iako je brzina proizvodnje često prednost, kvalitet finalnih proizvoda ostaje ključni izazov. Napredne tehnologije i materijali, prikazani u ovom radu, omogućavaju postizanje visokog kvaliteta, naročito u pogledu mehaničkih performansi i otpornosti delova pod zahtevnim uslovima rada. Dodavanjem ojačanja u osnovni materijal, postiže se veća otpornost delova na opterećenja, čime se proširuje njihova primena u industriji. Ovakvi kompozitni materijali sa ojačanjima mogu zameniti tradicionalne materijale, poput aluminijumskih legura, u aplikacijama gde je neophodna veća krutost i otpornost na opterećenje, što dodatno povećava njihov značaj u industrijskoj proizvodnji.

LITERATURA

- [1] SRPS EN ISO 17296-2:2017, *Aditivne tehnologije – Opšti principi – Deo 2: Pregled kategorija procesa i punjenje*, 2017.
- [2] Markforged, Mark 2, Flagship Continuous Fiber Composite 3D Printer, <https://markforged.com/3d-printers/mark-two/>, [15.9.2024].
- [3] ISO 527-1:2012, *Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles*, 2012.
- [4] Markforged Eiger, <https://www.eiger.io/signin>, [15.9.2024].
- [5] Jotić M., *Eksperimentalno ispitivanje epruveta na zatezanje od polimera i kompozita dobijenih aditivnom tehnologijom*, Master rad, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, 2024.

Jotić, M., Popović, M., Pjević, M., Bojović, B.

OVERVIEW OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY BY MATERIAL EXTRUSION FOR COMPOSITE PART PRODUCTION

Abstract: This paper presents the process of additive manufacturing technology based on material extrusion, using long-fiber reinforcement (carbon, fiberglass, or Kevlar). The application of additive technologies, specifically 3D printing, has become one of the most widespread methods for producing finished parts and prototypes. The main goal of this technology is the fast and efficient production of parts; however, the quality of the final products is often questioned. Many companies focus on the development of specialized machining systems, as well as innovative materials and software. Markforged stands out in advancing the attributes of quality and rapid production with its hardware based on material extrusion technology, supported by specialized software. Their technology allows the use of specific base materials and the addition of reinforcements to create composites, thereby improving the mechanical properties and performance of the finished products.

Key words: Additive manufacturing - 3D printing, production quality, Markforged, Eiger, composite materials



Krezovic, N.,¹ Bojović, B., Pjević, M., Popović, M.²

PROJEKTOVANJE I IZRADA OKVIRA BESPILOTNE LETELICE PRIMENOM GENERATIVNOG DIZAJNA I ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Rezime

U ovom radu je prikazan proces projektovanja prototipa okvira za bespilotnu letelicu primenom generativnog dizajna u okruženju Autodesk Fusion i njegova izrada primenom aditivnih proizvodnih tehnologija, konkretno postupkom fotopolimerizacije u kadi. Jedan od značajnijih napredaka u proizvodnoj industriji predstavlja razvoj aditivnih proizvodnih tehnologija, koje omogućavaju izradu kompleksnih struktura. Ove tehnologije u kombinaciji sa generativnim dizajnom, koji koristi algoritme i veštačku inteligenciju za stvaranje optimizovanih oblika, transformišu tradicionalne pristupe u dizajnu i proizvodnji. Bespilotne letelice, kao jedan od najbrže rastućih segmenata u vazduhoplovnoj industriji, predstavljaju idealnu platformu za primenu ovih agilnih tehnologija, sa ciljem izrade lakših i funkcionalno prilagođenijih letelica.

Ključne reči: bespilotna letelica, generativni dizajn, aditivne proizvodne tehnologije, Autodesk Fusion

1. UVOD

Cilj ovog rada je istraživanje kako se aditivne proizvodne tehnologije i generativni dizajn integrišu u proces izrade okvira bespilotnih letelica, te procena prednosti i izazovi ove integracije. Kroz detaljnu analizu i praktičnu primenu, predstavljene su mogućnosti koje ove tehnologije nude u optimizaciji procesa proizvodnje i unapređenju performansi bespilotnih letelica. Namera je da se utvrdi kako ove tehnologije mogu doprineti unapređenju performansi, smanjenju težine i optimizaciji proizvodnih troškova u odnosu na tradicionalne metode proizvodnje.

Integracija aditivnih proizvodnih tehnologija i generativnog dizajna u proizvodnji bespilotnih letelica ima potencijal da revolucionariše način na koji se ove letelice dizajniraju i proizvode. U tradicionalnoj proizvodnji, dizajneri su često ograničeni geometrijom i proizvodnim metodama, što može dovesti do kompromisa u performansama i težini letelice. Sa druge strane aditivne tehnologije omogućavaju stvaranje komponenti sa složenim strukturama koje bi bilo nemoguće ili izuzetno teško proizvesti korišćenjem tradicionalnih metoda. Generativni dizajn dodatno povećava ove mogućnosti time što omogućava automatizovano generisanje i optimizaciju dizajnerskih rešenja na osnovu specifičnih ulaza i ograničenja. Ovo znači da se mogu postići geometrije koje su istovremeno lakše, jače i energetski efikasnije, što je posebno važno u razvoju bespilotnih letelica, koje predstavljaju jedan od najbrže rastućih segmenata u vazduhoplovnoj industriji, gde svaki gram težine i svaki aspekt aerodinamike mogu značajno uticati na performanse.

1.1 Aditivne proizvodne tehnologije

Termin aditivne proizvodne tehnologije (APT) se odnosi na postupke proizvodnje pri kojima se materijal dodaje, tj. zasniva se na sukcesivnom dodavanju slojeva jedan preko drugog. Postoji više kriterijuma prema kojima se mogu podeliti aditivne proizvodne tehnologije. Prema kategoriji procesa APT se mogu podeliti na:

- Fotopolimerizacija u kadi (Vat photopolymerization),
- Diektna 3D štampa / Brizganje materijala (Material jetting),
- Vezivna 3D štampa / Brizganje veziva (Binder jetting),
- Fuzija nanetog praha (Powder bed fusion),

¹ Nemanja Krezović, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (1278-2022@studenti.mas.bg.ac.rs)

² prof. dr Božica Bojović, (bbojovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet; Kraljice Marije 16

- Ekstrudiranje materijala (Material extrusion),
- Spajanje usmeravanjem energije / Taloženje pod direktnim dejstvom energije (Directed energy deposition),
- Laminacija folija / listova (Sheet lamination) [1].

1.2 Generativni dizajn

Generativni dizajn je iterativni proces istraživanja dizajna koji koristi softver vođen veštačkom inteligencijom za generisanje različitih rešenja dizajna koji ispunjavaju određene zahteve. Za razliku od tradicionalnog pristupa dizajnu, gde proces počinje modelom zasnovanim na znanju inženjera, generativni dizajn počinje sa parametrima dizajna i koristi veštačku inteligenciju za stvaranje modela [2].

Aplikacije generativnog dizajna postoje u brojnim oblastima – od arhitekture do aeronautike. Inženjeri koji koriste generativni dizajn često pokušavaju da reše složene inženjerske izazove. Takvi izazovi uključuju smanjenje težine komponenti, troškova proizvodnje i optimizaciju performansi.

1.3 Bepilotne letelice

Bepilotna letelica (BPL) ili popularno dron (engl. *drone* – „*trut*“), je vazduhoplov kojim upravlja navigator, pilot sa daljinskim prenosom signala sa zemlje ili koji leti autonomno po zadatim zapamćenim podacima. Bepilotne letelice se koriste u civilne i vojne svrhe.

Klasifikacija bepilotnih letelica je izvršena prema više aspekata, prema nameni BPL možemo podeliti na:

- Bobbene,
- Izviđačke,
- Logističke,
- Eksperimentalne,
- Civilne [3].

Jedna relativno novija kategorija bepilotnih letelica jesu BPL sa pogledom iz prvog lica ili dronovi sa FPV (engl. *First Person View*) sistemom. Ustaljen naziv za ovu kategoriju dronova je FPV kategorija dronova. Predstavljaju vrstu bepilotnih letelica koje omogućavaju pilotu da vidi ono što BPL „vidi“ u realnom vremenu, kroz kameru postavljenu na letelici. Ova tehnologija je veoma popularna u raznim oblastima, uključujući brzinska takmičenja, snimanje video sadržaja, istraživanje i fotografisanje [4]. Na slici 1 se može videti primer FPV drona.

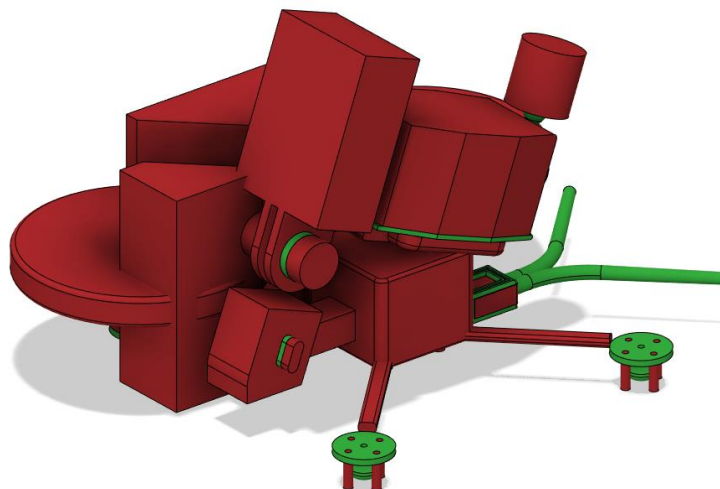


Slika 1: FPV dron [5]

2. PROJEKTOVANJE OKVIRA BESPILOTNE LETELICE

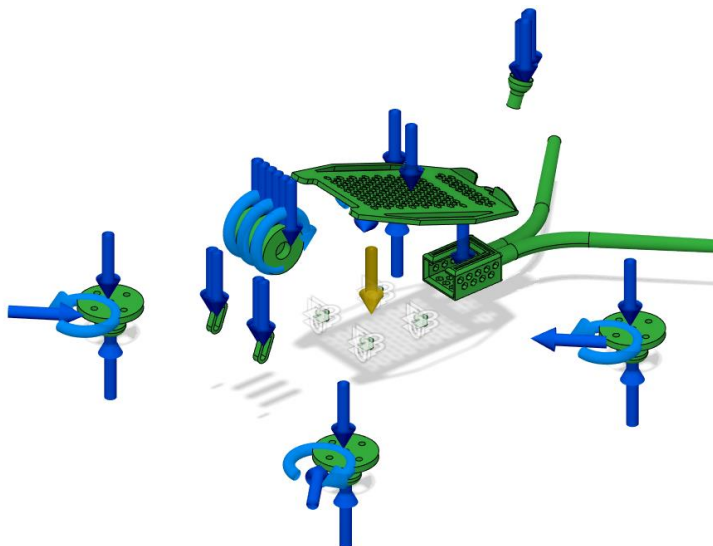
Prvi korak pri projektovanju okvira BPL predstavlja određivanje namene i veličine same BPL. Odlučeno je da se izrađuje okvir za BPL koja spada u kategoriju malih letelica čija je namena letenje slobodnim stilom i zabava. Okvir BPL je orijentisan ostalim funkcionalnim komponentama koje odgovaraju zadatoj nameni i veličini. Osnovne komponente FPV drona su: motori, propeleri, baterija, kontrolor leta, kontrolor brzine motora, radio prijemnik, video predajnik i video antena. Pri odabiru komponenti vođeno je računa o međusobnoj usaglašenosti, načinu vezivanja za okvir kao i ceni.

U softverskom okruženju Autodesk Fusion, proces kreiranja generativnog modela zasniva se na nizu koraka koji su neophodni za postizanje optimalnog dizajna, uzimajući u obzir sve zadate uslove i ograničenja. Prvi korak je obuhvatao precizno modeliranje komponenti, gde je definisana sačuvana geometrija, odnosno delovi koji moraju ostati nepromenjeni, kao i geometrija prepreka koja označava zone u kojima softver izbegava generisanje rešenja. Prilikom modeliranja komponenti vodilo se računa da konstrukcija okvira bude prilagođena najoptimalnijem funkcionisanju BPL.



Slika 2: Delimični prikaz sačuvanih geometrija (zelena boja) i geometrija prepreka (crvena boja)

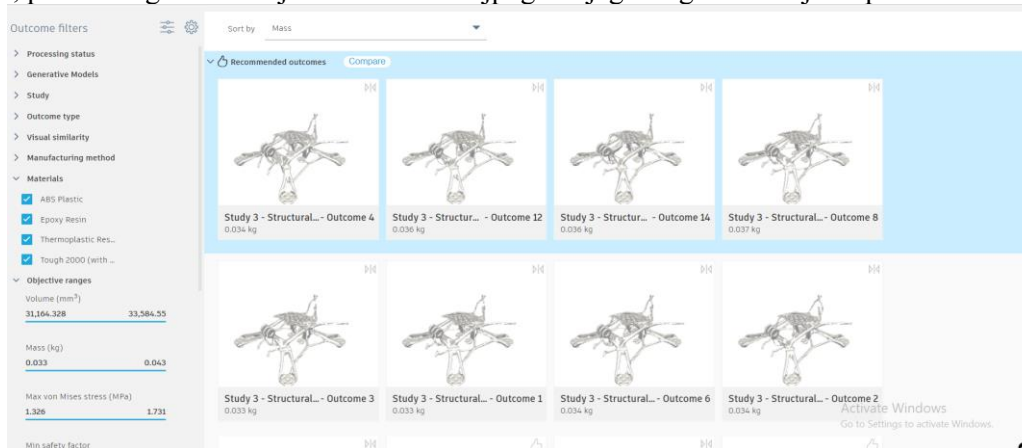
Nakon definisanja potrebnih geometrija neophodno je odrediti strukturalna ograničenja i opterećenja. Strukturalna ograničenja definišu koji deo strukture mora ostati statičan, u ovom slučaju odabrane su površine nosača kontrolora leta za statične iz razloga što je kontrolor leta najosetljivija komponenta vibracijama. Na slici 3 su prikazane sivim katancima površine odabrane za statične. Strukturalna opterećenja uključuju sve vrste sila, momenata i pritisaka koji deluju na telo. Ove informacije su ključne za osiguranje da generisani dizajn može da izdrži realna opterećenja tokom upotrebe. Prilikom analize uzete su u obzir sile kao što su: težine svih komponenti, sila uzgona motora, sile udara, momenti koje prave motori kao i sile otpora pri kretanju kroz vazduh za određene komponente. Strukturalna opterećenja kao i položaji njihovih dejstava se mogu videti na slici 3.



Slika 3: Prikaz svih strukturalnih ograničenja i opterećenja

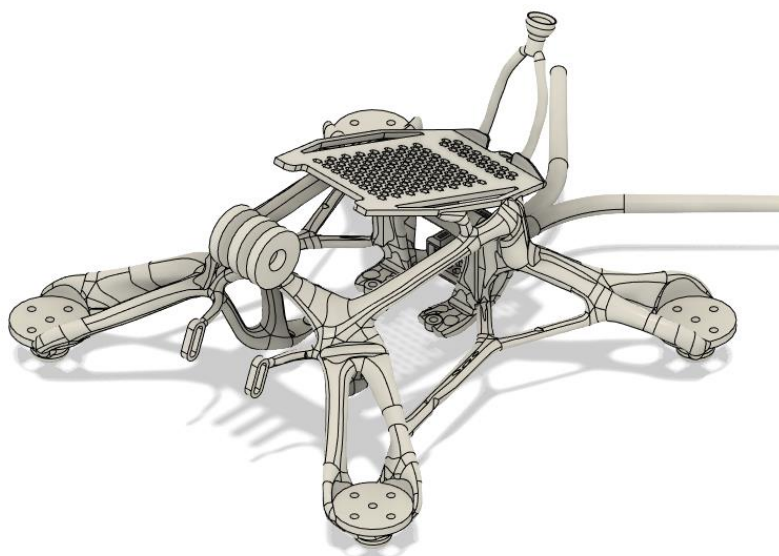
Pored strukturalnih ograničenja i opterećenja potrebno je definisati kriterijume dizajna i materijale za koje se vrši analiza. Kriterijumi dizajna obuhvataju cilj dizajna koji je postavljen na minimizaciju mase, stepen sigurnosti za koji je uzeta vrednost 2.5 kao i pomeraj koji je ograničen na 1 mm. Materijali koji su uzeti u analizu su ABS, Tough 2000, Epoxy Resin i Thermoplastic Resin, pri čemu svaki od njih karakteriše visoka čvrstoća, otpornost na udare i zadovoljavajuća izdržljivost na povišene temperature.

Nakon modelovanja komponenti i podešavanja svih relevantnih parametara, pristupilo se generisanju rešenja, uzimajući u obzir sva četiri navedena materijala. Funkcija istraživanja (explore) omogućava, nakon procesa generisanja, prikaz mogućih rešenja kao i odabir najpogodnijeg. Moguća rešenja su prikazana na slici 4.



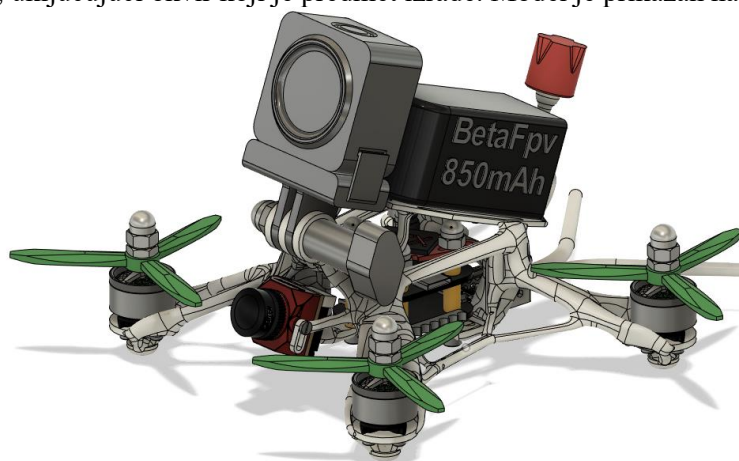
Slika 4: Prikaz mogućih rešenja

S obzirom da je cilj rada minimizacija mase, odabrano je rešenje sa najmanjom masom. U ovom slučaju, najmanju masu imao je deo izrađen od materijala ABS, a poslednja iteracija generativnog dizajna za navedeni materijal prikazana je na slici 4..



Slika 4: Poslednja iteracija odabranog modela

U cilju lakše vizualizacije i provere uklapanja delova, izrađen je trodimenzionalni model bespilotne letelice sa svim komponentama, uključujući okvir koji je predmet izrade. Model je prikazan na slici 5.



Slika 5: Trodimenzionalni prikaz bespilotne letelice

Nakon vizualizacije i provere uklapanja delova izvršena je i provera da li je težina bespilotne letelice u skladu sa maksimalnim uzgonom koji mogu da obezbede odabrani motori. Prema tehničkim specifikacijama proizvođača, maksimalna sila uzgona po motoru iznosi 5.4 N. S obzirom na to da bespilotna letelica za koju se izrađuje okvir koristi četiri motora, maksimalna sila uzgona iznosi 21.6 N. Ova vrednost je više nego dovoljna za osiguranje optimalnog funkcionisanja bespilotne letelice, čija težina iznosi 2.69 N.

3. IZRADA OKVIRA BESPILOTNE LETELICE

Priprema dela za izradu izvršena u softverskom okruženju *AnyCubic Photon Workshop*, gde je model optimalno pozicioniran, generisane potpore i definisani parametri kao što su visina sloja, vreme izlaganja UV zracima i ostale specifične postavke koje utiču na kvalitet i preciznost finalnog proizvoda.

Nakon rada u softverskom okruženju *AnyCubic Photon Workshop* pristupilo se izradi dela. Deo je izrađen na 3D štampaču *AnyCubic Photon Mono 4K*. Materijal koji je korišćen je Hard-Tough Resin proizvođača *Esun* koji karakteriše zadovoljavajuća čvrstoća i tvrdoća. Po završetku izrade deo je bio prekriven neočvrslom smolom. U cilju uklanjanja neočvrslom smole deo je postavljen u *AnyCubic Wash & Cure Machine 2.0* za proces čišćenja, a posle uklanjanja potpora deo opet vraćen na istu mašinu kako bi se izvršilo finalno očvršćavanje. Izrađen deo se može videti na slici 6.



Slika 6: Izrađen deo

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan proces izrade okvira za bespilotnu letelicu primenom generativnog dizajna i aditivnih proizvodnih tehnologija. Kombinacija ovih pristupa omogućila je optimizaciju strukture u pogledu mehaničkih karakteristika i težine, što je od ključnog značaja za performanse bespilotne letelice.

Generativni dizajn je omogućio generisanje geometrije koja je prilagođena specifičnim opterećenjima i ograničenjima. Primena ovog procesa dovela je do dizajna koji je, u poređenju sa tradicionalnim metodama značajno smanjio težinu okvira bespilotne letelice sa zadovoljavajućom čvrstoćom.

Sa druge strane, primena aditivnih proizvodnih tehnologija, konkretno fotopolimerizacije u kadi, omogućila je proizvodnju složenih geometrijskih oblika koji bi bili teško ostvarivi tradicionalnim metodama.

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da je primenom generativnog dizajna i aditivnih proizvodnih tehnologija moguće značajno poboljšati karakteristike okvira bespilotne letelice, čime se omogućava optimizacija ukupnih performansi letelice. Ovaj pristup predstavlja perspektivan pravac za dalji razvoj bespilotnih letelica, posebno u pogledu mase konstrukcije i prilagođavanja specifičnim potrebama korisnika.

5. LITERATURA

- [1] M. Popović, M. Pjević, Aditivne proizvodne tehnologije, hendauti za spremanje usmenog ispita kursa aditivne proizvodne tehnologije, Mašinskog fakulteta u Beogradu, 2023
- [2] Formlabs, Generative Design 101
<https://formlabs.com/blog/generative-design/> [17.8.2024.]
- [3] Wikipedia, Unmanned aerial vehicle
https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle [12.8.2024.]
- [4] OscarLiang, The Types of Drones Explained: FPV Drones, Camera Drones, Toy Drones
<https://oscarliang.com/types-of-drones/> [23.8.2024.]
- [5] InsideFPV, Drones <https://insidefpv.com/collections/drones> [25.9.2024]

Krezovic, N., Bojović, B., Pjević, M., Popović, M.

DESIGN AND MANUFACTURE OF A UNMANNED AERIAL VEHICLE FRAME USING GENERATIVE DESIGN AND ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract: *This paper presents the process of designing a prototype unmanned aerial vehicle (UAV) frame using generative design in Autodesk Fusion environment and its production through additive manufacturing technologies, specifically the vat photopolymerization. One of the most significant advances in the manufacturing industry is the development of additive manufacturing technologies, which enable the creation of complex structures. These technologies, combined with generative design, which utilizes algorithms and artificial intelligence to create optimized shapes, are transforming traditional approaches in design and production. UAVs, as one of the fastest-growing segments of the aviation industry, represent an ideal platform for the application of these agile technologies, producing lighter and more functionally adapted aircraft.*

Key words: *unmanned aerial vehicle, generative design, additive manufacturing technologies, Autodesk Fusion*



Lazarević, N.¹⁾, Anđelić, K.²⁾, Lazić, A.³⁾, Popović M.⁴⁾, Pjević, M.⁵⁾, Milovanović, A.⁶⁾

UTICAJ PROMENE PARAMETARA NA MEHANIČKA SVOJSTVA PROIZVODA DOBIJENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

Rezime

Sa razvojem tehnologije, aditivne metode proizvodnje nalaze sve veću primenu u izradi delova složene geometrije. Izbor materijala mora biti usklađen specifičnoj primeni i potrebnim mehaničkim svojstvima. Ova studija prikazuje rezultate eksperimentalnog testiranja 3D štampanih uzoraka, s ciljem evaluacije mehaničkih svojstava materijala koji imaju najširu primenu u 3D štampanju FDM tehnologijom, fokusirajući se na svojstvo elastičnosti i zateznu čvrstoću. Među materijalima istakao se PLA, demonstrirajući najviše vrednosti elastičnosti i zatezne čvrstoće. Imajući to u vidu, odabran je za dalja istraživanja uticaja temperature mlaznice i broja zidova na njegovo mehaničko ponašanje.

Ključne reči: Aditivne tehnologije, Zatezna čvrstoća, Temperatura, FDM

1. UVOD

Jedan od osnovnih ciljeva u razvoju proizvoda je ostvarivanje visokog kvaliteta samog proizvoda, a da pritom vreme proizvodnje bude što je moguće kraće, uz ostvarivanje što manjih troškova. Razvojem tržišta [1], marketing ima sve veću ulogu, pa se na osnovu toga tržište definiše zahtevima od strane kupaca. Glavni razlog za sve to je globalizacija tržišta i pojačana konkurencija među proizvođačima. Aditivna tehnologija omogućava nam izradu trodimenzionalnih delova od različitih vrsta materijala, dodavanjem slojeva. Prednost ovakvog načina dobijanja proizvoda je u tome što se ne koriste alati, kao kod konvencionalnih metoda obrade, pa zbog toga postoji visok stepen fleksibilnosti. Proizvodi koji se dobijaju mogu posedovati veoma složenu geometriju i na jednoj mašini može se dobiti veći broj različitih proizvoda. U zavisnosti od primene, aditivne tehnologije se mogu podeliti na [2]:

- Tehnologije za brzu izradu prototipova (rapid prototyping, eng.)
- Tehnologije za brzu izradu alata i kalupa (rapid tooling, eng.)
- Tehnologije za direktnu proizvodnju (rapid manufacturing, eng.)

Kao što je već rečeno, aditivnom tehnologijom dobijaju se proizvodi spajanjem slojeva materijala, sloj po sloj [3]. Moguće je na više načina istopiti materijal, u zavisnosti od same tehnologije, direktnim topljenjem, polimerizacijom i zračenjem ili omekšavanjem nakon čega se novi naneti sloj spaja sa prethodnim. Aditivna tehnologija omogućava dobijanje prototipa ili funkcionalnog dela, što znači da je moguće izraditi delove koji će se koristiti kao konačni bez potrebe za daljim tehnologijama obrade. Priprema 3D modela izvodi se na računaru [4], što korisniku omogućava brz pristup i eventualnu izmenu podataka u toku procesa izrade objekta. Primenom metoda aditivne tehnologije, upotreba materijala je minimalna, bez dodatnog rasipanja, pa je kod nekih metoda moguće reciklirati upotrebljeni metalni prah. Takođe, ova tehnologija omogućava dobijanje proizvoda kombinovanjem različitih vrsta materijala, čime se postižu različita mehanička svojstva [5]. Aditivne tehnologije možemo podeliti i u zavisnosti od kategorije procesa, prema standardu ASTM F2792-12a [2]:

- Fotopolimerizacija materijala u kadi (vat photopolymerization, eng.) – proces u kome se

¹⁾Natalija Lazarević, inž. maš., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (1070-2023@studenti.mas.bg.ac.rs)

²⁾Kristina Anđelić, inž. maš., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (1007-2023@studenti.mas.bg.ac.rs)

³⁾Aleksandar Lazić, inž. maš., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (1091-2023@studenti.mas.bg.ac.rs)

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

⁵⁾doc. dr Miloš Pjević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mpjevic@mas.bg.ac.rs)

⁶⁾Aleksa Milovanović, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, (amilovanovic@mas.bg.ac.rs)

polimerizacijom izvodi selektivno očvršćavanje tečnog fotopolimera. Široko poznat pod nazivom stereolitografija (Stereolithography – SLA, eng.).

- Brizganje materijala/Direktna 3D štampa (Material jetting, eng.) – proces u kome se kapljice materijala selektivno talože.
- Vezivna 3D štampa (Binder jetting, eng.) – proces u kome se na materijal u vidu praha selektivno nanosi tečno vezivno sredstvo.
- Spajanje praškastog materijala (Powder bed fusion, eng.) – proces u kome dolazi do fuzije materijala u vidu praha pod uticajem toplotne energije. Poznato i pod nazivom selektivno lasersko sinterovanje (Selective laser sintering – SLS, eng.)
- Ekstrudiranje materijala (Material extrusion, eng.) – proces u kome se rastopljeni materijal selektivno nanosi na podlogu ili prethodni sloj kroz mlaznicu. Poznata tehnologija je FDM (Fused deposition modeling, eng.).
- Deponovanje primenom usmerene energije (Directed energy deposition, eng.) – proces u kome se pomoću fokusirane toplotne energije izvršava topljenje i stapanje materijala koji se dozira.
- Laminiranje listova materijala (Sheet lamination, eng.) – proces u kome se listovi materijala kroje po definisanoj konturi i spajaju u cilju formiranja objekta.

2. UTICAJ VARIJACIJE MATERIJALA NA MEHANIČKA SVOJSTVA UZORAKA

Za ispitivanje su korišćeni uzorci dobijeni metodom ekstrudiranja rastopljenog materijala, u pravcu upravnom na pravac istezanja, radi postizanja maksimalne čvrstoće. Dimenzije uzoraka su u skladu sa standardom ISO 20753.

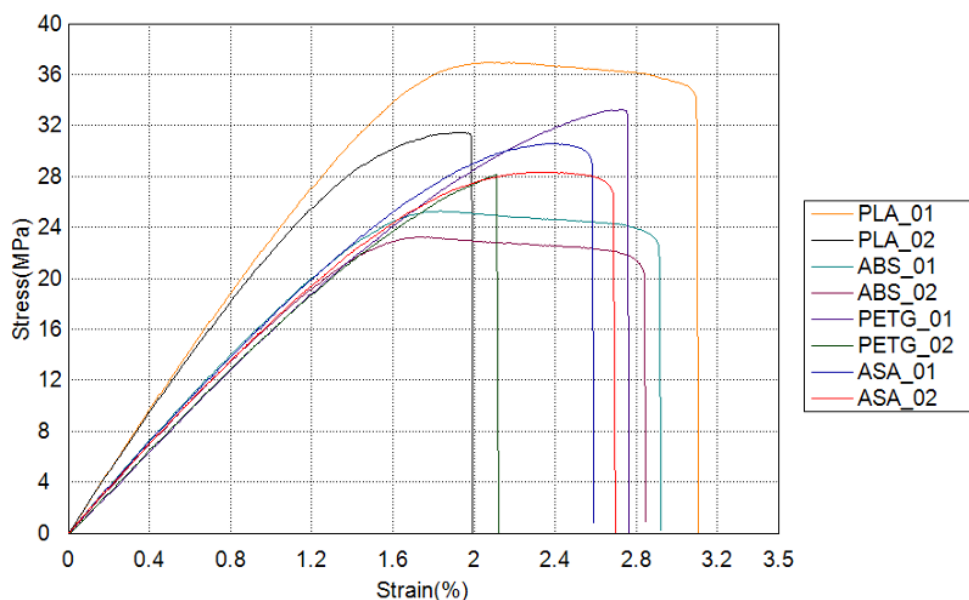
Inicijalno je vršeno ispitivanje svojstava različitih materijala, koji nalaze široku primenu [5] u proizvodnji delova pomenutom tehnologijom. Ispitivana su sledeća četiri materijala: PLA (Polylactic acid, eng.), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene, eng.), ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate, eng.) i PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol, eng.). Za izradu uzoraka korišćen je materijal proizvođača „Devil Design“. Za svaki materijal je bilo potrebno napraviti nekoliko uzoraka, kako bi rezultati bili pouzdani. S obzirom da je fokus na variranju materijala, svi parametri štampe su isto podešeni za sve materijale, izuzev temperature mlaznice, koja je prilagođena u skladu sa preporukama za specifične materijale.

Ispitivanje je vršeno na kidalici, koja sadrži čeljusti za pozicioniranje uzorka. Na slici 1 prikazan je način pozicioniranja na jednom od uzoraka, nakon pojave loma epruvete.



Slika 1. Primer uzorka pozicioniranog u čeljusti kidalice

Tokom testiranja na kidalici, komplementarni program obrađuje rezultate i predstavlja ih u vidu grafika. Primer jednog grafika u toku ispitivanja prikazan je na slici broj 2, gde se mogu videti krive za po dve testirane epruvete od svakog materijala, a nagli pad predstavlja trenutak loma uzorka. U pitanju je dijagram napon (ordinata) – deformacija (apscisa).



Slika 2. Prikaz grafika u toku testiranja za prve dve serije

Analiza rezultata fokusirana je na elastična svojstva materijala i njihovu zateznu čvrstoću. Najpre je izvršeno osrednjavanje rezultata dobijenih za svaki materijal pojedinačno, a potom i upoređivanje dobijenih vrednosti za različite materijale.

Osrednjene vrednosti zatezne čvrstoće i Jungovog modula elastičnosti za svaki od materijala prikazane su u tabeli broj 1.

Tabela 1. Osrednjene vrednosti dobijene ispitivanjem različitih materijala		
Materijal	Modul elastičnosti [MPa]	Zatezna čvrstoća [MPa]
PLA	2403,38	34,1805
ABS	1770,88	24,2464
PETG	1653,22	30,6932
ASA	1754,18	29,4590

Iz priloženog se može uočiti da je materijal ABS demonstrirao najniže vrednost krajnje zatezne čvrstoće. PETG se pokazao kao najmanje elastičan materijal, dok se PLA ističe kako po najvećem svojstvu elastičnosti, tako i po najvećoj zateznoj čvrstoći.

PLA spada u biomaterijale, biorazgradiv je i dobija se iz obnovljivih izvora. Prilikom štampe ne odaje štetna isparenja niti neprijatne mirise, pa nije potreban specijalni sistem za ventilaciju. Zbog navedenih karakteristika, ovaj materijal je pogodan za kućnu, tj. hobi varijantu. Ipak, treba imati u vidu da materijal PLA nije preporučljiv za dugotrajnu upotrebu u uslovima povišenih temperatura zbog svoje sklonosti ka deformacijama.

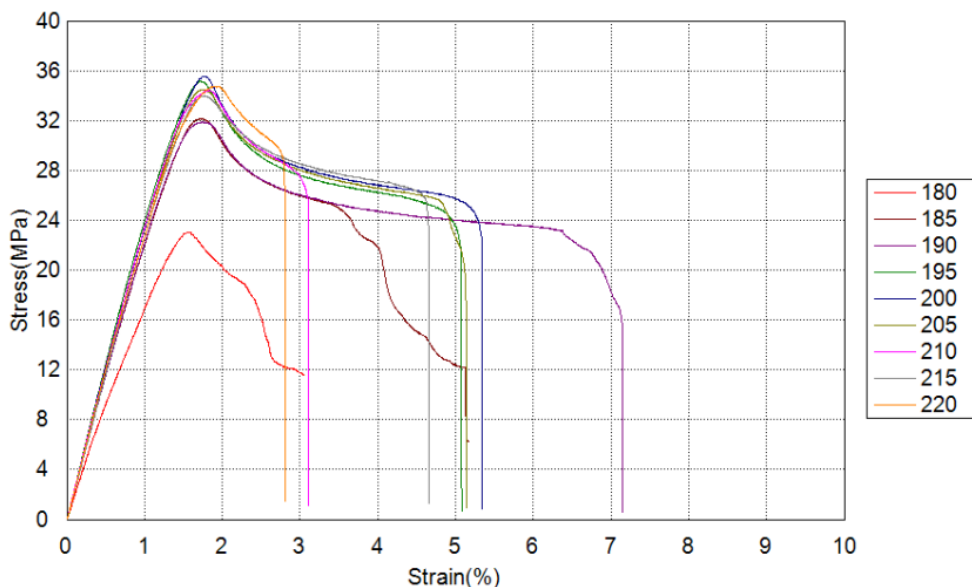
Materijali ASA i ABS pokazuju slična mehanička svojstva, s tim što ASA poseduje odličnu otpornost na UV zračenje i vremenske uslove. Međutim, prilikom ekstrudiranja ova dva materijala dolazi do pojave štetnih isparenja, pa je preporučljiva primena u prostorijama sa dobrom ventilacijom, kao i izbegavanje kontakta s hranom. Iz tog razloga, pomenuti materijali nisu pogodni za kućnu/hobi upotrebu, već širu primenu nalaze u industriji.

Kao najpogodniji za dalja ispitivanja izabran je materijal PLA, uzimajući u obzir njegove karakteristike, pogodnost za hobi primenu i dokazana mehanička svojstva.

3. UTICAJ VARIJACIJE TEMPERATURE NA MEHANIČKA SVOJSTVA UZORAKA

Dalje ispitivanje obuhvata analizu uticaja varijacije temperature mlaznice na svojstvo elastičnosti i zateznu čvrstoću uzorka. Prilikom štampe, svi ostali parametri su isto podešeni. Korišćeni materijal je PLA+, proizvođača Creality Ender, koji je korišćen za sva dalja ispitivanja. U nastavku svi prikazani rezultati predstavljaju osrednjene vrednosti nekoliko ispitivanih uzoraka. Preporučene vrednosti temperature mlaznice za štampu materijala PLA nalaze se u rasponu od 180-220 °C. U skladu sa tim, prilikom ispitivanja je za donju graničnu vrednost usvojena temperatura od 180 °C, a za gornju graničnu vrednost 220 °C. Temperatura je menjana u intervalima od po 5 °C. Na slici 3 prikazan je dijagram napon – deformacija za neke od uzoraka.

Radi preglednosti, prikazana je samo prva serija rezultata.

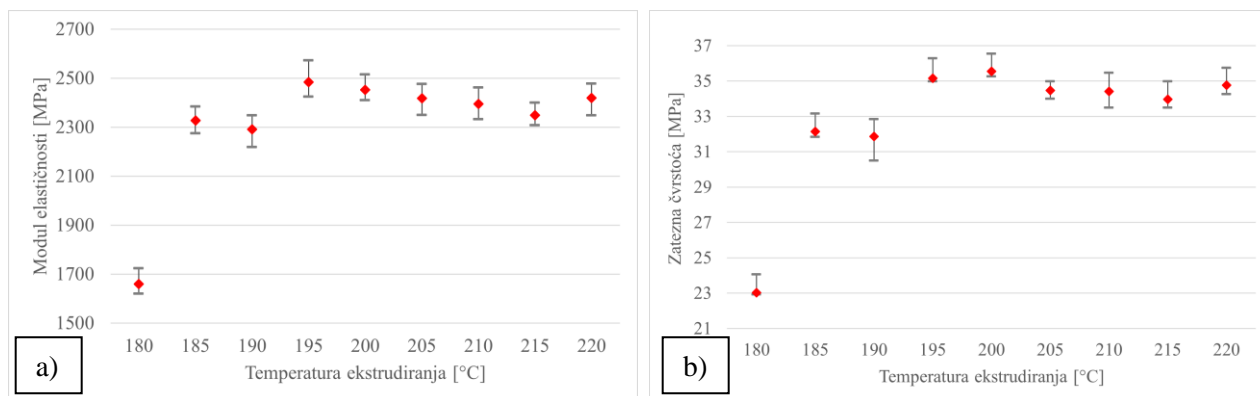


Slika 3. Prikaz grafika u toku testiranja za prvu seriju

Osrednjene vrednosti zatezne čvrstoće i Jungovog modula elastičnosti za svaku ispitivanu temperaturu prikazane su u tabeli broj 2.

Tabela 2. Osrednjene vrednosti dobijene ispitivanjem različitih temperatura mlaznice		
Temperatura [°C]	Modul elastičnosti [MPa]	Zatezna čvrstoća [MPa]
180	1659,24	23,0241
185	2327,07	32,1499
190	2291,71	31,8638
195	2483,84	35,1623
200	2451,83	35,5517
205	2417,56	34,4797
210	2394,33	34,4132
215	2349,25	33,9784
220	2418,52	34,7601

Rezultati su grafički prikazani na slici broj 4. Crevna oznaka predstavlja osrednjene vrednosti modula elastičnosti i zatezne čvrstoće za svaku temperaturu zasebno, a sive granične linije iznad i ispod nje predstavljaju odstupanja. Na slici 4. a) prikazan je dijagram zavisnosti modula elastičnosti od promene temperature ekstrudiranja, a na slici 4. b) dijagram zavisnosti zatezne čvrstoće od promene temperature ekstrudiranja.



Slika 4. Grafički prikaz uticaja temperature ekstrudiranja na: **a)** modul elastičnosti i **b)** zateznu čvrstoću. Uočava se znatni skok mehaničkih svojstava uzoraka između temperature mlaznice od 180°C i 185°C.

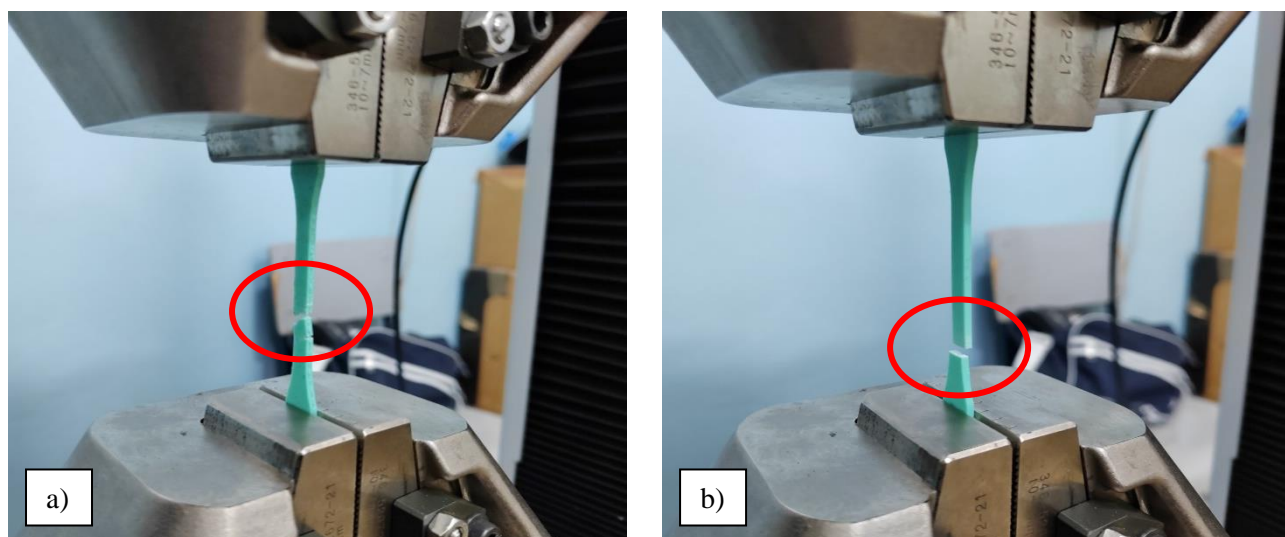
Može se zaključiti da temperatura ispod 185 °C nije dovoljna za postizanje pogodnih mehaničkih svojstava za ispitivani materijal. Iznad temperature od 195 °C, uključujući nju, varijacije u dobijenim vrednostima ispitivanih mehaničkih karakteristika nisu velikih razmera. Međutim, pokazalo se da su najpogodnije temperature, koje omogućavaju optimalna mehanička svojstva, u intervalu od 195-200 °C. Maksimalne vrednosti modula elastičnosti i zatezne čvrstoće ostvarene su korišćenjem ove dve vrednosti temperature mlaznice. Na temperaturi od 195 °C izraženije je svojstvo elastičnosti, dok je prilikom štampanja na temperaturi mlaznice od 200 °C postignuta najveća zatezna čvrstoća.

4. UTICAJ VARIJACIJE BROJA ZIDOVA NA MEHANIČKA SVOJSTVA UZORAKA

Kao i u prethodnim varijacijama, za ispitivanje su upotrebljeni uzorci dobijeni ekstrudiranjem rastopljenog materijala u pravcu upravnom na pravac istezanja.

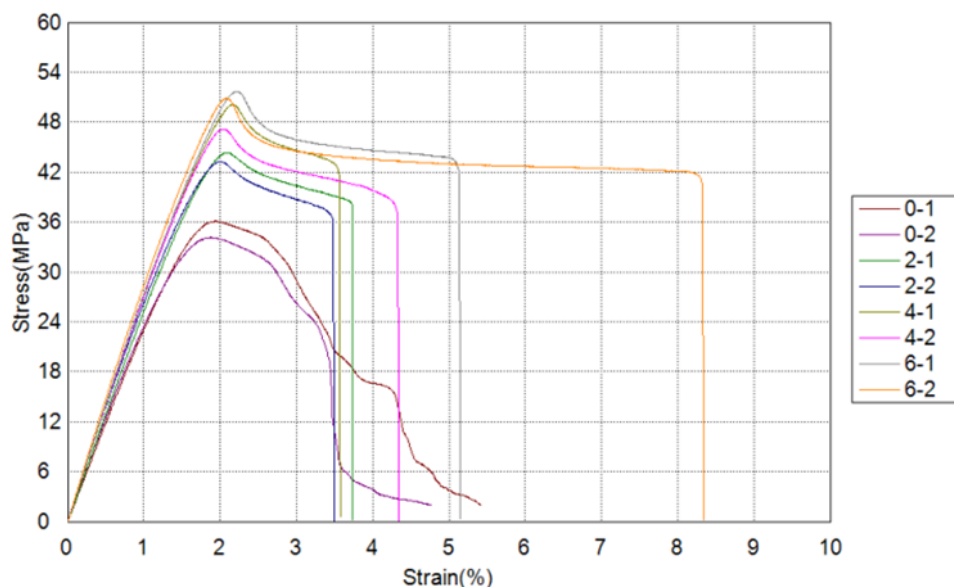
Veliki uticaj na mehanička svojstva ima i broj zidova samog ispitivanog uzorka. Kroz pripremu i unošenje podataka u program, pre dobijanja uzorka tehnologijom ekstrudiranja materijala, potrebno je podesiti željeni broj zidova uzorka. Korisniku je omogućeno da u nekoliko koraka veoma brzo podesi broj zidova. Neophodno je odabrati širinu linije početnog sloja, debljinu zidova konture i krajnjeg sloja, pri tome da ispuna bude konstantna za svaku varijaciju broja zidova. Ispitivanje je izvršeno na nekoliko uzoraka kako bi podaci koje dobijemo bili što ispravniji. Takođe, ispitivanje je izvršeno na uzorcima koji su izrađeni od istog materijala, u ovom slučaju to je odabrani PLA (Polylactic acid, eng.) materijal.

I u ovom ispitivanju, podatke o mehaničkim svojstvima varijacije broja zidova dobili smo na kidalici. Na slici 5.a) prikazan je izgled uzorka dobijenog sa najmanjim brojem zidova, nakon pojave loma. Dok je na slici 5.b) prikazan izgled uzorka dobijenog sa najvećim brojem zidova, nakon pojave loma.



Slika 5. Primer uzoraka: a) sa najmanjim brojem zidova i b) sa najvećim brojem zidova

Nakon završenog testiranja, rezultate dobijamo kroz softver na mašini za ispitivanje, kidalici. Primer jednog grafika koji je dobijen u toku ispitivanja prikazan je na slici broj 6, gde se mogu uočiti krive ispitivanih uzoraka sa naglim padom u trenutku loma. Dijagram koji je prikazan na ordinate definiše napon, dok je na apscisi deformacija.



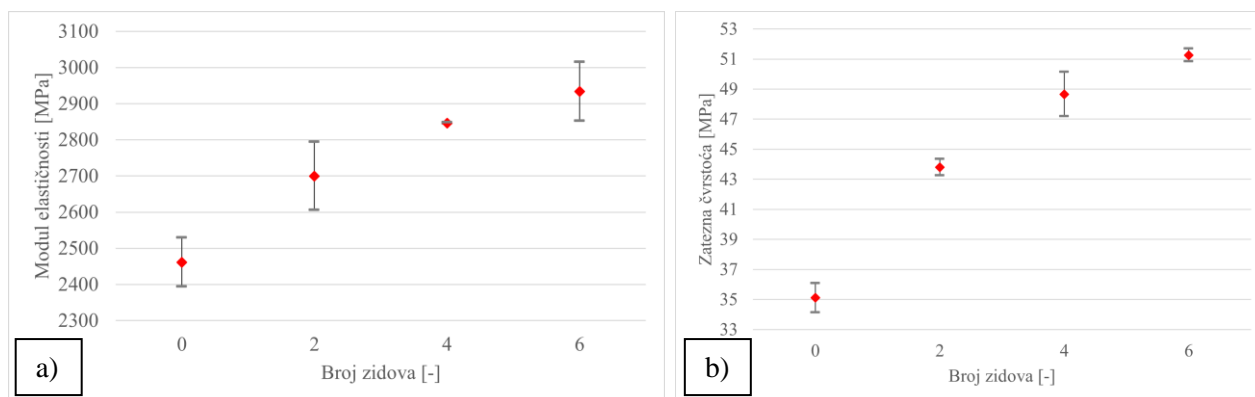
Slika 6. Prikaz grafika u toku testiranja za prve dve serije

Kroz analizu dobijenih rezultata fokusirali smo se na elastična svojstva i njihovu zateznu čvrstoću. Izvršeno je osrednjavanje dobijenih rezultata za svaku varijaciju pojedinačno, a zatim i upoređivanje vrednosti za različit broj zidova.

Osrednjene vrednosti zatezne čvrstoće i Jungovog modula elastičnosti za svaku od varijacija prikazane su u tabeli broj 3.

Tabela 3. Osrednjene vrednosti dobijene ispitivanjem različitog broja zidova		
Broj zidova	Modul elastičnosti [MPa]	Zatezna čvrstoća [MPa]
0	2461,24	35,1191
2	2699,62	43,7928
4	2846,21	48,6541
6	2933,64	51,2616

Rezultati su grafički prikazani na slici broj 7. Crevna oznaka predstavlja osrednjene vrednosti modula elastičnosti i zatezne čvrstoće za svaki broj zidova zasebno, a sive granične linije iznad i ispod nje predstavljaju odstupanja. Na slici 7. a) prikazan je dijagram zavisnosti modula elastičnosti od promene broja zidova, a na slici 7. b) dijagram zavisnosti zatezne čvrstoće od promene broja zidova.



Slika 7. Grafički prikaz uticaja broja zidova na: a) modul elastičnosti i b) zateznu čvrstoću

Kao što smo mogli intuitivno da zaključimo, najbrže će doći do loma na uzorku koji je izrađen sa najmanjim brojem zidova. Uzorak sa većim brojem zidova može da izdrži veće opterećenje. Takođe, ne mora da znači da uvek treba podešavati maksimalan broj zidova uzorka jer i manji broj može biti pogodan za određenu upotrebu, u zavisnosti od same funkcije koju treba da ostvari. Primećuje se tendencija ka pojavi zasićenja, tj. ka neznatnoj promeni mehaničkih svojstava sa povećavanjem broja zidova. Može se zaključiti da dalje povećanje broja

zidova nema značajan uticaj na mehanička svojstva. Zbog pogodnosti izrade dela i brzine štampe, a imajući u vidu dobijene vrednosti mehaničkih karakteristika, izrada dva zida predstavlja optimalni izbor.

9. ZAKLJUČAK

U ovom ispitivanju analizirali smo uticaj podešavanja različitih parametara na kvalitet i mehanička svojstva dobijenih uzoraka tehnologijom ekstrudiranja materijala. Rezultati su pokazali da varijacije u vrsti materijala, temperaturi ekstrudera i broju zidova značajno utiču na mehaničke osobine.

Optimalna kombinacija ovih parametara može nam omogućiti dobijanje finalnog proizvoda zadovoljavajuće čvrstoće. Preporučujemo dalja ispitivanja sa fokusom na različite materijale i dodatne parametre kako bi se unapredila tehnologija štampanja komponenti. Predlaže se korišćenje PLA i PETG materijala u kućnim uslovima, dok se primena materijala ABS i ASA preporučuje za spoljašnju upotrebu i neka inženjerska rešenja poput delova u automobilskoj industriji, zbog njihovog atmosferskog uticaja.

Ovi rezultati mogu biti od značaja za primenu u industriji, gde su preciznost i pouzdanost ključni faktori. Pravilnim podešavanjem parametara, pri tehnologiji aditivne proizvodnje, možemo značajno unaprediti performanse i funkcionalnost dobijenih proizvoda.

10. LITERATURA

- [1] Popović M., Pjević M.: *APT_1-5 Izvodi sa predavanja iz predmeta Aditivne proizvodne tehnologije*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2023/24.
- [2] Popović M., Pjević M.: *APT_6-10 Izvodi sa predavanja iz predmeta Aditivne proizvodne tehnologije*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2023/24.
- [3] ASTM F2792-12a: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*; DOI: 10.1520/f2792-12a.
- [4] Jevtić I., Popović M., Mladenović G., Pjević M., Milošević M., Milovanović A.: *Generativni dizajn i primena aditivnih tehnologija u okruženju Creo Parametric*, Zbornik radova sa konferencije JUPITER, Beograd 2022, str. 2.35-2.38.
- [5] Živanović S.: *AN-4 Mašine za procese dodavanja materijala*. Resursi sa predmeta, prezentacija sa predavanja iz predmeta Mašine alatke i roboti nove generacije, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2023/24.

Lazarević, N., Andelić, K., Lazić, A., Popović, M., Pjević, M., Milovanović, A.

IMPACT OF PARAMETER VARIATIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract: *With technological advancements, additive manufacturing is increasingly used to produce components with complex geometries. Material selection must align with the application and required mechanical properties. This study reports findings from experimental tests on 3D-printed specimens, aiming to evaluate the mechanical properties of materials commonly used in FDM-based 3D printing, with a focus on elastic properties and tensile strength. PLA outperformed the others, exhibiting the highest elastic properties and ultimate tensile strength. Given PLA's superior properties, it was selected for further testing to explore the impact of nozzle temperature and number of walls on its mechanical behavior.*

Keywords: *Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling (FDM), Polylactic Acid (PLA), Tensile Strength*

Majstorović,¹⁾ M., Bojović B.,²⁾ Mladenović G.,³⁾ Golubović Z.⁴⁾

INTEGRACIJA ADITIVNE TEHNOLOGIJE I MEHANIČKE ANALIZE ZA EPRUVETU AUKSETIČKE STRUKTURE

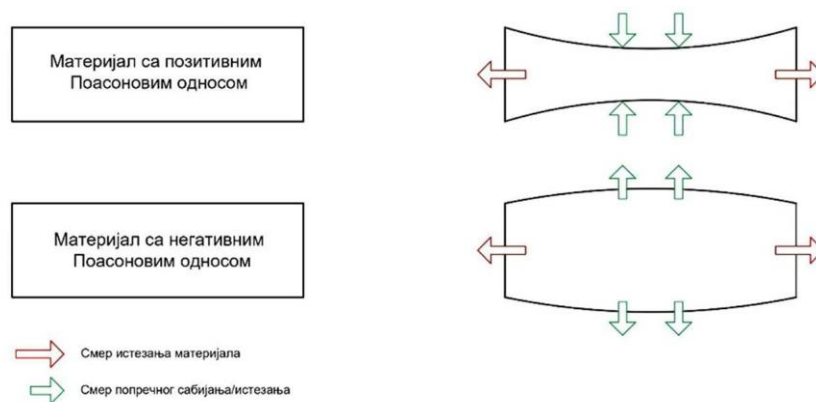
Rezime

Materijali sa negativnim Poasonovim koeficijentom su prepoznati kao auksetički materijali. Fleksibilna fotopolimerna smola je korišćena za uzorke, koji imaju auksetičku strukturu u vidu cilindrične školjke. Uzorci su štampani na LCD štampaču od flekseibilne smole koja strukturi daje elastična svojstva tokom testa sabijanja. Pomoću industrijske kamere dimenzionalne promene su zabeležene za dalja ispitivanja. Eksperimentalni rezultati metoda korelacije digitalne slike prikazuju različite scenarije za uzorke sa različitim dimenzijama strukture. Analizirani rezultati daju temelj za buduća istraživanja koja daju perspektivu potencijalnih aplikacija i proizvodnih varijacija auksetičkih struktura.

Ključne reči: Auksetične strukture, Aditivne tehnologije, Testiranje sabijanjem

1. UVOD

Auksetički materijali su privukli pažnju kao metamaterijali sa negativnim Poissonovim koeficijentom, čija se struktura uglavnom sastoji od ponavljajućih jedinica koje mogu biti različitih oblika i mehanizama [1]. Skoro svi materijali poseduju pozitivan Poissonov koeficijent, u smislu da se skupljaju kada se rastežu i šire kada se sabijaju. Oni se u osnovi nazivaju konvencionalnim materijalima i njihov Poissonov koeficijent (ν) se kreće od 0.0 do 0.5. Metamaterijal je materijal projektovan da poseduje svojstva koja se ne mogu naći u prirodnim materijalima. Sam pojam je kao reč nastao od prefiksa „meta“ što na grčkom znači „izvan“ i „materia“, što na latinskom znači „materija“ ili „materijal“. Osobine takvih materijala mogu se prilagoditi kroz dizajn njihove unutrašnje mikrostrukture. Za razliku od konvencionalnih materijala, auksetični materijali pokazuju negativan Poissonov koeficijent, koji može dostići vrednosti do -1. Proširuju se bočno kada se rastežu i bočno se skupljaju kada se pritisnu (Slika 1.).



Slika 1. Efekat delovanja sile na konvencionalni i auksetični materijal

¹⁾ Marija Majstorović, mast. inž.maš. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (majstorovic.marijaa@gmail.com)

²⁾ prof. dr Božica Bojović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bbojovic@mas.bg.ac.rs)

³⁾ prof. dr Goran Mladenović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs)

⁴⁾ dr Zorana Golubović, viši naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zzgolubovic@mas.bg.ac.rs)

Ranije je izrada mikrostrukture metamaterijala tradicionalnim tehnikama obrade predstavljala izazov. Međutim, pojava naprednih aditivnih tehnologija omogućava da se različiti dizajni mikrostrukture proizvode različitim AM metodama [2].

Poasonov koeficijent ν u osnovi opisuje relativnu promenu dimenzije objekta kada se primeni opterećenje na uzdužni ili poprečni pravac i zato u izrazu (1) sadrži znak minus tako da konvencionalni materijali imaju pozitivan odnos.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (1)$$

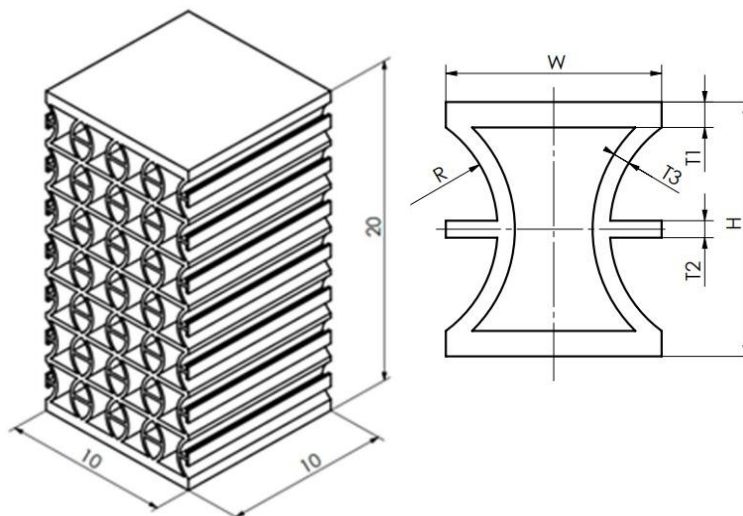
U izrazu (1) su ε_x , ε_y , uzdužna i poprečna deformacija, prema [3].

Početna ideja za ovaj rad je proistekla iz simulacije deformacija strukturnih ćelija, čiji oblik nazivamo cilindričnim ljuskama i peščanog sata, a koja je prikazana u [4]. Prema rezultatima simulacija konačnih elemenata iz [4] i eksperimentalne verifikacije dokazano je da je strukturna ćelija zasnovana na cilindričnom omotaču sa većim Poissonov koeficijentom (povećanje od 55,80%) i sa nižom koncentracijom napona (smanjenje od 44,02%) nego u slučaju strukturne ćelije u obliku peščanog sata. Ovi rezultati su podstakli dalja ispitivanja, koja su detaljno prikazana u master radu [5] gde je vršeno poređenje rezultata testiranja tek oštampalog uzorka i uzorka starog tri meseca. Rezultati iz [5] prikazuju razliku u sili potrebnoj da postigne sabijanje na zadatom pomeraju koji iznosi četvrtinu ukupne visine uzorka. Maksimalna sila potrebna za stariji uzorak je tri puta manja od sile pritiska za svež uzorak. Izlazni podaci govore da starenje ne narušava potpuno performanse u vidu fleksibilnosti što se kroz dalji razvoj može preciznije utvrditi testiranjem većeg broja epruveta različitog perioda starenja.

Cilj ovog rada je proučavanje mehaničkog ponašanja tri meseca starih uzoraka koji sadrže cilindrične strukturne ćelije. Uzorci su proizvedeni na LCD štampaču korišćenjem fleksibilne fotopolimerne smole čime se obezbeđuje da struktura ima elastična svojstva, a zatim su testirani na mernom instrumentu za kompresiju. Izvedena su tri ključna eksperimenta na uzorcima sa različitim debljinama ćelijske strukture od 0.5, 0.6 i 0.7 mm. Ponašanje auksetičke strukture pri različitim nivoima kompresije praćeno je industrijskom kamerom, a podaci o pomeranju strukture uzorka generisani su metodom digitalne korelacije snimaka (eng. Digital Image Correlation - DIC).

2. IZRADA UZORAKA AUKSETIČKE STRUKTURE

Kao idejno rešenje projektovani su uzorci auksetičke strukture, koji sadrže repetitivne međusobno povezane jedinice u obliku cilindričnih ljuski. Dimenzije uzoraka za test sabijanja su usvojene prema standardu ISO 604:2002, što je na Slici 2-levo i prikazano, dok ostale dimenzije variraju u okviru tri modela. Odštampan je po jedan uzorak od svakog modela, sa varijacijama u debljini zida od 0.5, 0.6 i 0.7 mm. Nakon tri meseca čuvanja u sobnim uslovima, ta tri uzorka su podvrgnuti testiranju. Osnovna ideja je da se tokom testiranja utvrdi da li su se elastična svojstva materijala i auksetičko ponašanje strukture zadržali nakon određenog vremena.



Slika 2. Grafički prikaz dimenzija epruvete i cilindrične ljuske

2.1 Modeliranje uzoraka

Mikrostrukturni dizajn u obliku cilindrične ljuške ima za cilj postizanje negativnog Poissonovog koeficijenta tokom deformisanja uzorka. Na Slici 2, na desnoj strani, prikazana je jedinica metamaterijala zasnovana na cilindričnom omotaču. Horizontalne ravne grede se dodaju između jedinica kako bi bile međusobno povezane. Struktura uzorka je dizajnirana u SolidWorksu. Dimenzije koje ostaju konstantne na modelima su širina (W), visina (H) i poluprečnik (R) cilindričnih ljuški. Vrednosti koje se menjaju navedene su u Tabeli 1, a to su T₁, T₂ i T₃, koje predstavljaju debljinu gornje i donje horizontalne grede, debljinu srednje spojne grede i debljinu cilindričnog omotača, respektivno. Variranjem debljine (T₃) na vrednosti od 0.5, 0.6 i 0.7 mm, posledično se menjaju ostale vrednosti kako pojedinačnih jedinica, tako i celokupne strukture uzorka.

Dimenzija [mm]	0.5 uzorak	0.6 uzorak	0.7 uzorak
W	3.3	3.3	3.3
H	4	4	4
R	2.1	2	2.7
T ₁	0.4	0.45	0.5
T ₂	0.3	0.3	0.3
T ₃	0.5	0.6	0.7

2.2 Priprema i izrada uzoraka

Na osnovu CAD modela izvežena je u datoteka u .STL formatu kako bi se u Chitubox softveru pripremio model za 3D štampanje. Potpora je neophodna i pridodata je svakom modelu, a odabrana je i orijentacija štampe sa najkraćim vremenom izrade. U okviru Chitubox-a se definišu glavni parametri 3D štampe. Parametri zavise od tipa štampanja i materijala fotopolimerne smole. Uzorci se izrađeni na Creality LD002R štampanju, koji koristi tehnologiju LCD ekrana, od fleksibilna smole eSUN -FLEX. Zadati su sledeći parametri: debljina sloja -50μ; broj donjih slojeva -6; vreme ekspozicije donjih -6s, a osnovnih slojeva -40s; brzina podizanja platforme -50mm/min, a brzina spuštanja -100mm/min; rastojanje podizanja -6mm. Sva tri modela su uspešno izrađena, očišćena od potpore i etanolom isprani ostaci nepolimerizovane smole.

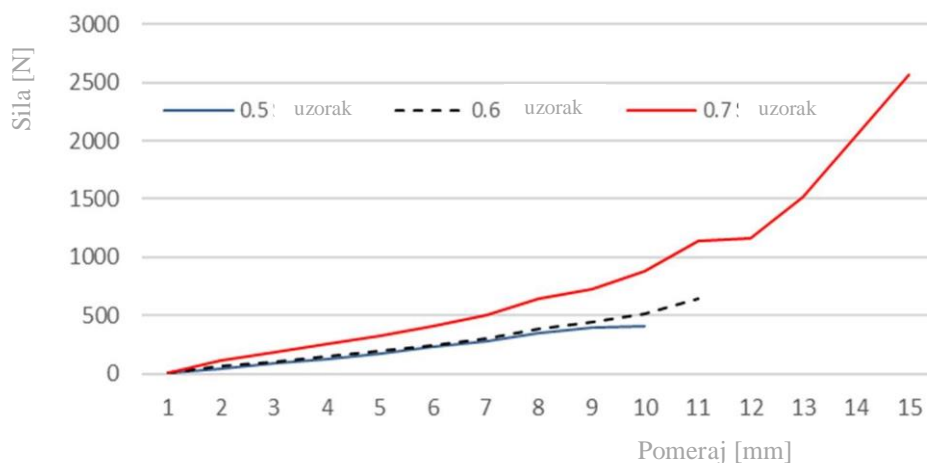
3. TESTIRANJE UZORAKA

3.1 Testiranje uzoraka sabijanjem

Ispitivanje je vršeno na kraljici SHIMADZU AGS-X sa radnim kapacitetom od 100 kN. Intuitivan program TRAPEZIUM na kontrolnoj jedinici je generisao podatke sa kraljice. U sklopu programa podešeni su svi parametri pre ispitivanja (broj testiranih komada, tip testiranja – kompresija, broj serije, gabariti testiranih uzoraka, datum ispitivanja), nakon čega se izvršila kalibracija kraljice. Primenjena je brzina testiranja od 2mm/min i vršeno je linijsko opterećenje po visini uzoraka. Sabijanje uzoraka se sprovodilo do polovine početne visine, da bi se posmatralo ponašanje auksetičke strukture. Podaci su generisani na svakih 0.01s očitavanjem sa senzora.

Nakon obrade podataka formiran je dijagram za jednostavniji prikaz izlaznih informacija. Dijagram na Slici 3, ilustruje nivo kompresije uzoraka i silu koja je potrebna za dostizanje pomeraja za određeni sabijeni položaj. Ponašanje uzoraka sa debljinom zida 0.5mm i 0.6mm pod dejstvom sile sabijanja je slično i poklapaju se linije na dijagramu, s tim što sa debljinom zida od 0.6 trpi nešto veće deformacije. Do tada se sabijanje prenosilo na auksetičku strukturu, koja je apsorbovala energiju. Uzorci 0.5mm i 0.6mm su otpušteni nakon 10mm i 11mm pomeraja respektivno i oba su se vratila u prvobitno stanje dokazavši fleksibilnost auksetičke strukture. Primećeno je da se uzorak sa debljinom zida od 0.6 mm, nakon dostizanja maksimalne kompresije od 9.89mm, u odnosu na početnu dimenziju od 20 mm za 2min i 25s vratio na visinu umanjenu za 1.531 mm.

Uzorak sa debljinom 0.7 pokazuje dvojako ponašanje nakon 11mm sabijanja. Nakon 11mm pomeraja je došlo do promene u ponašanju i nakon stagnacije koja pokazuje trenutak potpunog sabijanja strukture i prelazak sa rešetkastog na potpuno ispunjen materijalom. Nakon 11mm pa sve do početnog trenutka razaranja materijala na 15mm, uzorak pokazuje strmiji nagib prave i samim tim drugačije elastično ponašanje. Ovo je potvrda drugačijeg ponašanja uzorka sa auksetičkom strukturom u poređenju sa punim.



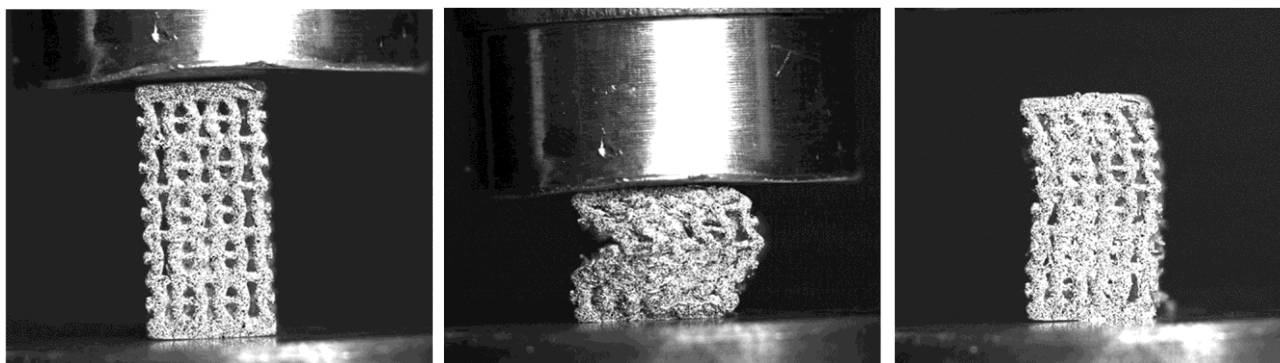
Slika 3. Dijagram sila-pomeraj za sva tri uzorka

3.2 Snimanje deformisanja

Pripremljeni uzorci od fleksibilne smole su blago providni i nemaju referentne tačke neophodne za ispitivanje. Da bi se poboljšala vidljivost strukture, korišćena je stohastička metoda za kreiranje direktnih tačaka na izrađenoj strukturi. U početku je naneta bela mat boja u spreju kako bi se sprečila refleksija tokom fotografisanja. Nakon toga, nanešena je crna sprej boja u blagim potezima sa veće udaljenosti da bi se stvorile tačke na strukturi – buduće referentne tačke na uzorku.

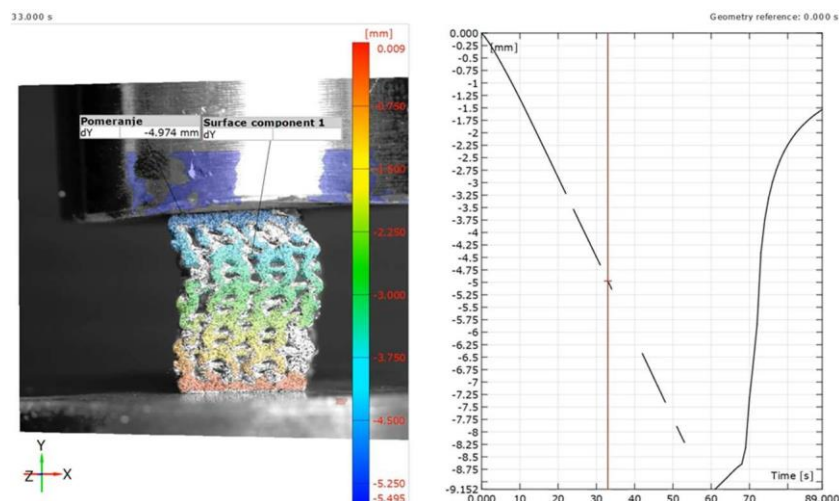
Prilikom sabijanja uzorka dokumentovane su fotografije DIC (Digital Image correlation) metodom korišćenjem kamere BASLER sa dodatnim objektivom za fokusiranje. Kamera je povezana sa računarom i program Basler Video Recording Software u kome je definisano da se na svakih 5s fotografiše ispitivani uzorak. Nakon što su fotografije sačuvane u zasebnom direktorijumu uvežene su u softverski paket GOM – Correlate gde se mogu jasno izvršiti merenja i videti deformacije ispitivanih delova.

Na primeru uzorka sa debljinom zida od 0.6mm (Slika 4), tokom sabijanja do polovine ukupne visine, biće prikazan DIC metod. Početak eksperimenta uključuje pozicioniranje uzorka u čeljusti kidalice na njegovoj početnoj visini (vidi sliku 4-levo), nakon čega sledi sabijanje dela u vertikalnom pravcu (vidi sliku 4-sredina). Nakon dostizanja maksimalne sabijenosti i praćenja deformacije sledi otpuštanje i merenje visine uzorka. Na Slici 4-desno primećuje se težnja uzorka da se vrati u prvobitni položaj.



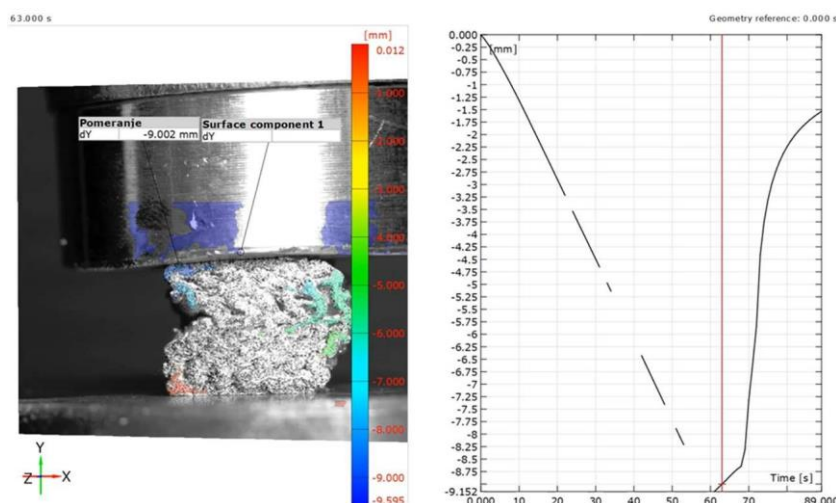
Slika 4. Pozicija uzorka na kidalici: levo -referentna, sredina-krajnja i desno -nakon testiranja

Od početka testiranja formirane su fotografije na svakih 5s sve do pomeraja od 9.98mm. Korišćenjem programa GOM – Correlate generisane su sve fotografije, tri pozicije su date na slikama 5-7. Omogućeno je merenje pomeranja za date sile. Na Slici 5, je prikazana deformacija auksetičke strukture nakon sabijanja od 4.974mm u 33-ćoj sekundi, dok se na Slici 6, jasno vidi potpuna deformacija dela nakon što je sabijen za približno polovinu svoje visine. Sa desne strane na dijagramu je jasno prikazana raspodela pomeranja referentne tačke koja meri visinu dela. Vremenska razlika od 145s nakon otpuštanja uzorka je dokumentovana na Slici 7, i dokazuje da se za tako kratko vreme auksetička struktura vratila u položaj blizak početnom. Nakon 5min uzorak se potpuno povratio.

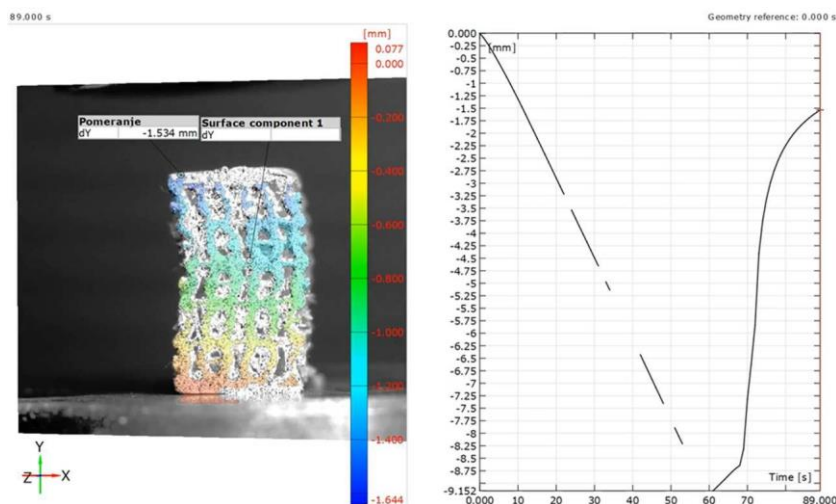


Slika 5. DIC za pomeraj 4.974mm

Poređenjem strukture na Slici 5, primentno je da su u skladu sa opterećenjem prve deformacije ustupile u ćeliskim jedinicama u skladu sa očekivanjima. Međutim, nakon što je opterećenje nastavilo da raste došlo je do krivljenja epruvete u stranu. Navedeno se smatra posledicom zaostale smole u uskim zazorima ćelijske strukture. Neočvrsla smola nakon 3D štampe se uklanja, ali se usled kapilarnih pojava dešava njeno neželjeno zadržavanje i naknadno očvršćavanje u komori sa UV svetlima.



Slika 6. DIC za pomeraj 9.98mm



Slika 5. DIC za otpušten uzorak

Pri maksimalnoj sabijenosti uzorka prazan prostor između zidova auksetičke strukture je ispunjen materijalom što se jasno vidi na Slici 6. Može se primetiti značajna razlika između početka vršenja testiranja i trenutka u kom je uzorak maksimalno sabijen. Za dostizanje navedenog pomeraja je upotrebljeno opterećenje od 639N.

Na slici 7. je nakon otpuštanja snimljen uzorak sa visinskom razlikom od 1.531mm u odnosu na početnu visinu. Jasan rezultat testiranja potvrđuje performanse izrađene strukture koja ima sposobnost absorpcije energije i posedovanje jedinstvene memorije svoje strukture koja teži da se vrati u prvobitni položaj pre deformacije.

4. ZAKLJUČAK

Standardni uzorci za tesiranje sabijanjem na kidalici su napravljeni od fleksibilne fotopolimerne smole na LCD 3D štampaču. Testirana su tri uzorka sa auksetičkom mikro-strukturom i različitom debljinom zida. Tokom procesa sabijanja snimane su deformacije DIC metodom. Analizom rezultata došlo se do generalnog zaključka da auksetička struktura tokom procesa sabijanja apsorbira energiju sabijanja do polovine visine uzorka, a nakon toga nastaje deformisanje kao da je u pitanju uzorak od punog materijala. Jednako važan zaključak zasnovan na generisanim podacima u vezi sa varijacijom u debljini zida je da veća debljina zahteva veću silu da bi se postigao isti uzdužni pomak. Takođe, bitno je napomenuti da se se nakon otpuštanja uzorci vratili prvobitno izrađenoj strukturi. Potvrđena je postavljena hipoteza da su se elastična svojstva materijala i auksetičko ponašanje strukture nakon perioda od tri meseca zadržali.

Rekapitulacijom i analizom dobijenih podataka, pruža se precizniji uvid u ponašanje auksetičke strukture proizvedene u mikrometarskom domenu. Kao interferirajući faktori mogu se navesti zarobljena smola unutar ćelijskih jedinica, koja ne dozvoljava ravnomernu kompresiju strukture.

Koraci koji bi usledili u daljem istraživanju obuhvataju ponovljeno testiranje na seriji uzoraka, sprovođenje istih ispitivanja na različitim dimenzijama uzoraka, ispitivanje na zatezanje i savijanje i dr. Uspostavljanje temelja u inovativnoj oblasti pruža mogućnosti za dalji razvoj koji bi mogao dovesti do potencijalnih rešenja u primeni u svakodnevnom životu ili industriji.

5. LITERATURA

- [1] Yilmaz B., Akar E., Kucukkalfa E., Yildiz K.: *Direct Foaming Approach for Reinforcing Re-entrant Auxetic Structures for Superior Compressive Properties and Energy Absorption*, 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), pp. 01-06, doi: 10.1109/RAST57548.2023.10198008. 2023.
- [2] Ren X., Das R., Tran P., Ngo T. D., Xie Y. M.: *Auxetic metamaterials and structures: a review*, Smart Mater. Struct. Vol 27, 023001, doi: 10.1088/1361-665X/aaa61c, 2018.
- [3] Boakye A., Chang Y., Raji R. K., Ma P.: *A Review on Auxetic Textile Structures, Their Mechanism and Properties*, J Textile Sci & Fashion Tech. Vol 2, No1. doi: 10.33552/JTSFT.2019.02.000526, 2019.
- [4] Gao S., Liu W., Zhang L., Gain A. K.: *A New Polymer-Based Mechanical Metamaterial with Tailorable Large Negative Poisson's Ratios*, Polymers Vol12, No7, doi: 10.3390/polym12071492, 2020.
- [5] Majstorović M.: *Mehaničko testiranje na pritisak epruvete auksetičke mikro-strukture izrađene aditivnom tehnologijom*, Master rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2024.

Majstorović, M., Bojović B., Mladenović G., Golubović, Z.

INTEGRATION OF ADDITIVE TECHNOLOGY AND MECHANICAL ANALYSIS OF SPECIMENS WITH AUXETIC STRUCTURE

Abstract: *The Materials with a negative Poisson's ratio are recognized as Auxetics materials. The flexible photopolymer resin is used for the test specimens, which have a cylindrical shell based Auxetics structure. The test specimens are printed on an LCD printer with resin which gives structure ductile properties during the compression test. Using an industry camera the dimensional changes are captured for further research. With Digital Image Correlation method experimental results show different scenarios in varying the dimensions of the structure. Analyzed results give a foundation for future research giving a perspective of potential applications and manufacturing variations of Auxetics structures.*

Key words: *Auxetic structures, Additive technologies, Compression testing.*



Milutinović, M., Dačević, B., Stefanović, Lj, Panić, M., Movrin, D.¹⁾

UTICAJ MODELA TRENJA NA TAČNOST REZULTATA NUMERIČKIH SIMULACIJA U PROCESU KOMBINOVANOG ISTISKIVANJA²⁾

Rezime

Rad se bavi analizom uticaja različitih modela kontaktnog trenja na tačnost numeričkih simulacija u procesima hladnog zapreminskog deformisanja. U tu svrhu, sprovedeno je modelovanje procesa kombinovanog istiskivanja u softverskom paketu Simufact Forming, primenom metode konačnih elemenata, koristeći tri modela trenja: Kulonov model, model konstantnog trenja i kombinovani model. Kako bi se procenila tačnost kreiranih modela, rezultati numeričkih simulacija koji se odnose na relevantne dimenzije obradaka upoređeni su sa eksperimentalno dobijenim podacima.

Ključne reči: Kontaktno trenje, modeli trenja, kombinovano istiskivanje, metoda konačnih elemenata

1. UVOD

Kontaktno trenje predstavlja jedan od najvažnijih faktora procesa obrade deformisanjem. Generalno, kontaktno trenje se smatra negativnom pojavom u procesima obrade deformisanjem jer, između ostalog, dovodi do neželjenih promena u mikrostrukturi deformisanog materijala, zatim pojave zaostalih unutrašnjih napona, smanjenja kvaliteta površine delova, bržeg i intenzivnijeg habanja alata, skoka deformacione sile itd. [1, 2]. U procesima gde se javlja raznosmerno tečenje materijala, poput kombinovanog istiskivanja, trenje predstavlja veliki problem za stabilnost procesa, odnosno stacionarno tečenje materijala u različitim pravcima. Naime, čak i mala promena kontaktnih uslova može dovesti do promene toka materijala i neravnomerne popune alata (nehomogeno deformisanje), što rezultira pojavom različitih defekata na gotovim proizvodima [3, 4, 5]. Pri određenim uslovima trenje može doći i do kvalitativne promene naponskog stanja u obratku (npr. pri sabijanju ono prelazi iz jednoosnog u prostorno), tako da trenje direktno utiče i na deformabilnost materijala. Međutim, kod nekih tehnoloških metoda (kovanje u otvorenom kalupu, valjanje) prisustvo kontaktnog trenja je korisno sa stanovišta odvijanja i kontrole procesa deformisanja.

Za optimalno projektovanje procesa obrade deformisanjem, poznavanje i kvantitativno određivanje kontaktnog trenja je od suštinskog značaja [1, 5, 6]. Do sada su sprovedena mnogobrojna istraživanja vezana za ovu problematiku, na osnovu kojih su razvijeni različiti modeli trenja pomoću kojih se opisuju kontaktni uslovi na graničnoj površini alat-obradak. Najčešće korišćeni modeli su: Amont-ov tj Coulumb-ov model kontaktnog trenja (1), Orowan-ov model konstantnog trenja (2), kao i opšti (Wanheim-ov) model trenja (3) [2, 7, 8]. Pored ova tri osnovna modela trenja, čija je grafička interpretacija data na sl. 1, postoje i drugi modeli koji uzimaju u obzir specifične karakteristike određenog procesa deformisanja [2, 9, 10, 11].

$$\tau_k = \mu \cdot \sigma_n \quad (1)$$

$$\tau_k = m \cdot \tau_{\max} \quad (2)$$

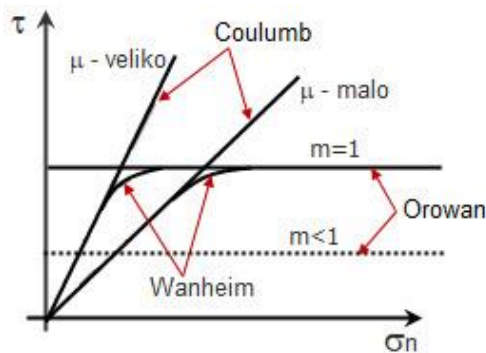
$$\tau = f \cdot \alpha \cdot k \quad (3)$$

¹⁾ prof. dr Mladimir Milutinović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (mladomil@uns.ac.rs), mast. inž. maš. Balša Dačević (bdacevic96@gmail.com), mast. inž. maš. Ljiljana Stefanović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (ljiljanastefanovic@uns.ac.rs), mast. inž. maš. Milica Panić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milicapanic@uns.ac.rs), prof. dr Dejan Movrin, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (movrin@uns.ac.rs)

²⁾ Ovaj rad predstavlja deo istraživanja u okviru projekta „Kolaborativni sistemi u digitalnom industrijskom okruženju” broj 142-451-3178/2022-01/01, sufinansiranog od strane Pokrajinskog sekretarijata za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost AP Vojvodine.

gde su:

- τ_k - tangencijalni napon na kontaktnoj površini usled kontaktnog trenja,
- σ_n - odgovarajući normalni napon,
- μ - koeficijent trenja ($0 \leq \mu \leq 0,575$),
- m - faktor smicanja, faktor trenja ($0 \leq m \leq 1$, $m = \sqrt{3} \mu$),
- τ_{max} - maksimalni tangencijalni napon,
- τ - tangencijalni napon na kontaktnoj površini usled kontaktnog trenja,
- f - faktor trenja, $0 \leq f \leq 1$.
- α - odnos realne zone kontakta i računске površine kontakta,
- k - napon tečenja.



Slika 1. Grafički prikaz različitih modela trenja

Iako su do sada sprovedena mnogobrojna istraživanja, fenomen kontaktnog trenja u oblasti obrade deformisanjem i dalje ostaje nepoznat u mnogim aspektima [11]. Glavni razlog za to leži u složenosti mehanizma trenja, kao i u velikom broju uticajnih parametara i njihovoj međusobnoj povezanosti. Stoga, postoji potreba za razvojem novih istraživačkih metoda i pristupa koji će omogućiti dublje razumevanje problematike kontaktnog trenja, kao i unapređenje postojećih modela.

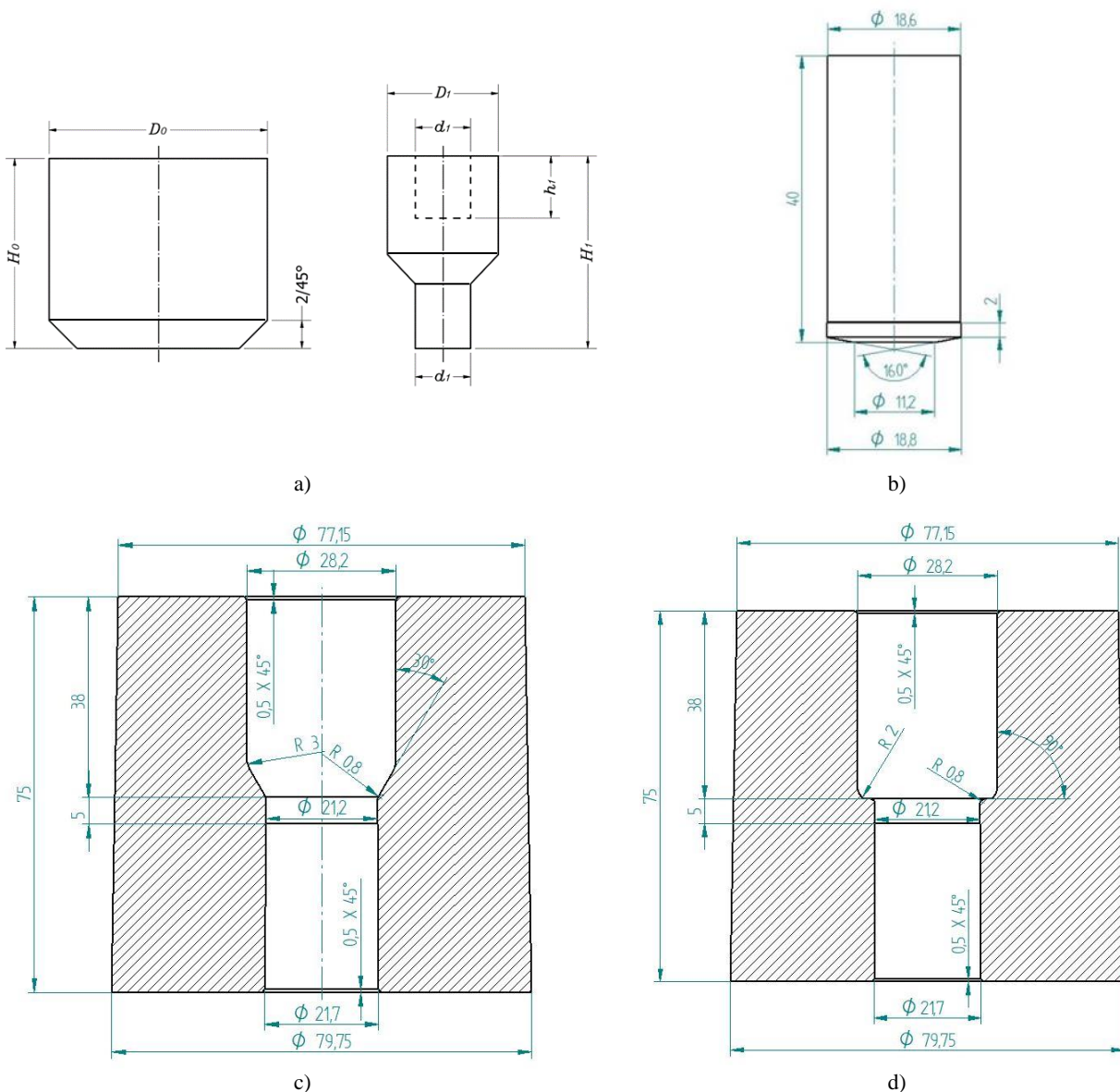
U savremenoj praksi, analiza, projektovanje i optimizacija procesa obrade deformisanjem su nezamislivi bez primene numeričkih simulacija i odgovarajućih softverskih alata, koji se u većini slučajeva baziraju na metodi konačnih elemenata (MKE). Optimizacija procesa najčešće se sprovodi primenom iterativnih postupaka i tzv. direktne MKE, gde se ulazni parametri koriguju sve dok se ne postigne zadovoljavajuće rešenje funkcije cilja u okviru zadatih kriterijuma. Pored toga, proces optimizacije deformisanja može se sprovesti i putem inverzne analize. U obradi deformisanjem, inverzna analiza se koristi u kombinaciji sa eksperimentalnim rezultatima ili industrijskim podacima radi procene karakteristika materijala, triboloških uslova i drugih parametara procesa, odnosno parametara koji se kod direktnog metoda koriste kao početni/ulazni podaci [12, 13]. Kod inverznog postupka, polazi se od pretpostavljenih vrednosti nepoznatih parametara, a zatim se pristupa njihovoj kalibraciji kroz iteraciju, sve dok razlika između stvarnih (merenih) i numeričkih rezultata ne postane minimalna.

Inverzni postupak MKE se često koristi za analizu kontaktnih uslova u procesima deformisanja i određivanje/kalibraciju koeficijenta trenja (faktora smicanja). U tom smislu, Zhang i saradnici [14] su istraživali uticaj trenja na industrijski proces istiskivanja kombinovanjem eksperimentalnih istraživanja i numeričkih simulacija. Pomoću MKE analiziraju se četiri različita procesa: istosmerno istiskivanje, dvostruko istiskivanje, sabijanje obratka u T-oblik i sabijanje valjka uz klizanje. Primenili su Coulumb-ov model trenja i menjali vrednosti koeficijenta trenja kako bi analizirali njegov uticaj na proces. U svojim istraživanjima, Nakamura, Bay i Zhang [15, 16] su ispitivali kako trenje utiče na procese istiskivanja, kao i efekte različitih sredstava za podmazivanje. Njihovi testovi uključivali su procese kombinovanog istiskivanja, dvostruko istiskivanje sa ravnim kontra žigom [15] i sa konusnim kontra žigom [16]. Uticaj trenja kod kombinovanog istiskivanja, pri izradi kompleksnih delova, analiziran je i u radu [10]. Pri ispitivanju je korišćen model konstantnog trenja sa različitim vrednostima faktora, a svi rezultati su kasnije upoređeni sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. U svrhu ispitivanja kontaktnih uslova na vrhu žiga i dnu matrice u procesu suprotnosmernog istiskivanja, Im i ostali [17] su MKE menjali različite uslove podmazivanja. Korišćen je model konstantnog trenja numerički određen za leguru AL6061-O.¶

Cilj ovog rada je ispitivanje uticaja modela trenja na tačnost rezultata numeričkih simulacija u procesu kombinovanog istiskivanja, kao i njihovo poređenje radi utvrđivanja pouzdanosti svakog modela.

2. PLAN ISTRAŽIVANJA

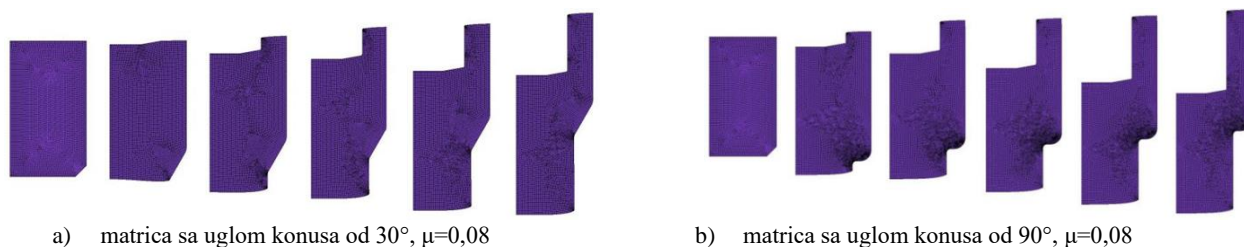
Istraživanja obuhvataju numeričke simulacije procesa kombinovanog istiskivanja cilindričnih priprema $\phi 28 \times 25$ (sl. 2.a) pri različitim kontaktnim uslovima. Istiskivanje se izvodi pomoću ravnog žiga (sl. 2.b) i dve različite matrice: jedna je sa uglom konusa od 30° (sl. 2.c) i druga sa uglom konusa od 90° (sl.2.d). Simulacije su realizovane pomoću softverskog paketa Simufact.forming u okviru koga su kreirani odgovarajući 2D MKE modeli procesa kombinovanog istiskivanja. Razvijeni modeli obuhvatili su sva tri standardna modela trenja (izrazi 1-3), pri čemu su varirane vrednosti odgovarajućih parametara: koeficijent trenja $\mu = 0,08; 0,11; 0,2$ (Coulomb-ov model), faktor smicanja $m = 0,14; 0,19; 0,35$ (Orowan-ov model), odnosno kombinacija $\mu = 0,08 + m = 0,14; \mu = 0,11 + m = 0,19; \mu = 0,2 + m = 0,35$ (Wanheim-ov model). Žig i matrice su modelovani kao apsolutno kruta tela, dok je pripremak definisan kao elasto-plastično telo. Materijal priprema je čelik C45E (Č.1531), čija je kriva deformacionog ojačavanja u analitičkom obliku dobijena fitovanjem eksperimentalnih podataka (Rastegajev test) korišćenjem Ludwik-ovog modela, odnosno $K=289,7+597,58+\varphi^{0,333}$, gde je φ efektivna deformacija. Da bi se ispitala tačnost numeričkih modela odnosno utvrdio uticaj modela trenja na rezultate, kao i da bi se taj uticaj kvantitativno valorizovao, sprovedeni su eksperimenti kombinovanog istiskivanja sa alatima odgovarajuće geometrije (sl.2). Za istiskivanje uzoraka korišćena je hidraulična presa Sack & Kiesselbach nominalne sile od 6,3 MN, a podmazivanje je vršeno mineralnim uljem. Pomoću svake matrice, za različite hodove alata (9 mm, 12 mm, 15 mm i 18 mm), istisnut je po jedan uzorak.



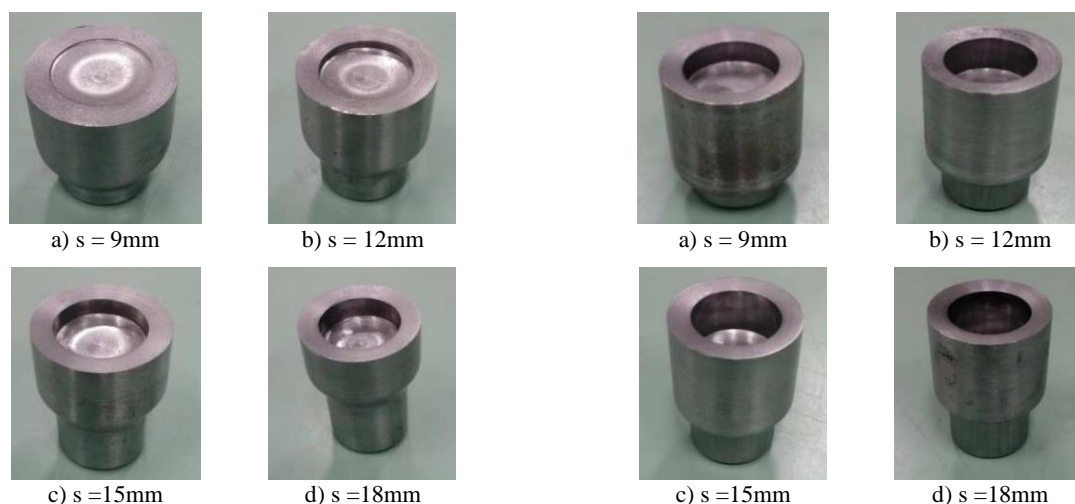
Slika 2. Geometrija priprema i finalnog dela (a), žiga (b) i matrice (c, d) korišćenih u simulacijama i eksperimentalnim istraživanjima

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Uticaj izabranog modela trenja, kao i različitih vrednosti koeficijenta i faktora trenja, na tačnost rezultata numeričkih simulacija, procenjen je poređenjem karakterističnih dimenzija uzoraka (H_I , h_I – sl.2a), dobijenih putem numeričkih simulacija i eksperimentalno. Na sl. 3 prikazana je promena geometrije uzorka tokom procesa kombinovanog istiskivanja (pri različitim hodovima žiga), određena numeričkim simulacijama za oba tipa matrice i vrednosti koeficijenta trenja $\mu=0,08$. Izgled realnih uzoraka, dobijenih pri određenom (ranije definisanom) hodu alata, može se videti na sl. 4 i 5.



Slika 3. Promena geometrije uzorka u toku procesa kombinovanog istiskivanja



Slika 4. Uzorci dobijeni istiskivanjem u matrici sa uglom konusa od 30° [18]

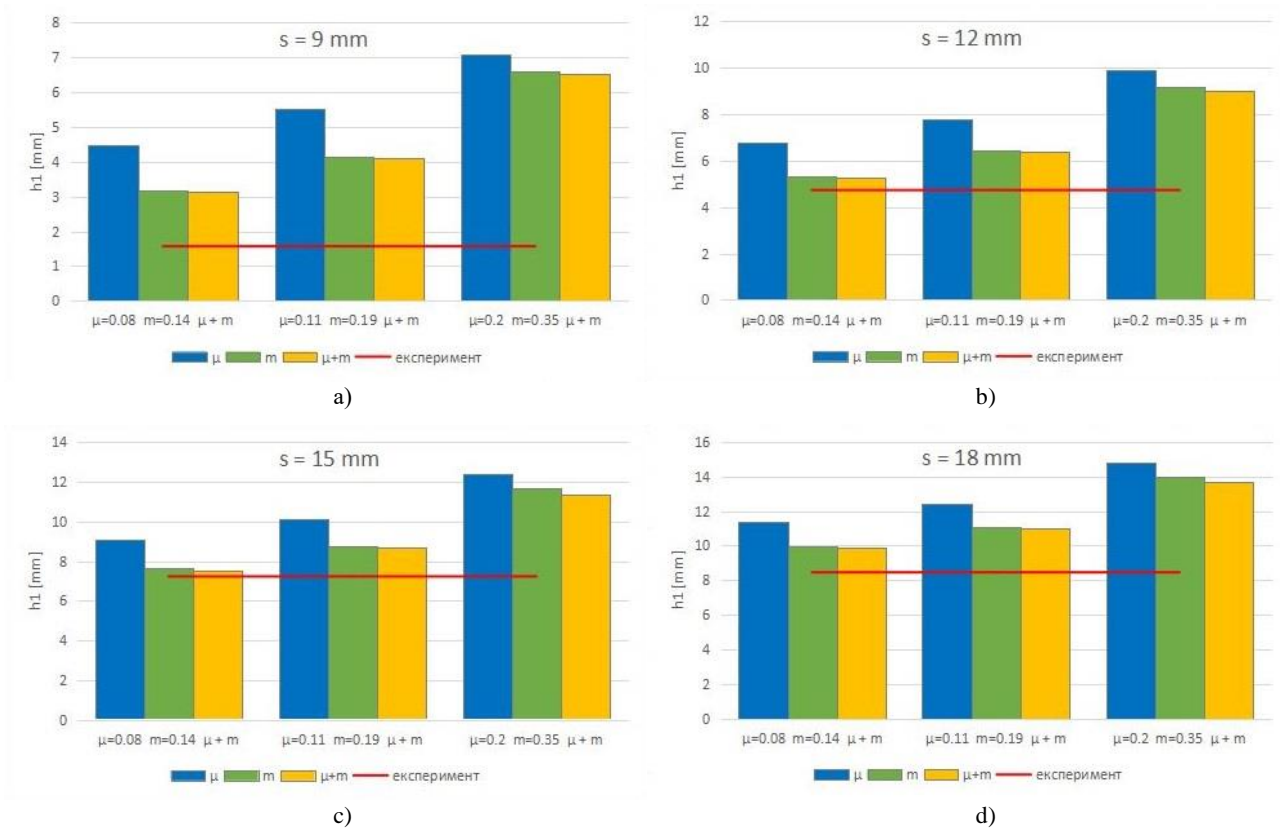
Slika 5. Uzorci dobijeni istiskivanjem u matrici sa uglom konusa od 90° [18]

Dijagrami sa vrednostima karakterističnih dimenzija obradaka za sve kombinacije variranih parametara dobijenih numeričkim simulacijama, kao i dimenzije realnih uzoraka, prikazani su na sl. 6 i 7. Grafička interpretacija rezultata omogućava vizuelizaciju i poređenje numeričkih modela sa stvarnim uzorcima, što pomaže u proceni tačnosti modela, odnosno pruža uvid u uticaj različitih modela trenja i parametara trenja na same rezultate.

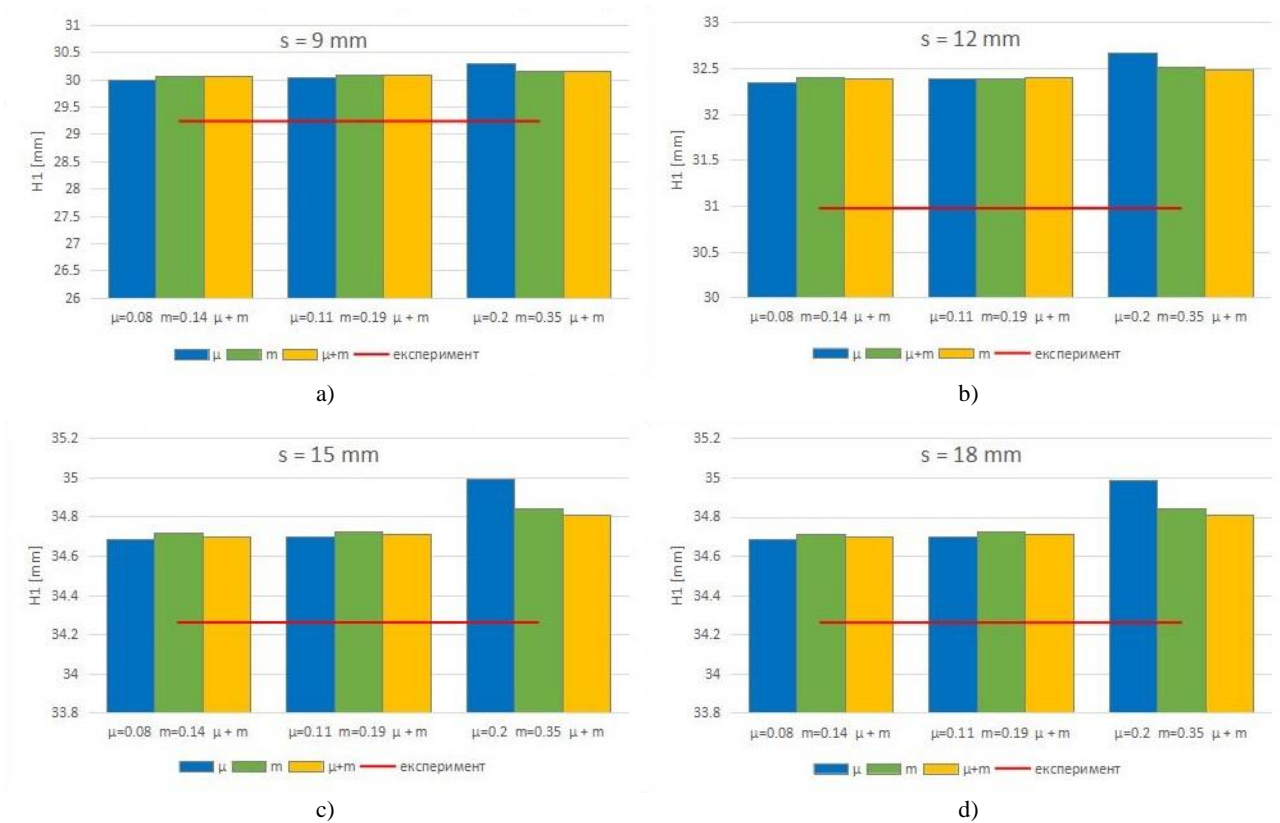
U slučaju dimenzije h_I i matrice sa uglom konusa od 30°, analiza rezultata pokazuje da za hod alata od 9 mm postoje znatna odstupanja između numeričkih simulacija i eksperimentalnih podataka, pri čemu su niže vrednosti koeficijenta i faktora trenja dale tačnije rezultate (sl. 6.a). Sa povećanjem hoda alata ($s=12, 15$ i 18 mm), podudarnost rezultata simulacija sa eksperimentom se značajno poboljšava (sl. 6., b, c, d). Najbolja podudarnost rezultata je postignuta korišćenjem modela sa konstantnim trenjem za faktor $m = 0,14$, kao i primenom kombinovanog modela za vrednosti $\mu = 0,08$ i $m = 0,14$. Sa druge strane, najveća odstupanja zabeležena su prilikom korišćenja Coulomb-ov modela trenja, gde su sve vrednosti posmatrane dimenzije bile veće u odnosu na druga dva modela, kao i eksperiment. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da niže vrednosti trenja bolje odgovaraju stvarnim kontaktnim uslovima u slučaju matrice sa uglom od 30°.

Što se tiče dimenzije H_I (sl. 7), odstupanja izmerenih vrednosti za različite modele i vrednosti trenja su minimalna. Ovi rezultati su očekivani, s obzirom na to da je uticaj trenja na dimenziju H_I znatno manji nego na dimenziju h_I . I u ovom slučaju, niže vrednosti trenja bolje odgovaraju stvarnim kontaktnim uslovima. Odstupanja vrednosti dobijenih simulacijama za niže vrednosti trenja u većini slučajeva su ispod 1 mm.

Na osnovu prikazanih rezultata, zaključeno je da najbolju podudarnost sa eksperimentalnim rezultatima pruža primena kombinovanog modela trenja za vrednosti koeficijenta i faktora trenja $\mu = 0,08$ i $m = 0,14$.

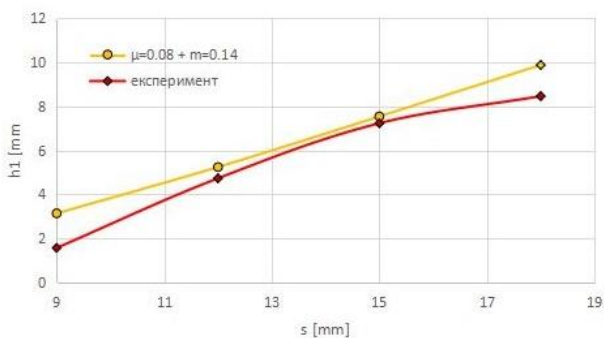


Slika 6. Poređenje dimenzije h_1 pri istiskivanju kod matrice od 30°

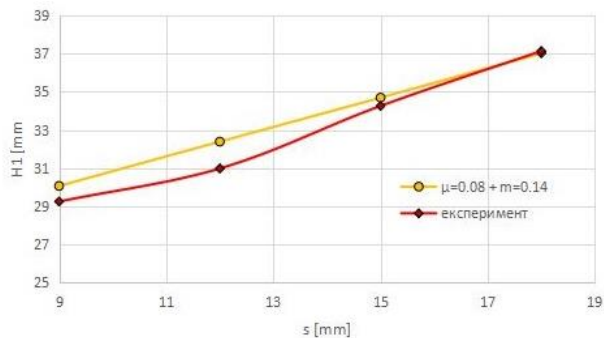


Slika 7. Poređenje dimenzije H_1 pri istiskivanju kod matrice od 30°

Na sl. 8. prikazan je dijagram koji poredi vrednosti dimenzija h_1 i H_1 za različite hodove alata, dobijene primenom kombinovanog modela i eksperimenta. Uočava se dobra podudarnost rezultata, naročito kod dimenzije H_1 , gde su odstupanja minimalna, što potvrđuje pouzdanost kombinovanog modela.



a)

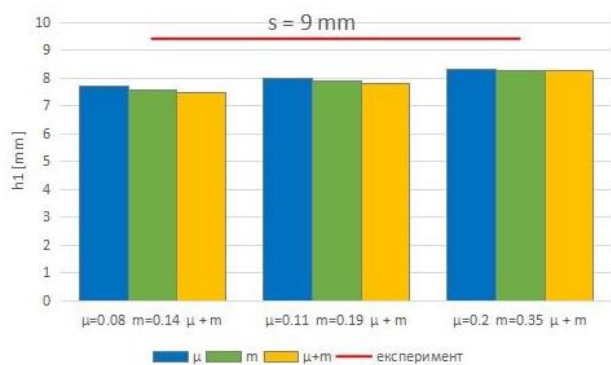


b)

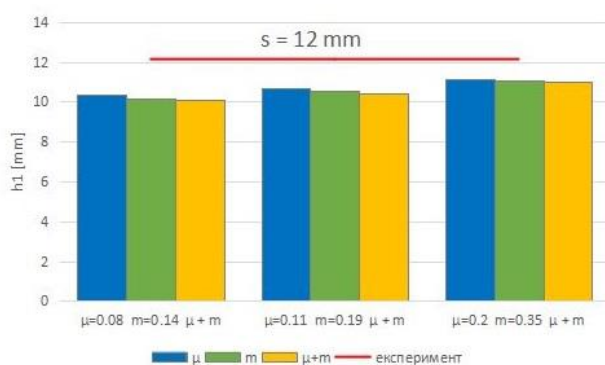
Slika 8. Promena dimenzija a) h_1 i b) H_1 u funkciji hoda alata dobijena eksperimentalno i numerički (kombinovani model trenja $\mu=0,08 + m=0,14$) pri istiskivanju matricom sa uglom konusa od 30°

Poređenjem dijagrama promene dimenzije h_1 za matricu sa uglom konusa od 30° (sl. 6) i 90° (sl. 9) mogu se uočiti značajne razlike. Kod matrice sa konusom od 90° , pri hodovima alata od 9 mm, 12 mm i 15 mm, eksperimentalno izmerena vrednost je viša od onih dobijenih simulacijom, pri čemu je veća tačnost postignuta korišćenjem većih vrednosti trenja. Sa druge strane, pri hodu alata od 18 mm, najprecizniji rezultati su postignuti korišćenjem najnižih vrednosti koeficijenta i faktora trenja, pri čemu je model konstantnog trenja sa vrednošću $m = 0,14$ dao najtačniji rezultat.

U slučaju dimenzije H_1 , ne postoje značajna odstupanja između rezultata dobijenih korišćenjem različitih modela i veličina trenja (sl. 10). Ovi nalazi potvrđuju nisku osetljivost dimenzije H_1 na kontaktne uslove. Poređenjem rezultata simulacija sa eksperimentalno dobijenim vrednostima, očigledno je da postoji dobra podudarnost, osim u slučaju kada je hod iznosio 15 mm, gde je odstupanje približno 1 mm. Poređenje dimenzija h_1 i H_1 kod matrice sa uglom 90° , za dva različita modela trenja: Coulomb-ov ($\mu = 0,2$), i kombinovani model ($\mu = 0,08$ i $m = 0,14$), dato je na sl.11. Poklapanje rezultata za dimenziju h_1 je relativno dobro, dok je za dimenziju H_1 odlično, što ukazuje na visoku tačnost kombinovanog modela u simulaciji ovog procesa.



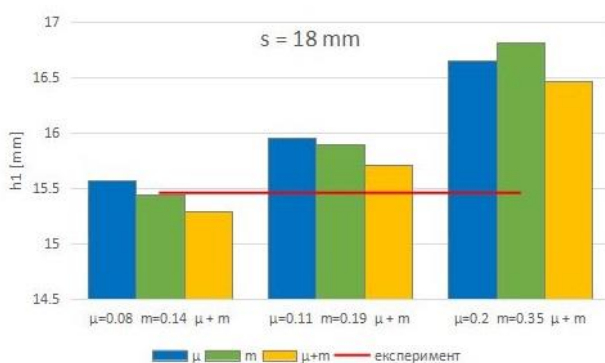
a)



b)

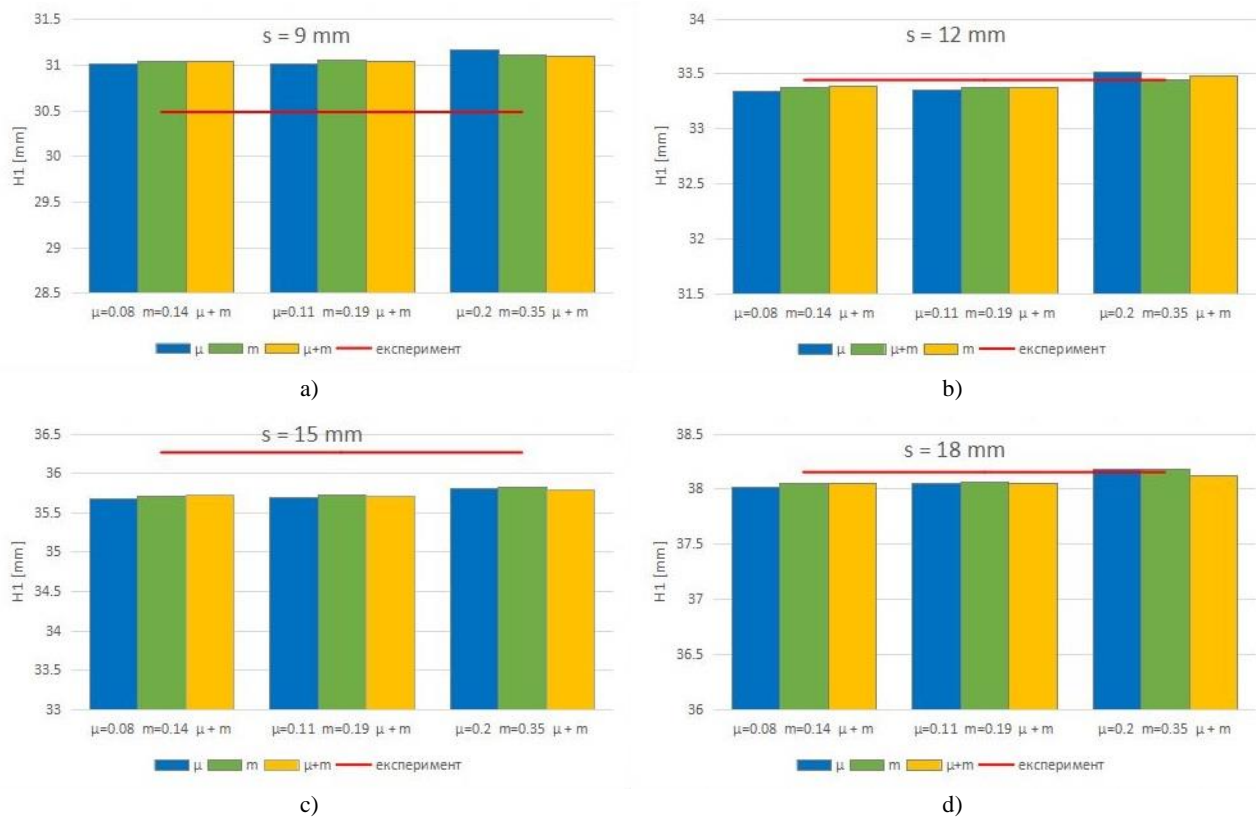


c)

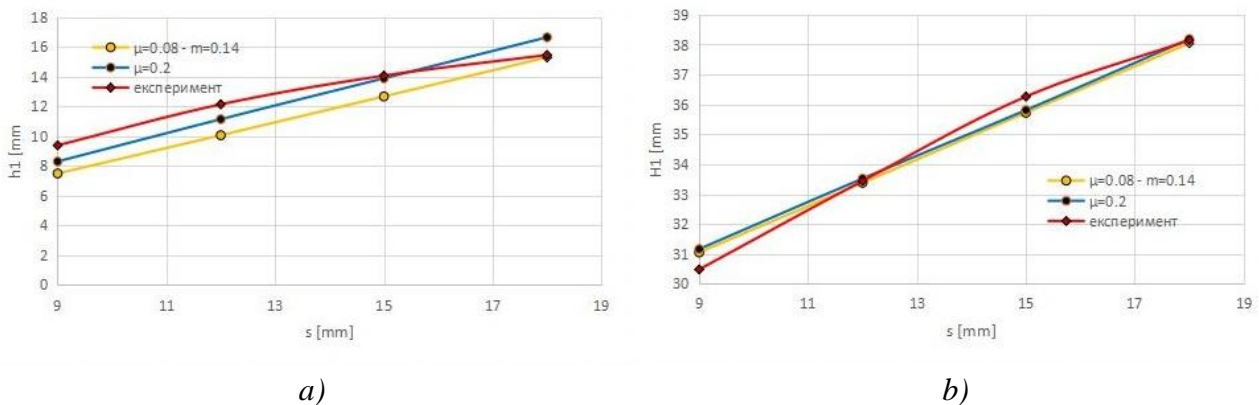


d)

Slika 9. Poređenje dimenzije h_1 pri istiskivanju kod matrice od 90°



Slika 10. Poređenje dimenzije H_1 pri istiskivanju kod matrice od 90°



Slika 11. Promena dimenzija a) h_1 i b) H_1 u funkciji hoda alata dobijena eksperimentalno i numerički (kombinovani model trenja $\mu=0,08 + m=0,14$, Coulomb-ov model $\mu=0,2$, matrica sa uglom konusa od 90°)

4. ZAKLJUČAK

U radu je ispitivan kombinovani uticaj različitih modela trenja i vrednosti kontaktnog trenja na tačnost rezultata numeričkih simulacija zasnovanih na MKE u slučaju procesa hladnog kombinovanog istiskivanja. Poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima karakterističnih dimenzija obratka može se zaključiti da su u slučaju matrice sa uglom od 30° tačniji rezultati dobijeni pri nižim vrednostima faktora i koeficijenta trenja, dok je u slučaju matrice sa uglom od 90° situacija obrnuta. Objasnjenje se može naći u tome da je kod matrice sa uglom konusa od 30° olakšano tečenje materijala, što zahteva manje deformacione sile u poređenju sa procesom gde je ugao konusa matrice 90° . Drugim rečima, u procesima sa većim pritiscima i otežanim tečenjem materijala, merodavniji rezultati dolaze iz modela sa većim vrednostima koeficijenta i faktora trenja.

Što se tiče dimenzionih karakteristika, tokom ispitivanja je uočeno da najrelevantnije rezultate pruža kombinovani model. Model konstantnog trenja je dao nešto manju tačnost u odnosu na kombinovani model, dok su korišćenjem Kulonovog modela uočena najveća odstupanja. Najbolja poklapanja su dobijena primenom kombinovanog modela trenja za vrednosti faktora i koeficijenta trenja $\mu = 0,08$ i $m = 0,14$.

10. LITERATURA

- [1] Plančak M., Vilotić D.: Tehnologija plastičnog deformisanja. Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2012
- [2] Mandić V.: Fizičko i numeričko modeliranje procesa obrade deformisanjem. Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2012
- [3] Groover, M.P.: Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 4th ed. JOHN WILEY & SONS, INC, 2010.
- [4] Milutinović M, Movrin D., Skakun P., Stefanović LJ., Vilotić D., Randelović S.: *Some remarks on process of combined forward - backward extrusion of steel*. Proceedings of the 13th International scientific conference MMA2018 - Flexible technologies, Novi Sad, 2018, pp.261-266.
- [5] Čupković, Đ., Plančak, M., Vilotić, D., Kuzman, K.: *Uticaj kontaktnog trenja na proces dvostrukog suprotnosmernog istiskivanja*, Zbornik radova sa konferencije YUTRIB'05, Kragujevac, 2005.
- [6] Plančak M., Car Z., Kršulja M., Vilotić D., Kačmarčik I., Movrin, D: *Possibilities to Measure Contact Friction in Bulk Metal Forming*, Technical Gazette, Vol.19, No4, 2012, pp.727–734.
- [7] Plančak M., Vilotić D., Trbojević I., Skakun, P., Milutinović M., Lužanin O., Movrin D.: *Theoretical and experimental models for the determination of friction coefficient in metal forming processes*, Proceedings of the conference Serbiatrib 2007, Kragujevac, 2007, pp.219-224.
- [8] Plančak M., Barišić B., Vilotić D., Kačmarčik I., Movrin D., Skakun P., Milutinović M.: *Analytical and numerical solution for friction calibration curve (FCC) in bulk metal forming*. Journal "CA Systems in Production Planning", Vol. 12, No1, 2011, pp.107-110.
- [9] Behrens B-A, Bouguecha A, Hadifi T, et al.: *Advanced friction modeling for bulk metal forming processes*, *Production Engineering*, Vol. 5, No.6, 2011, pp.621–627.
- [10] Hu C., Yin Q., Zhao Z. *A novel method for determining friction in cold forging of complex parts using a steady combined forward and backward extrusion test*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 249, 2017 pp.57–66.
- [11] Tan X.: *Comparisons of friction models in bulk metal forming*, *Tribology International*, Vol.35, No.6, 2002, pp.385–393.
- [12] Sousa L.C., et al.: *Inverse methods in design of industrial forging processes*, *J. Mater. Process. Technol.* Vol.128, 2002, pp. 266–273.
- [13] Gavrus A., Massoni E., Chenot J.L.: *An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters*, *J. Mat. Proc. Techn.*, Vol. 60, 1996, pp. 447-454
- [14] Zhang Q., Mogens A., Bruschi S., Dubar L., Felder É.: *Measurement of friction in a cold extrusion operation: Study by numerical simulation of four friction tests*. *International Journal of Material Forming*, Vol. 1(S1), 2008, pp.1267–1270.
- [15] Nakamura T., Bay N., Zhang Z.L.: *FEM Simulation of Friction Testing Method Based on Combined Forward Rod-Backward Can Extrusion*, *Journal of tribology*, Vol.119, No.3, 1997, pp.501–506.
- [16] Nakamura T., Bay N., Zhang, Z.L.: *FEM Simulation of a Friction Testing Method Based on Combined Forward Conical Can-Backward Straight Can Extrusion*, *Journal of Tribology*, Vol. 120, No.4, 1998, pp. 716-723.
- [17] Im Y., Kang S.H., Cheon J.S.: *Finite Element Investigation of Friction Condition in a Backward Extrusion of Aluminum Alloy*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The ASME*, Vol.125, No.2, pp.378–383.
- [18] Čizmić, D. (2014). Istraživanje toka materijala pri kombinovanom istiskivanju u funkciji geometrije matrice. Master rad. Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu.

Milutinović, M., Dačević, B., Stefanović, Lj, Panić, M., Movrin, D.

INFLUENCE OF FRICTION MODELS ON THE ACCURACY OF NUMERICAL SIMULATION RESULTS IN THE COMBINED EXTRUSION PROCESS

Abstract: This paper analyzes the influence of different friction models on the accuracy of numerical simulations in cold bulk forming processes. For this purpose, the combined extrusion process was modeled using the Simufact Forming software package, employing the finite element method and three different friction models: Coulomb friction model, the limit shear stress model and combined friction model. To assess the accuracy of the created models, the results of numerical simulations related to the relevant workpiece dimensions were compared with experimentally obtained data.

Key words: Contact friction, friction models, combined extrusion, finite element method



Pejčić, D., Mišković, Ž., Popović, M., Pjević, M., Mitrović, R., Magdolen L., Danko J.¹⁾

PROCENA RIZIKA ADITIVNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA PRIMENOM KINIJEVE METODE²⁾

Rezime

Aditivne proizvodne tehnologije danas imaju veoma široku primenu, ne samo u industriji, već i u mnogim drugim privrednim granama. Njihova upotreba je veoma raznolika, s najčešćom primenom u izradi prototipova, odnosno, delova složene geometrije čija je izrada konvencionalnim tehnološkim postupcima otežana ili čak nemoguća. Ipak, uticaji aditivnih proizvodnih tehnologija na bezbednost i zdravlje ljudi još uvek nisu dovoljno istraženi. U ovom radu, primenom Kinijeve metode procene rizika, izračunate su osrednjene vrednosti rizika za različite tipove aditivnih proizvodnih tehnologija, uz pregled dostupnih standarda i zakonske legislative. Na osnovu sprovedene procene rizika, preporučene su i zaštitne mere za aditivne proizvodne tehnologije kod kojih su utvrđeni najviši nivoi rizika.

Ključne reči: aditivne proizvodne tehnologije, procena rizika, Kinijeva metoda procene rizika, zaštitne mere

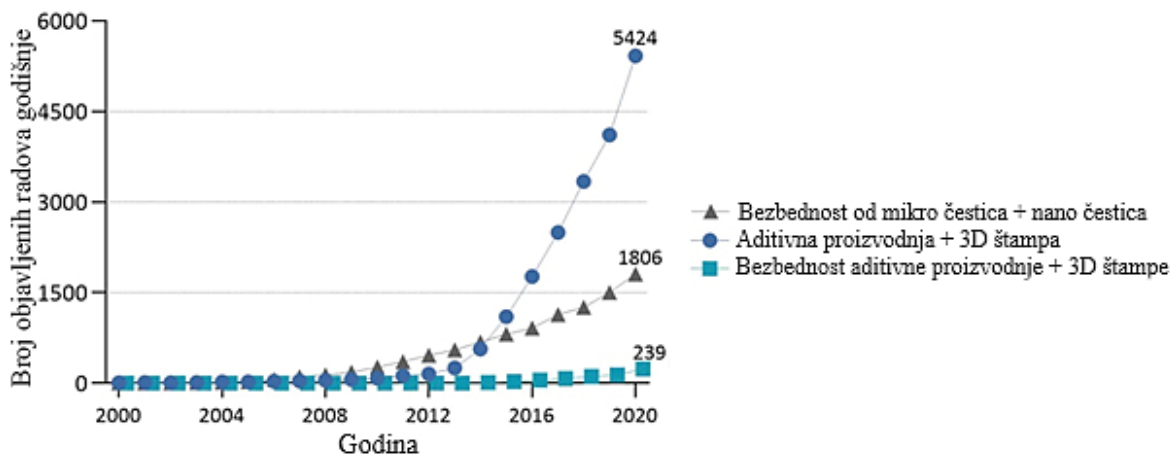
1. UVOD

Bezbednost i zaštita na radu od suštinskog su značaja za modernu industriju iz više razloga. Pre svega, zaštita zdravlja i bezbednosti zaposlenih smanjuje rizik od povreda, bolesti i nesreća na radnom mestu, što direktno doprinosi povećanju produktivnosti i motivacije zaposlenih. Pored toga, posvećenost bezbednosti pomaže kompanijama da izbegnu pravne probleme i finansijske gubitke povezane sa povredama na radu ili kršenjem zakonskih propisa. Takođe, kompanije koje investiraju u bezbednost grade pozitivnu reputaciju, što olakšava privlačenje talentovanih zaposlenih i jača poverenje među partnerima i klijentima. Ulaganje u zaštitu na radu ne samo da poboljšava operativnu efikasnost, već dugoročno smanjuje troškove povezane sa odsustvom radnika i osiguranjem, čineći ga strateškom prednošću u savremenom poslovanju.

Aditivne proizvodne tehnologije su u poslednje tri decenije doživele značajnu ekspanziju u industriji, a njihova primena postaje sve prisutnija i u svakodnevnom životu (pri čemu korisnici ne moraju da poseduju visok nivo tehničkog obrazovanja). Njihovo korišćenje dodatno olakšava raspoloživa literatura, uključujući uputstva, primere razvijenih prototipova i gotove 3D modele. Široka rasprostranjenost aditivnih proizvodnih tehnologija pozitivno utiče na razvoj tehnike ali i na društvo u celini, jer podstiče kreativnost i inovativnost korisnika. Međutim, negativni uticaji aditivnih proizvodnih tehnologija na zdravlje i bezbednost još uvek nisu dovoljno istraženi. Kao ilustracija ove činjenice može da posluži odnos broja radova iz oblasti aditivnih proizvodnih tehnologija i radova koji se bave njihovom bezbednošću i rizicima (Slika 1). Takođe, i analiza dostupne stručne literature pokazuje da se na unapređenju aditivnih proizvodnih tehnologija intenzivno radi, dok je bezbednost aditivnih proizvodnih tehnologija, posebno sa aspekta negativnog uticaja mikro i nano čestica, još uvek u drugom planu.

¹⁾ Danilo Pejčić, mast. inž. maš., (danilopejic32@gmail.com), prof. dr Žarko Mišković (zmiskovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Mihajlo Popović (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Radivoje Mitrović (rmitrovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, doc. dr Lubos Magdolen (lubos.magdolen@stuba.sk), Slovački Tehnički Univerzitet u Bratislavi – Mašinski fakultet, dr Jan Danko (jan.danko@stuba.sk), Slovački Tehnički Univerzitet u Bratislavi – Mašinski fakultet

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na bilateralnom projektu 337-00-3/2024-05/08: Assessment and reduction of risks related to the 3D printing technologies used in the automotive industry, koji finansijski podržavaju Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije i Ministarstvo nauke Republike Slovačke



Slika 1. Broj radova publikovanih u vezi sa rizikom i bezbednošću aditivnih proizvodnih tehnologija [1]

2. ADITIVNE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

Aditivne proizvodne tehnologije su tehnologije kod kojih se proizvod, odnosno, deo koji se izrađuje, dobija dodavanjem materijala sloj po sloj [2]. Iako se aditivnim proizvodnim tehnologijama mogu dobiti izuzetno kompleksni oblici trodimenzionalnih proizvoda, u principu se radi o 2.5D postupcima (2D slojevi koji se slažu jedan na drugi i na taj način se dolazi do treće dimenzije). U okviru standarda *ASTM ISO/ASTM52900-21: Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and Vocabulary*, definisano je sedam kategorija procesa, odnosno, sedam različitih tipova aditivnih proizvodnih tehnologija:

- Fotopolimerizacija materijala u kadi (Vat photopolymerization, eng.) - proces aditivne proizvodnje (u daljem tekstu aditivna proizvodnja – AP) u kome se tečni fotopolimer u kadi selektivno očvršćava svetlosno aktiviranom polimerizacijom [2]. Najznačajnija tehnologija je SLA.
- Direktna 3D štampa / Brizganje materijala (Material jetting, eng.) - proces AP u kome se kapljice materijala selektivno talože [2].
- Vezivna 3D štampa / Brizganje veziva (Binder jetting, eng.) - proces AP u kome se tečno vezivno sredstvo selektivno nanosi radi povezivanja praškastog materijala [2].
- Fuzija nanetog praha (Powder bed fusion, eng.) – proces AP u kome se toplotnom energijom selektivno tope i spajaju praškasti materijali [2]. Najznačajnije tehnologije su SLS, SLM i EBM.
- Ekstrudiranje materijala (Material extrusion, eng.) – proces AP u kome se materijal selektivno dozira kroz mlaznicu ili otvor [2]. Najznačajnija tehnologija je FFF.
- Deponovanje pod direktnim dejstvom izvora energije (Directed energy deposition, eng.) – proces AP u kome se fokusirana toplotna energija koristi za stapanje materijala koji se deponuje [2].
- Laminacija listova materijala (Sheet lamination, eng.) – proces AP u kome se listovi materijala spajaju da bi se oformio objekat [2].

3. PROCENA RIZIKA

Procena rizika aditivnih proizvodnih tehnologija je ključna za bezbednost korisnika, zaštitu radnog okruženja i očuvanje životne sredine. Na primer, tokom primene aditivnih proizvodnih tehnologija, materijali poput plastike, metala i smola oslobađaju štetne gasove i sitne čestice, koji mogu izazvati respiratorne probleme i dugoročne zdravstvene komplikacije. Procena rizika omogućava identifikaciju prisutnih opasnosti i štetnosti, kao i preduzimanje odgovarajućih zaštitnih mera (npr. korišćenje maski, adekvatne ventilacije i zatvorenih sistema 3D štampe). Takođe, procena rizika pomaže i u smanjenju negativnog ekološkog uticaja aditivnih proizvodnih tehnologija, omogućavajući izbor ekološki prihvatljivih materijala i minimizovanje otpada, uz usklađenost sa zakonskim regulativama, čime se izbegavaju dodatne pravne komplikacije i sankcije.

U Članu 4. (Značenje pojedinih izraza) Zakona o bezbednosti i zdravlju na radu („Sl. glasnik RS“, br. 35/2023) definisani su sledeći pojmovi od značaja za procenu rizika:

- *Opasnost* – okolnost ili stanje koje može ugroziti zdravlje ili izazvati povredu zaposlenog;
- *Štetnost* – osobina ili svojstvo koje može ugroziti zdravlje zaposlenog;
- *Rizik* – verovatnoća nastanka povrede, bolesti ili oštećenja zdravlja zaposlenog usled izloženosti opasnostima ili štetnostima;

- *Procena rizika* – sistematsko evidentiranje i procenjivanje svih opasnosti i štetnosti u radnom procesu, na radnom mestu i u radnoj sredini, koje mogu uzrokovati nastanak povreda na radu, bolesti ili oštećenja zdravlja, i utvrđivanje mogućnosti, odnosno načina sprečavanja, otklanjanja ili smanjenja rizika na najmanju moguću meru.

Danas postoji veliki broj metoda za procenu rizika, kao što su: FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, eng.), FMCA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis, eng.), FTA (Fault Tree Analysis, eng.), Singapurski model (3x3), itd. Međutim, primena ovih standardnih metoda često je otežana ili čak nemoguća za određene tipove aditivnih proizvodnih tehnologija. Raznolikost primenjenih materijala u aditivnim proizvodnim tehnologijama, kao što su plastika, metal i smole, donosi svoje specifične opasnosti i štetnosti, zahtevajući prilagođene pristupe proceni rizika. Kompleksnost sistema aditivnih proizvodnih tehnologija, koja uključuje intenzivnu interakciju između softvera i hardvera, takođe otežava primenu klasičnih metoda za procenu rizika.

Uzevši u obzir prethodno navedeno, u ovom radu je za procenu rizika primenjena Kinijeva metoda – prilagođena različitim tipovima aditivnih proizvodnih tehnologija.

3.1. Kinijeva metoda za procenu rizika

Kinijeva metoda predstavlja jednu od najčešće korišćenih metoda za procenu rizika. Ova metoda tretira ispunjenje rizika kao nastanak opasnosti ili štetnosti. Identifikacijom potencijalnih opasnosti i štetnosti utvrđuju se i mogući rizici po bezbednost na radu. Vrednost rizika se izračunava na način dat u jednačini (1), dok su vrednosti faktora date u tabeli 1 [3].

$$R (\text{Rizik}) = V (\text{Verovatnoća}) \times P (\text{Posledica}) \times U (\text{Učestalost}) \quad (1)$$

V	Opis kriterijuma za procenu verovatnoće	P	Opis kriterijuma za procenu posledica	U	Opis kriterijuma za procenu učestalosti
0,1	Jedva pojmljivo	1	Bolest, povreda koja zahteva prvu pomoć i nikakav drugi tretman	1	Izlaže se retko (godišnje)
0,2	Praktično neverovatno	2	Medicinski tretman od strane lekara	2	Izlaže se mesečno
0,5	Postoji, ali samo malo verovatno	3	Ozbiljne – invalidnost, ozbiljna pojedinačna povreda sa hospitalizacijom i izgubljenim danima	3	Izlaže se nedeljno
1	Mala verovatnost, ali moguća u ograničenim slučajevima	6	Veoma ozbiljne – pojedinačne nesreće sa smrtnim ishodom	6	Izlaže se dnevno
3	Malo moguće	10	Katastrofalne – sa višestrukim smrtnim ishodom	10	Izlaže se trajno, kontinualno
6	Sasvim moguće				
10	Predvidivo, očekivano				

Na osnovu numeričke vrednosti rizika (R), rizik se može podeliti u pet kategorija, koje su prikazane u tabeli 2 [3].

Nivo rizika (R)	0,1 – 20	21 – 70	71 – 200	201 – 400	Preko 400
Klasifikacija nivoa rizika	Zanemarljivo mali rizik	Mali rizik	Srednji rizik	Visoki rizik	Ekstremno visok rizik

3.2. Ček liste opasnosti i štetnosti

Za prepoznavanje opasnosti i štetnosti na radnom mestu koriste se ček (check) liste, prikazane u tabelama 3 i 4, bazirane na standardu ISO 12100:2010 – Bezbednost mašina – Opšti principi za projektovanje – Ocena rizika i smanjenje rizika [4].

Grupa opasnosti	Šifra	Podgrupa opasnosti	DA/NE
Mehaničke opasnosti koje se pojavljuju korišćenjem opreme za rad	(1)	Nedovoljna bezbednost zbog rotirajućih ili pokretnih delova	
	(2)	Slobodno kretanje delova ili materijala koji mogu naneti povredu zaposlenom	

	(3)	Unutrašnji transport i kretanje radnih mašina ili vozila, kao i pomeranja određene opreme za rad	
	(4)	Korišćenje opasnih sredstava za rad, koja mogu proizvesti eksplozije ili požar	
	(5)	Nemogućnost ili ograničenost pravovremenog uklanjanja sa mesta rada, izloženost zatvaranju, mehaničkom udaru, poklapanju i slično	
	(6)	Drugi faktori koji mogu da se pojave kao mehanički izvori opasnosti	
<i>Opasnosti koje se pojavljuju u vezi sa karakteristikama radnog mesta</i>	(7)	Opasne površine	
	(8)	Rad na visini ili u dubini, u smislu propisa o bezbednosti i zdravlju na radu	
	(9)	Rad u skućenom, ograničenom ili opasnom prostoru	
	(10)	Mogućnost klizanja ili spoticanja	
	(11)	Fizička nestabilnost radnog mesta	
	(12)	Moguće posledice ili smetnje usled obavezne upotrebe sredstava ili opreme za ličnu zaštitu na radu	
	(13)	Uticaji usled obavljanja procesa rada korišćenjem neodgovarajućih ili neprilagođenih metoda rada	
<i>Opasnosti koje se pojavljuju korišćenjem električne energije</i>	(14)	Druge opasnosti koje se mogu pojaviti u vezi sa karakteristikama radnog mesta i načinom rada	
	(15)	Opasnost od direktnog dodira sa delovima električne instalacije i opreme pod naponom	
	(16)	Opasnost od indirektnog dodira	
	(17)	Opasnost od toplotnog dejstva koje razvijaju električna oprema i instalacije	
	(18)	Opasnosti usled udara groma i posledica atmosferskog pražnjenja	
	(19)	Opasnost od štetnog uticaja elektrostatičkog naelektrisanja	
	(20)	Druge opasnosti koje se mogu pojaviti u vezi sa korišćenjem električne energije	

Tabela 4. Ček lista štetnosti [4]			
Grupa štetnosti	Šifra	Podgrupa štetnosti	DA/NE
<i>Štetnosti koje nastaju ili se pojavljuju u procesu rada</i>	(21)	Hemijske štetnosti, prašina i dimovi	
	(22)	Fizičke štetnosti	
	(23)	Biološke štetnosti	
	(24)	Štetni uticaji mikro-klime	
	(25)	Neodgovarajuća - nedovoljna osvetljenost	
	(26)	Štetni uticaji zračenja	
	(27)	Štetni klimatski uticaji	
	(28)	Štetnosti koje nastaju korišćenjem opasnih materija u proizvodnji, transportu, pakovanju, skladištenju ili uništavanju	
	(29)	Druge štetnosti koje se pojavljuju u radnom procesu, a koje mogu da budu uzrok povrede na radu zaposlenog, profesionalnog oboljenja ili oboljenja u vezi sa radom	
<i>Štetnosti koje potiču iz psihičkih i psihofizioloških napora koji se uzročno vezuju za radno mesto i poslove koje zaposleni obavlja</i>	(30)	Napori ili telesna naprezanja	
	(31)	Nefiziološki položaj tela	
	(32)	Napori pri obavljanju određenih poslova koji prouzrokuju psihološka opterećenja	
<i>Štetnosti vezane za organizaciju rada</i>	(33)	Odgovornost u primanju i prenošenju informacija, korišćenje odgovarajućeg znanja i sposobnosti, odgovornost u pravilima ponašanja, odgovornost za brze promene radnih procedura, intenzitet u radu, prostorna uslovljenost radnog mesta, konfliktne situacije, rad sa strankama i novcem, nedovoljna motivacija za rad, odgovornost u rukovođenju i slično	
	(34)	Rad duži od punog radnog vremena, rad u smenama, skraćeno radno vreme, rad noću, pripravnost za slučaj intervencija	
<i>Ostale štetnosti koje se pojavljuju na radnim mestima</i>	(35)	Štetnosti koje prouzrokuju druga lica	
	(36)	Rad sa životinjama	
	(37)	Rad u atmosferi sa visokim ili niskim pritiskom	
	(38)	Rad u blizini vode ili ispod površine vode	
	(39)	Ostale opasnosti i štetnosti	

4. REZULTATI PROCENE RIZIKA – ZA RAZLIČITE TIPOVE ADITIVNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJA

Na osnovu popunjenih ček lista opasnosti i štetnosti i primenjene Kinijeve metode procene rizika, u tabeli 5 su prikazane osrednjene vrednosti rizika za sve tipove aditivnih proizvodnih tehnologija prema standardu *ASTM ISO/ASTM52900-21*. Kvantitativne vrednosti postojećih rizika su usklađene i sa dostupnom literaturom, na način prikazan u referenci [5]. Crvenom bojom su označene najveće osrednjene vrednosti rizika, dok su zelenom bojom označene najmanje, pri čemu je osrednjena vrednost rizika dobijena kao aritmetička sredina identifikovanih parcijalnih rizika od pojedinačnih identifikovanih opasnosti i štetnosti – specifičnih za svaki tip aditivne proizvodne tehnologije.

Tabela 5. Procenjeni osrednjeni rizici različitih tipova aditivnih proizvodnih tehnologija		
<i>Tip aditivne proizvodne tehnologije</i>	<i>Srednja vrednost rizika od identifikovanih opasnosti</i>	<i>Srednja vrednost rizika od identifikovanih štetnosti</i>
Fotopolimerizacija materijala	31,00	220,00
Brizganje materijala	34,60	220,00
Brizganje veziva na materijal	28,20	233,33
Spajanje praškastog materijala	29,50	176,50
Ekstrudiranje materijala	84,75	166,67
Deponovanje pod dejstvom izvora energije	42,83	250,00
Laminiranje listova materijala	47,25	233,33

5. ADITIVNE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE I PREPORUČENE ZAŠTITNE MERE

Na osnovu tabele 5 utvrđeni su tipovi aditivnih proizvodnih tehnologija sa najvećom osrednjenom vrednošću rizika od identifikovanih opasnosti i štetnosti.

U tabeli 6 su prikazane procenjene vrednosti rizika za postupak ekstrudiranja materijala, što je aditivna proizvodna tehnologija kod koje je ustanovljen najveći rizik od identifikovanih OPASNOSTI (tabela 5).

Zaštitna oprema prilikom primene ekstrudiranja materijala najčešće podrazumeva zaštitnu masku. Tokom procesa dobijanja dela, mašina zagreva polazni materijal, što stvara rizik od pojave opekotina usled kontakta sa zagrejanim delovima mašine. Iz tog razloga neophodno je postaviti adekvatna upozorenja koja ukazuju na povišenu temperaturu delova. Preporučuje se čekanje od 30 minuta (vreme čekanja varira u zavisnosti od veličine dobijenog dela) pre nego što se deo ukloni sa radnog stola, kako bi temperatura mašine i samog dela bila snižena na bezbedan nivo.

Poželjno je izbegavati kontakt sa radnim prostorom mašina tokom njenog rada, u cilju izbegavanja mogućih povreda. Pre svake upotrebe potrebno je proveriti dovod električne energije i obezbediti redovno održavanje mašine.

Tabela 6. Procenjene vrednosti rizika opasnosti za ekstrudiranje materijala					
OPASNOSTI	OPIS OPASNOSTI	V	P	U	NIVO RIZIKA
Nedovoljna bezbednost zbog rotirajućih ili pokretnih delova	Pokretna glava ekstrudera	10	1	10	100
Opasne površine	Dobijanje oštrih delova, uklanjanje potpore	6	1	6	36
Opasnost od direktnog dodira sa delovima električne instalacije i opreme pod naponom	Napajanje uređaja je električno	0,5	6	1	3
Opasnost od toplotnog dejstva koje razvijaju električna oprema i instalacije	Zagrejana glava ekstrudera i radnog stola	10	2	10	200

U tabeli 7 prikazana je detaljna tabela procenjene vrednosti rizika za deponovanje pod dejstvom izvora energije, što je aditivna proizvodna tehnologija kod koje je ustanovljen najveći rizik od identifikovanih ŠTETNOSTI (tabela 5).

Zaštitna oprema prilikom deponovanja pod dejstvom izvora energije podrazumeva zaštitne naočare, rukavice (njihov materijal zavisi od materijala sa kojima dolaze u kontakt), antistatičko odelo, antistatične cipele i masku respirator. Prilikom rada mašine dolazi do pojave štetnih čestica i isparenja, iz tog razloga neophodno je postaviti mašinu u posebnu prostoriju sa adekvatnim sistemom za ventilaciju.

Uticaj štetnih zračenja može se smanjiti korišćenjem zaštitnih ekrana i barijera. Ukoliko je potrebno ukloniti zaštitni deo mašine (za vreme njenog rada), neophodno je koristiti zaštitne naočare namenjene za vrstu zračenja koja se emituje na mašini.

Prahove koji se koriste treba skladištiti isključivo u prostorima iz kojih su eliminisani svi otvoreni plamenovi i drugi izvori paljenja. Potrebno je držati ih dalje od izvora toplote ili plamena i obratiti pažnju na isparenja koja mogu biti zapaljiva i toksična. Neophodno je preduzeti mere predostrožnosti protiv statičkog elektriciteta. Materijal treba skladištiti u vatrootpornoj strukturi, a prostor u kojem se skladišti mora biti opremljen odgovarajućom ventilacijom i osvetljenjem. Tokom korišćenja materijala u procesu, potrebno je biti posebno pažljiv kako ne bi došlo do požara. Za detaljne preporuke o svakom materijalu, treba se konsultovati sa proizvođačem ili prodavcem.

Rad duži od punog radnog vremena, noćne smene i pripravnost za slučaj intervencije mogu dovesti do umora i stresa kod radnika, što povećava rizik od pojave nesreća na radu. Kako bi se smanjila ova vrsta rizika preporučuje se ravnomerna podela radnih zadataka između više zaposlenih, uz obezbeđivanje adekvatnog odmora između smena.

Tabela 7. Procenjene vrednosti rizika štetnosti za kategoriju procesa deponovanja pod dejstvom izvora energije					
ŠTETNOSTI	OPIS ŠTETNOSTI	V	P	U	NIVO RIZIKA
Hemijske štetnosti, prašina i dimovi	Korišćenje prahova	10	3	10	300
Štetni uticaji zračenja	Elektronski snop, lasersko zračenje	10	3	10	300
Štetnosti koje nastaju korišćenjem opasnih materija u proizvodnji, transportu, pakovanju, skladištenju ili uništavanju	Korišćenje prahova i žica u proizvodnji delova	10	3	10	300
Rad duži od punog radnog vremena, rad u smenama, skraćeno radno vreme, rad noću, pripravnost za slučaj intervencija	Rad duži od radnog vremena, noćne smene, moguće vanredne intervencije	10	1	10	100

6. ZAKLJUČAK

Aditivne proizvodne tehnologije, iako relativno nove, veoma brzo su našle primenu u najrazličitijim industrijskim sektorima, ali i drugim oblastima ljudske delatnosti. To se može pripisati njihovoj dostupnosti, jednostavnosti korišćenja i sposobnosti za proizvodnju raznovrsnih delova i proizvoda, često veoma kompleksne geometrije. Pored toga, aditivne proizvodne tehnologije značajno smanjuju vreme potrebno za izradu prototipova, što ubrzava razvoj novih proizvoda i inovacija. Ipak, pored navedenih prednosti, važno je razmotriti i rizike povezane s upotrebom aditivnih proizvodnih tehnologija.

Najveći identifikovani rizici vezani su za izloženost hemijskim štetnostima, poput isparenja, gasova, smola i metalnih praškova, pri čemu se primećuje značajna razlika između kvantitativnih vrednosti rizika od opasnosti i rizika od štetnosti. Tehnologija deponovanja pod dejstvom izvora energije pokazala se kao najrizičnija u pogledu štetnosti, dok je ekstrudiranje materijala najrizičnije kada su u pitanju opasnosti. Za ove tehnologije predložene su zaštitne mere koje bi mogle minimizovati identifikovane rizike. Pобољшanje bezbednosti aditivnih proizvodnih tehnologija može se dodatno postići usvajanjem novih standarda i regulativa. Ovi standardi bi trebali da sadrže protokole za procenu rizika, preporuke za bezbednosne mere i procedure za njihovu implementaciju. Takođe, obrazovanje i informisanje korisnika o pravilnoj upotrebi i potencijalnim rizicima aditivnih proizvodnih tehnologija su veoma značajni za smanjenje rizika i povećanje bezbednosti korisnika.

7. LITERATURA

- [1] Alijagic A., Engwall M., Särndahl E., Karlsson H., Hedbrant A., Andersson L., Karlsson P., Dalemo M., Scherbak N., Färnlund K., Larsson M., Persson A.: *Particle Safety Assessment in Additive Manufacturing: From Exposure Risks to Advanced Toxicology Testing*, Front Toxicol, 2022.
- [2] ASTM ISO/ASTM52900-21: *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and Vocabulary*. DOI: 10.1520/F3177-21.
- [3] Stanković M., Stanković V.: *Comparative analysis of methods for risk assessment – “KINNEY” and “AUVA”*, Safety Engineering 3, 2013, 129–136.
- [4] ISO 12100:2010: *Bezbednost mašina – Opšti principi za projektovanje – Ocena rizika i smanjenje rizika*. 2010.
- [5] Pejčić D.: *Procena rizika aditivnih proizvodnih tehnologija*, Master rad, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, 2024.

Pejčić, D., Mišković, Ž., Popović, M., Pjević, M., Mitrović, R., Magdolen L., Danko J.

RISK ASSESSMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES USING THE KINNEY METHOD

Abstract: Additive manufacturing technologies today have a very wide range of applications, not only in industry but also in many other sectors. Their use is highly diverse, with the most common applications in the production of prototypes and complex geometric parts that are difficult or even impossible to produce using conventional technological processes. However, the impacts of additive manufacturing technologies on safety and health are still not sufficiently researched. In this paper, using the Kinney risk assessment method, average risk values were calculated for different types of additive manufacturing technologies, along with an overview of available standards and technical regulations. Based on the conducted risk assessment, protective measures were recommended for additive manufacturing technologies where the highest levels of risk were identified.

Key words: Additive manufacturing, risk assessment, Kinney risk assessment method, protective measures



Miloš Vorkapić¹⁾, Stefan Ilić²⁾, Marko Spasenović³⁾, Miloš Vasić⁴⁾

PRIMENA 8R STRATEGIJE U REALIZACIJI NOSIVIH SENZORA⁵⁾

Rezime

Rezime: U radu je prikazan algoritam primene 8R strategije u okviru cirkularne ekonomije u realizaciji nosivih senzora na tekstilu. Primena aditivne proizvodnje u realizaciji nosivih senzora u tekstilnoj industriji podrazumeva koncept održive proizvodnje kroz minimalno generisanje otpada, realizaciju složene geometrije, brzog izradi prototipa. Takođe, aditivna proizvodnja se danas posmatra kao moćan alat u realizaciji kompletnog senzora primenom sirovih ili recikliranih materijala. U radu je dat algoritam za primenu i upotrebu nosivih senzora kroz primenu 8R strategije. Proizvodnja se odnosi na proces 3D štampe, realizaciju fleksibilne štampe, ugradnju elektronskih komponenti. Svi pomenuti delovi mogu brzo da se zamene, modifikuju, rastave i recikliraju, što je u osnovi bitno za cirkularnu ekonomiju.

Ključne reči: 8R strategija, aditivna proizvodnja, nosivi senzori, fleksibilna elektronika

1. UVOD

Aditivne tehnologije imaju veliku primenu u tekstilnoj industriji, pogotovo kada je reč o 3D štampi na tekstilnim podlogama, direktnom 3D štampanju tekstila ili kombinovanim tehnikama [1]. U tekstilnoj industriji modni predmeti ili detalji sve više se realizuju na zahtev kupaca gde se direktno koristi konkretan materijal i ne stvara se otpad [2]. Takođe i nosivi senzori dozvoljavaju primenu aditivne tehnologije. Tu se odvija štampa termoplastičnih polimera na tekstilu i pri tome se formira novi kompozit [3]. Izrada fiksnih senzorskih elemenata ali i različitih modnih detalja dovodi do formiranja lokalnih ojačanja (adhezije između polimera i tekstila) [4], odnosno 3D odštampani tekstil postaje krut i manje udoban [5]. Štampa na pamuku i poliesterskom tekstilu daje odličan spoj kako na površini tako i u samoj strukturi tekstila [6].

Formirani spoj tekstil-termoplastični polimer treba da poboljša mehaničku izdržljivost, pouzdanost, električnu provodljivost. U realizaciji nosivih senzora veoma je interesantna upotreba visoko provodljivog i perivog tekstila [7]. Međutim, postoje ozbiljne poteškoće u vezi između nosivih senzora i tekstila tokom izrade prototipa. Parametri štampe, svojstva polimera i tipovi tekstila imaju veliki uticaj na silu prijanjanja (sila adhezije) [8].

Nosivi senzori sadrže različite senzorske elemente. Materijali konvencionalnih senzorskih elemenata uglavnom su kruti što ograničava njihovu upotrebu. Zbog toga se teži realizaciji fleksibilnih nosivih konstrukcija, koje prvenstveno uključuju rastegljive termoaktivne i termoplastične polimere [9]. Fleksibilni senzori se lako prilagođavaju ljudskoj koži, pa je moguće nesmetano i brzo prikupljanje signala iz ljudskog tela [10]. Nosivi senzori na tekstilu uglavnom se koriste za monitoring vitalnih životnih funkcija kao i za kontrolu pokreta tela, disanja i znojenja, u merenju pulsa, krvnog pritiska i telesne temperature [11].

U ovom radu biće predstavljen 8R algoritam za realizaciju nosivih senzora sa osvrtom na otpad kao strateškom sirovinom u održivom razvoju preduzeća. Cilj je da se primenom ovog algoritma poštuju svi principi cirkularne ekonomije i implementira aditivna proizvodnja kroz svaki od R modela.

¹⁾ dr Miloš Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju,

Nacionalni institut od značaja za Republiku Srbiju; Njegoševa 12, 11000 Beograd (worcky@nanosys.ihm.bg.ac.rs)

²⁾ MSc Stefan Ilić, Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju,

Nacionalni institut od značaja za Republiku Srbiju; Njegoševa 12, 11000 Beograd (stefan.ilic@nanosys.ihm.bg.ac.rs)

³⁾ dr Marko Spasenović, Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju,

Nacionalni institut od značaja za Republiku Srbiju; Njegoševa 12, 11000 Beograd (spasenovic@nanosys.ihm.bg.ac.rs)

⁴⁾ dr Miloš Vasić, Institut IMS A.D.; Bul. Vojvode Mišića 43, 11040 Beograd (milos.vasic@institutims.rs)

⁵⁾ Rezultati istraživanja su finansijski podržani od Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (ugovori: 451-03-66/2024-03/200026 i 451-03-66/2024-03/200012). Takođe, postoji podrška kroz UNDP cirkularni vaučer broj 00131890/00145003/2023/01-12.

2. CIRKULARNA EKONOMIJA

Prema Geissdoerfer i dr. (2017) [12] koncept cirkularne ekonomije (CE) se definiše kao „regenerativni sistem” koji podrazumeva racionalno korišćenje prirodnih resursa, što dovodi do optimizacije raspoloživih resursa i promoviše ponovnu upotrebu proizvoda, komponenti i materijala tokom dugotrajnijih ciklusa. Prema Popović i dr. [13] kriterijumi CE se ogledaju u smanjenju upotrebe prirodnih resursa i nivou emisije štetnih gasova, smanjenju otpada i povećanje udela obnovljivih ili recikliranih resursa.

CE se prihvata kao održivi poslovni model koji se bazira na scenariju završetka upotrebe i optimizacije tokova komponenti na kraju upotrebe proizvoda. Scenario završetka upotrebe omogućava izradu proizvoda po modulima koji će biti odgovorni za ponovnu upotrebu, recikliranje ili odlaganje. Takođe, tu se daje prostor za poboljšanje i predlozi dizajna nakon završetka upotrebe [14].

Poslovni ili strateški modeli postali su uobičajen konceptualni alat za implementaciju CE kako bi se smanjila potrošnja resursa i materijala [15]. Tu je veoma prihvatljiv 8R model gde svako R označava individualnu CE strategiju. Prvobitno je CE definisana kao 3R, zatim je proširena na 6R, da bi se na kraju razvila kao 9R strateški model. U ovom radu fokus će biti na 8R modelu, i neće se razmatrati poslednji R model koji se odnosi na održivost koji nije predmet daljeg razmatranja. Prema mnogobrojnim literaturnim izvorima [16-18] u Tabeli 1 prikazani su 8R elementi strategije CE.

Tabela 1. R elementi strategije CE

R	Naziv	Opis	Aktivnost
1	Odbijanje Refuse	Uzima se u obzir kada proizvodi nisu održivi ili imaju negativan uticaj na životnu sredinu i pri tome se kupcima sugeriše da izbegavaju takve proizvode.	Proizvodu treba da se definiše nova namena ili ako se zadržava njegova funkcija da se modernizuje ili tehnološki unapredi.
2	Preispitivanje Rethink	Vrši se preispitivanje ideje, koncepta, definisanih procesa, metoda rada i postupaka realizacije.	Upotreba proizvoda treba da se intenzivira kroz eksploataciju proizvoda kao uslugu. Time proizvod dobija multifunkcionalnu ulogu.
3	Smanjenje Reduce	Vrši se minimiziranje upotrebe resursa, materijala i energija iz prirode, kao i odlaganje otpada.	Treba povećati efikasnost u proizvodnji ili upotrebi proizvoda trošenjem manje prirodnih resursa i materijala.
4	Ponovna upotreba Reuse	U upotrebi je proizvod koji je još uvek u dobrom stanju i koji uspeva da ispuni svoju prvobitnu funkciju.	Uključiti ponovno dizajniranje proizvoda ili komponenti koji mogu lako da se servisiraju, popravljaju, obnavljaju i ponovo koriste.
5	Popravka Repair	Servisiranje (ili popravka) neispravnog proizvoda tako da služi istoj svrsi ili da odezbeđuje istu funkciju.	Treba izvršiti servisiranje neispravnog proizvoda kako bi mogao da se dalje koristi u svojoj prvobitnoj nameni (funkciji).
6	Remont Refurbish	Remont proizvoda uz stalno poboljšanje sa održanjem kvaliteta proizvoda tokom produženog životnog veka.	Primeniti operacije čišćenja, pranja, ponovnog farbanja i ispitivanja funkcionalnosti.
7	Ponovna proizvodnja Remanufacture	Strategija koja se odnosi na obnavljanje ili reprodukcija upotrebljenih delova.	Upotrebiti odbačene proizvode u izradi novih proizvoda koji će imati iste funkcije i biti sličnog kvaliteta kao i odbačeni proizvod.
8	Recikliranje Recycle	Strategija recikliranja podrazumeva upotrebu recikliranih materijala i otpadnih nus proizvoda.	Ukoliko materijal ne može da se iskoristi trebalo bi da se ispita kompletan koncept od projektovanja, izbora materijala do finalizacije gotovog proizvoda.

3. ADITIVNA PROIZVODNJA I CE KONCEPT

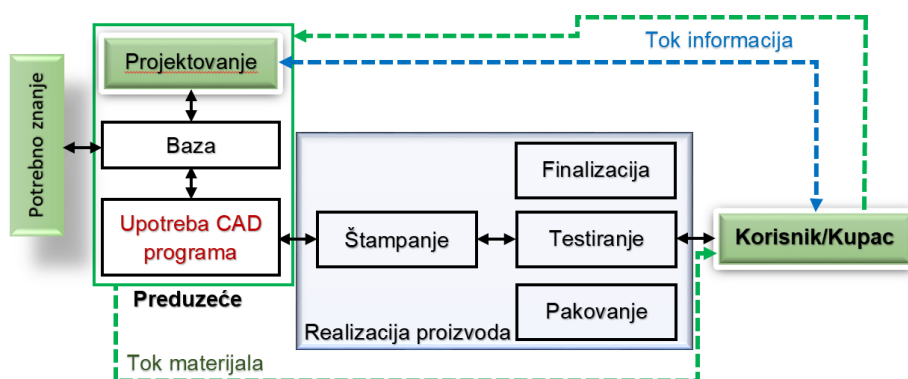
Aditivna proizvodnja (AP) omogućava ponovnu upotrebu, popravku i recikliranje proizvoda na kraju životnog ciklusa [19]. AP smanjuje ukupnu masu i prekomerno korišćenje vode, energije i materijala, što ukazuje na to da je u skladu sa konceptom CE [20]. U tabeli 2 data je primena AP u konceptu CE.

Tabela 2. Primena AP u konceptu CE

Proces	Cilj CE
Lansiranje proizvodnje	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se velikoserijska i masovna proizvodnja.
Upotreba resursa	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se upotreba materijala, što dovodi do smanjenja otpada.
Prilagođavanje proizvoda tržištu	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se mogućnost proizvodnje istih ili zastarelih proizvoda.
Popravka i održavanje proizvoda	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se mogućnost da proizvod bude odbačen. AP omogućava brzu zamenu neispravnih komponenti i time ponovnu upotrebu proizvoda.
Sistem zatvorene petlje	<ul style="list-style-type: none"> • Stvara se kružni tok materijala koji uključuje prvobitne resurse uz minimalnu primenu novih.
Lokalizovana proizvodnja	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se lanac snabdevanja, a time i emisija ugljeničnog otiska. Proizvodnja se odvija na jednoj lokaciji.
Izrada prototipa	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se vreme izrade uz obezbeđenje optimalnog i održivog dizajna prototipa.
Recikliranje materijala	<ul style="list-style-type: none"> • U mnogome se poboljšava održivost proizvodnog procesa.
Smanjenje otpada	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizira se otpad, jer se koristi tačno potrebna količina materijala u realizaciji proizvoda.

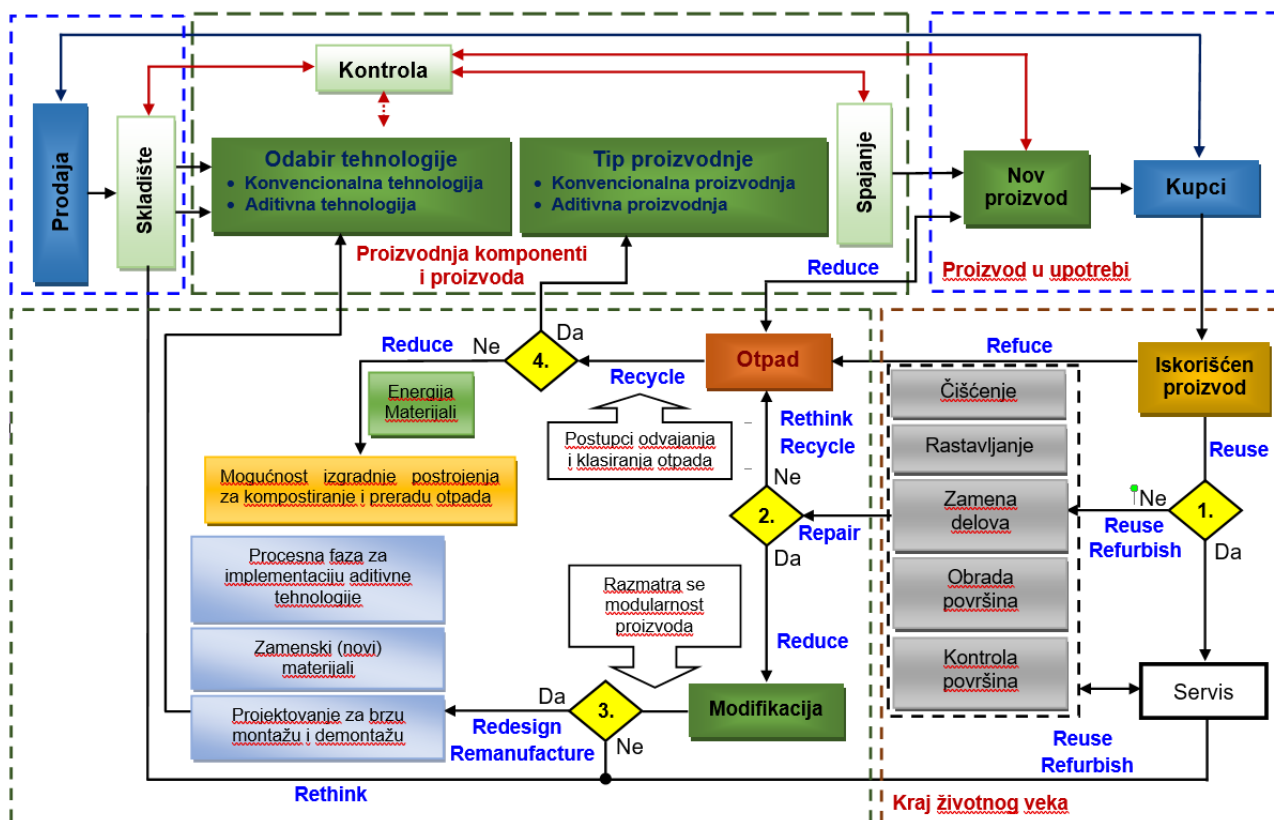
4. ALGORITAM U REALIZACIJI MODELA

8R model u konceptu CE definiše korisnika kao potencijalnog prodavca i kupca uređaja. Korisniku se daje mogućnost da proda ili zameni korišćeni uređaj. Digitalno prikazivanje predmeta uz pomoć CAD softverskih alata omogućilo je kvalitetnu saradnju sa kupcem [21]. Kupci utiču na redizajn proizvoda i daju se kompromisna rešenja. Time se stvara jedinstvena baza podataka koja je od obostranog interesa za dalju saradnju između kupca i preduzeća, videti Sliku 1.



Slika 1. Uticaj kupca u realizaciji proizvoda

U ovom radu potrebno je da se definišu svih 8R elemenata koji su važni sa stanovišta primene CE. Primena 8R algoritma u izradi novih ili popravci korišćenih elemenata/delova prikazan je na Slici 1. Posmatrajući proces održivog razvoja preduzeća primena ovog modela ima oko 80% pozitivnog uticaja na okolinu [22] Algoritam primene 8R modela kroz implementaciju AP u realizaciji novih/modifikovanih ili redizajniranih postojećih elemenata daje kompletan prikaz značaja svakog R modela strategije CE. U realizaciji algoritma korišćeni su brojni literaturni izvori [23-24], videti Sliku 2.



Slika 2. CE i 8R algoritam u realizaciji nosivih senzora

Proizvod može da se sastoji od potpuno novih, repariranih (osveženih) i modifikovanih delova. Naravno, postoji i kombinacija navedenih komponenti/sklopova. Tok aktivnosti (videti Sliku 2) koji opisuje 8R algoritam dat je u Tabeli 3.

Tabela 3. Tok aktivnosti za implementaciju 8R modela

Tok	Odluka	Aktivnost	Zaključak	Primena R
Kupovina proizvoda od korisnika	Da	Proizvod se proverava odmah nakon primanja.	Ukoliko je proizvod ispravan, znači može da se još upotrebljava. Ukoliko je proizvod neispravan/nije u upotrebi odlaže se u otpad	Refuse / Reuse
Ispravnost proizvoda	Da	Proizvod u funkciji	Vrši se vizualni pregled i servisiranje proizvoda. Ispravni delovi se nalaze u skladištu. Servisiranje podrazumeva rastavljanje proizvoda, čišćenje, proveru ispravnosti rastavljenih delova te popravak ili zamenu novima.	Reuse / Refurbish

	Ne	Proizvod nije u funkciji	Neispravan proizvod se rastavlja. Upotrebljivi delovi se odvajaju i procesom reparacije (specijalnom doradom) vraćaju u stanje upotrebljivosti. Delovi van upotrebe (polomljeni ili havarisani) odlažu se u otpad koji će se kasnije upotrebiti.	Rethink / Recycle
Upotrebljivost komponenti	Da	Komponente su tehn. ispravne.	Izvođe se dodatne tehnološke operacije (npr. čišćenje, pranje, poliranje, farbanje i zamena pojedinih elemenata. Sređeni elementi odlažu se u skladište ispravnih delova za ponovnu upotrebu.	Reuse / Repair
	Ne	Komponente su tehn. neispravne	Delovi ili komponente koji se ne koriste odlažu se u otpad.	Reduce / Recycle
Modifikacija proizvoda	Da	Postoji potreba	Ako je poduzeće strateški orijentisano, modifikacija proizvoda predstavlja dobru odluku.	Remanufacture
	Ne	Proizvod se ne modifikuje	Realizovan proizvod ide u skladište gotovih proizvoda.	Rethink
Reciklaža otpada	Da	Recikliranje moguće	Preduzeća imaju tehnologiju za preradu otpada gde će se materijal ponovo upotrebiti.	Rethink / Recycle
	Ne	Recikliranje nije moguće.	Preduzeće ima zastarele tehnologije što nije u skladu sa kriterijumima CE.	Reduce

U realizaciji nosivih senzora 8R algoritam se bazira na metodologiji koja se koristi za optimizaciju procesa proizvodnje i sam proces projektovanja. S tim u vezi, 8R algoritam u proizvodnji nosivih senzora odvijao bi se kroz sledeće faze [25-26]:

1. Istraživanje tržišta – Analiza tržišta i zahteva korisnika/kupaca, uključujući najnovija dostignuća na ovom polju.
2. Zahtevi – Specifikacija i funkcionalnost koje senzor treba da ispuni. Ovo je sve u vezi i sa okruženjem u kojem će raditi.
3. Dostupnost resursa – Vršiti se identifikacija potrebnih resursa: materijali, tehnologije i ljudstvo. Korišćenje resursa tokom proizvodnje znači smanjenje rasipanja materijala. Bitno jer da se odaberu materijali koji imaju što manji uticaj na okolinu. Poželjno je da su to materijali koji mogu da se recikliraju ili ponovo upotrebe. Ovde se posebno razmatra upotreba aditivne tehnologije.
4. Dizajniranje nosivih senzora za više životnih ciklusa - Podrazumeva realizaciju modularnih i nadogradive senzore gde se pojedinačne komponente ili sklopovi mogu zameniti ili nadograditi bez odbacivanja celog uređaja.
5. Razvoj – Izrada, ispitivanje i testiranje funkcionalnih prototipova. Ovde se vrši i optimizacija softvera i hardvera.
6. Testiranje – Sprovođenje različitih testova kako bi se osigurala pouzdanost i preciznost senzora u različitim uslovima eksploatacije.
7. Proizvodnja zatvorenog tipa. – Ova proizvodnja podrazumeva korišćenje recikliranog materijala. Što se tiče senzora, oni se rastavljaju, ponovno obrađuju ili recikliraju na kraju njihovog životnog ciklusa. Ovde se vrši planiranje i uspostavljanje proizvodnog procesa, uključujući automatizaciju i kontrolu kvaliteta.
8. Pregled – Vršiti se analiza povratnih informacija od korisnika kako bi se unapredili budući modeli i procesi.

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Prikazan 8R algoritam na primeru nosivih senzora u konceptu CE pokazuje svoje prednosti i nedostatke. Prednosti se ogledaju u primeni različitih rešenja, uz permanentno razvijanje novih materijala koji su sve više prikladniji za recikliranje. Nedostaci se ogledaju u smeštajnim kapacitetima, sortiranju i ponovnoj upotrebi ovakve vrste otpada. Procenjuje se da će do 2030. godine oko 65% svetske populacije koristiti neku vrstu nosivih uređaja, odnosno da će tržište nosivih uređaja eksponencijalno rasti tako da će količina od elektronski otpada uveliko premašiti 50 miliona tona godišnje, što je poražavajući podatak. Primenom pomenutog algoritma 8R modela CE na proizvodnju i upotrebu nosivih uređaja otpad bi mogao da se značajno smanji. Proizvod po svojoj definiciji uključuje razvoj, primenu nove tehnologije, mogućnost poboljšanja, zamene ili modifikacije komponenti ili delova, rastavljaljivost (modularnost), popravke i ponovnu upotrebu komponenti. U svakom od ovih aktivnosti postoji prostor za minimiziranje otpada.

Primena 8R algoritma imaće veliki uticaj na smanjenje e-otpada na tržištu nosivih uređaja, jer primenom bioplastičnih i termoplastičnih materijala trebalo bi da se poveća životni vek proizvoda sa što manjom emisijom ugljen-dioksida i upotrebom prirodnih resursa. Nosivi uređaji/senzori igraće ključnu ulogu u svakodnevnom životu. Sve veći je trend minijaturizacije dizajna senzorskog i elektronskog sklopa uz poboljšanje preciznosti merenja više parametara (kvalitet vazduha, izloženost UV zračenju, itd...). AP u održivom razvoju preduzeća primenom 8R algoritma omogućava korisniku brzu realizaciju nosivih uređaja/senzora upotrebom otpadnog materijala. Ovom putem AP postaje delotvoran alat u radu sa specifičnim i sofisticiranim proizvodima, dok sa druge strane AP dobija važnu ulogu u smislu potrošnje energije, kraćih lanaca snabdevanja, smanjenih troškova i kraćeg vremena proizvodnje.

Najdostupnija metoda 3D štampe je FDM (engl. Fused Deposition Modeling) štampanje. FDM štampanje sve više postaju dostupniji i pristupačniji za rad. Pri radu ovog štampanja model se realizuje po slojevima. Korisnicima je omogućeno da učestvuju u realizaciji modela od jednostavnih elektroničkih prototipova do složenih mehaničkih delova, umetničkih kreacija, predmeta za domaćinstvo. U radu je prikazan algoritam i postupci za uvođenje strategije 7R u održivi razvoj preduzeća.

Prema algoritmu realizacija nosivog uređaja/senzora trebalo bi da proizvodi manje materijalnog otpada i smanji emisiju ugljeničnog otiska. Nažalost, i pored prednosti koje pruža algoritam još uvek postoje prepreke za prihvatanje CE koncepta. To se ogleda u slabo razvijenim istraživačkim i razvojnim aktivnostima što za posledicu ima nemogućnost brzog odgovora na zahteve tržišta.

6. LITERATURA

- [1.] Chan, K. P., He, F., Atwah, A. A., Khan, M.: *Experimental investigation of self-cleaning behaviour of 3D-printed textile fabrics with various printing parameters*. Polymer Testing, Vol. 119, pp. 107941, 2023.
- [2.] Hermann, R., Hodul, J., Keprdová, Š.: *Effect of specimen geometry on selected physical and mechanical properties of epoxy-based building materials*. Key Engineering Materials, Vol. 868, pp. 24-31, 2020.
- [3.] Sabantina, L., Kinzel, F., Ehrmann, A., Finsterbusch, K.: *Combining 3D printed forms with textile structures-mechanical and geometrical properties of multi-material systems*. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 87, No. 1, p. 012005). IOP Publishing, 2015.
- [4.] Pei, E., Shen, J., Watling, J.: *Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, No. 5, pp. 556-571, 2015.
- [5.] Xiao, Y. Q., Kan, C. W.: *Review on development and application of 3D-printing technology in textile and fashion design*. Coatings, Vol. 12, No. 2, pp. 267, 2022.
- [6.] Grimmelsmann, N., Kreuziger, M., Korger, M., Meissner, H., Ehrmann, A.: *Adhesion of 3D printed material on textile substrates*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 24, No. 1, pp. 166-170, 2018.
- [7.] Simegnaw, A. A., Malengier, B., Rotich, G., Tadesse, M. G., Van Langenhove, L.: *Review on the Integration of Microelectronics for E-Textile*. Materials, Vol. 14, No. 17, pp. 5113, 2021.
- [8.] Sanatgar, R. H., Campagne, C., Nierstrasz, V.: *Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters*. Applied Surface Science, Vol. 403, pp. 551-563, 2017.
- [9.] Li, S., Li, H., Lu, Y., Zhou, M., Jiang, S., Du, X., Guo, C.: *Advanced textile-based wearable biosensors for healthcare monitoring*. Biosensors, Vol. 13, No. 10, pp. 909, 2023.
- [10.] Xu, K., Lu, Y., Takei, K.: *Multifunctional skin-inspired flexible sensor systems for wearable electronics*. Advanced Materials Technologies, Vol. 4, No. 3, pp. 1800628, 2019.
- [11.] Majumder, S., Mondal, T., Deen, M. J.: *Wearable sensors for remote health monitoring*. Sensors, Vol. 17, No. 1, pp. 130, 2017.
- [12.] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., Hultink, E. J.: *The Circular Economy – A new sustainability paradigm?* Journal of Cleaner Production, Vol. 143, pp. 757-768, 2017.
- [13.] Popović, A., Stanković, Z., Todorović, A., Rajić, M.: *Economic monitoring of the circular transformation as a challenge for mechanical engineering*. Innovative Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 89-109, 2023.
- [14.] Cong, L., Zhao, F., & Sutherland, J. (2018). A design method to improve end-of-use product recyclability for circular economy. Journal of Mechanical Design. <https://doi.org/10.1115/1.4041574>.

- [15.] Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: Measuring innovation in the product chain. *Planbureau voor de Leefomgeving*, 2544.
- [16.] Prieta-Sandoval V., Jaca C., Ormazabal M.: *Towards a consensus on the circular economy*. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 179, pp. 605-615, 2017.
- [17.] Linder, M.: Ripe for disruption: reimagining the role of green chemistry in a circular economy. *Green Chemistry Letters and Reviews*, Vol. 10, No. 4, pp. 428-435, 2017.
- [18.] Bocken, N. M., De Pauw, I., Bakker, C., Van Der Grinten, B.: *Product design and business model strategies for a circular economy*. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 308-320, 2016.
- [19.] Despeisse, M., Ford, S.: The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. In: *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Tokyo, Japan, September 7-9, 2015, Proceedings, Part II 0* (pp. 129-136). Springer International Publishing, 2015.
- [20.] Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M.: *Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment*. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 21, No. 6, pp. 687-697, 2010.
- [21.] Rylands, B., Böhme, T., Gorkin, R., Fan, J., Birtchnell, T.: *The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems*. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 27, No. 7, pp. 969-989, 2016.
- [22.] Diaz, A., Schöggel, J. P., Reyes, T., Baumgartner, R. J.: *Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management*. *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 26, pp. 1031-1045, 2021.
- [23.] Sartal, A., Bellas, R., Mejías, A. M., García-Collado, A.: *The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review*. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 1687814020925232, 2020.
- [24.] Vorkapić, M., Ivanov, T.: Algorithm for Applying 3D Printing in Prototype Realization Following Circular Production and the 6R Strategy: Case-Enclosure for Industrial Temperature Transmitter. In: *International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies* (pp. 44-78). Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [25.] Perez, A. J., Zeadally, S.: *Recent advances in wearable sensing technologies*. *Sensors*, Vol. 21, No. 20, pp. 6828, 2021.
- [26.] Vivaldi, F., Dallinger, A., Poma, N., Bonini, A., Biagini, D., Salvo, P., ...Di Francesco, F.: *Sweat analysis with a wearable sensing platform based on laser-induced graphene*. *APL Bioengineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 036104, 2022.

Miloš Vorkapić, Stefan Ilić, Marko Spasenović, Miloš Vasić

APPLICATION OF THE 8R STRATEGY IN WEARABLE SENSORS REALIZATION

Abstract: *The manuscript provides an algorithm for applying the 8R strategy within the circular economy framework to realize wearable sensors on textile. The application of additive manufacturing in realizing wearable sensors in textile industry implies sustainable production through minimal waste generation, complex geometry, and rapid prototyping. Also, today, additive manufacturing is seen as a powerful tool in realizing a complete sensor using raw or recycled materials. Also, the manuscript gives an algorithm for the application and use of wearable sensors through the additive manufacturing application. Manufacturing refers to the process of 3D printing, the realization of flexible printing, and the installation of electronic components. All the mentioned parts can be quickly replaced, modified, disassembled, and recycled, essential for a circular economy.*

Key words: *8R strategy, additive manufacturing, wearable sensors, flexible electronics*

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



40. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, oktobar 2024.

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 1

Lovrec, D., Šitum, Ž., Tič, V. DEVELOPMENT OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT FOR REMOTE CONTROL APPLICATION	3.1
Tič, V., Benić, J. REMOTE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT USING BECKHOFF SOFT- PLC	3.7
Brenjo, K., Jevtić, Đ., Jokić, A., Petrović, M.M., Miljković, Z. INTELIGENTNI TEHNOLOŠKI SISTEMI I PROCESI - NOVI PRAVCI RAZVOJA INTELIGENTNO-VIZUELNOG UPRAVLJANJA MOBILNOG ROBOTA-LETELICE I OPTIMALNO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA U DINAMIČKIM USLOVIMA	3.14
Maletić, J., Živanović, S., Popović, M., Puzović, R. SIMULACIJA PROCESA OBRADE SKULPTORSKIH POVRŠINA NA MAŠINAMA SA HORIZONTALNOM OBRTNOM OSOM	3.24
Момчиловић, Б., Славковић, Н., Воркапић, Н., Живановић, С. ПРОТОТИП ИНДУСТРИЈСКОГ РОБОТА SCARA КОНФИГУРАЦИЈЕ	3.30
Matijašević, L., Jakovljević, Ž. FLEKSIBILNI ROBOTSKI HVATAČI U INDUSTRIJSKOM OKRUŽENJU – PREGLED POSTOJEĆIH MEHANIČKIH STRUKTURA	3.38



NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 2

Nešovanović, Lj., Živanović, S., Popović, M. SIMULACIJA RADA TROOSNOG MEHANIZMA SA PARALELNOM KINEMATIKOM NA BAZI MEHANIZMA ČEBIŠEVA.....	3.49
Stanojković, J., Madić, M., Lazarević D. COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING FORCE PREDICTION MODELS	3.55
Suvajac, Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž. UPOREDNA ANALIZA ALGORITAMA ZA DETEKCIJU POZICIJE I ORIJENTACIJE OBJEKATA U OKVIRU SISTEMA VEŠTAČKOG GLEDANJA	3.61
Todorović P. , Mačužić I., Savković M. MODERNIZACIJA PROIZVODNE OPREME U MSP KROZ INTEGRACIJU NAPREDNIH REŠENJA UPRAVLJAČKE ELEKTRONIKE	3.71
Trifunović, M., Madić, M., Janković, P. DEVELOPMENT OF EMPIRICAL MODEL FOR ANALYSIS OF CHIP COMPRESSION RATIO IN MEDIUM TURNING OF C45E	3.77
Vasilic, G., Živanović, S., Milutinović, M., Dimić, Z. KONCEPT KOMPLEKSNE REDUDANTNE MAŠINE ALATKE NAMENJENE ZA PROCES OBRADJE SEČENJA ŽICOM	3.83





Lovrec, D., Šitum, Ž., Tič, V.¹⁾

DEVELOPMENT OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT FOR REMOTE CONTROL APPLICATION

Abstract

Electro-hydraulic robotic manipulator for manipulation of objects weighing up to 200 kg, was designed and developed. All three degrees of freedom, rotation of the base arm, lifting of the arm and extension of the arm, are hydraulically actuated. Also the gripper, which is placed at the end of the arm, is hydraulically actuated. The robot can be controlled either by using mechanical levers on the proportional hydraulic valves or either by joystick that applies PWM signals to the proportional hydraulic valves. The paper focuses on design and development of the robot by presenting components consisting mechanical structure, drive and, sensors.

Keywords: robot, electro-hydraulic, remote control

1. INTRODUCTION

Technological improvements and innovations within modern robotic systems and control techniques have made possible to develop new robotic system applications [1, 2]. In last years the scope of robots and their application is rapidly expanding, and they are increasingly being applied in more complex cases, which generally require faster and more accurate motions and at the same time greater interaction with the environment in which they operate. Bearing in mind that hydraulic drives provide high force multiplication they were used as preferred actuators for industrial robots during the early stages of robotics development. The first prototype was produced in 1961 and was installed at a GM in order to handle hot metal parts used in die casting and for spot welding on auto bodies.

The primary purpose of the first robots was to replace humans for the heavy, dangerous and monotonous tasks and they were mostly used for simple pick and place tasks. Although the first industrial robots had a hydraulic or pneumatic drive, they have undergone a huge change and development, so the robots with fluid power drives are rare today. Nowadays, electric drives are by far the most widely used actuators for industrial robots, because they are reliable and accurate and thus, they dominate in all segments of applications [3, 4].

Since electro-hydraulic servo systems have desirable features for application in highly automated production facilities as they are characterized with small size-to-power ratio, ability to produce large hydraulic power and large forces, this paper presents a prototype of the electro-hydraulic robotic manipulator, which was developed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture at the University of Zagreb, Croatia. The robotic manipulator can be used in various industrial applications e.g. assembly lines, CNC machines, welding tasks, in serving foundries, automobile industry..., and it is able to manipulate with objects weighing up to 200 kg.

The electro-hydraulic robotic manipulator is completely open system and currently is being used as an educational platform for the development of advanced control algorithms [5]. In order for the manipulator to achieve the desired actions, it was necessary to implement high-quality sensors and control unit that controls the system by individual movements towards the given task, and this is precisely one of the challenges of modern robotics.

¹⁾ prof. dr. Darko Lovrec, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia, (darko.lovrec@um.si),
prof. dr. Željko Šitum, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Croatia
(zeljko.situm@fsb.unizg.hr), assoc. prof. dr. Vito Tič, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia
(vito.tic@um.si)

2. MAIN COMPONENTS OF THE ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT

The electro-hydraulic robotic manipulator (Figure 1) has three-degrees-of-freedom. The first degree-of-freedom is the rotation of the base arm, the second degree-of-freedom is lifting of the arm by rotation of the arm, and the third degree-of-freedom is the extension of the arm, which carries a gripper at the end of the mechanical structure. All degrees-of-freedom are hydraulically actuated, as well as the gripper itself. Rotation of the base arm is performed using a hydraulic motor combined with a worm drive, while the lifting (rotation of the extendable arm) is performed using a double acting hydraulic cylinder. The linear movement of the arm has been enabled using a telescopic hydraulic cylinder. A small double acting hydraulic cylinder is used for the movement of the gripper. The manipulator workspace is described with an operating diameter of 3.6 m and height of 2.7 m while its payload capacity is up to 200 kg. This configuration allows the manipulator to reach a wide working area, still being reasonably affordable and flexible.

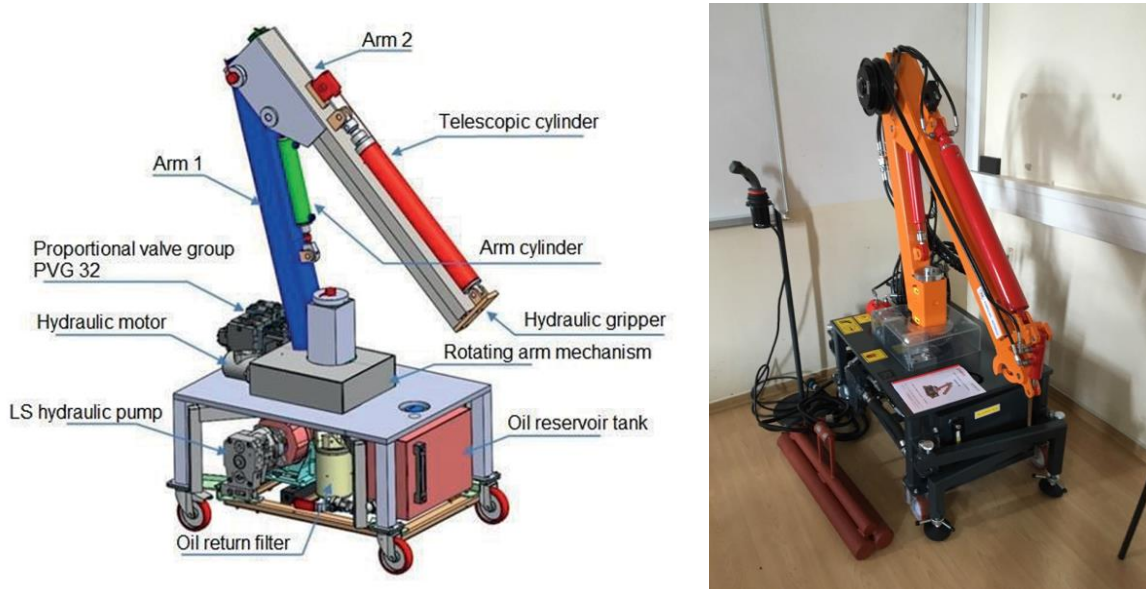


Figure 1. The electrohydraulic robot manipulator

2.1 Hydraulic power unit

The hydraulic power unit of the electro-hydraulic robotic manipulator consists of an axial piston pump, a 60 litre hydraulic tank, filters and proportional valve block. Installed axial piston pump with variable displacement (Figure 2) is produced by Parker Hannifin (model PV023), and it is equipped with a load-sensing system which allows the pump to detect the need for oil supply and change the flow rate accordingly. The displacement of the pump is 23 cm^3 with the nominal rotational speed of 1410 rev/min which translates to the nominal flow of 32.5 l/min. Maximum pressure the pump can operate at is 120 bar, while the maximum achievable pressure in the system has been reduced to 100 bar by using a pressure regulator. The oil pump is driven by a three-phase induction electric motor, rated 5.5 kW at 1410 rpm.

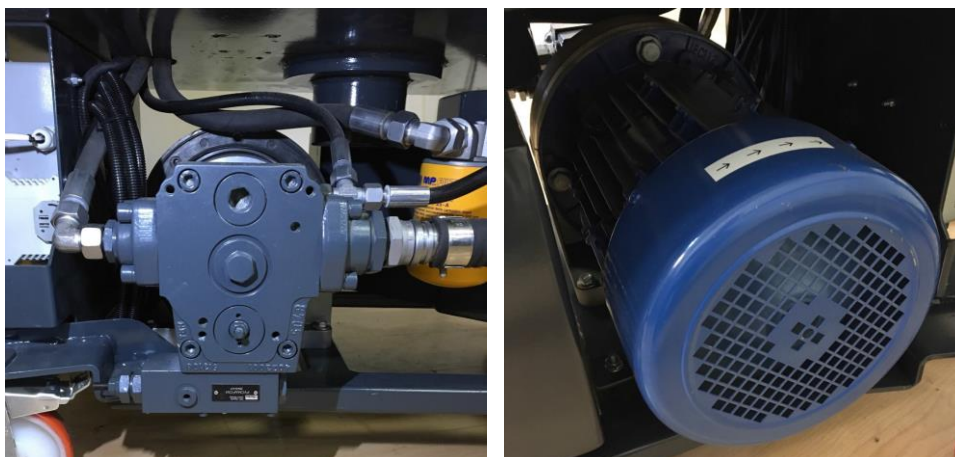


Figure 2. Axial piston pump with load sensing

2.2 Rotation of the base arm

For allowing the rotary motion of the base arm, a hydraulic torque motor paired with a worm drive with the reduction of 1:50 has been chosen. The hydraulic motor (Figure 3) is produced by Parker (model TE0036). With its fixed displacement of 36 cm³ and the nominal flow rate of the axial piston pump, the maximal rotational speed of the arm is 18.34 rev/min. Maximum pressure of the torque motor can operate under is 120 bar while the maximum pressure in the system is limited to 100 bar by a pressure relief valve.



Figure 3. Parker hydraulic motor

2.3 Lifting of the arm

Double acting hydraulic cylinder is used for the lifting of the arm (the second degree-of-freedom) by means of rotating the extendable arm (Figure 4). The diameter of the piston is 50 mm, while the diameter of the piston rod is 25 mm with maximum stroke of 210 mm. The cylinder is mounted on the manipulator with spherical G-bearings, allowing the proper installation of force sensor on the lower part of the cylinder



Figure 4. Double acting hydraulic cylinder for lifting of the arm by means of arm rotation

2.4 Extension of the arm

A telescopic double acting hydraulic cylinder (Figure 5) is used to realize the translational motion of the third degree of freedom – extension of the arm. The diameter of the outer tube is Ø63/Ø75 mm, the middle tube Ø45/Ø55 mm and the inner tube Ø25/Ø35 mm. The maximum stroke is 1000 mm.



Figure 5. Telescopic double acting hydraulic cylinder for arm extension

2.5 Gripper

A small double acting hydraulic cylinder is installed for actuation of the gripper (Figure 6). The outer diameter of the cylinder is set to 35 mm with 5 mm thick side wall. The maximum stroke of the cylinder, which is 30 mm, has been calculated in a way to enable the full opening and closing of the gripper. Considering the weight of the objects the manipulator can handle, the gripper was designed in simple but effective way, allowing the manipulator to firmly and safely grasp the desired object. The grip is ensured by the overlapping jaws of the gripper itself.



Figure 6. Hydraulic gripper

3. SENSORS

The manipulator has been equipped with various sensors allowing the control unit to acquire important data regarding the state of the system.

3.1 First and second degree of freedom rotation sensors

In order to measure the angle of the rotation of the arm and telescope, rotary encoders, produced by RLS, have been used. Range of the rotary encoder connected to the base of the arm (Figure 7, left) has been chosen to be 360°, considering the achievable angle span of the base of 270°. On the other hand, for measuring the angle of the telescopic arm – lifting (Figure 7, right), a similar rotary encoder has been used, but with reduced range of 180° in order to achieve greater resolution. Both of the chosen rotary encoders are of incremental type, whereas the voltage output of the encoder to the user is in the range of 0 to 10 VDC thus excluding the need for the additional calculations on the user side. The function describing the voltage in respect to the angle of the rotary encoder is linear.

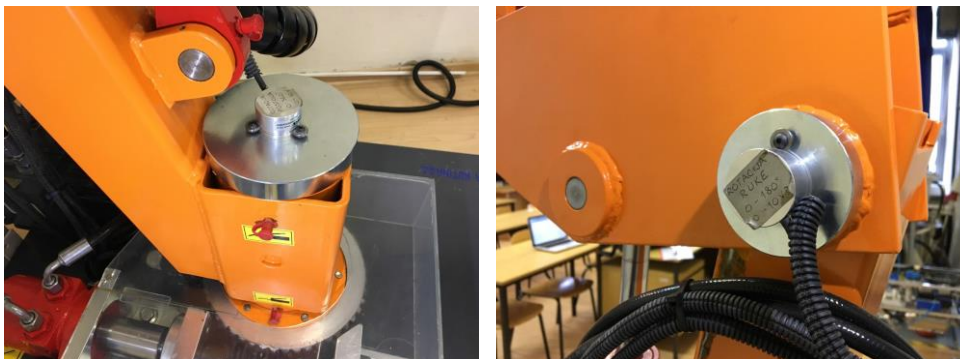


Figure 7. Rotational sensor on robot base arm

3.2 Third degree of freedom linear sensor

Linear position of the extendable arm is measured with a linear position sensor manufactured by Micro-epsilon (draw-wire sensor type WPS-2100, Figure 8) and it is based on the working principle of a trimmer. With its range of up to 2100 mm the linear position sensor has been chosen as suitable considering the length of the retracted arm and its maximum elongation. Since the sensor is based on the principle of a voltage divider, its output is directly correlated to the supplied voltage.

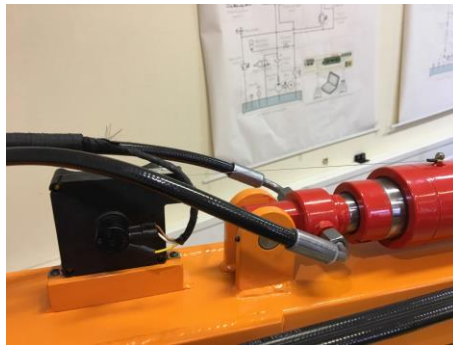


Figure 8. Linear position sensor (potentiometer) on robot arm extension mechanism

3.4 Force and pressure sensors

In order to be able to directly measure force exerted upon the double acting hydraulic cylinder used for the lifting (rotation) of the telescopic arm, HBM force sensor 1-U9C is used (Figure 9, left), combined with RM4220 amplifier. The force that can be measured with the chosen sensor ranges from 2 kN to 50 kN, whereas value of the output voltage signal ranges from 0 to 10 VDC

For measuring the oil pressure in the chambers of the telescopic hydraulic cylinder and the torque motor, Siemens pressure sensors SITRANS P220 are used (Figure 9, right). The sensor is suitable for measuring pressures up to 250 bar which corresponds to the voltage signal output in range from 0 to 10 VDC.



Figure 9. HBM Force sensor on lift mechanism (left) and pressure sensors (right)

4. CONTROLS

A load-sensing proportional valve group Sauer-Danfoss PVG32 with PVEH actuation modules (cross-section shown in Figure 10, left) is used to control the hydraulic power to the actuators. Characteristic for this valve group is the independence of the flow rate with the pressure in the system and extremely low hysteresis alongside with the compact design and easy installation options. Maximum working pressure is set to 160 bar and the supply voltage of the valve group is 24 VDC.

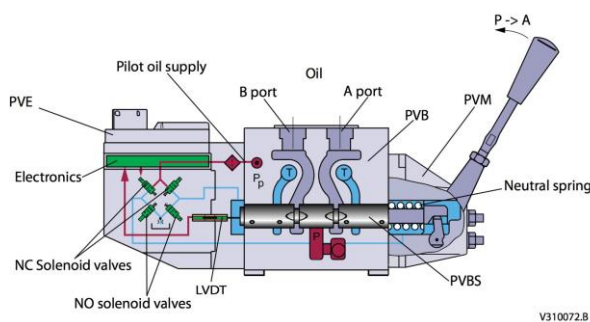


Figure 10. Load-sensing proportional valve group

The flow of each of the segment of the valve group is voltage controlled according to the valve characteristics. The flow of the proportional valve group depends on the supply voltage and the signal voltage (PWM) applied to each individual segment of the group. The robot hydraulic actuator and thus movement of the robot can be controlled either by the use of mechanical levers on the valve block (Figure 10, right), or either by the use of Sauer Danfoss Prof-1 joystick (Figure 11). The joystick control is intended for professional and frequent use, which is evidenced by the ergonomically designed shape of the stick and enables simultaneous control of all three degrees of freedom of the manipulator.



Figure 11. Control joystick Prof-1

4. CONCLUSION

This paper deals with the design and practical realization of a prototype of an electro-hydraulic robotic manipulator suitable for handling heavy weight objects in industrial environment. The prototype has been completely built and has three-degrees-of-freedom (spherical or polar kinematic configuration) with a hydraulic gripper at the end of the mechanical structure. The manipulator uses a load sensing hydraulic system that provides superior controllability regardless of the load and also contributes to the energy efficiency. Originally the manipulator has no advanced way of being operated, other than the use of joystick or levers on the hydraulic valve block itself, but it has been pre-prepared for connection to industrial PLC that will allow remote connection and remote control of the robot.

5. REFERENCES

- [1] Wilcox, B., Ambrose, R., Kumar, V., Robotics: State of the Art and Future Challenges, WTEC Panel on International Assessment of R&D in Robotics, <http://www.wtec.org/robotics/>, pp. 39-68, 2008.
- [2] Pagliarini, L., Lund, H.: The future of Robotics Technology. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*. 3. 270. 10.2991/jrnal.2017.3.4.12, 2017.
- [3] Brochures of Fanuc's product: Super Heavy Payload Robot, Fanuc M-2000iA/2300, <http://fanuc.co.jp>, visited on November 20, 2017.
- [4] Dubus, G., Davida, O., Nozais F., Meassona, Y., Friconneau, J.-P., Palmer, J.: Assessment of a wa hydraulic joint for remote handling operations in the divertor region; *Fusion Engineering and Desig Vol.* 83, pp. 1845–1849, 2008.
- [5] Šitum, Ž., Fluid power drives in robotic systems, In: 11th International Conference Fluid Power 2 Maribor, Slovenia, pp. 11-23, September 14-15, 2017.

Lovrec, D., Šitum, Ž., Tič, V.

RAZVOJ ELEKTROHIDRAULIČKOG ROBOTA ZA PRIMJENU NA DALJINSKO UPRAVLJANJE

Rezime: Projektiran je i razvijen elektrohidraulički robotski manipulator za manipulaciju objektima težine do 200 kg. Sva tri stupnja slobode, rotacija bazne ruke, rotacija ruke i translacija konzole ruke, pokreću se hidraulički. Također, hvataljka, koja se nalazi na kraju ruke, pokreće se hidraulički. Robot se može kontrolirati pomoću mehaničkih poluga na proporcionalnim hidrauličkim ventilima ili primjenom PWM signala na proporcionalne hidrauličke ventile. Rad se fokusira na dizajn i razvoj robota predstavljajući komponente koje se sastoje od mehaničke strukture, pogona i senzoričke.
Ključne reči: robot, elektrohidraulički, daljinsko upravljanje



Tič, V., Benić, J.¹⁾

REMOTE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT USING BECKHOFF SOFT-PLC²⁾

Abstract

The paper presents the development of remote control application for an electro-hydraulic robot manipulator that was previously designed and constructed at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. The robot has three degrees-of-freedom, which are the rotation of the base arm, the lifting of the arm, and additionally the extension of the arm which also carries a gripper at the end. Since the robot uses hydraulic actuators, the robot is controlled using load-sensing proportional valve group. The application of remote control solution is based on Beckhoff Soft-PLC controller running TwinCAT 3 software and allows three different types of operation, which are JOG mode and PID control mode with additional possibility of using 3-point reference position generator.

Keywords: robot, electro-hydraulic, remote control, beckhoff, soft-plc

1. INTRODUCTION

In the last three decades, enormous interest was focused on industrial robots. The automotive companies were, and still are, an important customer, but industrial robots are used in a wide variety of industries, including the mechanical, electronic and chemical industries among others. After having studied robots for decades, we are now witnessing a real interest in robotics and today there is a multitude of teams creating different robots worldwide for special applications such as: agricultural robots, hostile territory exploration, inspection robots, military robots, cleaning robots, service robots, robots for helping the handicapped, medical robots etc. We live in exciting times and the change in robotics technology has never been more rapid. Thus the question arises: are there niche applications for greater use of robots with hydraulic drives? Example of state-of-the-art application of electro-hydraulic drives is remote handling of critical equipment in nuclear fusion reactor [1]. Reliable and robust control strategies are crucial for such applications.

However, precision motion and force control on high power levels are far from trivial. Significant nonlinearities of hydraulic components and complex phenomena of fluid dynamics make control of electro-hydraulic systems extremely challenging task, especially in cases of simultaneous motion of several controlled links of a robotic system. These difficulties are even more emphasized in plants with a large number of control variables and high performance requirements in terms of rapid responses and high accuracy in a wide range of working conditions, smooth and noiseless operation, all in conditions of dynamically changing structure of the robotic system [2]

The electro-hydraulic robot manipulator represents a complex, nonlinear, multivariable system comprised of production components and various features in order to be able to manipulate with objects weighing up to 200 kg. Furthermore, specific for such systems is a large number of parameters which vary depending on the system's operational point. Load-sensing technology is used for the manipulator operation, enabling simultaneous motion of all controlled axes.

¹⁾ assoc. prof. dr. Vito Tič, University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia (vito.tic@um.si),
dr. Juraj Benić, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Croatia (juraj.benic@fsb.unizg.hr)

²⁾ The project is co-financed by the Republic of Slovenia, the Ministry of Education, Science and Sport and the European Union – NextGenerationEU. The project is implemented in accordance with the Recovery and Resilience Plan (RRP) under the development area Smart, Sustainable and Inclusive Growth, component Strengthening competencies, in particular digital competencies and those required by the new professions and the green transition (C3 K5), for the investment measure Investment F. Implementation of pilot projects, the results of which will serve as a basis for the preparation of a roadmap for the reform of higher education for a green and resilient transition to a Society 5.0: project Pilot Projects for the Reform of Higher Education for a Green and Resilient Transition.

2. THE ELECTRO-HYDRAULIC ROBOT MANIPULATOR

The electro-hydraulic robotic manipulator (Figure 1) was previously designed and constructed at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb for education and research purposes. The robot has three degrees-of-freedom, which are the rotation of the base arm, the lifting of the arm, and additionally the extension of the arm which also carries a gripper at the end. All degrees-of-freedom are hydraulically actuated, as well as the gripper itself. The maximum load capacity of the robot is 200 kg, while the operating area of the robot is within diameter of 3.6 m and height of 2.7 m.

Since given robotic manipulator uses electro-hydraulic drive technology it can provide a large torque and fast response of actuators with the possibility of simultaneous movement of all the controlled axes. The system is equipped with sensors allowing the control unit to acquire angular position of two revolute joints and the extension of a linear joint. Furthermore, pressure and force sensors are used to determine forces exerted upon a specific degree-of-freedom of the manipulator.

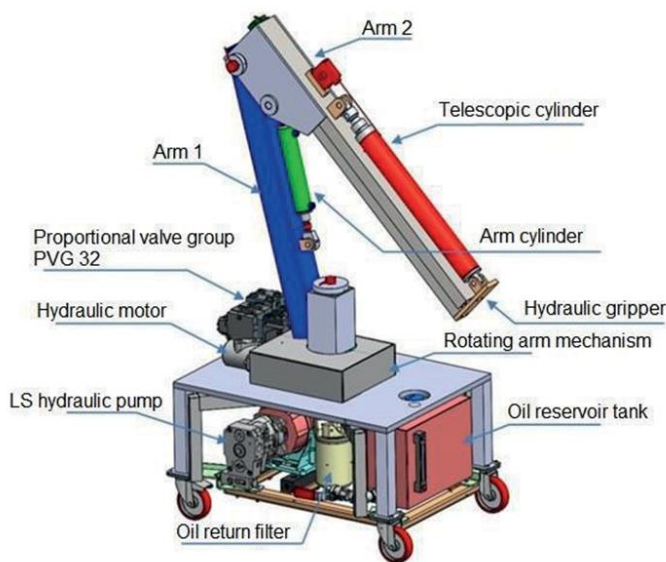


Figure 1. The electrohydraulic robot manipulator

2.1 Electro-Hydraulic controls

All three degrees-of-freedom, together with the gripper, use hydraulic actuators that are controlled by load-sensing proportional valve group, which can be operated either by manual control of the hand levers on the valve block, or either electrically by applying proportional control signal to each valve. The voltage control signal is in the range of 6.0 – 18.0 VDC. At the middle of the signal range (12.0 VDC) the valve is in the center position and outputs no flow, while at min. signal value (6.0 VDC) the valve outputs the full oil flow in one direction and at max. signal value (18,0 V) the valve outputs the full oil flow in opposite direction (Figure 2).

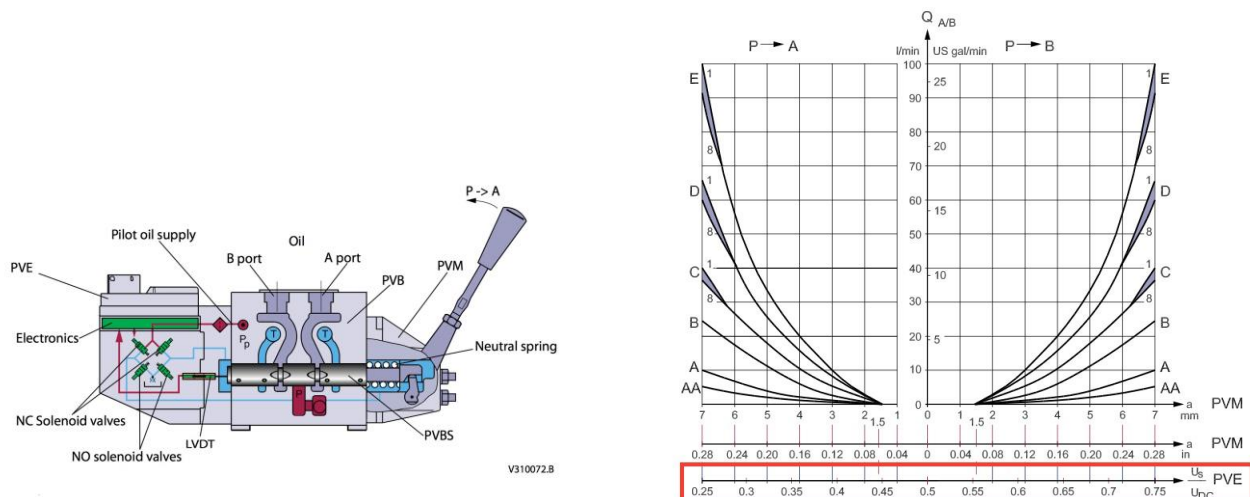


Figure 2. Load-sensing proportional valve and its characteristics

2.2 Sensors

In order to provide the information about the robot state and its current position, there are several sensors installed on the robot. For first degree-of-freedom, which is rotation of the base arm, a rotational sensor (0 – 360) is used. Similar, for second degree-of-freedom, which is lifting/rotation of the arm, also a rotational sensor (0 – 180) is used, while a linear draw-wire type position sensor (0 – 1000 mm) is used for the third degree-of-freedom, which is the extension of the arm. The gripper, which is located at the end of the arm, does not have any sensors installed.

Besides the position sensors on the robot, there are pressure sensors installed on the actuators for the first degree-of-freedom (rotation of the base arm) and for the third degree-of-freedom (extension of the arm). On the other hand, the second degree-of-freedom (lifting of the arm) has a force sensor installed in order to accurately measure the weight of the carrying load.

2.3 Main input and output signals

The Table 1 presents a summary of all command signals to the load-sensing proportional valves (above) and all the proportional signals from the sensors that are acquired from the robot (below). All measured values are in standardized industrial form of proportional voltage signal from 0 – 10 VDC.

Table 1. Main output (command) and input (sensors) signals		
Signal (command)	Terminal	I/O No.
Valve command - Rotate (6V - 12V - 18V PWM)	EL2502 (2)	1
Valve command - Lift (6V - 12V - 18V PWM)	EL2502 (1)	2
Valve command - Extend (6V - 12V - 18V PWM)	EL2502 (2)	2
Valve command - Gripper (6V - 12V - 18V PWM)	EL2502 (1)	1
Signal (sensor)	Terminal	I/O No.
Rotational position sensor - Rotate 0 - 360deg - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	7
Rotational position sensor - Lift 0 - 180deg - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	8
Linear sensor Extend - Linear potentiometer WPS Output Signal (0 - 10,2 V)	EL3068	1
Force sensor Lift 0 - 50kN - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	2
Pressure sensor Rotation Positive 0 - 250 bar - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	5
Pressure sensor Rotation Negative 0 - 250 bar - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	3
Pressure sensor Extend Positive 0 - 250 bar - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	4
Pressure sensor Extend Negative 0 - 250 bar - Voltage Output (0 - 10V)	EL3068	6
Rotate End Switch Output Signal (NC) - both directions	EL1008	3

2.4 Control cabinet

While developing and designing the robot, and first putting it into use, the manual controls of the robot were used for testing purposes – either the manual control via hand levers on the valve block, or either by a professional joystick that sends proportional voltage control signal to each valve.

In order to develop and implement industrial grade remote control of the robot, the electrical wiring of the robot was pre-prepared to allow an additional connection to the valve command signals and signals coming from sensors. Thus, an additional electrical cabinet (Figure 3) was designed and implemented. The main component of the electrical cabinet is the Beckhoff Soft-PLC (CX-5110 [3]), together with suitable input and output terminals: EL1008 (digital input) used for installed buttons on the cabinet, EL3068 (0 – 10 VDC voltage input) used to acquire proportional signals from the sensors, and two EL2502 (PWM output) used to control proportional valves. Additional to the main PLC, there are other components installed in/on the cabin, e.g., the main switch, the power ON and OFF buttons, the E-stop button, main power supply (24 VDC) and additional reference power supply (10,2 VDC). The designed and implemented electrical cabinet is connected to the main electrical cabinet of the robot by using a special 40-pin connector and cable of 5 m length.

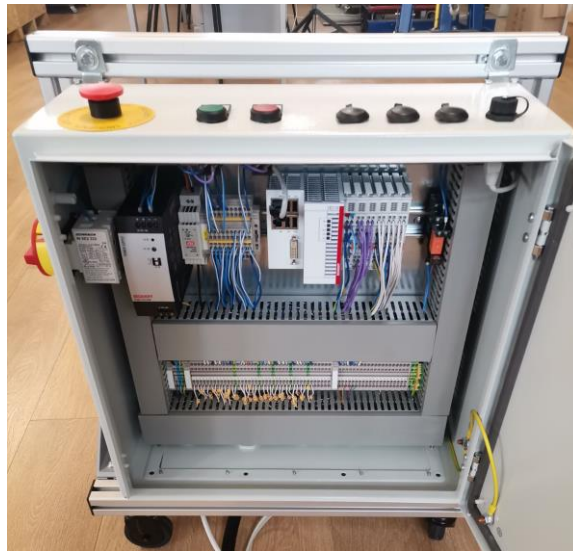


Figure 3. The control cabinet with Beckhoff Soft-PLC

3. DEVELOPMENT OF REMOTE CONTROL APPLICATION

As presented above, the industrial grade remote control solution of the presented electro-hydraulic robot is based on Beckhoff Soft-PLC controller running TwinCAT 3 software. Besides great CPU capability, the main advantages of using the Beckhoff Soft-PLC solution is that it simultaneously runs the designed PLC program on one part of the integrated processor and the designed HMI application (which can be accessed remotely) on the other part of the processor.

3.1 PLC Program

The PLC program was designed and developed with Beckhoff TwinCAT 3 software [4]. According to the chosen type of operation, the main PLC task runs one of the three different sub-tasks, either it runs JOG mode, the PID mode, or the PID mode with additional 3-point reference position generator.

The TwinCAT 3 programming software offers us various programming languages. Figure 4 (left) presents PID-mode sub-task, which is programmed using SFC programming language, which is best for sequential execution of the tasks. Further on, Figure 4 (right) presents a single step of the sequence, which is the PID controller in FBD form used for first degree-of-freedom (base arm rotation). As seen from the figure, output of the PID controller is additionally limited, so that the output (PWM signal to control the valve for base arm rotation) can only reach values from -100 to 100 %, which corresponds to command signal between 6 and 18 VDC.

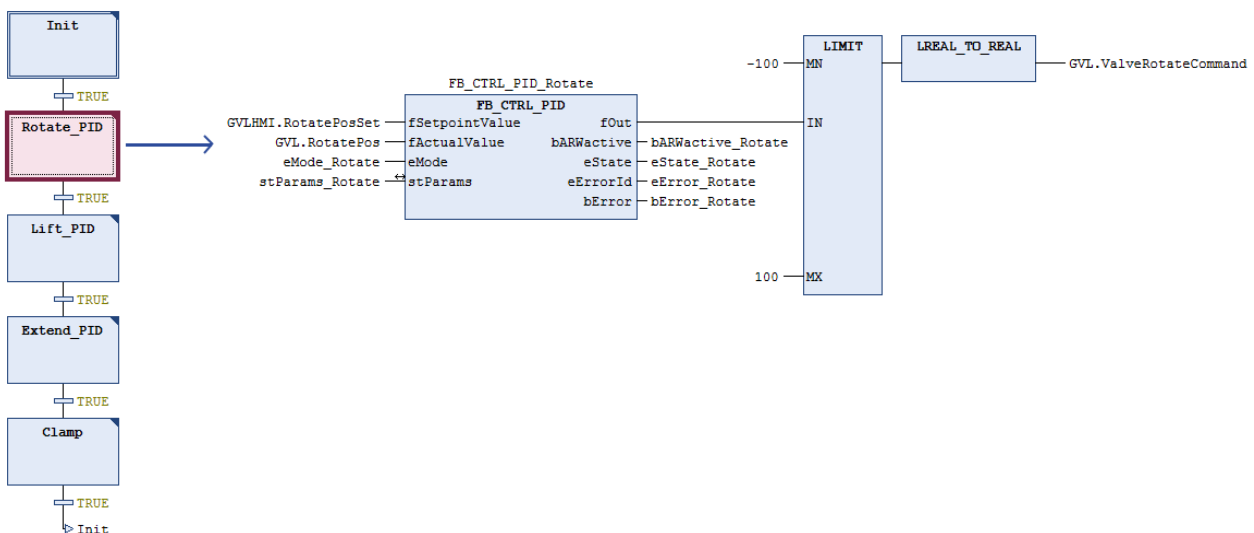


Figure 4. PID Control part of PLC program

In order to achieve smoother robot motion and performance, especially while starting and stopping the movement of the robot arm, additional 3-point reference position generator was implemented. The generator allows user to set the maximum speed, acceleration and jerk when controlling the robot from current point to a new reference point.

3.2 HMI Control panel – JOG

Alongside the presented PLC program, a HMI control panel was designed and built using TwinCAT 3 HMI, which is based on HTML5 and JavaScript technology, allowing an remote access to the web-panel from various devices, such as PCs, laptops, tablets and mobile phones, without the need for an installation of a special dedicated software [5].

Figure 5 presents the JOG-mode remote accessible HMI control panel, where user has the possibility to manually control the rotation, lift, extension and the gripper using the buttons at the top of the screen. The speed of each mentioned actuator is set below the buttons using a slider tool to select the speed from 0 to 100 %. At the bottom of the screen there are several gauges that display current robot position and state, e.g. different pressures and force while lifting.

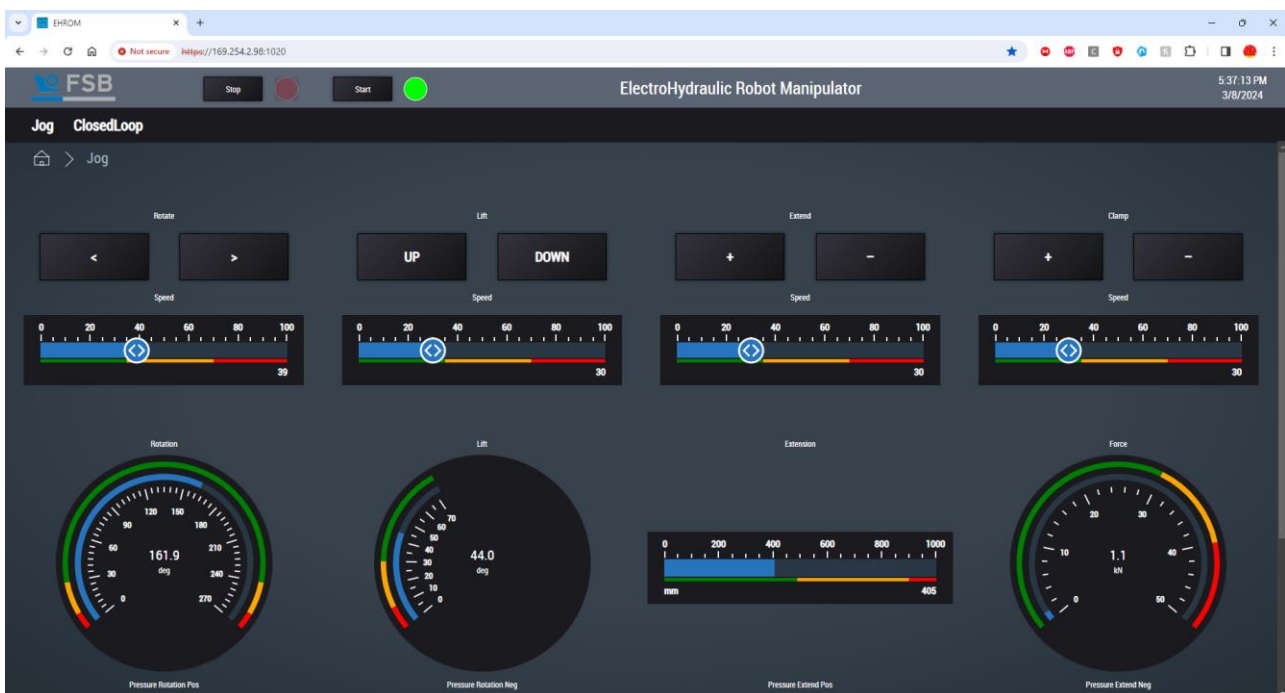


Figure 5. Remote accessible HMI control panel for JOG control

3.3 HMI Control panel – PID

The JOG-mode was essentially only developed to test the control of the robot using the voltage signals sent to electrically actuated proportional directional hydraulic valves (in PWM form) and to test the acquisition of all sensor signals. Further on, we have proceeded with developing closed-loop PID control of the position of the robot arm using three PID controllers that are called sequentially in PID-mode program block (Figure 4).

Figure 6 presents the PID-mode remote accessible HMI control panel, which consists of gauges, linear slider and number input textboxes. The SET rotation gauge is used to input the reference value for the first degree-of-freedom, which is the rotation of the base arm. Further on, the SET lift gauge and SET extension linear slider are used to input the reference value for the second and third degree-of-freedom, which are lifting (rotation of the arm) and arm extension. The gripper clamping can be controlled with two buttons marked as plus and minus. All actual current values that are acquired from the robot sensors are shown in corresponding gauges and linear scale.

The PID controller settings are presented on the right side of Figure 6. At the top, the user has the possibility to fully engage or disengage the PID controller, while below, the user can engage or disengage the PID controller for each degree-of-freedom separately. The textboxes below the PID controller switches are used to parameterise each of three PID controllers by inputting the values for K_p , T_n , T_v and T_d . To only use the P-controller without the I and D part, the user must input 0 values to T_n , T_v and T_d .

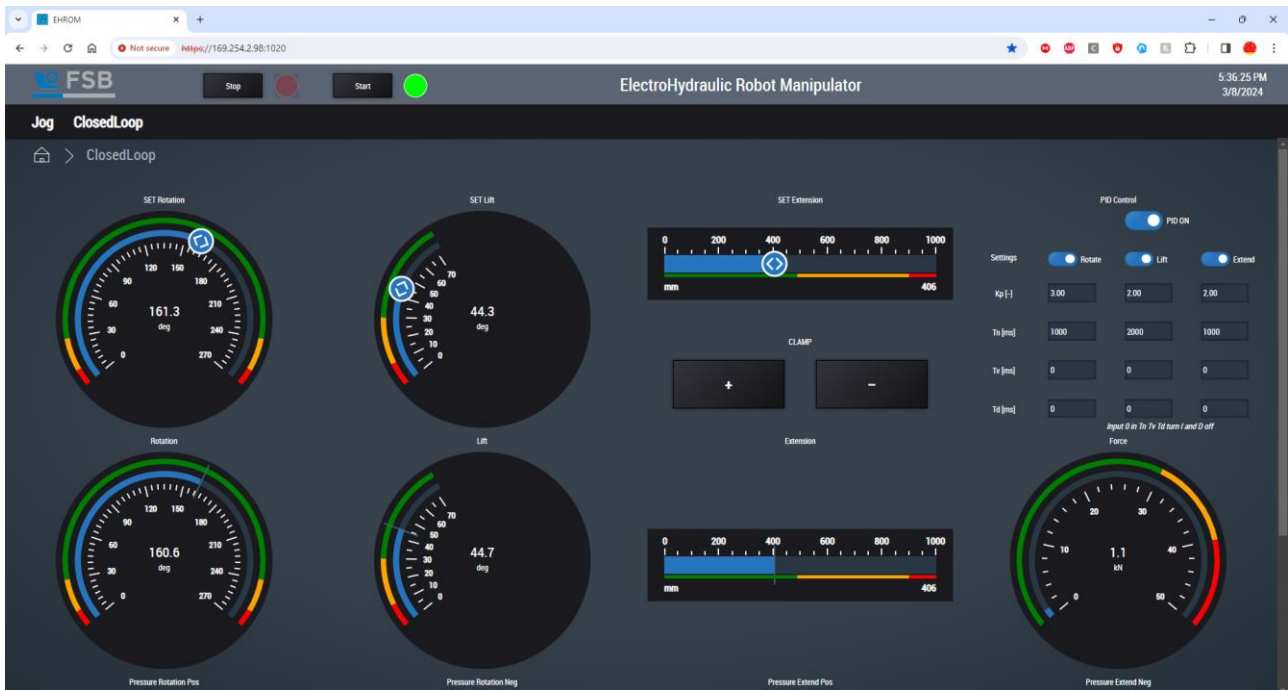


Figure 6. Remote accessible HMI control panel for PID control

4. RESULTS

The PID controller for each degree-of-freedom was manually tuned to best performance. Figure 7 shows the results of robot response to the step change of reference position using additional 3-point reference position generator. While the responses of each three degrees-of-freedom are presented, we can notice excellent performance of first and third degree-of-freedom, which are rotation of the base arm and the extension of the arm. On the other hand, we can see that the performance of the second degree-of-freedom, which is lifting/rotation of the arm, is slightly worse.

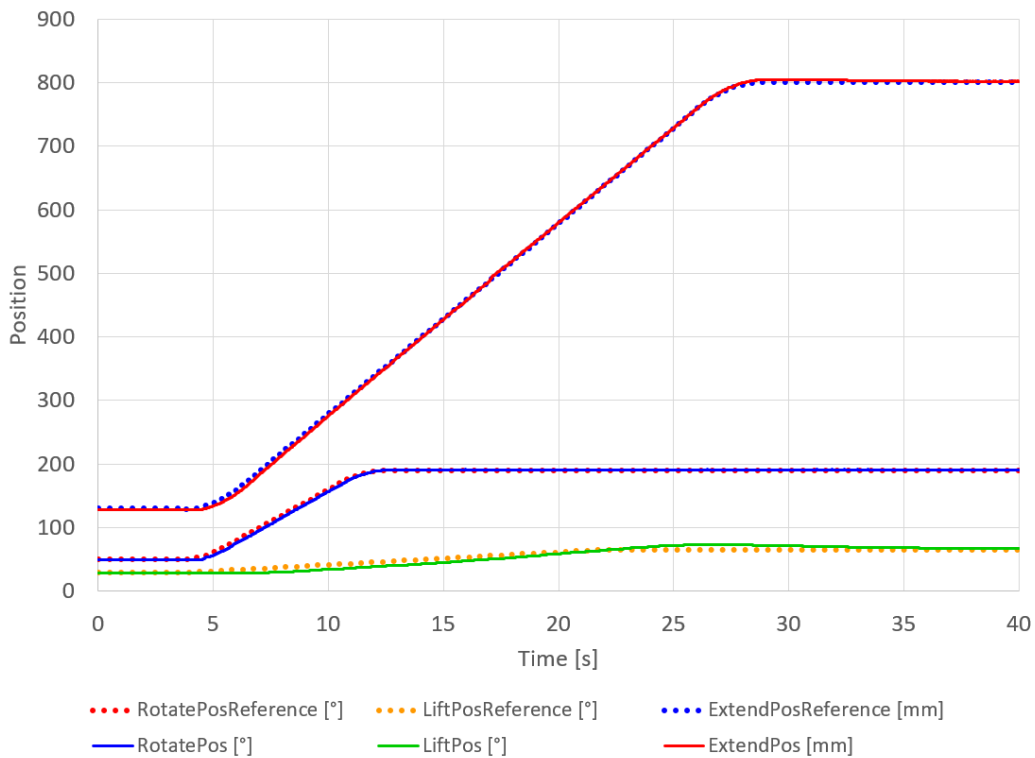


Figure 7. Step response of the robot using PID control with 3-point reference position generator

4. CONCLUSION

The paper presents the development of remote control application for an electro-hydraulic robot manipulator with three degrees-of-freedom using Beckhoff Soft-PLC controller running TwinCAT 3 PLC and HMI software. The presented control solution allows three different types of operation: the JOG mode and PID control mode with additional possibility of using 3-point reference position generator. Since the TwinCAT 3 HMI control panel designed is based on the HTML5 and JavaScript, the robot can be controlled remotely from any modern devices, such as PCs, laptops, tablets and mobile phones, without the need for an installation of a special dedicated software.

Further development of the system is possible in the form of establishing the robot arm workspace in standardized coordinates, which would allow the user to control the robot using standard point-to-point robot commands.

5. REFERENCES

- [1] Dubus, G., Davida, O., Nozais F., Meassona, Y., Friconneau, J.-P., Palmer, J.: Assessment of a water hydraulic joint for remote handling operations in the divertor region; Fusion Engineering and Desig Vol. 83, pp. 1845–1849, 2008.
- [2] Sirouspour, M. R., Salcudean, S. E., Nonlinear control of hydraulic robots, IEEE Transaction Robotics and Automation, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182, 2001..
- [3] Beckhoff: CX51x0 Embedded-PC manual. WWW: https://download.beckhoff.com/download/Document/ipc/embedded-pc/embedded-pc-cx/cx5100_en.pdf. September 2024.
- [4] Beckhoff: TwinCAT 3 manual. WWW: https://download.beckhoff.com/download/document/automation/twincat3/TwinCAT_3_IO_EN.pdf. September 2024.
- [5] Beckhoff: TwinCAT HMI TE2000 manual. WWW: https://filfar.by/PDF/beckhoff/TE2000_TC3_HMI_EN.pdf. September 2024.

Tič, V., Benić, J.

DALJINSKO UPRAVLJANJE ELEKTRO-HIDRAULIČKIM ROBOTOM POMOĆU BECKHOFF SOFT-PLC

Rezime: U radu je prikazan razvoj aplikacije daljinskog upravljanja za elektrohidraulički robotski manipulator koji je prethodno projektiran i konstruiran na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Robot ima tri stupnja slobode, a to su rotacija bazne ruke, podizanje ruke, te dodatno ekstenzija ruke koja na kraju nosi i hvataljku. Budući da robot koristi hidrauličke aktuatora, robotom se upravlja pomoću skupine proporcionalnih ventila osjetljivih na opterećenje. Primjena rješenja za daljinsko upravljanje temelji se na Beckhoff Soft-PLC kontroleru koji pokreće TwinCAT softver i omogućuje tri različite vrste kontrole, a to su jog način i PID način upravljanja uz dodatnu mogućnost korištenja generatora referentnih pozicija u 3 točke.

Gljučne reči: robot, elektro-hidrauličkim, daljinsko upravljanje, beckhoff, soft-plc



Brenjo, K., Jevtić, Đ., Jokić, A., Petrović, M.M., Miljković, Z.¹⁾

INTELIGENTNI TEHNOLOŠKI SISTEMI I PROCESI - NOVI PRAVCI RAZVOJA INTELIGENTNO-VIZUELNOG UPRAVLJANJA MOBILNOG ROBOTA-LETELICE I OPTIMALNO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA U DINAMIČKIM USLOVIMA²⁾

Rezime

Aktuelni potprojekat Mašinskog fakulteta u Beogradu, kao i rad na doktorskim disertacijama, podrazumeva novi razvoj inteligentno-vizuelnog upravljanja mobilnog robota-letelice (MBL) specifične namene, kao i optimalno planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima, i to baziranim na tehnikama veštačke inteligencije, posebno na dubokom učenju ojačavanjem i biološki inspirisanim algoritmima optimizacije. Tokom ovogodišnjih intenziviranih naučnih istraživanja razvija se nova metodologija za autonomno kretanje, odnosno navigaciju i inteligentno-vizuelno upravljanje mobilnog robota-letelice sopstvenog razvoja, namenjenog čišćenju staklenih površina visokih zgrada. Takođe, generisanje optimalnog plana terminiranja tehnoloških procesa, u okviru koga se u dinamičkim uslovima rada inteligentnih tehnoloških sistema uzimaju u obzir alternativni izbori resursa poput mašina alatki, alata i pomoćnih pribora, jedan je od važnih ciljeva ovih naprednih istraživanja u domenu daljeg razvoja proizvodnog mašinstva u 21. veku. U ovom radu, dat je pregled nekih od novih pravaca razvoja baziranih na sopstvenim istraživanjima, poput analize algoritama dubokog učenja ojačavanjem koji su od značaja za razvoj inteligentnog upravljanja MBL, prevashodno onih sa kontinualnim prostorom stanja i akcija, kao i analiza primene metaheurističkih algoritama, odnosno evolucionih algoritama, algoritama baziranih na inteligenciji roja i reprezentativnih hibridnih pristupa u okviru terminiranja tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima.

Ključne reči: *inteligentno-vizuelno upravljanje mobilnog robota-letelice, mašinsko gledanje, duboko učenje ojačavanjem, terminiranje tehnoloških procesa, biološki inspirisani algoritmi optimizacije*

1. UVOD

Novija istraživanja u domenu inteligentnih tehnoloških sistema i procesa podrazumevaju razvoj inteligentno-vizuelnog upravljanja mobilnog robota-letelice (MBL) specifične namene, kao i optimalno planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima, i to baziranim na tehnikama veštačke inteligencije. U tom smislu, naučnoistraživački rad podrazumeva razvoj nove metodologije za autonomno kretanje, odnosno navigaciju i inteligentno-vizuelno upravljanje mobilnog robota-letelice sopstvenog razvoja, namenjenog čišćenju staklenih površina visokih zgrada. Takođe, istraživanja su usmerena i na generisanje optimalnog plana terminiranja tehnoloških procesa, u okviru koga se u dinamičkim uslovima rada inteligentnih tehnoloških sistema uzimaju u obzir alternativni izbori resursa poput mašina alatki, alata i pomoćnih pribora. U nastavku su detaljno predstavljena dva nova pravca razvoja inteligentnih tehnoloških sistema, u smislu analize algoritama dubokog učenja ojačavanjem koji su od značaja za razvoj inteligentnog upravljanja MBL, kao i analize primene biološki inspirisanih algoritama optimizacije u cilju terminiranja tehnoloških procesa u

¹⁾ Katarina Brenjo, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (kbrenjo@mas.bg.ac.rs), Đorđe Jevtić, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beograd - Mašinski fakultet, (drjevtic@mas.bg.ac.rs), Aleksandar Jokić, MSc, asistent, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (ajokic@mas.bg.ac.rs), dr Milica M. Petrović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (mmpetrovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Zoran Đ. Miljković, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, (zmiljkovic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ U ovom radu, saopštava se pregled aktuelnih istraživanja ostvarenih u okviru naučnog potprojekta „Duboko učenje i sajber bezbednost kibernetičko-fizičkih sistema Industrije 4.0“ (interni naziv), koji finansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije, prema ugovoru o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2024. godini (ev. br. 451-03-65/2024-03/200105 od 5.2.2024. godine, rukovodilac projekta Prof. dr Vladimir Popović).

dinamičkim uslovima.

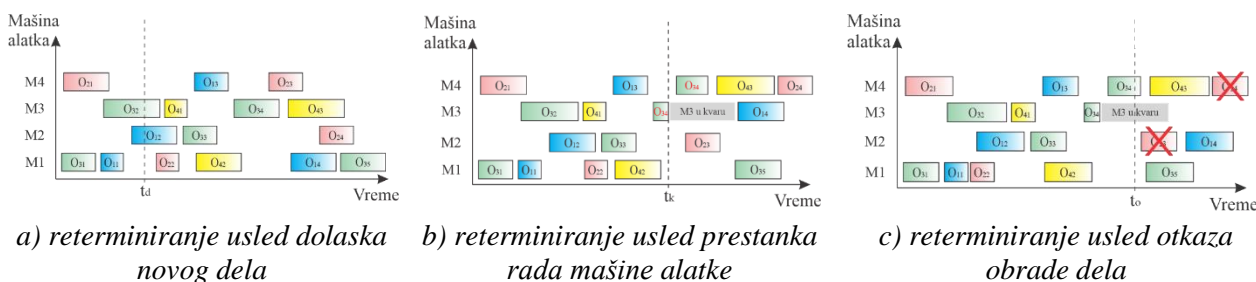
Poslednjih decenija, primetan je permanentan porast broja visokih zgrada (tzv. nebodera) u svetu, a i kod nas. Najnoviji trendovi u arhitekturi ovih građevina baziraju se uglavnom na implementaciji „egzotičnih“ materijala i kompleksnih površina, a sve u cilju zadovoljenja najstrožih zahteva klijenata, kao i potrebe za modernizacijom gradova. Prethodna tvrdnja podrazumeva i čestu upotrebu stakla kao ugradnog materijala njihovih eksterijera. Trenutno se u svetu stakleni eksterijeri, u najvećoj meri, održavaju tradicionalnim metodama, odnosno angažovanjem dobro obučениh radnika za rad na visinama [1]. Stoga se, danas, upotreba robota namenjenih čišćenju eksterijera visokih zgrada smatra racionalnim izborom. Svakako, dodatni i bitni razlozi za integraciju robota u sistem za održavanje staklenih eksterijera su, slično kao i kod industrijskih robota: humanizacija rada, mogućnost permanentnog obavljanja zadatka, povećanje efikasnosti samog procesa čišćenja, mogućnost učestalog održavanja staklenih površina, ušteda značajnih materijalnih sredstava kako pri projektovanju zgrade, tako i tokom održavanja u eksploataciji. Roboti koji imaju mogućnost kretanja uz vertikalnu podlogu (engl. *wall-climbing robots*), a kojima pripadaju i roboti namenjeni posebnim zadacima kao što je čišćenje gabaritnih staklenih površina eksterijera visokih zgrada (engl. *glass and facade-cleaning robots*), predstavljaju predmet naučnih istraživanja tokom prethodnih godina [1,2]. Takođe, male bespilotne letelice predstavljaju aktuelni tip letelica čija je morfološka struktura u funkciji originalnog razvoja predmetnog robotskog sistema specifične namene, a koji će imati i napredne karakteristike mobilnog robota sa ciljem ostvarivanja željenog položaja radnog organa pri obavljanju zadatka čišćenja staklene površine, uz adekvatne manevarske sposobnosti [3].

Duboko učenje ojačavanjem (engl. *Deep Reinforcement Learning – DRL*) obezbeđuje mogućnost mobilnim robotskim sistemima da ostvare zavidne upravljačke performanse u izrazito dinamičkim okruženjima i slučajevima kada je model objekta upravljanja nepoznat i/ili nepotpun i/ili neodređen. Specifičnost ove aktuelne tehnike veštačke inteligencije ogleda se u učenju optimalnog ponašanja inteligentnog agenta kroz interakciju sa okruženjem u kome egzistira. Glavna prednost DRL-a je mogućnost generisanja adekvatnih akcija u slučaju nepostojanja eksplicitnog modela, koji pored karakteristika okoline sa kojom je agent u interakciji, uključuje i matematički model objekta upravljanja. Druga važna prednost ogleda se u tome što metode bazirane na DRL-u daju značajno bolje izlaze u odnosu na tradicionalne pristupe upravljanju, kako sa aspekta minimalne zahtevane frekvencije procesiranja informacija (100 Hz u poređenju sa 250 Hz), tako i u pogledu brzine ostvarivanja željenih upravljačkih zadataka [4], što je od posebnog značaja kod robota specifične namene, kada svako dodatno kašnjenje u sistemu može dovesti do fatalnog ishoda u ponašanju. Treća prednost tehnika baziranih na DRL-u je mogućnost njihove implementacije u izrazito dinamičkim okruženjima, što u potpunosti koegzistira sa činjenicom da mobilni robot - letelica (MBL) svoje radne zadatke obavlja na staklenoj površini sa nepredvidivim i promenljivim koeficijentima trenja/kotrljanja, kao i u uslovima izraženih vazдушnih strujanja. Dakle, ova aktuelna tehnika veštačke inteligencije veoma je zastupljena u razvoju inteligentnih tehnoloških sistema i procesa.

Inteligentni tehnološki sistemi (ITS) predstavljaju najvišu klasu fleksibilnih tehnoloških sistema i podrazumevaju sledeće ključne funkcije: projektovanje tehnoloških procesa, terminiranje proizvodnje, terminiranje transportnih sredstava u okviru ITS-a i upravljanje transportnim tokovima materijala. Pod pojmom terminiranje (engl. *scheduling*), podrazumeva se primena metoda odlučivanja i optimizacionih metoda u cilju planiranja i optimalnog vremenskog raspoređivanja aktivnosti proizvodno-tehnoloških entiteta (mašina alatki, alata, pomoćnih pribora, transportnih sredstava poput mobilnih robota itd.). Terminiranje tehnoloških procesa predstavlja proces planiranja mašinske obrade delova na osnovu raspoloživih resursa tehnoloških sistema, a u skladu sa usvojenim kriterijumima performansi. Na taj način se, kao rezultat procesa terminiranja, dobija redosled tehnoloških operacija obrade delova na odgovarajućim mašinama alatkama, prema nekom od sledećih kriterijumima: proizvodno vreme (engl. *makespan*), troškovi proizvodnje (engl. *production cost*), uravnoteženo iskorišćenje mašina alatki (engl. *balanced utilization*), transportni tokovi materijala (engl. *flow time*), poštovanje rokova završetka (engl. *lateness*) sa svoje dve kategorije – kašnjenje (engl. *tardiness*) i završetak pre roka (engl. *earliness*). Na osnovu tokova materijala u tehnološkom sistemu, izdvaja se *job-shop* tip terminiranja koji se definiše za N različitih delova i M različitih mašina alatki, gde je za svaki od delova definisan skup operacija, kao i njihov redosled izvršavanja na mašinama alatkama, a za svaku od operacija vreme obrade na odgovarajućim mašinama. Ukoliko se neka operacija sastoji od više zahvata ili više prolaza u okviru jednog zahvata, vreme trajanja operacije je jednako zbiru glavnih vremena obrade za svaki od zahvata.

U realnim tehnološkim sistemima često se javljaju poremećaji pa je stoga neophodno izvršiti određene izmene kako bi se omogućilo prilagođavanje njihovoj dinamičkoj prirodi, što dovodi do pojave dinamičkog fleksibilnog terminiranja tehnoloških procesa (engl. *Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling – DFJSS*). Prestanak rada mašine alatke, uvođenje nove mašine u tehnološki sistem, dolazak novog dela i otkaz obrade

dela koja je u toku samo su neki od poremećaja koji opisuju dinamičku prirodu tehnoloških sistema. Potreba za obradom novog dela koji se uvodi u tehnološki sistem (engl. *new job arrival*) podrazumeva i promenu redosleda postojećih operacija nakon trenutka dolaska, uzimajući u obzir i operacije neophodne za obradu novog dela (Slika 1.1a). Novi plan terminiranja, koji se još naziva i plan reterminiranja (engl. *rescheduling*), može se iskoristiti za unapređenje performansi tehnološkog sistema za obradu novog dela poštujući istovremeno zadate rokove obrade svih delova u sistemu. Prestanak rada mašine alatke (engl. *machine breakdown*) takođe dovodi do potrebe za ponovnim terminiranjem, tj. reterminiranjem svih operacija koje nisu završene u trenutku otkaza, a izvodile su se na mašini alatki pre prestanka njenog rada (Slika 1.1b). Pristupi u modeliranju ovog dinamičkog faktora podrazumevaju da se operacije koje nisu završene prosleđuju na alternativne mašine alatke na kojima je moguće nastaviti obradu mašinskog dela. Otkaz obrade dela (engl. *job cancellation*) predstavlja događaj u tehnološkom sistemu koji nastaje usled potrebe da se prekine obrada dela (Slika 1.1c). Iz tog razloga, nakon trenutka otkaza, vrši se ponovno terminiranje – reterminiranje preostalih delova, uz zanemarivanje svih predviđenih operacija obrade za otkazani deo. Uvođenje nove mašine alatke u tehnološki sistem podrazumeva da je potrebno izvršiti reterminiranje u pogledu raspoređivanja operacija neophodnih za obradu svih delova i na novouvedenu mašinu. Tehnološke operacije koje su bile u toku završavaju se na mašinama na kojima su se odvijale u trenutku uvođenja nove mašine alatke, dok se za preostale formira novi optimalni plan reterminiranja koji podrazumeva preraspodelu svih neizvršenih operacija na sve mašine koje su na raspolaganju u tehnološkom okruženju.



Slika 1.1 Gantov dijagram job-shop tipa terminiranja usled uticaja dinamičkih faktora [5]

Fleksibilni tehnološki procesi podrazumevaju sledeće tipove fleksibilnosti: (1) fleksibilnost mašina alatki (jedna operacija može da se izvodi na više alternativnih mašina alatki), (2) fleksibilnost alata, (3) fleksibilnost orijentacija alata, (4) fleksibilnost redosleda operacija (predstavlja mogućnost zamene redosleda operacija pri optimizaciji tehnoloških procesa) i (5) fleksibilnost procesa (odnosi se na mogućnost odabira različitih varijantnih rešenja obrade dela). Fleksibilni tehnološki procesi mogu da se predstavljaju na više načina, kao na primer: pomoću grafova, primenom različitih struktura topologije drveta i Petrijevih ili AND/OR mreža. Na osnovu informacija datih u mrežama alternativnih tehnoloških procesa, formira se inicijalni plan terminiranja generisan pre nastanka poremećaja, a zatim se formira optimalni reterminirani plan za obradu delova, nakon uticaja jednog ili više dinamičkih faktora.

2. PREGLED STANJA U OBLASTIMA ISTRAŽIVANJA

Razvoj modela inteligentnog upravljanja u cilju ostvarivanja autonomnog kretanja robota namenjenog čišćenju gabaritnih staklenih površina eksterijera visokih zgrada, podrazumeva rešavanje kompleksnog robotskog zadatka koji se odnosi na hardversko-softversku integraciju u funkciji generisanja njegovih kognitivnih sposobnosti. Detaljan pregled stanja u oblasti istraživanja robota namenjenih realizaciji posebnih zadataka na visinama dat je u literaturnim izvorima [1, 2]. Klasifikacija robota koji imaju mogućnost kretanja uz vertikalnu površinu izvršena je prema dva kriterijuma [1]: (1) prema načinu ostvarivanja kretanja (sistema za lokomociju) i (2) prema načinu ostvarivanja prijanjanja, kontakta sa podlogom. Na osnovu izvršene uporedne analize u radu [1], može da se zaključi da se za posebne zadatke koji se realizuju na staklenim površinama eksterijera visokih zgrada koriste sistemi koji prijanjanje ostvaruju dejstvom sile potiska ili elektrostatičke sile. U pogledu odabira optimalnog sistema za lokomociju, zaključuje se da su načini kretanja ostvareni pomoću šina ili užadi, kao i pomoću nogu najpogodniji za upotrebu kod ovog tipa mobilnog robota [2]. Potrebno je naglasiti da su kod sistema čije je kretanje ostvareno pomoću šina ili užadi, ključni nedostaci slaba prilagodljivost konfiguraciji radne površine i loše manevarske sposobnosti, dok se kod sistema čije je kretanje ostvareno pomoću nogu nedostaci odnose na nemogućnost ostvarivanja kontinuiteta u radu, malu brzinu kretanja i mehaničku kompleksnost. Prethodni zaključci doveli su do toga da je za rešavanje uočenih

nedostataka, osim kod mobilnih robota koji imaju mogućnost kretanja uz vertikalnu podlogu i robota namenjenih čišćenju gabaritnih staklenih površina eksterijera visokih zgrada, neophodno proširiti oblast istraživanja, te u značajnoj meri istražiti i MBL: (1) namenjene pranju i čišćenju (engl. *washing and cleaning drones*), (2) koji imaju mogućnost prijanjanja na vertikalnu površinu (engl. *perching drones*), (3) koji se napajaju sa tla (engl. *tethering drones*), (4) koji su namenjeni gašenju požara, inspekciji, održavanju ili farbanju.

Ubrzani razvoj MBL u poslednjoj deceniji, orijentisan ka mnogim multidisziplinarnim istraživanjima, inicirao je pojavu nove kategorije robota koji imaju sposobnost kretanja uz vertikalnu podlogu (engl. *wall-climbing drones*). Potreba za ovim robotima je proistekla iz činjenice da MBL nisu u stanju da se adekvatno pozicioniraju, niti poseduju potrebnu stabilnost pri obavljanju zadataka na visinama. Naglašava se da MBL koji imaju sposobnost kretanja uz vertikalnu podlogu mogu da ispune ove zahteve svojom tranzicijom iz položaja u letu u položaj na radnoj površini i daljim kretanjem po njoj, najčešće koristeći dodatne oslonce/sistem za lokomociju. U kontekstu relevantnih istraživanja, izdvajaju se rezultati istraživačke laboratorije *Urban Robotics Lab* iz Južne Koreje. Jedan od poslednjih istraživačkih izlaza pomenute laboratorije je prototip inteligentnog MBL zasnovan na heksakopteru Y-konfiguracije (3 para koaksijalnih rotora) sa mehanizmom koji omogućava simultanu promenu orijentacije (u istom smeru i za iste vrednosti ugla orijentacije) dva para koaksijalnih rotora oko unapred zadate ose [3]. Ovakva realizacija omogućava promenu morfološke strukture MBL u vazduhu, što je od suštinske važnosti za pouzdanu tranziciju robota na radnu površinu. Ističe se da je ostvarivanje specifične konfiguracije MBL, predstavljene u [3], rezultat sedmogodišnjih istraživanja sa ciljem određivanja optimalne hardverske konfiguracije za pomenuti projektantski, ali i naučnoistraživački ishod najvišeg ranga. Ipak, da bi ovi roboti imali svoju praktičnu primenu, neophodno je da ostvare stabilnost tokom procesa tranzicije, kao i pouzdanost u pogledu sprečavanja nezgoda sa fatalnim ishodom. Nastavak ovih istraživanja podrazumeva razvoj inteligentnog upravljačkog sistema, baziranog na algoritmima dubokog učenja ojačavanjem, što je inicijalno predstavljeno u [6]. Ovde je potrebno izdvojiti jedno ključno zapažanje. Naime, u referenci [6], istaknut je značaj usvajanja vektora akcija (predstavljen je preko šest vrednosti vučnih sila), kao i značaj ostvarenog ugla orijentacije u formiranju obučavajućih parova za predloženi model dubokog učenja ojačavanjem. Dakle, razlika u vremenima odziva servo motora i električnih motora koji pogone rotore je različita i ovo predstavlja suštinski razlog nemogućnosti njihove zajedničke integracije u vektor akcija. Zbog toga, usvojeno je da jedna od veličina vektora stanja bude i ugao orijentacije radnog organa servo motora.

Naučnoistraživački rezultati koji su dati u referencama [4, 7, 8, 9] ukazuju na to da su inteligentni MBL, čiji su upravljački sistemi bazirani na algoritmima dubokog učenja ojačavanjem, superiorniji u poređenju sa MBL koji su konvencionalno upravljani. Istraživanje predstavljeno u referenci [4], imalo je za cilj određivanje fundamentalnih razlika između tehnika dubokog učenja ojačavanjem i optimalnog upravljanja, na primeru agilnog MBL. Prvi deo studije uključivao je kvalitativnu analizu, odnosno poređenje ostvarenih vremena leta (od početnog do ciljnog položaja) i stepena uspešnosti (odnosno da li će doći do pojave fatalne greške u upravljačkom sistemu) za dve različite metode upravljanja. Utvrđeno je da je stepen uspešnosti upravljačkog sistema baziranog na algoritmu dubokog učenja ojačavanjem višeg nivoa u odnosu na optimalne metode upravljanja tokom simulacione evaluacije, dok je prilikom testiranja u realnim uslovima ta razlika bila još izraženija, jer je jedino upravljački sistem baziran na algoritmu dubokog učenja ojačavanjem uspešno realizovao zadatak. Dobijeni rezultati su inicirali dalja istraživanja, odnosno podstakli istraživače da pronađu fundamentalne razloge ustanovljene superiornosti. Detaljnom analizom predstavljenom u referenci [4], došlo se do zaključka da su algoritmi bazirani na mašinskom učenju ojačavanjem superiorniji u odnosu na algoritme optimalnog upravljanja zbog njihove mogućnosti da direktno optimizuju funkciju cilja (funkcija nagradne ocene stanja), koja se kod dubokog učenja ojačavanjem može neuporedivo bolje definisati, odnosno bolje prilagoditi problemu koji se tretira. Dodatno, suštinski važno zapažanje, odnosi se na brzinu procesiranja informacija upravljačkog sistema. Dakle, za razliku od konvencionalnih metoda upravljanja MBL gde minimalna zahtevana frekvencija procesiranja informacija iznosi 250 Hz, upravljački sistemi bazirani na algoritmima dubokog učenja ojačavanjem zahtevaju 2,5 puta manju frekvenciju rada (100 Hz). Istraživanje predstavljeno u referenci [7] odnosi se na robusnost, a što je demonstriralo sposobnost inteligentnog upravljačkog sistema, baziranog na dubokom učenju ojačavanjem, da izvrši stabilizaciju letelice pri početnoj brzini od 5 m/s, čiji je pravac i smer vektora kretanja proizvoljan. Osim pomenutog, ostvarena je brzina procesiranja obučenog modela od 7 μ s što je izuzetan rezultat. Uporedna analiza PID regulatora i upravljačkog sistema baziranog na dubokom učenju ojačavanjem bila je predmet istraživanja u referenci [8]. Analiziran je uticaj pomenutih metoda upravljanja na tačnost pri ostvarivanju željenih uglova orijentacije (engl. *attitude control*) MBL. Ostvareni rezultati pokazali su značajne prednosti algoritma dubokog učenja ojačavanjem – smanjenje greške za 44 %, kao i 1,15 - 2,5 puta kraća vremena uspona (engl. *rise time*) pri ostvarivanju željenih

uglova orijentacije. Inteligentni upravljački sistem, baziran na dubokom učenju ojačavanjem, koji obezbeđuje automatsko prilagođavanje režimima letenja i koji je istovremeno primenljiv na različitim konfiguracijama hibridnih bespilotnih letelica, predstavljen je u referenci [9]. Za razliku od najčešće korišćenih promenljivih koje figurišu u vektoru stanja [7], uvedena su određena pojednostavljena radi smanjenja njegove dimenzionalnosti. Ovo je ključni doprinos za ostvarivanje zavidnih upravljačkih performansi i robusnosti u pogledu implementacije na različitim konfiguracijama hibridnih bespilotnih letelica.

Nova primena algoritama dubokog učenja ojačavanjem donosi i evidentne naučne izazove, kao što su: (1) potreba za značajnim unapređenjem procesorskih resursa, i to pre svega modela koji tretiraju kontinualne prostore stanja i akcija izrazite dimenzionalnosti što posledično iziskuje distribuiranje upravljačkih zadataka na više procesorskih resursa, ali i dodatna istraživanja u pogledu njihove sinhronizacije i razmene generisane baze znanja tokom procesa obučavanja, (2) kreiranje adekvatne funkcije nagradne ocene stanja čije čak i minimalne modifikacije mogu dovesti do neželjenih rezultata u ponašanju upravljačkog sistema, (3) postojanje razlike između simulacionog i realnog modela inteligentnog robotskog upravljanja, (4) primenljivost jednostavnih funkcija nagradne ocene stanja u cilju rešavanja kompleksnih upravljačkih problema i sl.

U poređenju sa algoritmima dubokog učenja ojačavanjem, primenjenim u analiziranoj literaturi, značajan naučni iskorak biće ostvaren kroz razvoj modela inteligentnog robotskog upravljanja čiji će vektor akcija osim brojeva obrta rotora, činiti i brojevi obrta točkova, a potencijalno i dodatne upravljačke veličine poput željenih uglova orijentacije radnog organa kod servo motora i sl. Dakle, moguće je postići viši nivo tačnosti ostvarenog položaja inteligentnog MBL pri obavljanju zadatka na specifičnoj radnoj površini, kao i robusnost u pogledu ostvarivanja željenog kognitivnog ponašanja usled poremećaja različitog karaktera. Očekivano je da će terminiranje rada MBL biti razmatrano u završnoj fazi njegovog razvoja, zbog izrazito dinamičkih uslova rada i potrebe za optimalnim upravljanjem.

Poput projektovanja i terminiranja tehnoloških procesa, i DFJSS problem pripada klasi nedeterminističkih polinomialnih problema, tzv. *NP-hard* kombinatorno-optimizacionih problema. Kako vreme potrebno za rešavanje ovih problema eksponencijalno raste sa njihovom dimenzionalnošću (povećanje broja delova, mašina alatki i operacija dovodi do povećanja prostora mogućih rešenja), oni se ne mogu efikasno rešiti primenom konvencionalnih neheurističkih metoda. U cilju prevazilaženja nedostataka konvencionalnih metoda, u relevantnoj literature je predložen značajan broj pristupa u rešavanju DFJSS problema, koji se generalno mogu podeliti na: (1) pristupe bazirane na multiagentnim sistemima (engl. *multiagent systems*) i (2) pristupe bazirane na algoritmima. U okviru istraživanja biće analiziran pristup baziran na različitim optimizacionim algoritmima, koji u potpunosti zavisi od tipa korišćenog algoritma. Metaheuristički algoritmi se često koriste za rešavanje DFJSS problema zbog svoje jednostavne implementacije koja omogućava generisanje optimalnih tehnoloških procesa obrade delova. Algoritmi bazirani na svim rešenjima, koji mogu biti primenjeni u cilju rešavanja DFJSS problema, mogu se klasifikovati na: (1) evolucione metaheurističke algoritme (engl. *evolutionary algorithms*), (2) algoritme bazirane na inteligenciji roja (engl. *swarm intelligence-based algorithms*) i (3) hibridne algoritme.

Evolucionni algoritmi predstavljaju klasu stohastičkih metoda optimizacije koji simuliraju proces prirodne evolucije i bazirani su na dva principa evolucije: selekciji i variranju. Najznačajnija prednost primene evolucionih algoritama je mogućnost prilagođavanja zadatku i fleksibilnost u kombinaciji sa robusnim performansama i karakteristikama globalne pretrage. Genetički algoritmi (engl. *Genetic Algorithm* – GA) su jedni od najstarijih i najrasprostranjenijih metaheurističkih algoritama, koji su zasnovani na prirodnoj selekciji i genetici. GA kombinuje koncept „preživljavanja“ najboljeg među rešenjima sa struktuiranom, a ipak slučajnom, razmenom informacija i stvaranjem potomaka. Autori rada [10] predstavljaju unapređenu verziju prethodno razvijenog genetičkog algoritma za rešavanje DFJSS usled kontinualnih dolazaka novih delova u tehnološki sistem. U procesu dobijanja optimalnog rešenja, razmatrano je sledećih šest funkcija cilja: vreme transportnih tokova materijala, maksimalno vreme kašnjenja, vreme kašnjenja, vreme definisano zadatim rokom, broj delova koji kasne i zbir vremena kašnjenja i vremena roka završetka, uz napomenu da su sve funkcije cilja osim maksimalnog vremena kašnjenja ponderisane. U cilju dobijanja novih optimalnih planova terminiranja kod DFJSS problema, u radu [11] razvijen je višekriterijumski evolucionni algoritam (engl. *Multi-Objective Evolutionary Algorithm* – MOEA) baziran na proaktivno-reaktivnoj metodi. Relevantnost razvijenog algoritma ogleda se u mogućnosti uspešne optimizacije, uzimajući u obzir četiri kriterijuma istovremeno (ukupno vreme potrebno za obradu svih delova, kašnjenje, maksimalno iskorišćenje mašina alatki i stabilnost), brzom prilagođavanju novom tehnološkom okruženju uključivanjem heurističke strategije dinamičke optimizacije, kao i simultanom rešavanju sledećih zadataka: dodeljivanje mašina alatki i raspoređivanje redosleda operacija potrebnih za obradu dela. Autori rada [12] razmatraju robusno i stabilno reterminiranje u slučaju otkaza rada mašina alatki, pri čemu se za generisanje novih planova terminiranja primenjuje dvofazni GA. Prva faza podrazumeva optimizaciju *makespan*-a u determinističkim uslovima bez očekivanih

poremećaja. U drugoj fazi se, nakon otkaza rada mašina alatki, generišu optimalni planovi reterminiranja na osnovu dva kriterijuma, *makespan* i stabilnost, pri čemu se koriste dve različite verzije višekriterijumske optimizacije bazirane na primeni NSGA-II algoritma (engl. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*) i NPGA algoritma (engl. *Non-dominated Ranking Genetic Algorithm*). U cilju prilagođavanja tehnološkog sistema novonastalim promenama i generisanja optimalnog plana terminiranja novih delova, uz minimizaciju *makespan*-a, autori rada [13] predlažu model zasnovan na primeni evolucionog GA i više lokalnih pretraga. Statistička analiza zasnovana na eksperimentalnoj verifikaciji pokazuje da predloženi model ima bržu konvergenciju i obezbeđuje veću tačnost u odnosu na algoritme iz referentne literature.

Rešenje za generisanje optimalnog fleksibilnog tehnološkog procesa, koji podrazumeva razmatranje velikog broja tehnoloških operacija, kao i raspoloživih tehnoloških resursa, traži se u velikom prostoru mogućih rešenja. U cilju sveobuhvatnog istraživanja i izbegavanja lokalnog optimuma, uspešno se primenjuju metode zasnovane na algoritmu inspirisanom inteligencijom roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization algorithm* – PSO) i teoriji haosa (engl. *Chaos theory*) (cPSO) [14, 15]. Početna rešenja za integrisano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa, predstavljena su u obliku čestica cPSO algoritma, dok je primarni cilj da se spreči konvergencija PSO u ranim fazama procesa optimizacije implementacijom deset različitih haotičnih mapa. Optimalno planiranje tehnoloških procesa bazira se na višekriterijumskoj optimizaciji vremena i troškova proizvodnje, dok se sa druge strane, optimalni planovi terminiranja generišu na osnovu sledeće tri funkcije cilja: proizvodno vreme obrade svih delova, uravnoteženo iskorišćenje mašina alatki i srednje vreme transportnih tokova materijala. Višekriterijumska metoda optimizacije inspirisana inteligencijom čopora vukova (engl. *Multi-Objective Grey Wolf Optimizer* – MOGWO), uspešno je primenjena za optimizaciju planova terminiranja transportnih sistema [16]. Takođe, razvijeno je 13 novih funkcija cilja kombinovanih u cilju formiranja Pareto fronta višekriterijumskog optimizacionog problema i razvijena je nova strategija za višekriterijumsko optimalno istraživanje prostora pretrage. Razvoj, unapređenje i implementacija PSO algoritama u rešavanju DFJSS takođe ima široku primenu. U tom smislu, tokom prethodnih godina, razvijeni su: (1) diskretni PSO algoritam u kojem čestice ažuriraju svoje položaje na osnovu prethodnog sopstvenog najboljeg položaja (pbest) i najboljeg položaja cele populacije (gbest) [17], (2) novi model u cilju minimizacije tri funkcije cilja [18] i (3) nova robusna optimizaciona metoda koja uzima u obzir dinamičke faktore i generiše dva indikatora za evaluaciju robusnosti tehnoloških sistema, ponovno korišćenje sistema, kao i reproduktivnost zadataka obrade [19]. Otkaz rada mašine alatke i dolazak novih delova u tehnološki sistem predstavljaju dinamičke poremećaje koji su razmatrani u pomenutim istraživanjima. Jedno od efikasnih rešenja problema terminiranja i reterminiranja tehnološkog sistema bazirano je na primeni dvofaznog algoritma inspirisanog kolonijom pčela (engl. *Two-stage Artificial Bee Colony* – TABC) [20]. Problem je modeliran kao fleksibilni *job-shop* tip terminiranja u slučaju dolaska novog dela u sistem. Cilj optimizacije je ostvarivanje minimalnog vremena potrebnog za obradu svih delova. Pored novog pravila za inicijalizaciju populacije kolonije pčela, predlaže se i poboljšanje performansi algoritma kolektivnim lokalnim pretraživanjem. U svojim daljim istraživanjima, autori produbljuju problem fleksibilnog *job-shop* tipa terminiranja, usvajajući pored problema dolaska novog dela u tehnološki sistem i ograničenje u pogledu fazi vremena obrade delova [21]. U cilju minimizacije maksimalnog fazi vremena potrebnog za obradu svih delova, predložena je primena unapređenog TABC algoritma, a čiji su rezultati, u odnosu na sedam postojećih algoritama za pet referentnih slučajeva, pokazali uspešnost rešavanja ove vrste problema.

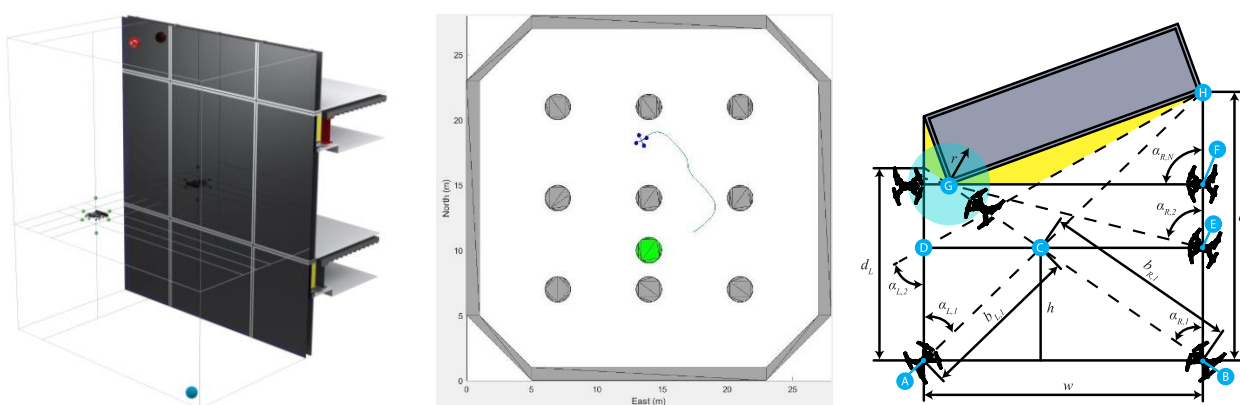
Istraživanja u radu [22] prikazuju primenu hibridnog GA u cilju minimizacije *makespan*-a. Razvijena je nova heuristika, zasnovana na tri koraka, koja je kombinovana sa GA za rešavanje DFJSS problema. U tim koracima daje se prednost pri dodeljivanju operacija mašinama alatkama u pogledu dužine trajanja vremena obrade, dok se u sledećem dodeljivanju operacija mašinama prioritet daje delu čija je prethodna operacija ranije završena. U cilju zadržavanja najbolje reprezentativne inicijalne populacije, dobro poznata dispečarska pravila su integrisana sa GA. U radu [23], predložen je hibridni MPGA-CP pristup (engl. *Multi-Population Genetic Algorithm and Constraint Programming*) u cilju obezbeđivanja Pareto rešenja, uzimajući u obzir tri tipična optimizaciona kriterijuma: *makespan*, iskorišćenje mašina alatki, kao i ukupno kašnjenje. U poređenju sa drugim alternativnim pristupima iz relevantne literature, predloženim pristupom ostvaruje se poboljšana efikasnost u rešavanju kompleksnih problema, pokrivajući veliki broj Pareto rešenja. Takođe, DFJSS problem sa ograničenjima u pogledu transportnih resursa nije još istražen u potpunosti. U cilju uspešnog rešavanja pomenutog ograničenja, autori rada [24] razvijaju novi DQNSGA algoritam, koji integriše unapređeni genetički algoritam baziran na NSGA-III (engl. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III*) i mašinsko učenje ojačavanjem (engl. *Reinforcement Learning* – RL). U okviru DQNSGA algoritma, razvijen je metod inicijalizacije zasnovan na heurističkim pravilima i pohlepnom pristupu dekodiranja.

Iako prethodno analizirana literatura pokazuje prednosti pristupa baziranih na algoritmima, jedan od ključnih nedostataka odnosi se na njihovu brzu konvergenciju ka lokalnom optimumu u inicijalnim fazama

optimizacije. U tom smislu, u okviru budućih istraživanja biće predložene različite strategije pretraživanja prostora mogućih rešenja optimizacionog problema koje će za cilj imati unapređenje konvergentnih karakteristika algoritma i kvaliteta dobijenog rešenja.

3. NOVI PRAVCI RAZVOJA

Dosadašnja istraživanja, obuhvatila su rad na definisanju adekvatne konfiguracije inicijalnog koncepta mobilnog robota – letelice, kao i na razvoju originalnih algoritama inteligentnog upravljanja primenom mašinskog učenja ojačavanjem (Slika 3.1) za nekoliko različitih upravljačkih zadataka „višeg“ nivoa poput: (1) učenja optimalne putanje kretanja na osnovu informacija o početnom i ciljnom položaju i uz prethodno usvojene određene pretpostavke [25]; (2) rešavanja kompletnog upravljačkog problema koji se odnosi na autonomnu navigaciju MBL tokom obavljanja zadatka čišćenja objekta oblika kvadra i to proizvoljne početne orijentacije u odnosu na mobilni robot – letelicu, uz primenu originalno razvijene metodologije (koristi informacije sa kamere kao eksternog senzora) za estimaciju udaljenosti objekta od interesa i određivanje granica okruženja [26], (3) razvoja sistema za izbegavanje prepreka u okruženju na osnovu informacija dobijenog sa LIDAR senzora uz detaljnu analizu međusobne zavisnosti vektora akcija, vektora stanja, funkcije nagradne ocene stanja i konfiguracije okruženja [27].



Slika 3.1 MBL u iteraciji upravljanja tokom procesa obučavanja (levo) [25]; Agent uspešno izbegava prepreke tokom navigacije (sredina) [26] i Metoda za estimaciju udaljenosti objekta (desno) [27]

Na osnovu znanja i iskustava generisanih dosadašnjim naučnim istraživanjima, kao i detaljnom analizom ključnih literaturnih izvora u predmetnoj multidisciplinarnoj oblasti - kognitivnoj robotici, budući rad baziraće se na dokazivanju hipoteza da je model inteligentnog upravljanja, baziran na originalnom algoritmu dubokom učenja ojačavanjem moguće primeniti za ostvarivanje autonomnog kretanja mobilnog robota – letelice, posebno po staklenoj površini tokom obavljanja robotskog zadatka čišćenja, kao i da kognitivne sposobnosti mobilnog robota – letelice, bazirane na originalnom algoritmu dubokog učenja ojačavanjem, mogu da obezbede pouzdano i efikasno obavljanje robotskog zadatka specifične namene na osnovu ocenjenog trenutnog stanja robotskog sistema.

Da bi se postavljenije hipoteze uspešno dokazale, a imajući u vidu sveobuhvatnost, kompleksnost i multidisciplinarni karakter tematske oblasti, izdvojene su i predložene naučne metode istraživanja za: (1) modeliranje i obučavanje različitih arhitektura konvolucionih neuronskih mreža (engl. *Convolution Neural Networks* – CNN); (2) inteligentno robotsko upravljanje na osnovu informacija dobijenih od heterogenog senzorskog sistema; (3) kompjutersko projektovanje bazirane na aktuelnim CAD softverima za konfigurisanje trodimenzionalnog modela MBL; (4) razvoj, testiranje i verifikaciju modela inteligentnog robotskog upravljanja u okviru softverskog okruženja *MATLAB Simulink*; (5) softversko-hardversku implementaciju posebno razvijenog algoritma dubokog učenja ojačavanjem za ostvarivanje autonomnog kretanja MBL; (6) obradu signala tokom akvizicije u eksperimentalnim laboratorijskim uslovima i (7) eksperimentalnu verifikaciju i validaciju predloženih hipoteza i statističku analizu ostvarenih rezultata.

Takođe, fokus istraživanja odnosi se i na implementaciju biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije u cilju generisanja optimalnih tehnoloških procesa i optimalnih planova terminiranja obrade delova u dinamičkim uslovima. Optimizacija će biti ostvarena kroz razvoj jednokriterijumskih i višekriterijumskih metoda, na osnovu zadatih funkcija cilja, primenom metaheurističkih algoritama poput evolucionih algoritama, algoritama baziranih na inteligenciji roja, kao i hibridnih pristupa. Implementacija novorazvijenih metoda

optimizacije trebalo bi da obezbedi smanjenje ukupnih proizvodnih troškova, ekonomičniju i efikasniju proizvodnju mašinskih delova, a u skladu sa tim, da omogući povećanje obima proizvodnje. Na osnovu detaljne analize relevantnih literaturnih izvora i pomoću znanja stečenih tokom dosadašnjih istraživanja, a u cilju teorijske i eksperimentalne verifikacije predloženih višekriterijumskih metoda optimizacije planova terminiranja, buduća istraživanja, zasnivaće se na generisanju optimalnih tehnoloških procesa obrade delova u dinamičkim tehnološkim sistemima, primenom biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije, uzimajući u obzir alternativne resurse poput mašina alatki, alata i pomoćnih pribora; kao i na određivanju optimalnih planova terminiranja shodno usvojenim kriterijumima performansi, a na osnovu optimalnih tehnoloških procesa, kao i jednokriterijumskih i višekriterijumskih modela optimizacije.

Imajući u vidu sveobuhvatnost, kompleksnost i multidisciplinarni karakter tematske oblasti, predlažu se sledeće naučne metode istraživanja: metode za kompjutersko projektovanje bazirane na CAD softverima za generisanje 3D modela reprezentativnih mašinskih delova, metode za softversku implementaciju razvijenih algoritama, metode biološki inspirisane optimizacije planova terminiranja, kao i metode za eksperimentalnu verifikaciju i validaciju predloženih hipoteza i statističku analizu dobijenih rezultata. Očekivani rezultati predloženih naučnih istraživanja podrazumevaju: (1) novu metodologiju za kodiranje (šematsko predstavljanje redosleda operacija tehnoloških procesa i planova terminiranja u formi pogodnoj za primenu različitih operatora optimizacionih algoritama) i dekodiranje (određivanje funkcije cilja tehnoloških procesa i planova terminiranja) i (2) nove metodologije za optimizaciju tehnoloških procesa i njihovo optimalno terminiranje u dinamičkim uslovima primenom biološki inspirisanih tehnika veštačke inteligencije, uz definisanje relevantnih funkcija cilja i poboljšanje performansi inteligentnih tehnoloških sistema u pogledu smanjenja vremena i troškova proizvodnje, kao i efikasnijeg planiranja proizvodnih resursa.

4. ZAKLJUČAK

Planirana istraživanja su usmerena na naučnoistraživački cilj razvoja kognitivnih mobilnih robota minimizirane mase, sa autonomnim ponašanjem pri izvršavanju robotskog zadatka specifične namene, koristeći inteligentno upravljanje zasnovano na heterogenoj senzorskoj podršci, posebno kameri, kao i dubokom učenju ojačavanjem. Dakle, cilj je da oni budu u stanju da ostvare rekonfigurabilnost morfološke strukture u zavisnosti od uslova okruženja, posebno posmatrano kroz ograničenja prilikom autonomnog kretanja. Za ostvarivanje ovog ultimativnog cilja koji obuhvata razvoj modela inteligentnog upravljanja mobilnog robota – letelice baziranog na oceni njegovog trenutnog stanja, posebno kada se radi o nepredvidivim i dinamičkim uslovima radnog okruženja, fokus istraživanja biće usmeren ka njegovim kognitivnim sposobnostima. Razvoj kognitivnih sposobnosti MBL u cilju autonomnog donošenja pravovremenih odluka o daljim akcijama, kao i ostvarivanje inteligentnog ponašanja primenom algoritma dubokog učenja ojačavanjem, naučnoistraživački je cilj najvišeg ranga. Reč je o originalnoj ideji značajnoj za razvoj nauke u domenu kognitivne robotike.

Takođe, naučni cilj predviđenih istraživanja predstavlja i razvoj metodologije za generisanje optimalnih tehnoloških procesa i optimalnih planova terminiranja obrade delova u dinamičkim uslovima, a zasnovane na biološki inspirisanim tehnikama veštačke inteligencije. Razvoj će se ostvariti kroz sledeće parcijalne ciljeve istraživanja: (1) identifikacija dinamičkih faktora (na primer: otkaz obrade dela, prestanak rada mašine alatke, dolazak novog dela u tehnološki sistem) relevantnih za odabrano tehnološko okruženje, (2) kreiranje matematičkih modela za određivanje različitih vremenskih parametara tehnoloških procesa (poput vremena početka operacije i vremena završetka operacije) na osnovu glavnog vremena obrade, vremena transporta, vremena izmene alata i orijentacije alata, uzimajući u obzir uticaj dinamičkih faktora, (3) razvoj metode za kodiranje i dekodiranje tehnoloških procesa i planova terminiranja shodno dostupnim resursima (na primer: mašinama alatkama, alatima, pomoćnim priborima, transportnim sredstvima) u cilju predstavljanja mogućih rešenja optimizacionih algoritama, (4) analiza različitih funkcija cilja (na primer: ukupno vreme potrebno za mašinsku obradu svih delova, troškovi proizvodnje, uravnoteženo iskorišćenje mašina alatki, transportni tokovi materijala, poštovanje zadatih rokova) relevantnih za unapređenje performansi inteligentnih tehnoloških sistema i (5) razvoj i implementacija različitih metoda optimizacije tehnoloških procesa i planova terminiranja shodno usvojenim funkcijama cilja.

5. LITERATURA

- [1] Schmidt, D., Berns, K. (2013). *Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures - A survey of design aspects and technologies*, Robotics and Autonomous Systems, Vol 61(12), 2013, pp. 1288-1305.

- [2] Seo, T., Jeon, Y., Park, C., Kim, J.: *Survey on Glass And Façade-Cleaning Robots: Climbing Mechanisms, Cleaning Methods, and Applications*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol 6, 2019, pp. 367-376.
- [3] Lee, H., Yu, B., Tirtawardhana, C., Kim, C., Jeong, M., Hu, S., Myung, H.: *CAROS-Q: climbing aerial robot system adopting rotor offset with a quasi-decoupling controller*, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol 6(4), 2021, pp. 8490-8497.
- [4] Song, Y., Romero, A., Müller, M., Koltun, V., Scaramuzza, D.: *Reaching the limit in autonomous racing: Optimal control versus reinforcement learning*, Science Robotics, Vol 8(82), 2023, eadg1462.
- [5] Miljković, K., Petrović, M.: *Integrirano planiranje i terminiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima – pregled stanja u oblasti istraživanja*, TEHNIKA – MAŠINSVO, Vol 69, 2020, pp. 733 – 746.
- [6] Lee, H., Jeong, M., Kim, C., Lim, H., Park, C., Hwang, S., Myung, H.: *Low-level pose control of tilting multirotor for wall perching tasks using reinforcement learning*, In 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 9669-9676.
- [7] Hwangbo, J., Sa, I., Siegwart, R., Hutter, M.: *Control of a quadrotor with reinforcement learning*, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol 2(4), 2017, pp. 2096-2103.
- [8] Koch, W., Mancuso, R., West, R., Bestavros, A.: *Reinforcement learning for UAV attitude control*, ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, Vol 3(2), No 22, 2019, pp. 1-21.
- [9] Xu, J., Du, T., Foshey, M., Li, B., Zhu, B., Schulz, A., Matusik, W.: *Learning to fly: computational controller design for hybrid uavs with reinforcement learning*, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol 38(4), No 42, 2019, pp. 1-12.
- [10] Lin, S., Goodman, E., Punch, W.: *A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem*, Proceedings of International Conference on Genetic Algorithms, 1997, pp. 481–488.
- [11] Shen, X.N., Yao, X.: *Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems*, Information Sciences, Vol 298, 2015, pp. 198-224.
- [12] Sajadi, S. M., Alizadeh, A., Zandieh, M., Tavan, F.: *Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns: multi-objectives genetic algorithm approach*, International Journal of Mathematics in Operational Research, Vol 14(2), 2019, pp. 268–289.
- [13] Ali, K.B., Bechikh, S., Louati, A., Louati, H., Kariri, E.: *Dynamic Job Shop Scheduling Problem with New Job Arrivals using Hybrid Genetic Algorithm*, IEEE Access, (in press), 2024,.
- [14] Petrović, M., Vuković, N., Mitić, M., Miljković, Z.: *Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm*, Expert Systems with Applications, Vol 64, 2016, pp. 569-588.
- [15] Petrović, M., Mitić, M., Vuković, N., Miljković, Z.: *Chaotic particle swarm optimization algorithm for flexible process planning*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 85, 2016, pp. 2535-2555.
- [16] Petrović, M., Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z.: *Multi-objective scheduling of a single mobile robot based on the grey wolf optimization algorithm*, Applied Soft Computing, Vol 131, 2022, p.109784.
- [17] Yu, M. R., Yang, B., Chen, Y.: *Dynamic integration of process planning and scheduling using a discrete particle swarm optimization algorithm*, Advances in Production Engineering & Management, Vol 13(3), 2018, pp. 279–296.
- [18] Wang, Z., Zhang, J., Yang, S.: *An improved particle swarm optimization algorithm for dynamic job shop scheduling problems with random job arrivals*, Swarm and Evolutionary Computation, Vol 51, 2019, p. 100594.
- [19] Duan, J., Wang, J.: *Robust scheduling for flexible machining job shop subject to machine breakdowns and new job arrivals considering system reusability and task recurrence*, Expert Systems with Applications, Vol 203, 2022, p. 117489.
- [20] Gao, K. Z., Suganthan, P. N., Chua, T. J., Chong, C. S., Cai, T. X., Pan, Q. K.: *A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion*, Expert Systems with Applications, Vol 42, 2015, pp. 7652–7663.
- [21] Gao, K. Z., Suganthan, P. N., Pan, Q. K., Tasgetiren, M. F., Sadollah, A.: *Artificial bee colony algorithm for scheduling and rescheduling fuzzy flexible job shop problem with new job insertion*, Knowledge-Based Systems, Vol 109, 2016, pp. 1–16.
- [22] Kundakci, N., Kulak, O.: *Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem*, Computers and Industrial Engineering, Vol 96, Jun. 2016, pp. 31–51.

- [23] Zhang, S., Tang, F., Li, X., Liu, J., Zhang, B.: *A hybrid multi-objective approach for real-time flexible production scheduling and rescheduling under dynamic environment in Industry 4.0 context*, Computers & Operations Research, Vol 132, 2021, p. 105267.
- [24] Tang, H., Xiao, Y., Zhang, W., Lei, D., Wang, J. and Xu, T.: *A DQL-NSGA-III algorithm for solving the flexible job shop dynamic scheduling problem*, Expert Systems with Applications, Vol 237, 2024, p. 121723.
- [25] Miljković, Z., Jevtić, Đ., Svorcan, J.: *Reinforcement learning approach for autonomous UAV navigation in 3D space*, In Proceedings of the 14th International Scientific Conference MMA 2021–Flexible Technologies, Novi Sad 2021., pp. 189-192.
- [26] Miljković, Z., Jevtić, Đ.: *Object Detection and Reinforcement Learning Approach for Intelligent Control of UAV*, In: Karabegović, I., Kovačević, A., Mandžuka, S. (eds) New Technologies, Development and Application V, NT 2022, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham, Vol 472, 2022, pp. 659-669.
- [27] Jevtić, Đ., Miljković, Z., Petrović, M., Jokić, A.: *Reinforcement Learning-based Collision Avoidance for UAV*, In 2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), Istočno Sarajevo 2023, pp. 1-6. IEEE.

Brenjo, K., Jevtić, Đ., Jokić, A., Petrović, M.M., Miljković, Z.

INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS AND PROCESSES - NEW DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INTELLIGENT-VISUAL CONTROL OF A MOBILE ROBOT-DRONE AND OPTIMAL SCHEDULING OF MANUFACTURING PROCESSES IN DYNAMIC ENVIRONMENT

Abstract: *The current subproject of the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, as well as work on doctoral dissertations, involves the new development of intelligent-visual control of a mobile robot-drone (MBD) for the specific purpose, as well as optimal planning and scheduling of manufacturing processes in a dynamic environment, based on artificial intelligence techniques, especially on deep reinforcement learning and biologically inspired optimization algorithms. During this year's intensified scientific research, a new methodology is being developed for autonomous movements, i.e. navigation and intelligent-visual control of a mobile robot-drone of our own development, intended for cleaning the glass surfaces of high-rise buildings. Also, the generation of an optimal scheduling plan for manufacturing processes, in which alternative resources such as machine tools, cutting tools and tool access directions are taken into account in dynamic operating environment of intelligent manufacturing systems, is one of the important goals of these advanced researches in the field of further development of production engineering in the 21st century. In this paper, an overview of some of the new directions of development based on own research is given, such as the analysis of deep reinforcement learning algorithms that are important for the development of intelligent control of MBD, primarily those with a continuous space of states and actions, as well as the analysis of the application of metaheuristic algorithms, i.e. evolutionary algorithms, algorithms based on swarm intelligence and representative hybrid approaches in scheduling of manufacturing processes in dynamic environment.*

Key words: *intelligent-visual control of a mobile robot-drone, vision systems, deep reinforcement learning, scheduling of manufacturing processes, biologically inspired optimization algorithms*



Maletić, J.¹⁾, Živanović, S.²⁾, Popović, M.²⁾, Puzović, R.²⁾

SIMULACIJA PROCESA OBRADJE SKULPTORSKIH POVRŠINA NA MAŠINAMA SA HORIZONTALNOM OBRATNOM OSOM³⁾

Rezime

U okviru ovog rada je prikazana je simulacija procesa obrade skulptorskih površina na mašinama sa horizontalnom obratnom osom. Predmet ovog rada je četvorosna glodalica LOLA VMC4 iz klase mašina MultiProDesk, strukture A'Y'OXZ. Za potrebe programiranja ove mašine, razvijen je postprocesor baziran na jednačinama inverzne kinematike. Deo za koji se definiše obrada je deo kompleksne geometrije koji služi kako bi se verifikovala obrada složenih površina na razmatranoj mašini, kao i mogućnost softvera za postprocesiranje za proračun putanje alata pri obradi kompleksnih površina. Za generisanje početne putanje alata korišćen je CAD/CAM softverski paket PTC Creo Parametric. Obrada dela je izvršena u okviru virtuelnog tehnološkog okruženja u softverskom paketu Vericut.

Ključne reči: skulptorske površine, simulacija, putanja alata, CAD/CAD, virtuelna obrada

1. UVOD

U današnje vreme, simulacija mašinske obrade, kao i virtuelna mašinska obrada, postali su ključni faktor u postizanju željene produktivnosti u industriji. Krajnji cilj jeste proizvesti tehnologiju obrade dela na realnoj mašini koja će omogućiti da se svi obrađeni delovi proizvedu na željeni način, za najmanji vremenski period i najmanju cenu [1]. Virtuelna simulacija mašinske obrade, koja je izvršava pre same obrade dela na pravoj mašini dobrinosi ranom otkrivanju grešaka koji se javljaju prilikom obrade, čime se povećava efikasnost samog obradnog procesa, pri čemu se izbegavaju greške obrade na samoj mašini. Virtuelni mašinski sistemi su razvijeni simulirajući realne mašinske sisteme, kao i realne mašinske obrade, u digitalnom okruženju sa ciljem da se poveća preciznost, kao i efikasnost obrade. Obradni sistemi mogu biti simulirani, analizirani, a potom i modifikovani nakon virtuelne mašinske obrade [2]. Korišćenjem virtuelnog mašinskog sistema, pri samoj izradi utrošak materijala je manji, i izbegava je prekidanje rada prave mašine [3].

Skulptorske površine (*free-form surfaces*) su u okviru mašinstva najzastupljenije u okviru avioindustrije, autoindustrije i obrade kalupa za kovanje i livenje. Za delove sa slobodnim, ili skulptorskim površinama, tipično se koriste troosne ili višeosne mašine alatke, na kojima se obrada izvodi loptastim glodalom. Problemi obrade delova sa skulptorskim površinama su predmet proučavanja mnogih istraživačkih centara već više od 30 godina. Delovi sa skulptorskim površinama su prisutni u svim granama inženjstva. Upotreba skulptorskih površina je prevashodno zbog poboljšanja dizajna, ili/i zbog poboljšanja funkcionalnih zahteva dela [4]. Za mašinsku obradu skulptorskih površina, zbog kompleksnosti samih delova, neophodno je koristiti CAD/CAM softvere u kojima se putanja alata izvodi po unapred određenim algoritmima u okviru softverskog paketa. Putanja alata najčešće se može sačuvati u obliku CL datoteke. Za obradu složene skulptorske površine višeosnom mašinom alatkom, orijentacija alata, geometrija alata, broj obrtaja glavnog vretena, i brzina pomoćnog kretanja moraju se uzeti u obzir na svakoj tački putanje alata definisane u okviru CAD/CAM softvera [5].

U ovom radu prikazana je virtuelna obrada dela sa skulptorskom površinom koja je izvršena na virtuelnoj

¹⁾ Julija Maletić, LOLA Institut, Beograd, (julija.maletic@li.rs)

²⁾ prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Radovan Puzović (rpuzovic@mas.bg.ac.rs) Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,

³⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekata koje finansijski podržava Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije po ugovorima: ev. br: 451-03-65/2024-03/200105 i ev. br. 451-03-66/2024-03/ 200066 za 2024. godinu.

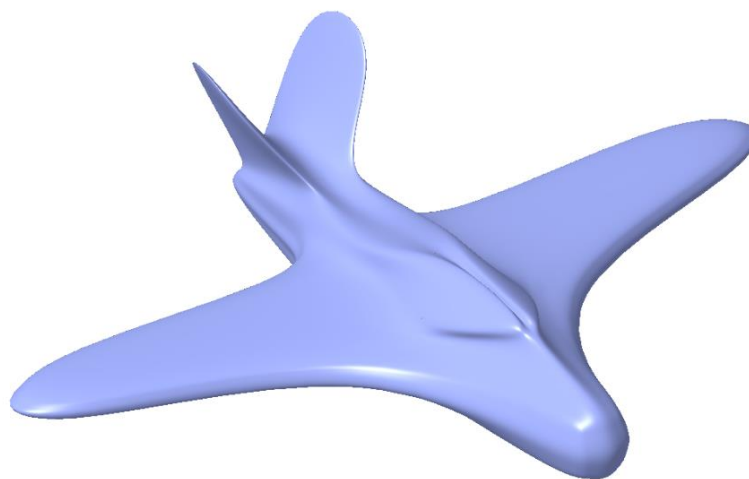
četroosnoj mašini sa horizontalnom obrtnom osom, konfiguracije $A'Y'OXZ$. Ova virtuelna mašina predstavlja verifikaciono okruženje za četroosnu mašinu sa horizontalnom obradnom osom LOLA VMC 4 [6]. Razmatrana mašina je trenutno troosne konfiguracije, sa planom nadogradnje na četroosnu mašinu dodatkom horizontalne rotacione ose A' . U okviru ove verifikacije virtuelni model mašine je proširen sa pomenutom rotacionom osom.

Odabir dela kompleksne površine je izvršen sa dvojakom namenom, prva od kojih jeste da se verifikuje mogućnost, kao i preciznost obrade na razmatranoj mašini. Druga namena jeste verifikacija mogućnosti razvijenog postprocesorskog softvera za proračun putanje alata pri obradi kompleksnog dela. Program korišćen za postprocesorski proračun predstavlja modifikovanu verziju softvera razvijenog u [7], koji je prilagođen kinematičkoj strukturi mašine LOLA VMC4.

U okviru ovog rada prikazan je izbor reprezentativnog dela, kao i programiranje putanje alata za njegovu obradu. Nakon toga, definisanje virtuelnog obradnog sistema za simulaciju i verifikaciju mašinske obrade za mašinu LOLA VMC4. Na kraju, prikazana je virtuelna mašinska obrada razmatranog dela.

2. IZGLED TEST DELA I PROGRAMIRANJE OBRADNE

U okviru ovog rada izvršena je obrada dela u obliku makete aviona, kao primer obrade dela složene geometrije, prikazano na slici 1. Deo složene geometrije, sačinjen od skulptorskih površina je izabran kao reprezentativni primer za verifikaciju obrade složenih površina na razmatranoj mašini sa horizontalnom obrtnom osom. Simulacija obrade dela sa složenom površinom izvedena je kako bi se proverile situacije u procesu obrade koje mogu dovesti do komplikacija. Ovakva geometrija obratka je takođe korišćena za verifikaciju ispravnosti razvijenog programa za postproceriranje putanje alata.



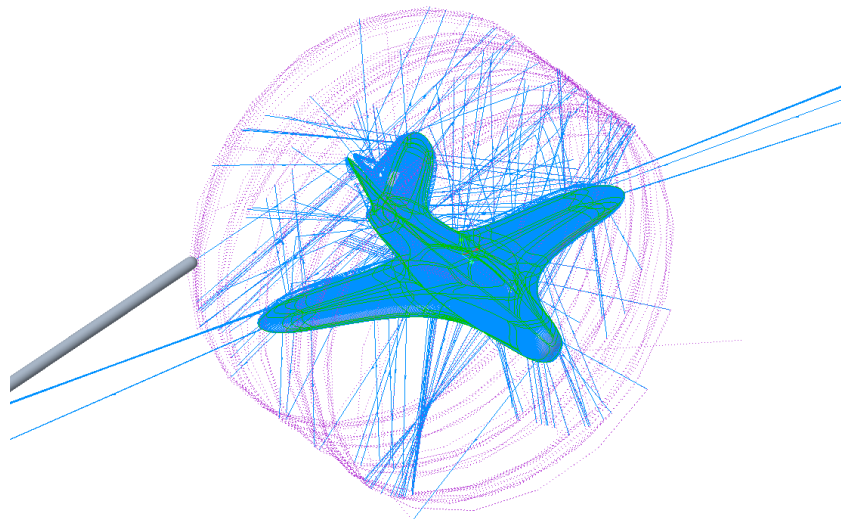
Slika 1. Primer dela sa skulprorskim površinama

Programiranje putanje alata izvršeno je pomoću CAD/CAM softvera *PTC Creo Parametric*, čime je dobijen CL fajl u kome je sadržana putanja alata. Ovako definisana putanja alata sadrži podatke poziciji i orijentaciji alata tokom obrade u odnosu na koordinatni sistem obratka i kao takav se ne može koristiti na samoj mašini, već se mora određenim postprocesorom prilagoditi tako da se dobiju potrebna kretanja osa mašine alatke.

U okviru definisanja putanje alata, u okviru CAM paketa korišćenog softvera definisane su površine koje će se obraditi, u ovom slučaju to su sve površine razmatranog modela, izuzev dodatka sa zadnje strane kako bi deo ostao pričvršćen za ostatak neobrađenog materijala. Korišćena je opcija površinskog glodanja (*Conventional Milling*), i definisano je loptasto glodalo prečnika 4mm kao jedini alat koji se koristi prilikom ove obrade. U okviru definisanja mašine, odabrana je opcija četroosne glodalice sa obrtnom horizontalnom osom A' . Kretanje alata tokom obrade je verifikovano koristeći simulaciju putanje alata u samom CAD/CAM sistemu, prikazao na slici 2. Simulacijom je potvrđeno da se željeni deo može dobiti ovakvim procesom obrade i da se obrada može izvršiti na definisanoj mašini sa tri translatorne i jednom horizontalnom rotacionom osom. Izvršena simulacija prikazuje kretanje alata bazirano na podacima iz CL datoteke, i samim tim ne može prikazati tačno kretanje alata prilikom izvršavanja programa obrade na samoj mašini.

Imajući u vidu prirodu kompleksnih površina koje se ne mogu obraditi unapred definisanom interpolacijom

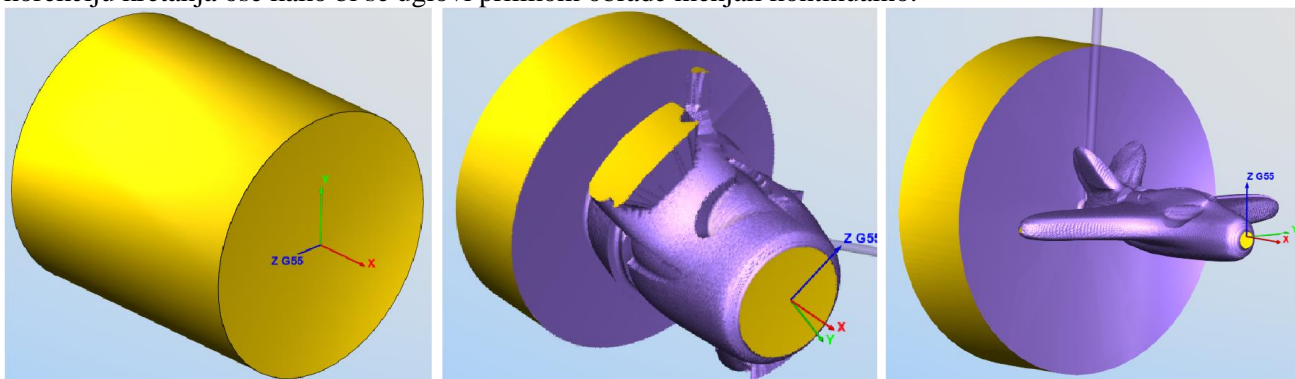
alata, obrada takvih delova sačinjenih od takvih površina se programira kao niz linearnih interpolacija alata između gusto raspoređenih tačaka na površini dela. Putanja alata koja se nalazi u CL fajlu nije opisana imajući u vidu kinematiku mašine, već samo sadrži podatke o kretanju alata u odnosu na obradak. Kako bi ovako definisana putanja alata mogla da se izvede na pravoj ili virtuelnoj mašini, potrebno je podatke u CL fajlu prevesti u vrednosti pomeranja osa mašine.



Slika 2. Programirana putanja alata u okviru CAD/CAM sistema PTC Creo

Kako bi se dobio program obrade koji se može izvršiti na mašini, potrebno je gore pomenuti CL fajl postprocesirati odgovarajućim postprocesorskim softverom. U ovu svrhu korišćena je modifikovana verzija softvera za postprocesiranje koji je razvijen u okviru [7]. Razvijeni softver za postprocesiranje je modifikovan koristeći kinematičke jednačine koje opisuju strukturu razmatrane četvoroosne mašine sa horizontalnom obrtnom osom. Kinematičke jednačine korišćene u okviru ovog softvera izvedene su na osnovu rešenja inverznog kinematičkog problema, na osnovu [8] i [9].

Kao što se može videti na slici 2 u okviru programiranja putanje alata nije definisana predobrada dela, a kako je zbog specifičnog oblika razmatranog modela potrebno je ukoniti veliku zapreminu materijala, pored završne obrade, u okviru postprocesorskog softvera je uvedena opcija za definisanje predobrade na osnovu putanje alata tokom završne obrade. Proces predobrade je razmatranog dela prikazan je na slici 3. Razvijeni softver za postprocesiranje je proširen korekcijom proračuna uglova rotacione ose. Naime, zbog prirode trigonometrijskih funkcija koje figurišu u okviru proračuna željenih uglova horizontalne rotacione ose A' prilikom obrade, postoje ograničenja ugla A u granicama od $[-\pi, \pi]$. Zbog ovih ograničenja potrebno je izvršiti korekciju kretanja ose kako bi se uglovi prilikom obrade menjali kontinualno.

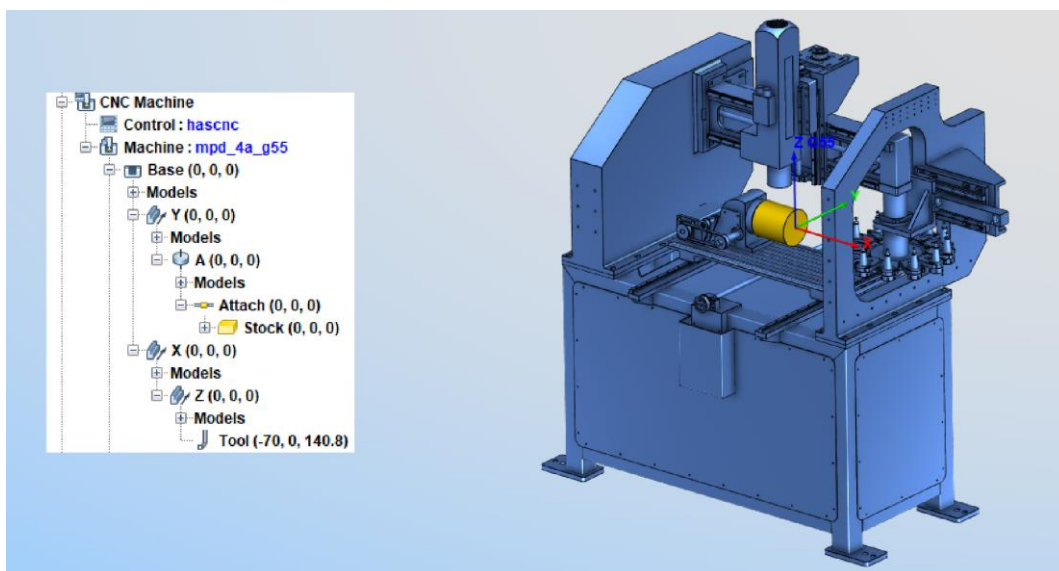


Slika 3. Proces predobrade razmatranog dela

3. DEFINISANJE SIMULACIONOG OKRUŽENJA

U svrhu simuliranja obrade zasnovano na G kodu korišćen je softver *Vericut*. U ovom softveru je definisano virtuelno simulaciono okruženje koje se sastoji iz virtuelnog modela mašine sa definisanom kinematičkom struktutrom, uspostavljenim koordinatnim sistemima, izabranog odgovarajućeg upravljanja mašine, alata, pribora, kao i potrebnih korekcija položaja alata i obratka. Postavka modela mašine u virtuelnom tehnološkom

okruženju, sa prikazom hjerarhijskog stabla kinematičke strukture, prikazana je na slici 4.

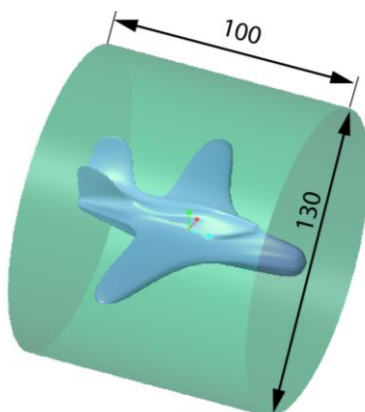


Slika 4. Virtuelno tehnološko okruženje mašine MultiProDesk

U okviru softvera *Vericut* moguće je simulirati obradu na osnovu različitih formata programa putanje alata, između ostalog, moguće je simulirati obradu na osnovu G koda, što je u ovom slučaju korišćeno za verifikaciju programa.

Najpre je definisan virtuelni model mašine koristeći modele delova mašine koji odgovaraju delovima prave mašine. U okviru softvera *Vericut* moguće je na jednostavan i intuitivan način definisati virtuelni model mašine. Najpre se polazi od nepokretne baze mašine (*Base*), a pokretni delovi mašine se definišu prema tipu i redosledu kojim su definisani u kinematičkoj strukturi mašine. Kao što je prethodno napomenuto, strukturna formula mašine je $A'Y'OXZ$ pri čemu se prilikom formiranja virtuelnog modela mašine definišu dve grane, grana alata i grana obratka. Grana alata je određena translatorskim osama X i Z (X Linear, Z Linear), koje su sledstveno definisane u okviru virtuelnog modela. Na Z osu mašine se dalje nastavlja mesto definisanja glavnog vretena mašine (*Spindle*), a nakon toga i mesto postavke adekvatnog alata (*Tool*). Grana obratka je definisana translatorskom osom Y' (Y Linear), na čijem je nastavku definisana rotaciona osa A' (A Rotary), pri čemu se na kraju grane definiše mesto baziranja obratka (*Attach*), a zatim i pripremak (*Stock*). U okviru definisanja virtuelnog modela mašine, pored definisanja pozicije i načina kretanja pokretnih delova, neophodno je i svakom delu mašine dodeliti odgovarajući CAD model, u STEP formatu.

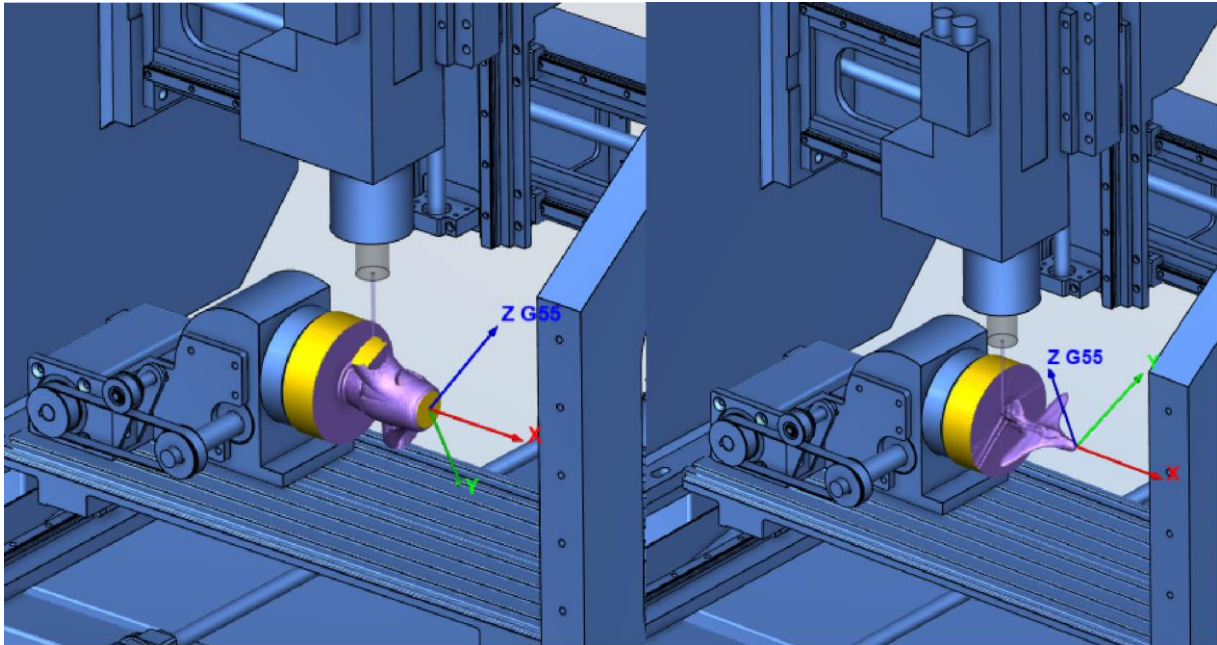
Pored same mašine, za simulaciju procesa obrade potrebno je u okviru virtuelnog tehnološkog okruženja definisati alate koji se koriste tokom obrade, glavno vreteno mašine, referentne koordinatne sisteme, kao i model pripremk koji će biti obrađen prilikom virtuelne obrade. Model pripremk u okviru simulacije obrade razmatranog dela na virtuelnom obradnom sistemu je u obliku cilindra, čije dimenzije odgovaraju dimenzijama polaznog dela. Pripremk je prečnika 130mm i visine 100mm, prikazano na slici 5. Kako se u ovoj fazi pripreme virtuelne obrade ne razmatra izgled početnog modela, on se ne definiše, na ovaj način je provereno da je izlazni model virtuelne simulacije deo koji je obrađen na virtuelnom vertikalnom obradnom centru samo na osnovu zadatog G koda.



Slika 5. Prikaz pripremk za obradu dela sa skulptorskom površinom

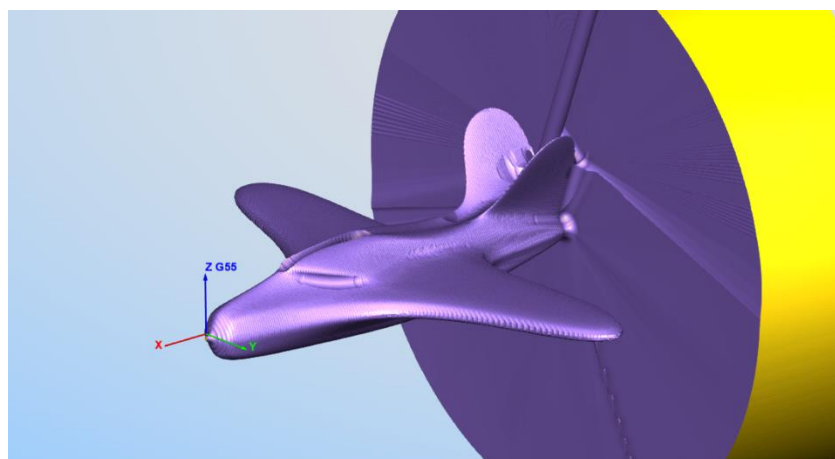
4. VIRTUELNA OBRADA

Nakon definisanja obratka, programiranja obrade i verifikovanja ispravnosti definisane putanje alata sledi virtuelna obrada. Definisanje i proces virtuelne mašinske obrade odgovaraju pripremi mašinske obrade na pravoj mašini. Kao takva, virtuelna obrada predstavlja poslednji korak pripreme obrade nekog dela, sa ciljem verifikacije programa za obradu pre same obrade. U okviru obrade skulptorskih površina, potrebno je izvršiti obradu površine koristeći pomoćna kretanja sve četiri ose simultano, bez kolizije delova mašine, kao i bez kolizije alata sa pripremkom, što je ovom virtuelnom obradom verifikovano. Simulacija obrade razmatranog dela, prilikom predobrade i završne obrade, u okviru virtuelnog tehnološkog okruženja, prikazana je na slici 6.



Slika 6. Simulacija obrade dela sa skulptorskom površinom

Simulacija obrade bazirana na G kodu je izvršena u okviru definisanog tehnološkog okruženja. Rezultat virtuelne obrade je virtuelni obradak, prikazan na slici 7. U okviru softvera Vericut ovakav obradak je moguće sačuvati kao zaseban STL fajl i koristiti ga prilikom analiziranja rezultata. Rezultujući virtuelni obradak se poklapa sa početnim, zadatim modelom, izuzimajući hrapavost površine koja je prouzrokovana geometrijom alata. Simulacijom je potvrđeno da tokom obrade ne dolazi do kolizije delova mašine.



Slika 7. Virtuelni obradak dela sa skulptorskom površinom nakon virtuelne obrade

5. ZAKLJUČAK

U ovom radi prikazana je simulacija obrade skulptorske površine na mašini LOLA VMC 4. Razmatrana mašina je četveroosna glodalica sa horizontalnom obrtnom osom. U ovom radu je prikazan metod definisanja okruženja za verifikovanje rada mašina sa horizontalnom obrtnom osom kinematičke strukture A'Y'OXZ.

Svrha virtuelne obrade dela sa složenom, skulptorskom površinom jeste verifikacija kapaciteta mašinskog sistema za obradu kompleksnih površina, kao i verifikacija mogućnosti programa za postprocesiranje putanje alata pri obradi delova složene geometrije.

Definisanje putanje alata je izvršeno pomoću CAD/CAM softvera *PTC Creo Parametric*. Kao rezultat definisanja putanje alata je dobijena CL datoteka, koja je potom prevedena u G kod. Za programiranje G koda koji je izvršen prilikom virtuelne obrade je korišćen je postprocesorski program koji je razvijen na osnovu kinematike mašine. Programi obrade dela skulptorske površine, koji uključuju predobradu i završnu obradu, izvršeni su u okviru virtuelnog tehnološkog okruženja razvijenog u okviru softvera *Vericut*. Pri izradi virtuelnog tehnološkog okruženja, definisana je virtuelna mašina alatka koja koincidira sa projektovanom četveroosnom mašinom sa horizontalnom obrtnom osom. Rezultat virtuelne obrade dela jeste virtuelni obradak koji se nakon simulacije može koristiti za analizu korektnost izvršenog programa. Ovaj vid virtuelne verifikacije programa doprinosi bržem i lakšem izvođenju obrade na realnoj mašini.

Ovakva obrada je planirana i na pravoj mašini, gde se rezultati ovog rada mogu upotrebiti za poboljšavanje performansi mašine i postprocesora, što dovodi do pouzdanijeg i preciznijeg procesa obrade. Istraživanja za sada služe kao priprema i provera postprocesora i okruženja za verifikovanje obrade na realnoj mašini.

6. LITERATURA

- [1] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., Witt, S.: *Virtual Machine Tool*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.54, 2005, pp.115-138. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5
- [2] Soori M., Arezoo B.: *Virtual Machining Systems for CNC Milling and Turning Machine Tools: A Review*, International Journal of Engineering and Future Technology, Vol. 18 No. 1, 2021 pp.56-104
- [3] Kadir A.A., Xu, X., Hämmerle, E., *Virtual machine tools and virtual machining—A technological review*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, No 3, pp. 494-508, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.10.003>.
- [4] Mladenović, G., Tanović Lj., Pjević M., Popović M.: *Obrada skulptorskih površina - Razvoj CAD/CAM sistema*, Zbornik radova sa konferencije Jupiter, Beograd 2016, str. 2.27-2.32
- [5] Lasemi, A., Xue D., Gu, P.: *Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review*, Computer-Aided Design, Vol. 42, No. 7, pp. 641-654, 2010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.04.002>.
- [6] Lola Vertical Machining Center 4- LOLA VMC4, <https://www.li.rs/o-institutu/vesti/629-velika-nagrada-korak-u-buducnost-lola-institut-u>, 2024.
- [7] Maletić, J., Živanović, S.: *Verification of inverse kinematic equations for a five-axis machine tool with a spindle tilting configuration*, Advanced Technologies & Materials, Vol. 47, No. 1, 2022, pp. 33-38, 2021. DOI: 10.24867/ATM-2022-1-006
- [8] Lee R.S., and C.H. C.H.: *Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.13, pp. 658–665, 1997
- [9] Chu, M.A., Nguyen C. V., Nguyen H.M., Bohez, E. LJ., *Transformation of CAM data for 5-axis CNC machine Spinner U5-620*, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, vol.9, no.2, 2020, DOI: 10.18178/ijmerr.9.2.233-237

Maletić, J., Živanović, S., Popović, M., Puzović, R.

THE SIMULATION OF MACHINING FREE-FORM SURFACES ON A MILLING MACHINE WITH A HORIZONTAL ROTARY AXIS

Abstract: This paper presents a simulation of machining a part with a complex, freeform surface on a milling machine with a horizontal rotary axis. The machine on which this simulation is based is the four-axis milling machine with a horizontal rotary axis and the kinematic structure A'Y'OXZ, LOLA VMC4 from the machine class MultiProDesk. A custom-made postprocessor with integrated machine kinematics was used to generate the toolpath for this machine. The test piece was chosen with specific free-form surfaces intended to evaluate the performance of the machining system and the postprocessing program under various operational scenarios. The initial toolpath was defined using the CAD/CAM software PTC Creo Parametric. The virtual machining of the said part was done in a virtual machining environment using the Vericut software.

Key words: free-form surfaces, simulation, toolpath, CAD/CAM virtual machining



Момчиловић, Б., Славковић, Н., Воркапић, Н., Живановић, С.¹⁾

ПРОТОТИП ИНДУСТРИЈСКОГ РОБОТА SCARA КОНФИГУРАЦИЈЕ²⁾

Резиме

Област примене индустријских робота се брзо шири уз сталну потражњу за побољшањем њихових функција, техничких карактеристика као и система управљања и програмирања. Један од циљева актуелних истраживања у оквиру Лабораторије за роботiku и вештачку интелигенцију је развој домаћег индустријског робота са могућношћу аутоматизованог програмирања на основу информација добијених од камере. У оквиру овог рада је представљен први део истраживања који подразумева развој и реализацију 4-осног индустријског робота SCARA конфигурације. Професор Хироси Макино са Универзитета Јаманаши пројектовао је SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) робота, који представља најпознатију конфигурацију робота насталу на универзитетима. Овај део истраживања обухвата кинематичко моделирање пројектованог робота, његову физичку реализацију и развој система управљања и програмирања са интеграцијом виртуелног робота. Систем управљања је реализован уз помоћ система управљања отворене архитектуре LinuxCNC, који омогућава даљи развој и интеграцију информација са камере као спољашњег сензора. Развијени систем управљања обухвата и модел виртуелног робота који представља дигиталну сенку реализованог SCARA робота. Верификација комплетно развијеног прототипа робота је спроведена кроз неколико примера реализовања технолошког задатка ласерског сећења и гравирања. Кључне речи: Индустријски робот, Управљање и програмирање, Виртуелни робот

1. УВОД

Индустријски роботи данас имају кључну улогу у производним системима кроз задатке као што су манипулација материјалом и деловима, обрада, монтажа, инспекција, адитивна производња итд. Потреба за екстремно флексибилним технолоким системима, који су последица све заступљеније персонализоване производње, намеће пред произвођаче робота захтеве за побољшањем функција, техничких карактеристика, као и система управљања и програмирања индустријских робота. С обзиром на то, подсистеми индустријских робота се непрестано модификују чиме се перманентно шири област њихове примене, унапређује њихова функционалност и повећава адаптивност променама у технолошком окружењу при извршавању задатака. Другим речима, многи индустријски роботи који раде у фабрикама користе вештачку интелигенцију, Интернет ствари, технологије проширене и виртуелне реалности итд. за обављање својих задатака. Данас су роботи способни да одлучују и уче на основу искуства у различитим ситуацијама и да се прилагођавају динамичким променама окружења у току извршавања задатака [1].

Офлајн програмирање и симулација робота реализовани кроз различите дигиталне моделе су од кључне важности за неке сложене производне задатке. Као што је познато, једна од есенцијалних технологија Индустрије 4.0 је технологија дигиталног близанца. Дигитални близанац подразумева виртуелно представљање процеса, система или другог физичког ентитета који користи виртуелну и проширену реалност, као и 3Д визуелизацију и моделирање података. Приступу офлајн програмирања се генерално говорећи могу поделити на приступе базиране на компјутерски подржаном пројектовању (CAD-based) и приступе засноване на визији (vision-based). Комбиновано, ова два приступа офлајн

¹⁾ маг. инж. маш. Богдан Момчиловић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (bmomcilovic@mas.bg.ac.rs), ван. проф. др Никола Славковић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), маг. инж. маш. Никола Воркапић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (nvorkapic@mas.bg.ac.rs), проф. др Саша Живановић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (szivanovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ У оквиру овог рада саопштавају се резултати истраживања која се спроводе на пројекту подржаном од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (број уговора: 451-03-65/2024-03/200105).

програмирања формирају хибридни приступ, који је широко примењен у програмирању индустријских робота за реализацију многих производних задатака [2].

Сложеност програмирања индустријских робота за технолошке задатке као што су обрада резањем, ласерско сечење и гравирање, 3Д штампање итд. се огледа у чињеници да не постоји јединствени програмски језик робота [3, 4]. За разлику од робота, стандард ISO 6983 (Г-код) се користи за програмирање машина алатки. С обзиром на то, постоје потешкоће при употреби широко распрострањених CAD/CAM система машина алатки за програмирање индустријских робота за обраду. Један начин за решавање овог проблема подразумева коришћење адекватних, специјализованих CAM система за програмирање робота или коришћење развијених транслятора за претварање путање алата технолошких задатака у адекватни програмски језик робота [4]. Други начин подразумева развој система управљања отворене архитектуре који омогућава програмирање робота коришћењем Г-кода.

Један од циљева тренутног истраживања у оквиру Лабораторије за роботiku и вештачку интелигенцију Катедре за производно машинство Машинског факултета Универзитета у Београду је развој домаћег индустријског робота и његовог дигиталног близанца са могућношћу аутоматског програмирања на основу информација добијених од камере и техника вештачке интелигенције.

Изабрани робот за истраживање је SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) робот који представља најпознатију конфигурацију робота потеклу на универзитетима. Као што је наглашено у [5], професор Хироши Макино са Универзитета Јаманши у Јапану је осмислио и заједно са својим колегама и партнерима из индустрије развио SCARA робота. SCARA робот је индустријски робот широко примењен у задацима монтаже. Први прототип оваквог робота је направљен 1978. године. Након темељних истраживања карактеристика и употребљивости самог прототипа, други прототип је направљен 1980. године. Произвођачи робота су 1981. године почели да продају роботе SCARA конфигурације. Овако настали модели робота су данас названи роботима SCARA конфигурације.

2. ПРИКАЗ КОНЦЕПТА

Развој домаћег 4-осног индустријског робота SCARA конфигурације, који се програмира у Г-коду, и његовог дигиталног близанца, са могућношћу аутоматског програмирања заснованог на информацијама добијених од камере и техникама вештачке интелигенције, се састоји из два дела.

Први део истраживања се састоји од кинематичког моделирања робота, развоја система управљања и програмирања, генерисања виртуелног робота, као и физичког реализовања 4-осног SCARA робота. Физичка реализација прве две осе робота је извршена кроз два Мастер рада 2022. године [6, 7], док је реализација комплетног 4-осног робота са системом управљања приказана у овом раду. Развој система управљања се базира на познатом кинематичком моделу SCARA робота који је имплементиран у систем управљања отворене архитектуре LinuxCNC. Овакав систем управљања омогућава програмирање у Г-коду, као и даљи развој и интеграцију камере. Такође, систем управљања обухвата и развијеног виртуелног робота конфигурираног уз помоћ неколико предефинисаних класа у Python и OpenGL окружењу који представља дигиталну сенку реализованог SCARA робота. Верификација развијеног прототипа робота је извршена кроз реализовање технолошког задатка ласерског гравирања различитих контура.

Други део истраживања ће укључити: (1) развој аналитичких метода и метода машинског учења заснованог на неуронским мрежама за прецизно позиционирање робота на основу информација са камере, (2) примена техника вештачке интелигенције и информација са камере ради генерисања путање енд-ефектора робота за извршење изабране класе задатака у технолошком систему и (3) развој експерименталног окружења за остваривање софтверско-хардверске интеграције система управљања и визуелне детекције базиране на камери за потребе аутоматског програмирања робота.

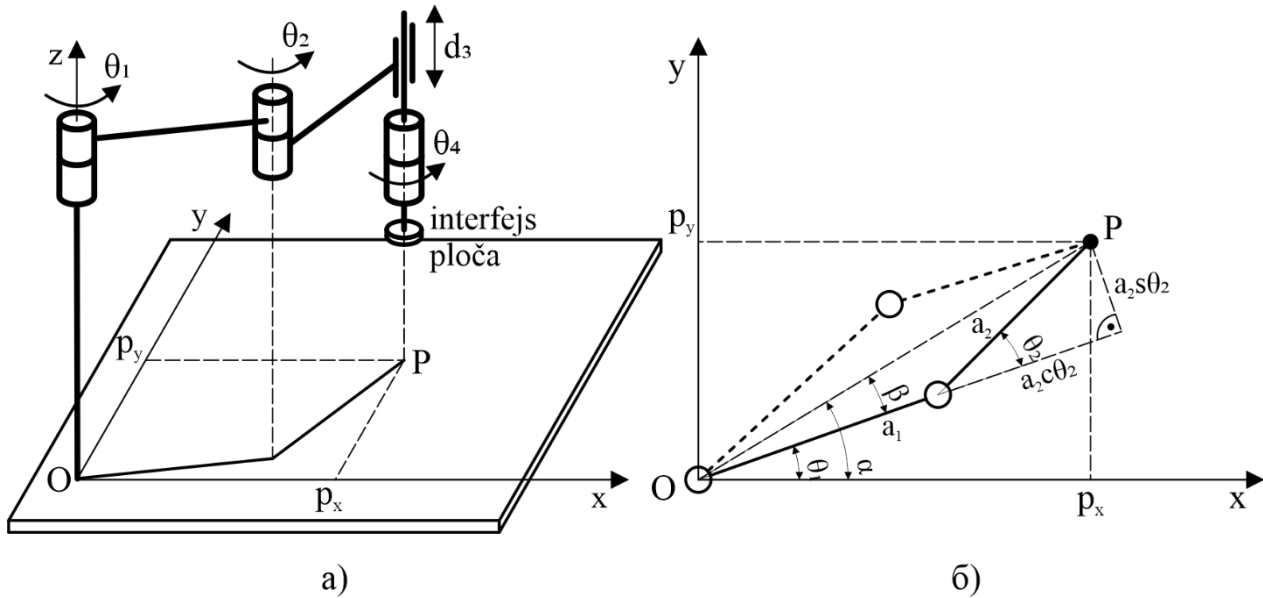
3. КИНЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ И ФИЗИЧКИ ПРОТОТИП

Кинематичко моделирање, које је неопходно за развој система управљања и програмирања се базира на добро познатим кинематичким једначинама SCARA робота [8, 9]. Кинематичко моделирање робота, у овом раду, обухвата решавање директног и инверзног кинематичког проблема, као и анализу радног простора.

3.1 Кинематичко моделирање 4-осног SCARA робота

Директни кинематички проблем робота овакве конфигурације се једноставно решава користећи Денавит-Хартенбергове кинематичке параметре и хомогене трансформације. Геометријски модел

SCARA робота је приказан на слици 1а), док је на слици 1б) приказан геометријски модел робота у равни Oxy.



Слика 1. Кинематички модел SCARA робота

Вектори спољашњих и унутрашњих координата разматраног робота, слика 1, су дефинисани као

$$\mathbf{x} = [p_x \quad p_y \quad p_z \quad \phi]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad d_3 \quad \theta_4]^T \quad (2)$$

Применом косинусне теореме, са слике 1б) добија се једначина

$$p_x^2 + p_y^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2c\theta_2 \quad (3)$$

Изражавањем непознате променљиве θ_2 као функције познатих параметара механизма и познатих спољашњих координата, из једначине (3) се добија да је

$$c\theta_2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad (4)$$

Коришћењем израза $s\theta_2 = \pm\sqrt{1 - (c\theta_2)^2}$ унутрашња координата θ_2 , односно померање у другом зглобу, се одређује као

$$\theta_2 = \text{Atan2}(s\theta_2, c\theta_2) \quad (5)$$

Унутрашња координата θ_1 се одређује на основу вредности углова α и β , слика 1б), као

$$\theta_1 = \alpha - \beta = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}(a_2s\theta_2, a_1 + a_2c\theta_2) \quad (6)$$

Вредности преосталих унутрашњих координата d_3 и θ_4 се, према слици 1, одређују на следећи начин

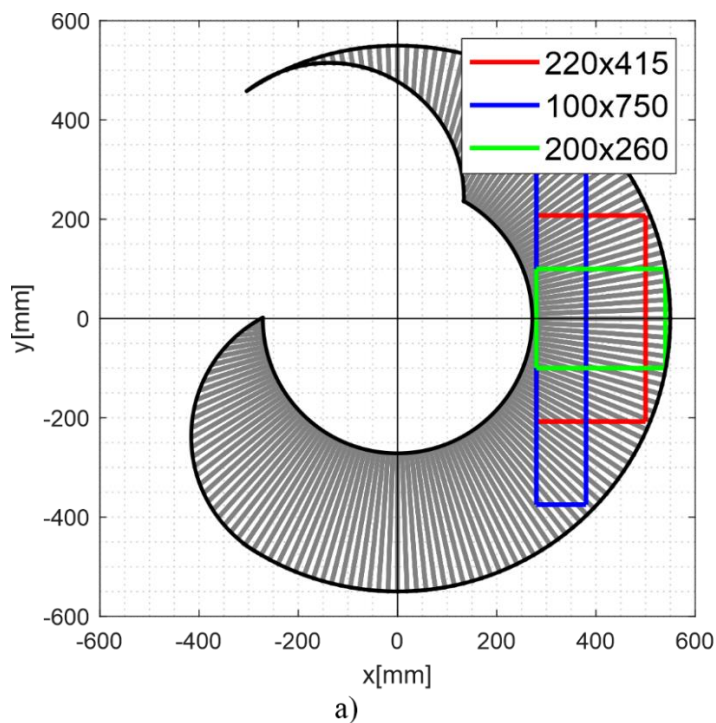
$$d_3 = d_1 - p_z \quad (7)$$

$$\theta_4 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (8)$$

3.2 Одређивање радног простора

Још једна од битних карактеристика механичке структуре робота како за развој виртуелног модела, тако и за развој физичког прототипа, је радни простор робота. Коришћени метод за одређивање радног простора се заснива на провери да ли одређену тачку у простору спољашњих координата енд-ефектор

робота може достићи или не, у зависности од задатих ограничења у зглобовима. За изабрану тачку са координатама (X,Y,Z) се решавањем инверзног кинематичког проблема добијају унутрашње координате, чије вредности морају бити у дефинисаним границама да би тачка припадала радном простору разматраног робота. При пројектовању новог прототипа, анализа радног простора представља итеративну процедуру, која подразумева измену параметара механизма док се не добије радни простор задовољавајућих димензија [10]. Слика 2а) приказује облик и димензије радног простора робота у Oxy равни чији параметри износе $a_1 = a_2 = 275 \text{ mm}$, а ограничења унутрашњих координата θ_1 и θ_2 износе $\pm 120^\circ$. Због природе механизма робота, може се закључити да трећа димензија радног простора зависи искључиво од унутрашње координате d_3 и да су облик и димензија радног простора исти у правцу z осе. Радни простор робота који је неправилног геометријског облика се може користити у целисти или се могу користити издвојени делови радног простора облика паралелопипеда који испуњавају услове задатка.



Слика 2. Радни простор реализованог SCARA робота

3.3 Реализација прототипа SCARA робота

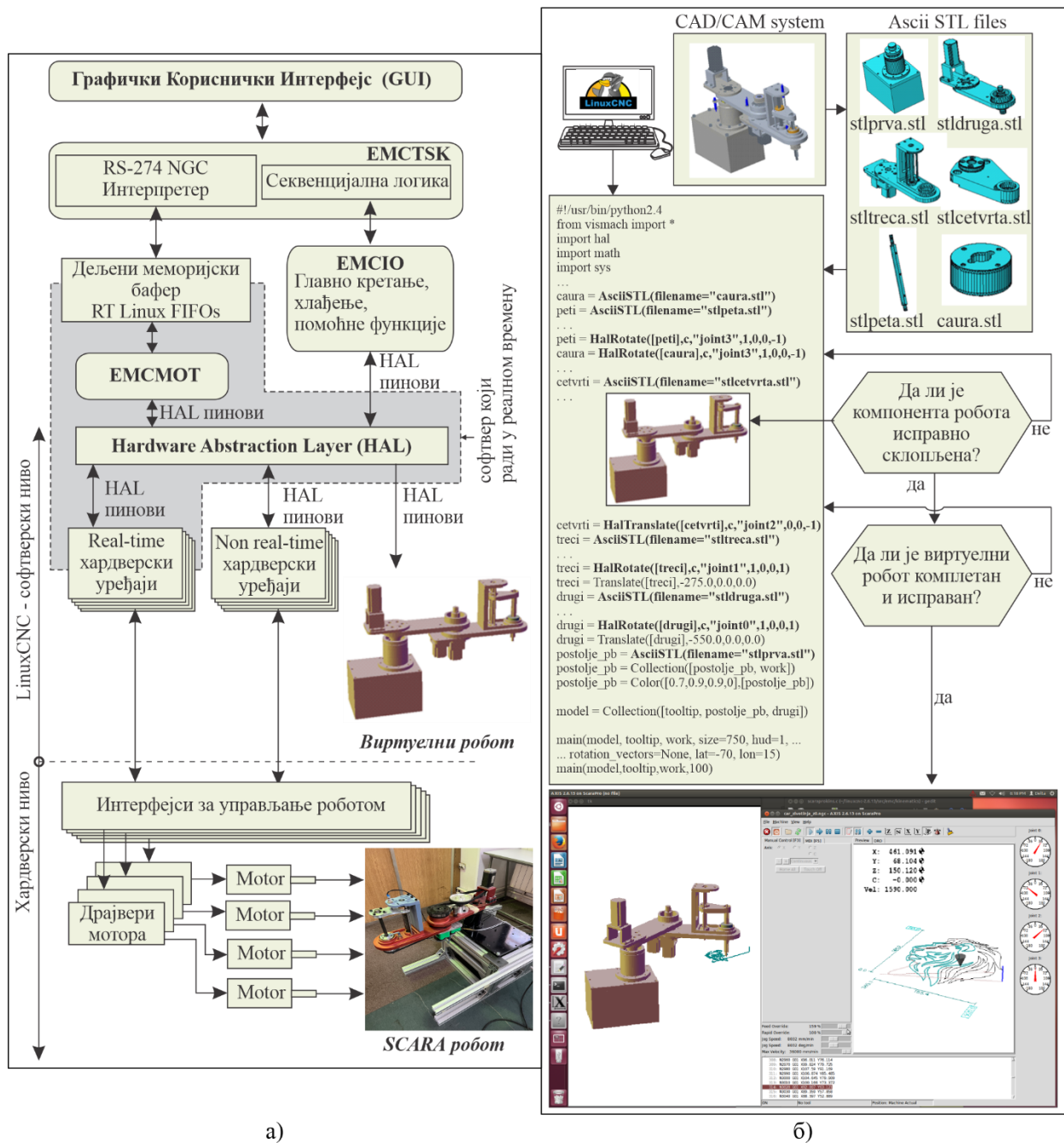
Реализовани прототип 4-осног SCARA робота је приказан на слици 2б). За погон зглобова робота су коришћени корачни мотори и то NEMA 34, 86x115, 4.0A1 8.5Nm за прву осу, NEMA 23, 57x112, 3.0A, 2.8Nm за другу осу и NEMA 23, 57x56, 2.8A, 1.17Nm за трећу и четврту осу. На првој оси је изведен тростепени преносник (редуктор) уз помоћ зупчастих каишника и каишева преносног односа $i_1 = 38.1176$, док је на другој оси двостепени зупчasti каишни редуктор преносног односа $i_2 = 36$. Актуатор линеарне (треће) осе је кинематички пар завојно вретено/навртка, корака $P = 4 \text{ mm}$, са зупчастим каишним преносником преносног односа $i_3 = 2$. Преносник четврте осе је, такође, зупчasti каишни преносног односа $i_4 = 4$. За иницијализацију сваке од оса, при укључивању робота, користе се индуктивни сензори (прекидачи).

4. РАЗВОЈ СИСТЕМА УПРАВЉАЊА И ПРОГРАМИРАЊА

Једна од погодности овог истраживања је да развијеног робота могу користити програмери CNC машина алатки користећи постојеће CAD/CAM системе и програмирање у Г-коду. Овакав приступ омогућава развијени систем управљања отворене архитектуре на бази LinuxCNC платформе.

4.1 Развој система управљања базираног на LinuxCNC платформи

Софтверска структура LinuxCNC-а се састоји од 4 основна модула, слика 3а): контролер кретања (EMCMOT), контролер дискретно улазно/излазних сигнала (EMCIO), модул за координисање задацима (EMCTSK) као и графички кориснички интерфејс (GUI).



Слика 3. Софтверска структура LinuxCNC и конфигурација виртуелног робота

Графички кориснички интерфејс (GUI) представља екстерни програм који комуницира са LinuxCNC-ом слањем команди као што су: укључивање машине, прелазак на аутоматски мод рада, покретање програма итд. Такође, команде које се шаљу преко GUI-а, могу бити инициране и од стране оператера. Неке од ових команди су кретање машине дуж неке од оса, слање свих оса у референту позицију, прелазак из спољашњих у унутрашње координате итд. Интерфејс AXIS је најчешће коришћен зато што подсећа на интерфејсе већине, данас доступних, нумерички управљаних машина алатки. Још једна од његових предности је могућност прилагођавања специфичним применама обрадног система на бази робота [3, 12].

Контролер дискретно улазно/излазних сигнала (EMCIO) представља модул који извршава све потребне комуникације које нису везане за управљање кретањем. Овај модул се састоји из неколико подсистема који имају улогу у управљању главним кретањем, измени алата, управљању средством за хлађење и подмазивање, као и управљању помоћним “све-стоп” функцијама итд.

Модул за координисање задацима (EMCTSK) је модул који дистрибуира команде на машини. Такође, он врши и интерпретацију програма у Г-коду, сходно RS 274 NGC стандарду.

Контролер кретања (EMCMOT) извршава планирање трајекторије, израчунавања која се односе на

директну и инверзну кинематику, као и рачунице које се односе на сигнале који се шаљу драјверима мотора. Контролер кретања извршава наведене функције у реалном времену.

HAL (Hardware Abstraction Layer) је замишљен као флексибилни интерфејс између контролера кретања са једне стране и свега онога што је потребно за везу са корисником и машином са друге стране. Он заправо представља метод за активирање и/или укључивање свих потребних модула, тако да се комплетира један систем нумеричког управљања, који се може користити адекватно и код индустријских робота за обављање одређених група задатака.

LinuxCNC омогућава управљање машинама и роботима са комплексном (нетривијалном) кинематиком. Управљање оваквих система је могуће на бази решеног инверзног и директног кинематичког проблема, који се програмирају у C програмском језику формирајући кинематички модул. Како разматрани SCARA робот представља машину са серијском, али нетривијалном кинематиком, решења директног и инверзног кинематичког проблема су послужила за формирање кинематичког модула који је имплементиран у конфигурациони фајл управљачког система робота.

4.2 Конфигурисање виртуелног робота

Виртуелни робот је конфигурисан у оквиру Python 3D окружења. Овај програмски језик омогућава поједностављену израду графичких корисничких интерфејса, као и њихових елемената. Захваљујући низу предефинисаних класа, могуће је програмирање и повезивање геометријских примитива и њихова интеграција у оквиру AXIS графичког корисничког интерфејса LinuxCNC-а.

Виртуелне машине алатке или роботи, креирани у Python 3D окружењу, се састоје од покретних делова који су виртуелно актуирани сходно променама у вредностима сигнала одговарајућих HAL пинова. Један типичан след активности при конфигурисању виртуелних робота у Python 3D окружењу је [12]:

- Креирање HAL веза које управљају кретањима оснажених оса;
- Креирање компонената које формирају механичку структуру робота. Компонете се могу програмирати и груписати у Python окружењу или могу бити увезене као готове компоненте;
- Креирање покретних елемената робота;
- Склапање робота у функционалну целину учитавањем и позиционирањем компонената на одговарајуће место.

На слици 3б) је приказана процедура конфигурисања виртуелног SCARA робота на основу претходно припремљених подсклопова у CAD/CAM окружењу. Компонете су претходно извезене у ASCII STL формату у односу на изабрани координатни систем, што омогућава да се у Python окружење прочитају у референтни координатни систем, а затим правилно позиционирају и оријентишу. Међусобно покретни елементи робота су повезани адекватним обртним или трансляторним везама. Параметри виртуелног робота одговарају параметрима реалног робота, и смерови оса су подешени према дефинисаном кинематичком моделу.

Резултат описане процедуре је виртуелни робот или машина алатка у Python 3D окружењу интегрисани са AXIS графичким корисничким интерфејсом. Виртуелни робот ради у Python 3D окружењу и омогућава кретање зглобовима робота кроз симулацију путање алата. Симулација је генерисана као резултат извршавања Г-кода у реалном времену, на исти начин као што би и реална машина била управљана. С обзиром на то, виртуелни робот може послужити за комплетирање и верификацију система управљања пре физичке реализације реалног робота.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА

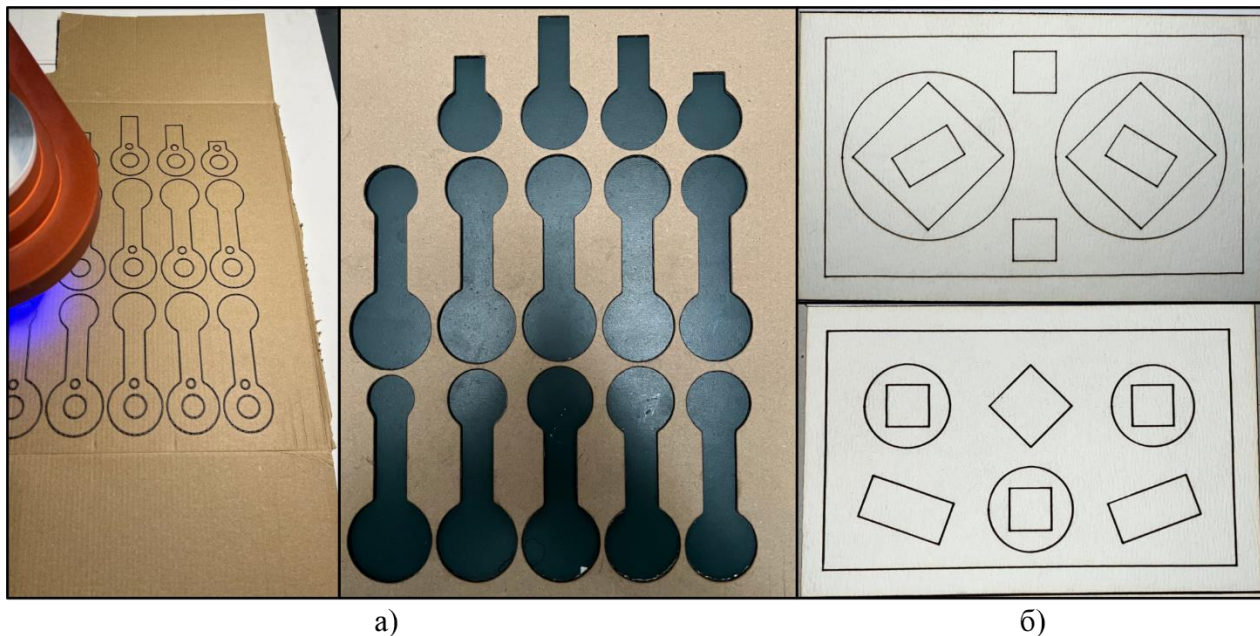
Коришћени метод програмирања је конвенционални и заснива се на CAD/CAM окружењу. Након верификације путање алата (Cutter Location - CL фајл), постпроцесирањем се добија Г-код. Добијени Г-код је уčitан у систем управљања и затим верификован на развијеном виртуелном роботу у реалном времену, слика 3б). Након извршених верификација, управљачки сигнали се могу упутити реалном роботу за извршење задатог технолошког задатка.

Након покретања развијеног система управљања и програмирања, постоји могућност избора управљања виртуелним или реалним роботом. Обично се прво покреће и иницијализује виртуелни робот. Тестирање програма је извршено на два начина. Први начин се односи на исцртавање програмиране путање алата у оквиру AXIS графичког корисничког интерфејса, а други начин подразумева коначно тестирање програма на виртуелном роботу.

Провера путање алата је веома важна, како због провере постављања радног предмета у ограничени радни простор робота, тако и због правилног одређивања нулте тачке.

Након укључивања робота, његова физичка позиција није позната управљачком систему због коришћења корачних мотора и одсуства апсолутних енкодера. Из ових разлога, пре пуштања робота у рад, потребно је извршити секвенцу иницијализације како би LinuxCNC одредио референтну позицију за бројање управљачких импулса. Припремљени програм је генерисан у односу на нулту тачку обратка, која је означена са G55, и позицију припремка у радном простору робота је потребно одредити и проследити управљачком систему.

Верификација развијеног система је извршена на примеру технолошког задатка ласерског сечења и ласерског гравирања. На слици 4а) дат је пример ласерског сечења жељених контура од картона на реализованом роботу. С друге стране, слика 4б) представља пример ласерског гравирања контура правилног геометријског облика на картон лепенци.



Слика 4. Верификација развијеног система управљања и програмирања

Програми у G-коду су припремљени у оквиру CAD/CAM окружења на основу DXF фајлова жељених контура. Експериментима је верификован рад комплетно развијеног система управљања и програмирања SCARA робота.

6. ЗАКЉУЧАК

Апликације индустријских робота се брзо шире са сталним унапређењем њихових функција, техничких карактеристика, као и система управљања и програмирања. Приказано истраживање укључује развој домаћег 4-осног индустријског робота SCARA конфигурације са могућношћу аутоматског програмирања на основу информација добијених са камере и техника вештачке интелигенције, захваљујући развијеном систему управљања отворене архитектуре.

Поред неколико доступних управљачких софтвера отворене архитектуре, изабран је систем управљања на бази LinuxCNC-а. Овај управљачки софтвер омогућава машинама алаткама и роботима програмирање према RS-274 или ISO 6983 стандарду. Овакав систем управљања машинама алаткама и роботима ради у реалном времену и његови кодови су бесплатни за коришћење, модификацију и дистрибуцију. Такође, LinuxCNC омогућава коришћење широко распрострањених CAD/CAM система за програмирање машина алатки код програмирања робота за обраду. Развијени управљачки систем укључује виртуелног робота, који је конфигурисан у оквиру Python 3D окружења на основу комплетног кинематичког и CAD модела робота. Овако развијени виртуелни робот представља дигиталну сенку развијеног SCARA робота.

Будућа истраживања ће укључити примену техника вештачке интелигенције и информација добијених од камере за потребе аутоматског програмирања путање енд-ефектора робота.

7. LITERATURA

- [1] M. Javaid, A. Haleem, R.P. Singh and R. Suman, “Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation”, *Cognitive Robotics*, Vol. 1, pp. 58-75, (2021)
- [2] C. Zheng, Y. An, Z. Wang, H. Wu, X. Qin, B. Eynard and Y. Zhang, “Hybrid offline programming method for robotic welding systems”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 73, 102238, (2022)
- [3] D. Milutinovic, M. Glavonjic, N. Slavkovic, Z. Dimic, S. Zivanovic, B. Kokotovic and Lj. Tanovic, “Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 53(9-12), pp. 1217-1229, (2011)
- [4] N. Slavkovic, S. Zivanovic and D. Milutinovic, “An indirect method of industrial robot programming for machining tasks based on STEP-NC”, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 32(1), pp. 43–57, (2019)
- [5] H. Makino, “Development of the SCARA”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 26(1), pp. 5-8, (2014)
- [6] B. Momcilovic, “Development of the control system of the 4-axis SCARA robot”, M.Sc. Thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering (Serbia), 2022
- [7] Dj. Milicevic, “Designing the prototype of the 4-axis SCARA industrial robot”, M.Sc. Thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering (Serbia), 2022
- [8] J. Fang and W. Li, “Four degrees of freedom SCARA robot kinematics modeling and simulation analysis”, *International Journal of Computer, Consumer and Control*, Vol. 2(4), pp. 20-27, (2013)
- [9] N.R. Slavković, S.T. Živanović and N.M. Vorkapić, “Configuring a virtual prototype of a BiSCARA robot”, *Tehnika*, Vol. 76(3), pp. 311-317, (2021)
- [10] N. Slavkovic, S. Zivanovic, N. Vorkapic and Z. Dimic, “Development of the Programming and Simulation System of 4-axis Robot with Hybrid Kinematic”, *FME Transactions*, Vol. 50(3), pp. 403-411, (2022)
- [11] <https://howtomechatronics.com/category/projects/>
- [12] N. Slavković, N. Vorkapić, S. Živanović, Z. Dimić and B. Kokotović, “Virtual BiSCARA robot integrated with open-architecture control system”, *Proceedings of 14th International Scientific Conference “Flexible Technologies MMA 2021”*, Novi Sad (Serbia), 23-25 September 2021, pp. 63-66, (2021)

PROTOTYPE OF SCARA-TYPE INDUSTRIAL ROBOT

Abstract: *The field of application of industrial robots is expanding rapidly with a constant demand for improving their functions, technical characteristics as well as control and programming systems. One of the goals of current research within the Laboratory for Robotics & AI is the development of a domestic industrial robot with the possibility of automated programming based on information obtained from the camera. This paper presents the first part of the research, which includes the development and realization of a 4-axis SCARA-type industrial robot. Professor Hiroshi Makino from Yamanashi University designed the SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) robot, which representing the most famous robot configuration created at universities. This part of the research includes the kinematic modeling of the designed robot, its physical realization, and the development of the control and programming system with the virtual robot integration. The developed control system is based on the open architecture control system LinuxCNC, which enables further development and integration of information from the camera as an external sensor. The developed control system also includes a virtual robot model that represents a digital shadow of the realized SCARA robot. The complete robotic system verification was performed through several examples of the technological task of laser cutting and engraving.*

Key words: *Industrial robot, Control and programming, Virtual robot*



Matijašević, L., Jakovljević, Ž.¹⁾

FLEKSIBILNI ROBOTSKI HVATAČI U INDUSTRIJSKOM OKRUŽENJU– PREGLED POSTOJEĆIH MEHANIČKIH STRUKTURA²⁾

Rezime

Hvatanje i manipulacija objektima spadaju u klasu osnovnih zadataka robotskih sistema. Robotski hvatači omogućavaju da se ovi zadaci realizuju i služe kao jedinstveni mehanički interfejs između robotskog sistema i okruženja, odnosno objekata manipulacije. Razvoj robotskih hvatača uslovljen je različitim zahtevima, među kojima se mogu izdvojiti stabilnost hvatanja, izbegavanje proklizavanja, izbegavanje oštećenja objekta manipulacije i hvatanje objekata različitih oblika, dimenzija i materijala. U uslovima velike varijantnosti objekata kojima se manipuliše javlja se potreba za razvojem hvatača sa ugrađenim visokim stepenom fleksibilnosti koji umnogome imitiraju sposobnosti ljudske šake. U ovom radu će biti izvršen pregled različitih mehaničkih struktura koje se koriste prilikom projektovanja podaktuiranih fleksibilnih robotskih hvatača i robotskih šaka.

Ključne reči: fleksibilni robotski hvatač, robotska šaka, mehanički interfejs

1. UVOD

Robotski sistemi inicijalno su razvijani sa ciljem da potpomognu ili u potpunosti zamene čoveka na proizvodnim linijama u procesima koji su monotoni, zahtevaju veliku brzinu i/ili tačnost ili se odvijaju u uslovima koji su opasni po čoveka [1]. Ubrzan razvoj robotskih sistema doveo je do njihove primene i u drugim oblastima kao što su poljoprivreda [2] (ubiranje plodova, odstranjivanje oštećenih delova biljaka...), medicina [3] (minimalno invazivne operacije, laserske operacije...), istraživanje svemira [4] i druge. Savremeni robotski sistemi imaju mogućnost da podižu velike terete, imaju veliku ponovljivost (i do 10 μ m) i u mnogim segmentima prevazilaze mogućnosti čoveka. Međutim, ako se govori o procesu hvatanja i manipulacije objektima tokom finih kretanja, sposobnost čoveka, odnosno njegove šake i ruke je neprevaziđena.

Ljudska šaka je, mehančki posmatrano, aktuirana sa 34 mišića i preko 90 ligamenata i tetiva [5], obložena je jedinstvenim složenim senzorskim sistemom, kožom, koja pored senzorskih funkcija obavlja i zaštitnu funkciju i sposobna je da obavlja i izuzetno grube poslove kao što je manipulacija teškim teretima i najfinije radnje kao što je operacija na mozgu.

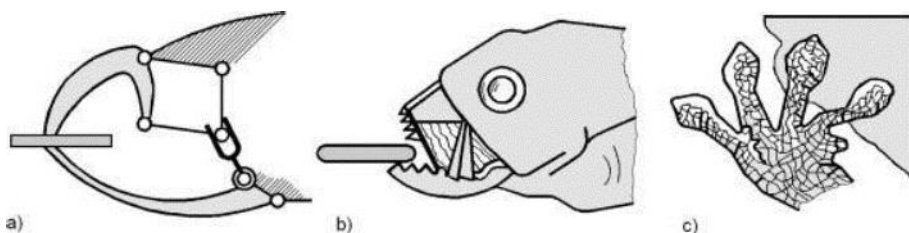
Sa upravljačke strane, procesi hvatanja i manipulacije objektima predstavljaju potpunu sinergiju motoričkih i kognitivnih sposobnosti čoveka [6]. To su kompleksni procesi koje je teško softverski reprodukovati, a razlog za to se može pronaći u činjenici da procesi planiranja i realizacije hvatanja predstavljaju sposobnosti čoveka usađene kroz niže kognitivne funkcije čije je funkcionisanje teško objasniti. Paradoks Moraveca, koji je opisan u [6], objašnjava da su se lokomotorne funkcije čoveka razvile mnogo pre sposobnosti za apstraktnim razmišljanjem. Iz navedenog razloga neki trivijalni procesi za čoveka (npr. manipulacija mekanim objektima) izuzetno su teški za algoritamski opis i realizaciju na robotskim sistemima, dok se apstraktni procesi (npr. igranje šaha) lakše reprodukuju i mašina ih obavlja bez većih problema.

Pored ljudske šake koja predstavlja svojevrsni ideal i inspiraciju za razvoj robotskih šaka, u prirodi postoji mnoštvo različitih mehanizama koji se koriste za hvatanje [7]. Neki od mehanizama koji su analizirani i primenjeni prilikom projektovanja sistema za hvatanje i manipulaciju su riblja usta ili ptičiji kljun. Mehanizmi koji se nalaze u njima (slika 1) omogućavaju da se ti organi, pored uloge u ishrani, koriste i u procesima hvatanja i manipulacije objektima koji nisu hrana. Surla slona predstavlja svojevrsnu inspiraciju za razvoj mekih

¹⁾ Lazar Matijašević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (imatijasevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja u okviru projekta podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije po Ugovoru 451-03-65/2024-03/200105.

hvatača [8] za manipulaciju osetljivim objektima različitih oblika i veličina. Korišćenje vakuuma za hvatanje takođe postoji u prirodi i određeni insekti, gušteri i hobotnice poseduju ovu sposobnost za hvatanje.

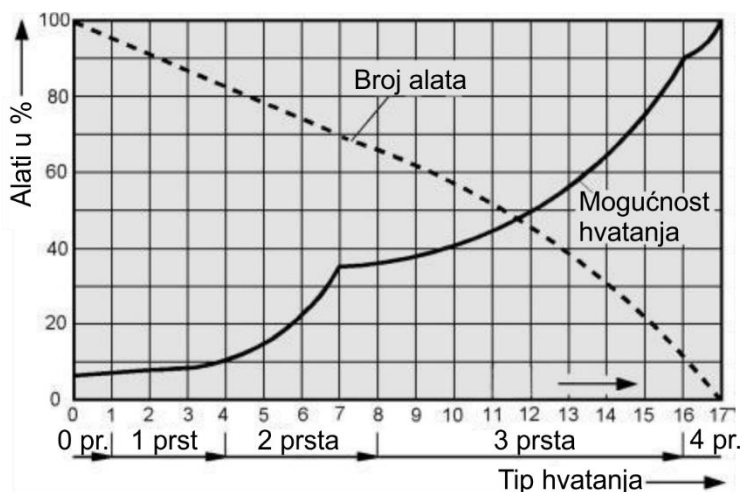


Slika 1. Različiti prirodni mehanizmi za hvatanje [7]: a) kljun ptice, b) usta ribe i c) vakuumsko hvatanje kod guštera

U okviru ovog rada, u poglavlju 2, predstavljena je podela višeprstih robotskih hvatača. U poglavlju 3 je dat pregled postojećih struktura robotskih hvatača koji su aktuirani preko savitljivih tetiva, dok su u poglavlju 4 predstavljena predstavljena rešenja sa aktuacijom putem krutih poluga. U poglavlju 5 su predstavljeni zaključci rada i dat je prikaz budućih istraživanja u oblasti razvoja robotskih sistema za hvatanje.

2. OSNOVNA PODELA VIŠEPRSTIH ROBOTSKIH HVATAČA

Postojeći sistemi za hvatanje i manipulaciju objektima u industrijskom okruženju predstavljaju relativno jednostavne mehanizme koji su projektovani za izvršavanje konkretnog zadatka. To su najčešće paralelni hvatači projektovani za hvatanje i jednostavnu manipulaciju konkretnim objektima i njihove karakteristike (na primer veličina i oblik) odgovaraju karakteristikama tih objekata. S druge strane, paradigma masovne kastomizacije proizvodnje koja sobom nosi veliku varijantnost objekata koje je potrebno hvatati zahteva da postoje značajno fleksibilniji sistemi koji se u mnogim aspektima približavaju fleksibilnosti ljudske šake. Ako uzmemo u obzir da se u današnje vreme robotski sistemi ne koriste samo za manipulaciju proizvodima nekog tehnološkog procesa već i za manipulaciju alatima koji se koriste u tom procesu, onda je poželjno imitirati karakteristike i sposobnosti ljudske šake za koju su ti alati i projektovani.



Slika 2. Učestalost korišćenja prstiju prilikom obavljanja procesa hvatanja i manipulacije objektima u industrijskim uslovima [7]

Proces ručnog hvatanja objekata u industrijskim uslovima analiziran je u [7] sa ciljem uspostavljanja korelacije između objekata manipulacije i broja prstiju operatera koji su u kontaktu sa objektom tokom hvatanja i manipulacije. Na slici 2 prikazani su rezultati te analize gde su autori pokazali da se gotovo svi procesi manipulacije proizvodima i alatima u industrijskom okruženju mogu izvršiti korišćenjem četiri prsta šake. Dodavanje petog prsta nema nikakav uticaj. Pritom se za sve procese koji zahtevaju više od jednog prsta, smatra da se palac uvek koristi. Na osnovu dijagrama sa slike 2 dolazi se do zaključka da fleksibilni robotski hvatač sa tri prsta zadovoljava potrebe procesa manipulacije u 90% slučajeva u industrijskim uslovima.

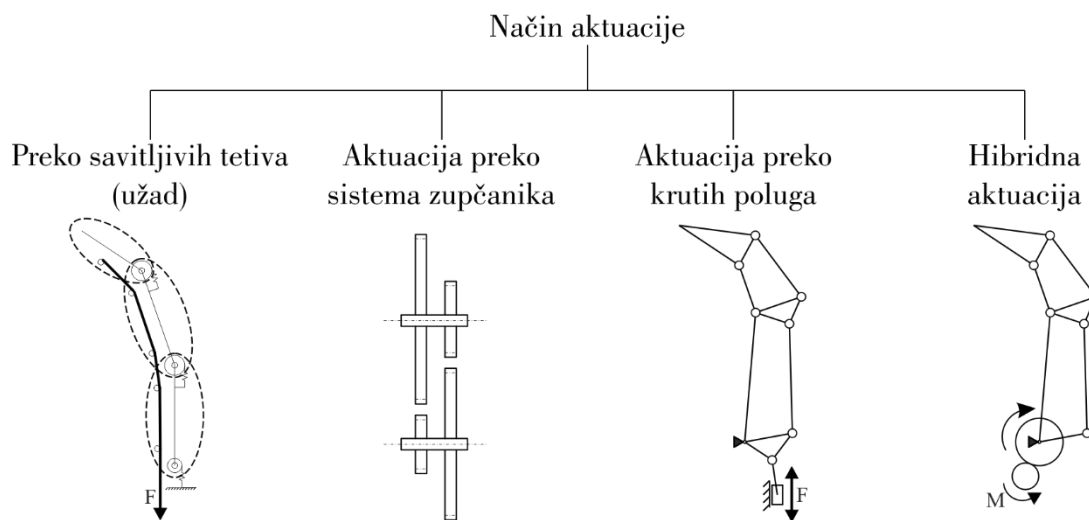
Ovaj podatak se poklapa i sa trendom razvoja fleksibilnih robotskih hvatača i robotskih šaka. Izuzev potpuno aktuiranih robotskih šaka koje teže da u potpunosti imitiraju sposobnosti ljudske šake, koje su uz par izuzetaka razvijane isključivo za laboratorijske uslove rada i koje imaju pet prstiju [9], tržištem dominiraju fleksibilni

robotski sistemi za hvatanje sa dva ili tri prsta. Najznačajniji pravac razvoja robotskih hvatača usmeren je na proizvodne pogone i industrijska okruženja pa se cena i robusnost svrstavaju u glavne projektne zahteve koji moraju da se ispune.

Dvoprsti i troprsti fleksibilni robotski hvatači mogu biti potpuno aktuirani i podaktuirani. Višeprsti potpuno aktuirani robotski hvatači imaju akciju svakog zgloba svakog prsta hvatača, dok se kod podaktuiranih višeprstih robotskih hvatača najčešće koristi jedan motor za akciju jednog prsta. Kada se posmatraju potpuno aktuirani naspram podaktuiranih robotskih hvatača dolazi se do zaključka da su podaktuirani sistemi pogodniji za primenu u industrijskim okruženjima. Naime, potpuno aktuirani sistemi mehanički imaju više komponenta te su podložniji kvarovima, zahtevaju veći broj aktuatora i prapratne elektronike pa su samim tim i skuplji, a softverski posmatrano sistem za upravljanje potpuno aktuiranim sistemima značajno je kompleksniji od sistema za upravljanje podaktuiranim sistemima. Podaktuirani robotski hvatači i jednostavniji višeprsti robotski hvatači se dominantno koriste jer su robusni, jeftiniji i zadovoljavaju većinu potreba za fleksibilnošću koju zahteva industrijsko okruženje

Višeprsti robotski hvatači mogu biti projektovani sa krutim ili sa deformabilnim prstima. Robotski hvatači sa deformabilnim prstima mogu se svrstati u dve osnovne grupe. To su robotski hvatači sa ugrađenom popustljivošću [10] i meki robotski hvatači [11]. S obzirom na to da je upravljanje robotskim hvatačima sa deformabilnim prstima kompleksno i da se oni ne koriste u industrijskim uslovima, u ovom radu će biti prikazana paleta različitih mehanizama višeprstih robotskih hvatača sa krutim prstima.

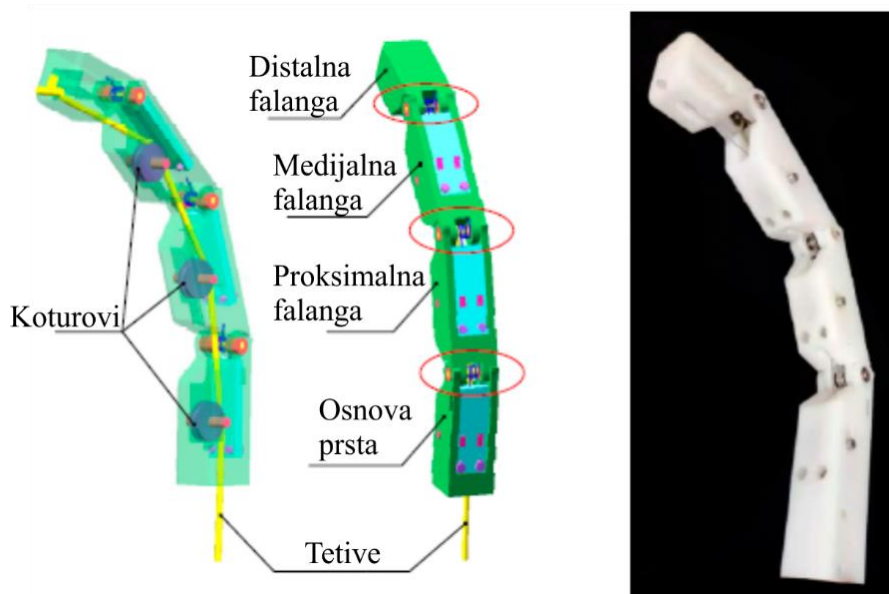
Kruti elementi prstiju hvatača omogućavaju prenos velikih sila sa prsta na objekat manipulacije, ali zbog toga zahtevaju primenu specifičnih senzora sile kako bi se upravljalo procesom hvatanja i kako ne bi došlo do oštećenja objekta. Kada se govori o akciji višeprstih robotskih hvatača sa krutim prstima, zaključuje se da postoje sistemi sa akcijom preko savitljivih tetiva (užadi), sa akcijom putem krutih prenosnih mehanizama (zglobni mehanizmi), sa akcijom putem sistema zupčanika i sa hibridnom akcijom (slika 3) [12].



3. ROBOTSKI HVATAČI SA AKCIJOM PREKO SAVITLJIVIH TETIVA

Višeprsti robotski hvatači sa akcionim sistemom koji koristi tetive za pomeranje pojedinačnih falangi prsta nisu lako upravljivi. Ovi hvatači mogu biti podaktuirani i potpuno aktuirani.

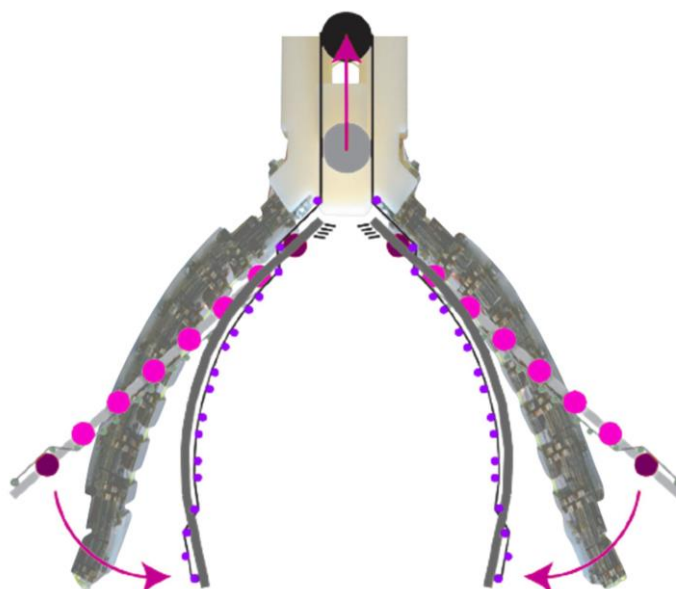
Primer jednog podaktuiranog robotskog hvatača sa tetivama kao akcionim elementom prikazan je na slici 4 [13]. Konstrukcija hvatača sastoji se od četiri elementa (tri falange i osnova prsta) napravljena od ABS plastike. U svaku falangu integrisani su senzori sile kako bi se upravljalo silom stezanja objekta manipulacije. Kroz sve falange i osnovu prsta prolazi tetiva koju povlači elektromotor i na taj način se prst savija. Pasivni elementi u svakom zglobu (opruge) nakon prestanka povlačenja tetive vraćaju prst u prvobitni položaj. Ovaj prst ima mogućnost kretanja samo u jednoj ravni. Ovakav mehanizam ima mogućnost da manipuliše objektima do 55 mm u prečniku mase do 800 g.



Slika 4. 3D model i prototip predložene konstrukcije prsta [13]

U radu [14] autori su predstavili podaktuirani robotski hvatač inspirisan origamijem sa tetivama kao aktuacionim elementom. Ovaj dvoprsti hvatač (slika 5) poseduje specijalne zglobove od memorijskog polimera koji zadržava prvobitni oblik nakon prestanka dejstva opterećenja na njih. Primenom navedenog materijala zglobova upravlja se krutošću zglobova robotskog hvatača i na taj način ostvaruju različiti načini kretanja pristiju. Predloženi robotski hvatač projektovan je za hvatanje i manipulaciju osetljivim objektima.

On je pogonjen jednim motorom koji povlači užu i na taj način istovremeno savija oba prsta. Kada je objekat nepravilnog oblika ili hvatač nije pozicioniran tako da oba prsta hvataju objekat ravnomerno, tada ovakav sistem povlačenja užeta omogućava da se prsti savijaju različitim brzinama, čak i kada jedan prst prestane da se kreće.

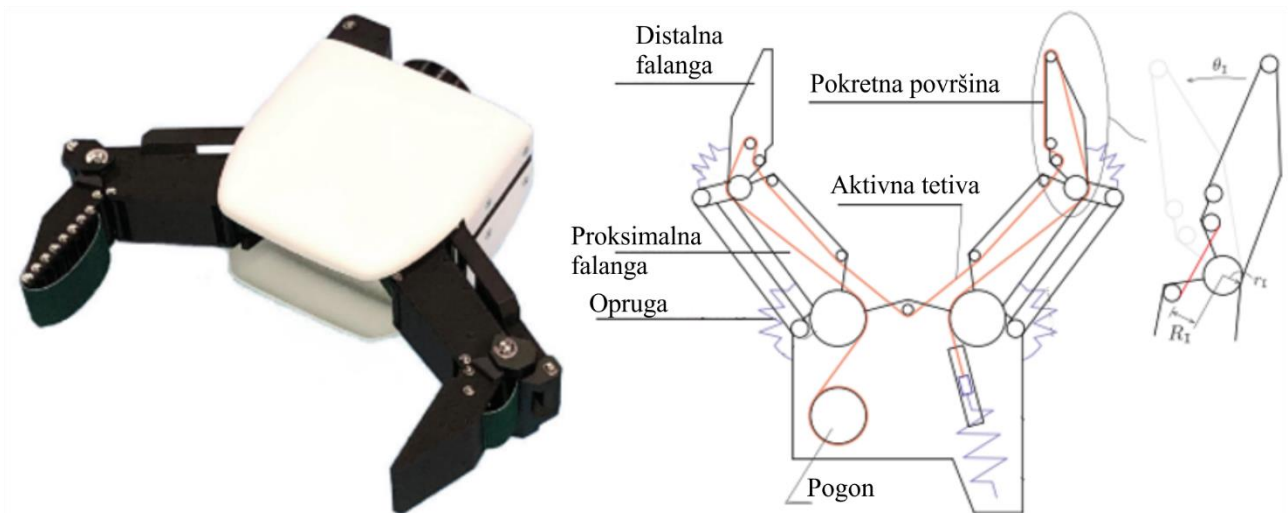


Slika 5. Podaktuirani robotski hvatač inspirisan origamijem [14]

Robotski hvatač koji bi mogao da ima primenu u industrijskom okruženju predstavljen je u radu [15]. Ovaj robotski hvatač je podaktuiran. Autori su na jedan od dva prsta postavili podaktuiranu površinu koja ima mogućnost da se pomera (slika 6). Na taj način ovom robotskom hvataču omogućeno je da funkcioniše u tri moda rada. Prvi mod rada predstavlja prilazak objektu manipulacije kao standardni paralelni hvatač, drugi mod rada predstavlja uvlačenje objekta manipulacije unutar šake korišćenjem aktuiranog vrha prsta i treći mod rada predstavlja mogućnost envelopnog hvatanja objekta.

Korišćenjem ovog robotskog hvatača u drugom modu rada autori su uspeali da eksperimentalno pokažu mogućnost hvatanja gumenog objekta debljine 3 mm sa ravne podloge. Ovaj hvatač može da manipuliše

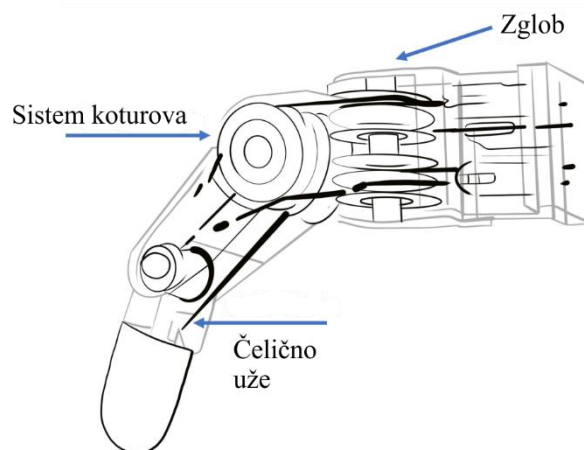
objektima dimenzija do 200 mm i objekat steže maksimalnom silom stezanja od 20 N.



Slika 6. Podaktuirani robotski hvatač sa promenjivom kontaktnom površinom prsta [15]

Na Institutu Mihajlo Pupin 1963. godine konstruisana je prva humanoidna robotska šaka na svetu pod nazivom „Beogradska šaka“. Ova šaka ima pet prstiju u koje su ugrađeni senzori sile da bi se detektovao dodir. Ona je imala mogućnost da hvata objekte i envelopno i precizno. Iako nikad nije korišćena u industriji ili u medicini, ova šaka predstavlja osnovu daljeg razvoja oblasti robotskih šaka u svetu.

Projekat Beogradske šake doveo je do pojave jedne od prvih uspešnih robotskih šaka pod nazivom Salsburi šaka (eng. Salisbury hand), koja je namenjena istraživanjima u oblasti robotskog hvatanja i predstavljena je u radu [16] (slika 7). Svaki prst ove šake ima tri zgloba što joj donekle omogućava da imitira sposobnosti ljudske šake. Unutar falangi nalaze se teflonska creva kroz koja prolaze čelična užad. Svako uže je pogonjeno posebnim motorom jednosmerne struje preko reduktora. Ova robotska šaka je potpuno aktuirana.

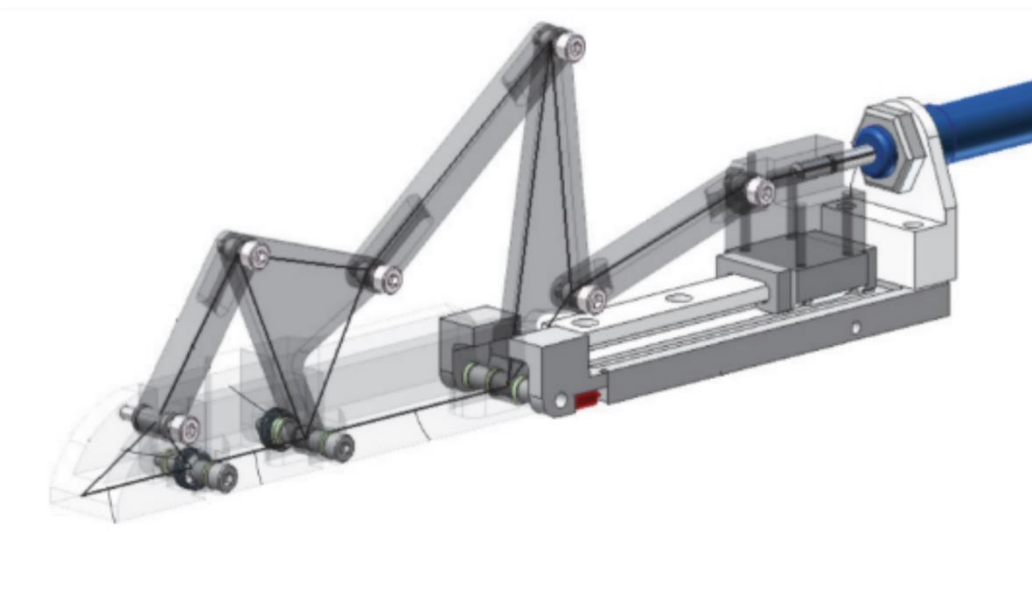


Slika 7. Salisbury hand - potpuno aktuirana robotska šaka aktuirana tetivama [16]

4. ROBOTSKI HVATAČI SA AKTUACIJOM PREKO KRUTIH MEHANIZAMA

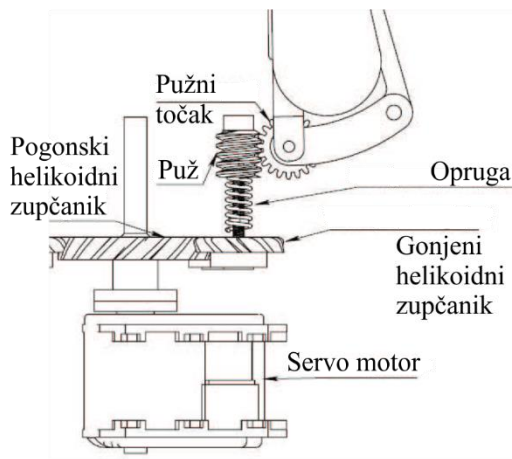
U ovom radu neće biti detaljno analizirane razne mehaničke strukture robotskih hvatača koji su aktuirani samo putem sistema zupčanika jer je ovaj način aktucije skoro ekskluzivno rezervisan za skupe, potpuno aktuirane humanoidne šake koje se retko primenjuju u industriji. Jedna takva robotska šaka je opisana u radu [17]. U pitanju je potpuno aktuirana robotska šaka DLR-Hand 2 koju je razvio Nemački vazduhoplovni centar i koja se koristi i u istraživanju svemira. Ova šaka poseduje pogon koji se sastoji od sistema zupčastih kaiševa, visokopreciznog sistema zupčanika bez zazora (engl. *Harmonic drive*), konusnih zupčastih parova i motora jednosmerne struje. Ovakav način aktucije omogućava ovom robotskom sistemu da na objekat manipulacije primeni silu od 30 N vrhom prsta. Uprkos dobrim mehaničkim karakteristikama, upravljanje ovakvim sistemom je izuzetno složeno.

Postoje mnogi realizovani mehanizmi robotskih hvatača koji koriste sistem krutih poluga da bi preneli ulazni moment sa aktuatora na falange prstiju. Jedan takav mehanizam je predložen u [12]. U ovom radu autori predstavljaju projekat podaktuiranog prsta sa tri falange koji je prikazan na slici 8. Ovaj prst je aktuiran dvosmernim pneumatskim cilindrom koji svoje kretanje prenosi na falange posredstvom klizne vođice i zlobnog četvorougla. Robotska šaka je realizovana postavljanjem četiri pomenuta prsta jednog pored drugog. Na taj način napravljena je robotska šaka kojom je moguće relativno lako upravljati i napravljen je jedan robustan i jeftin robotski hvatač za potrebe istraživanja.



Slika 8. Mehanizam podaktuiranog prsta sa pneumatskom aktucijom [12]

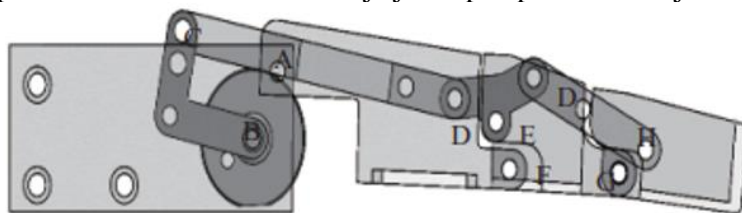
U [18] je predstavljena konstrukcija podaktuiranog robotskog hvatača koji se sastoji od tri prsta pogonjena jednim servo motorom (slika 9). Svaki prst ima dva stepena slobode. Pogon je sa prve falange razveden na drugu zglobnim četvorougлом u kojem je integrisana opruga kao pasivni element koji omogućava predformiranje [19] konfiguracijae za hvatanje i vraćanje druge falange u prvobitni položaj pri otvaranju šake. Autori su ovaj robotski hvatač projektovali za rad u nestruktuiranom okruženju za hvatanje objekata nepoznatog oblika. Ovaj robotski hvatač poseduje tri prsta ravnomerno raspoređena po obodu osnove hvatača. Da bi se omogućilo da robotski hvatač potpuno uhvati objekat svim prstima, autori su osmislili mehanizam za dekuplovanje prstiju jednih od drugih. Ovaj mehanizam je prikazan na slici 9. Predložena konstrukcija sistema za aktuciju i dekuplovanje prstiju se sastoji od jednog servo motora koji preko helikoidnog zupčastog para prenosi obrtni moment sa motora na pužni par. Obrtanjem pužnog točka obrtno kretanje motora prenosi se na rotaciono kretanje prstiju robotske šake.



Slika 9. Predložena konstrukcija šake, napravljen prototip i 2D prikaz principa za dekuplovanje [18]

Kako bi se obezbedilo stabilno hvatanje, kada jedan prst dođe u kontakt sa objektom manipulacije i zaustavi svoje kretanje, potrebno je omogućiti kretanje ostala dva prsta dok i oni ne dođu u kontakt sa objektom. Da bi

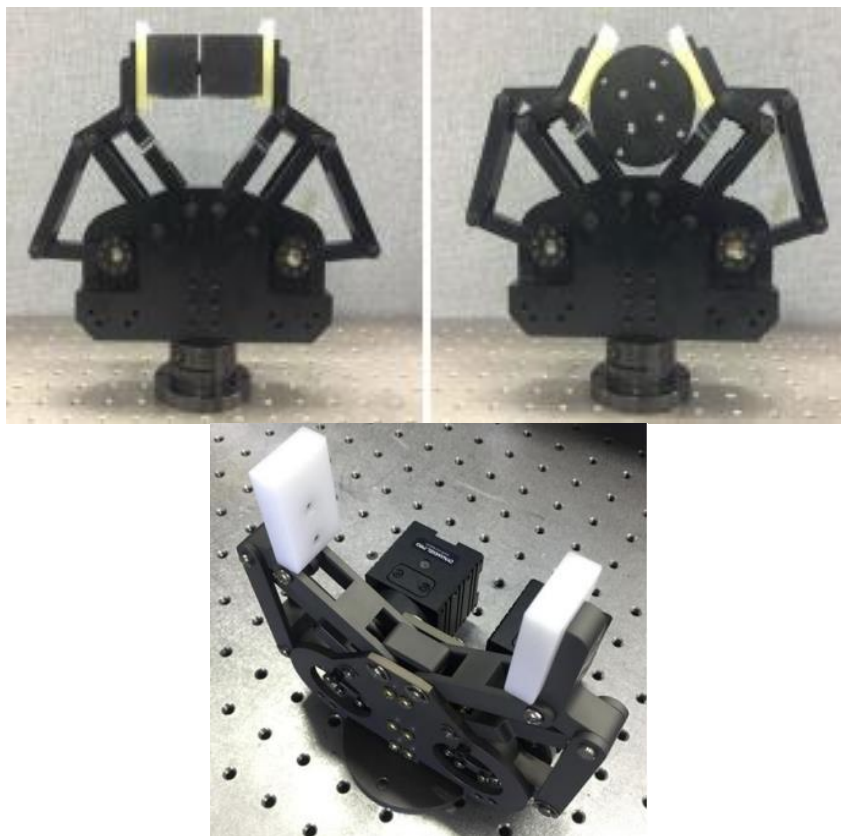
se to omogućilo, postavljene su opruge na vratilo gonjenog helikoidnog župčanika. Gonjeni helikoidni zupčanik ima mogućnost aksijalnog kretanja po gonjenom vratilu i kada prst dođe u kontakt sa objektom, njegovo kretanje se zaustavlja i zbog prirodnog zakošenja zuba helikoidnog zupčanika stvara se aksijalna sila koja pomera helikoidni zupčanik duž gonjenog vratila. Na taj način se sprečava zaustavljanje svih prstiju kada jedan prst dođe u dodir sa objektom manipulacije i obezbeđuje se stabilno hvatanje. Eksperimentalnim ispitivanjem autori su pokazali da maksimalna sila koju jedan prst prenosi na objekat iznosi 15 N.



Slika 10. Tri falange predložene konstrukcije prsta podaktuirane šake [20]

Još jedan robotski hvatač projektovan da hvata i manipuliše objektima nepoznatog oblika u nestruktuiranom okruženju predstavljen je u [20]. Predloženi robotski hvatač sastoji se od osnove hvatača (dlan) i tri podaktuirana prsta, čija konstrukcija je prikazana na slici 10. Svaki prst ima tri falange koje su aktuirane zglobnim mehanizmima. Kao i kod svakog podaktuiranog robotskog hvatača, u ovoj konstrukciji nalaze se opruge koje se ponašaju kao pasivni elementi za aktuciju i omogućavaju pravilno predformiranje konfiguracije za hvatanje i vraćanje prsta u prvobitni položaj prilikom otvaranja šake.

U [21] autori su predstavili robotski hvatač koji poseduje aktuacioni mehanizam koji se sastoji od pet poluga (slika 11). Za razliku od većine robotskih hvatača sa polužnim aktuacionim mehanizmom koji poseduju tri ili četiri poluge, predloženi mehanizam ima pet poluga što rešava problem krutosti mehanizma prilikom procesa hvatanja objekta.

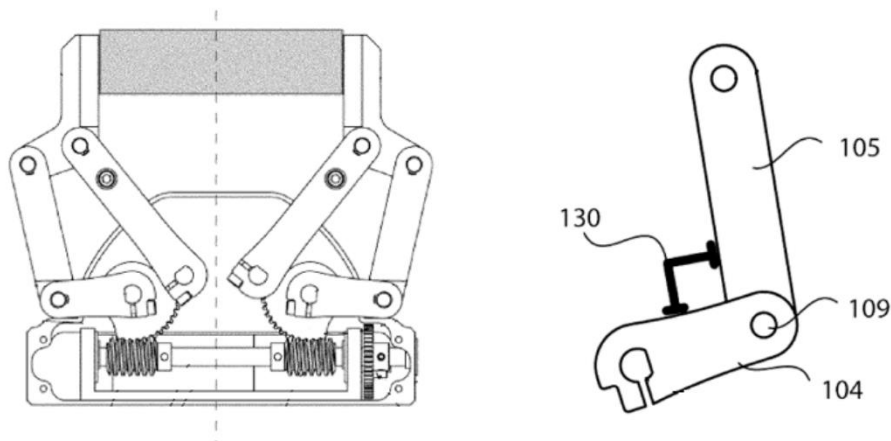


Slika 11. Robotski hvatač sa aktuacionim mehanizmom sa pet poluga [21]

Predloženi robotski hvatač ima mogućnost preciznog i envelopnog hvatanja. Precizno hvatanje se ostvaruje u distalnoj falangi prsta i kada ona dođe u dodir sa objektom manipulacije, kretanje prstiju se zaustavlja. Ako proksimalna falanga prsta prva dođe u dodir sa objektom, ona zaustavlja svoje kretanje, a distalna nastavlja dok ne dođe u kontakt sa objektom. Svaki prst je aktuiran sopstvenim motorom jednosmerne struje.

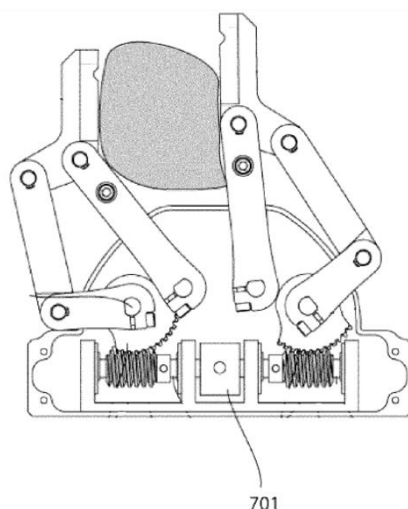
Tip podaktuiranih robotskih hvatača sa polužnim mehanizmima za aktuciju falangi prsta izuzetno je

popularan kod komercijalnih rešenja zbog toga što se sam mehanizam može implementirati na malom prostoru, dobijajući na taj način robustan i kompaktan sistem relativno male cene u odnosu na konkurente sa potpunom aktuacijom. Popularni komercijalni robotski hvatač je *Robotiq Gripper* [22] koji je zasnovan na patentu [23] pod nazivom: „Podaktuirani mehanički prst za envelopno i precizno hvatanje“ (engl. *Underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping*). Na ovaj patent se oslanjaju mnogi autori kada je u pitanju konstrukcija njihovih predloženih rešenja.



Slika 12. Patent kompanije Robotiq [23]

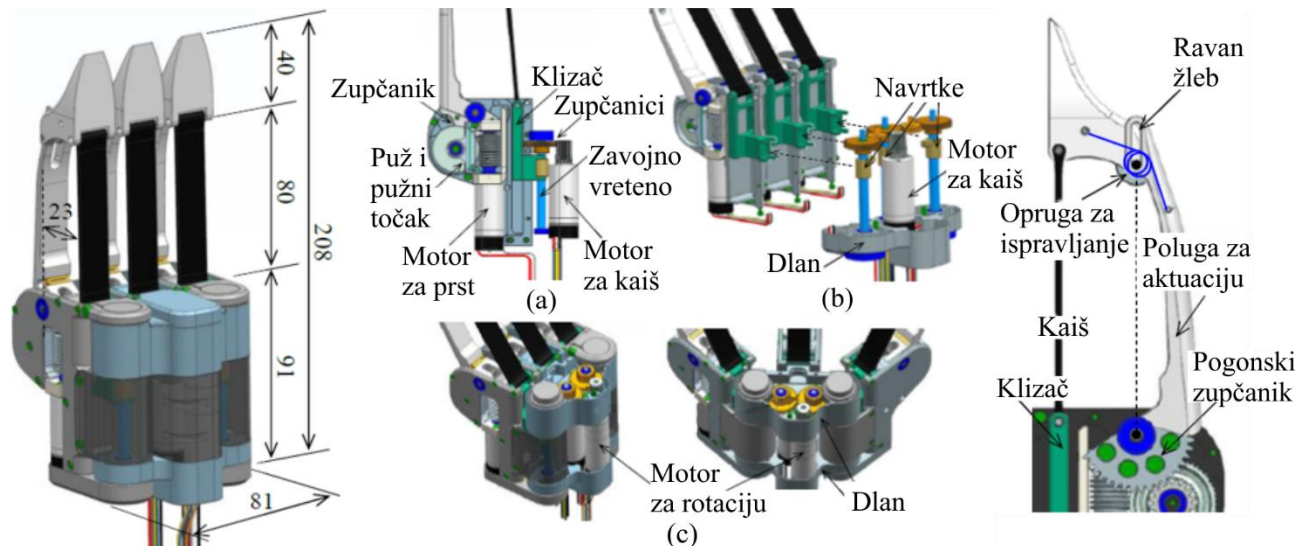
Robotiq Gripper je podaktuiran robotski hvatač koji je prilagođen da automatski izvodi ili precizno hvatanje ili envelopno hvatanje. Hvatač se sastoji od dva prsta sa dve falange (slika 12, 104 i 105) koje su zglibno povezane (slika 12, 109). Kada se primeni opterećenje na distalnu falangu, mehanizam za aktuaciju se prilagođava i omogućava distalnoj falangi da se pomera tako da njena kontaktna površina zadržava konstantnu orijentaciju na taj način omogućavajući precizno hvatanje. Kada se opterećenje primeni na proksimalnu falangu, mehanizam za aktuaciju se prilagođava i nakon zaustavljanja kretanja proksimalne falange omogućava distalnoj falangi da nastavi svoje kretanje formirajući stabilno envelopno hvatanje. U samom mehanizmu ugrađen je pasivni element (slika 12, 130), odnosno opruga koja omogućava pravilno funkcionisanje ove podaktuirane strukture. Prsti ovog predloženog rešenja su upravljivi i prilikom otvaranja i prilikom zatvaranja robotskog hvatača.



Slika 13. Pogon predloženog rešenja iz patenta [23]

Ovo rešenje ima jedan motor za pogon oba prsta. Obrtni moment se sa motora na prste prenosi preko vratila na kojima se nalaze puževi. Preko ovih pužnih parova se obrtni moment prenosi na prste i omogućava njihovu rotaciju. Da bi prsti mogli da se prilagode objektima nepoznatog oblika u nestruktuiranom okruženju, potrebno je da postoji diferencijal (slika 13, 701) koji omogućava prstima da se kreću različitim brzinama i na ovaj način omogućava hvatanje tih objekata.

Jedno rešenje robotskog hvatača sa hibridnim načinom aktucije predloženo je u [24]. U ovom radu autori predlažu kombinaciju zupčastog prenosnika i tetiva za aktuciju robotskog hvatača (slika 14). U pitanju je adaptivni robotski hvatač sa mogućnošću upravljanog prelaska iz moda rada envelopnog hvatanja u mod rada preciznog hvatanja. Prst se sastoji od jedne poluge za aktuciju (proksimalna falanga), jednog kaiša, jednog vrha prsta (distalna falanga) i jednog motora koji pogoni mehanizam (slika 14). Realizovana šaka poseduje tri ovakva prsta i osnovu šake gde je smešten kompletan pogonski segment. U osnovi se nalazi pet elektromotora od kojih tri pogone savijanje prstiju, jedan se koristi za promenu dužine kaiša sva tri prsta i na taj način se upravlja vrhovima prstiju i jedan motor kojim se vrši orijentacija dva prsta u odnosu na vertikalnu osu robotskog hvatača.



Slika 14. 3D model predloženog rešenja: a) mehanizam za savijanje prsta, b) eksplodirani pogled osnove šake i c) prikaz mehanizma za rotaciju prstiju [24]

Prilikom envelopnog hvatanja, elektromotor u osnovi prsta pogoni pužni par koji vrši savijanje prsta (slika 14, a). Kada kaiš dođe u dodir sa objektom manipulacije, pasivnim savijanjem kaiša, pomera se distalna falanga i realizuje se envelopno hvatanje. Kada je poželjno da se izvrši precizno hvatanje, tada se prvo definiše položaj distalne falange svih prstiju elektromotorom u osnovi šake i onda se pužnim prenosnikom izvršava precizno hvatanje.

5. ZAKLJUČAK

Robotski hvatači imaju ključnu ulogu u savremenim industrijskim procesima, gde su fleksibilnost, pouzdanost i ekonomičnost od najvećeg značaja. Detaljna analiza različitih mehaničkih struktura hvatača pokazuje da su podaktuirani sistemi, naročito oni sa dva ili tri prsta, najprikladniji za većinu industrijskih primena. Ovi hvatači omogućavaju stabilno hvatanje i manipulaciju objektima različitih oblika, dimenzija i materijala, čime zadovoljavaju preko 90% potreba u industrijskom okruženju. Njihova jednostavnija konstrukcija, manja složenost upravljačkog sistema i manja cena čine ih adekvatnim za primene koje zahtevaju robusne, ali prilagodljive sisteme.

Iako je ljudska šaka i dalje nenadmašna po svojoj senzorskoj sofisticiranosti i motoričkim sposobnostima, podaktuirani robotski hvatači pružaju pouzdanu alternativu. Osim toga, trend razvoja robotskih hvatača usmeren je ka daljoj integraciji senzora i mekih materijala, što omogućava veću prilagodljivost i osigurava zaštitu objekata prilikom manipulacije, smanjujući rizik od oštećenja.

Budući razvoj će se fokusirati na unapređenje senzorskih mogućnosti, kao i na dodatnu optimizaciju fleksibilnih struktura kako bi robotski hvatači postali još efikasniji. Cilj je dalje smanjivanje razlike između robotskih i ljudskih sposobnosti, posebno u kontekstu preciznih zadataka manipulacije u industrijskom okruženju. Uvođenjem naprednih tehnologija i materijala dodatno će se unaprediti performanse robotskih sistema, omogućavajući im širu primenu u sve zahtevnijim industrijskim i drugim okruženjima.

6. LITERATURA

- [1] Siciliano, B.; Khatib, O.: Springer Handbook of Robotics, Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008.
- [2] Tai, K.; El-Sayed, A.-R.; Shahriari, M.; Biglarbegian, M.; Mahmud, S.: *State of the Art Robotic Grippers and Applications*, Robotics, Vol 5, No 2, 2016, pp. 11, <https://doi.org/10.3390/robotics5020011>
- [3] Morgan, A., A., Abdi, Syed, J., M., A., Q., Kohen, G., E., Barlow, P., & Vizcaychipi, M., P.: *Robots in Healthcare: a Scoping Review*. Current Robotics Reports 3, 271–280 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00095-4>
- [4] Fong, T., Deans, M., Bualat, M.: *Robotics for Human Exploration*, 44th IFR International Symposium on Robotics, October 24-26, 2013, KINTEX, Seoul, Korea.
- [5] Anatomy of the Hand and Wrist, <https://my.clevelandclinic.org/health/body/25060-anatomy-of-the-hand-and-wrist> [pristup: oktobar 2024]
- [6] 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.
- [7] Monkman, G.; Hesse, S.; Steinmann, R.; Shunk, H.: *Robot Grippers*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2007.
- [8] J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, H. Shea.: *Soft Robotic Grippers*, *Advanced Materials*, Vol 30, No 29, 2018, <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- [9] Sivakumar, K., Priyanka, Ch.: *Grasping Objects Using Shadow Dexterous Hand with Tactile Feedback*, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol 4, No 5, 2015, DOI: 10.15680/IJRSET.2015.0405088
- [10] Hashizume, J., Huh, T., M., Suresh, S., A., Cutkosky, M., R.: *Capacitive Sensing for a Gripper With Gecko-Inspired Adhesive Film*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 677-683, April 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2893154.
- [11] Manti, M., Taimoor H., Passetti, G., D'Elia, N., Laschi, C., Cianchetti, M.: *A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping*, *Soft Robotics*, vol 2, no. 3, pp. 107-116, 2015, DOI: 10.1089/soro.2015.0009
- [12] Rea, P.: *On the Design of Underactuated Finger Mechanisms for Robotic Hands*, *Advances in Mechatronics*, 2011, <http://dx.doi.org/10.5772/24304>
- [13] Wu, C.; Song, T.; Wu, Z.; Cao, Q.; Fei, F.; Yang, D.; Xu, B.; Song, A.: *Development and Evaluation of an Adaptive Multi-DOF Finger with Mechanical-Sensor Integrated for Prosthetic Hand*, *Micromachines* 2021, vol 12, no. 33. <https://doi.org/10.3390/mi12010033>
- [14] Firouzeh, A., Paik, J.: *Grasp Mode and Compliance Control of an Underactuated Origami Gripper Using Adjustable Stiffness Joints*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2165-2173, Oct. 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2732827
- [15] Ko, T.: *A Tendon-Driven Robot Gripper With Passively Switchable Underactuated Surface and its Physics Simulation Based Parameter Optimization*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5002-5009, Oct. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3005131
- [16] Hernandez, J.; Sunny, M.S.H.; Sanjuan, J.; Rulik, I.; Zarif, M.I.I.; Ahamed, S.I.; Ahmed, H.U.; Rahman, M.H.: *Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review*. *Robotics* 2023, vol. 12, no. 5. <https://doi.org/10.3390/robotics12010005>
- [17] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger: *DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand*, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), Seoul, Korea (South), 2001, pp. 109-114 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.2001.932538.
- [18] Telegenov, K., Telegenov, Y., Shintemirov, A.: *An underactuated adaptive 3D printed robotic gripper*, 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mecatronics (MECATRONICS2014-Tokyo), Tokyo, Japan, 2014, pp. 110-115, doi: 10.1109/MECATRONICS.2014.7018563
- [19] 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.
- [20] Li, XL., Wu, LC. & Lan, TY.: *A 3D-printed Robot Hand with Three Linkage-driven Underactuated Fingers*, *International Journal of Automation and Computing*, vol. 15, 593–602 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11633-018-1125-z>
- [21] Kim, G., Kim, H., S.: *Optimal Design of a Novel Adaptive Gripper*, 2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Barcelona, Spain, 2020, pp. 115-119, doi: 10.1109/ICMRE49073.2020.9065140.

- [22] Robotiq adaptive grippers, <https://robotiq.com/products/adaptive-grippers#Three-Finger-Gripper>, [pristup: septembar 2024]
- [23] L. A. Demers, L. Simon, J. P. Jobin, "Gripper having a two degree of freedom underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping," US 8,973,958 B2, 2015
- [24] Kim, Y., -J., Song, H., Maeng, C., -Y.: *BLT Gripper: An Adaptive Gripper With Active Transition Capability Between Precise Pinch and Compliant Grasp*, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 4, pp. 5518-5525, Oct. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3008137

Matijašević, L., Jakovljević, Ž.

FLEXIBLE ROBOTIC GRIPPERS IN INDUSTRIAL SETTING– AN OVERVIEW OF MECHANICAL STRUCTURES

Abstract: *Objects grasping and manipulating represents a fundamental capability of robotic systems. Robotic grippers are essential components of robots that enable this process, serving as the unique mechanical interface between the robotic system and the environment, i.e., the objects being manipulated. The development of robotic grippers is driven by various requirements, with significant ones being grip stability, avoidance of slippage and damage to the manipulated object, and the ability to grasp objects of different shapes, sizes, and materials. This creates the need for systems with a high degree of flexibility, often mimicking the capabilities of human hand. This paper will present various mechanical structures used in the design of underactuated robotic grippers and robotic hands.*

Key words: *flexible robotic gripper, robotic hand, mechanical interface*



Nešovanović, Lj.¹⁾, Živanović, S., Popović, M.²⁾

SIMULACIJA RADA TROOSNOG MEHANIZMA SA PARALELNOG KINEMATIKOM NA BAZI MEHANIZMA ČEBIŠEVA³⁾

Rezime

U okviru ovog rada će biti prikazan konceptualni dizajn mehanizma sa paralelnom kinematikom koji poseduje tri stepena slobode kretanja. Novina u konstrukciji razmatranog mehanizma je primena Čebiševljevog mehanizma kao pasivnog translatorno-obrtnog zgloba. Razmatrani mehanizam kao predstavnik mehanizama sa paralelnom kinematikom je sačinjen od velikog broja spojki međusobno povezanih pasivnim zglobovima, te kao takav predstavlja kompleksnu konstrukciju sa velikim brojem posledičnih kretanja unutar konstrukcije. Kako bi se došlo do zaključaka po pitanju mobilnosti konstrukcije, nameće se potreba za simulacijom razmatranog mehanizma u nekom virtuelnom okruženju. U okviru ovog rada biće prikazana simulacija razmatranog mehanizma u softverskom paketu PTC Creo Parametric.

Ključne reči: Paralelni mehanizam, Čebiševljevi mehanizam, Simulacija, PTC Creo Parametric.

1. UVOD

Mehanizmi sa paralelnom kinematikom predstavljaju široko rasprostranjenu grupu mehanizama u industriji današnjice. Zbog svojih izrazitih prednosti u odnosu na mehanizme sa serijskom kinematikom ovi mehanizmi predstavljaju idealno rešenje u oblasti pakovanja proizvoda, elektronskoj i farmaceutskoj industriji, a sve su češće primene paralelnih mehanizama i u medicinskoj industriji [1]. Delta mehanizam kao jedan od najčešće primenjenih mehanizama sa paralelnom kinematikom je visoko zastupljen u svim prethodno pomenutim industrijskim oblastima i jako tačno oslikava sve prednosti paralelnih mehanizama sa akcentom na brzini i tačnosti pozicioniranja [2]. U proizvodnom mašinstvu zbog svojih impresivnih brzina i tačnosti pozicioniranja paralelni mehanizmi se mogu koristiti i u bušačkim operacijama, kao što je prikazano na primeru mašine UraneSX [1, 3].

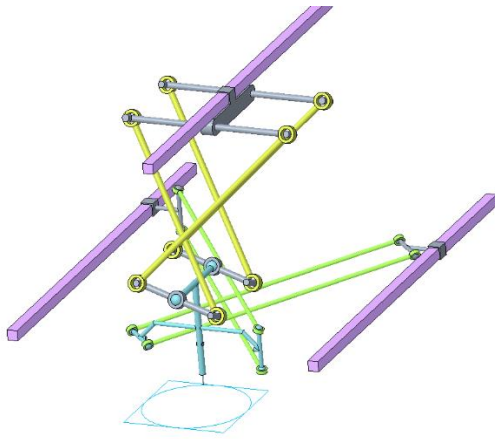
Imajući u vidu mogućnosti primene paralelnih mehanizama i sve širu rasprostranjenost u industriji ovih tipova mehanizama u okviru ovog rada će biti prikazan novi konceptualni dizajn jednog paralelnog mehanizma sa tri stepena slobode kretanja koji poseduje visok nivo fleksibilnosti, te kao takav, potencijalno, može biti primenjen u različitim industrijskim granama za veliki broj proizvodnih procesa. Ono što izdvaja ovaj mehanizam u odnosu na druge je primena pasivnog translatorno-obrtnog zgloba kao jednog kinematičkog lanca koji povezuje stacionarnu bazu i pokretnu platformu. Primer inicijalnog paralelnog mehanizma sa pasivnim translatorno-obrtnim zglobom na bazi mehanizma Čebiševa, je pokazan na slici 1. Veliki broj mehanizama može imati ulogu translatorno-obrtnog zgloba, ali će zbog svojih karakteristika mehanizam prikazan u okviru ovog rada biti baziran na mehanizmu Čebiševa [4, 5].

Razmatrani mehanizam je u funkciji razvoja, te će u okviru ovog rada biti prikazan konceptualni dizajn prvog prototipa mehanizma sa paralelnom kinematikom baziranog na mehanizmu Čebiševa. Kao deo od izuzetne važnosti u procesu projektovanja novih mehanizama izdvaja se izrada virtuelnog modela mehanizma.

¹⁾ mast. inž. Ljubomir Nešovanović, LOLA Institut, (ljubomir.nesovanovic@li.rs)

²⁾ prof. dr. Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr. Mihajlo Popović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mpopovic@mas.bg.ac.rs)

³⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekata koje finansijski podržava Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije po ugovorima: ev. br: 451-03-65/2024-03/200105 i ev. br. 451-03-66/2024-03/ 200066 za 2024. godinu.



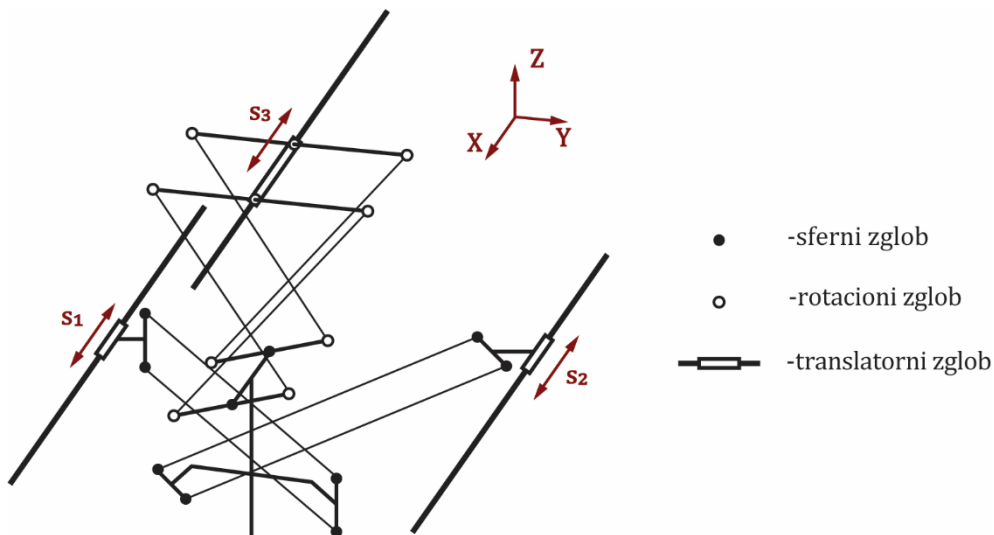
Slika 1. Primer inicijalnog koncepta paralelnog mehanizma p3 glide sa translatorno pokretnim aktuatorima i pasivnim translatorno obrtnim zglobov

Sagledavanjem virtuelnog modela može se doći do značajnog broja zaključaka koji inicijano mogu dovesti do unapređenja samog mehanizma. Posmatranje trodimenzionalnog modela kao takvo nije dovoljno za formiranje kompletne slike o posmatranom mehanizmu. Ključni nedostatak predstavlja odsustvo analize kretanja samog mehanizma. Iz ovog razloga je neprodno izvršiti simulaciju kretanja mehanizma kako bi se posmatranjem ponašanja aktivnih i pasivnih zglobova u toku rada mehanizma došlo do potpunijih i adekvatnih zaključaka u pogledu pokretljivosti i funkcionalnosti samog mehanizma.

Težište ovog rada će biti na formiranju simulacionog modela razmatranog mehanizma kao i na samoj analizi kretanja mehanizma. Takođe, biće prikazan konceptualni model razmatranog paralelnog mehanizma sa posebnim akcentom na analizu pokretljivosti mehanizma Čebiševa u sklopu novog paralelnog mehanizma koji je predmet razvoja.

2. KINEMATIČKA STRUKTURA RAZMATRANOG PARALELNOG MEHANIZMA

Paralelni mehanizam razmatran u okviru ovog rada je sačinjen od stacionarne baze i pokretne platforme međusobno povezane sa tri kinematička lanca. Svaki od tri kinematička lanaca je osnažen translatorskim aktuatorima tako da se translatorno kretanje između stacionarne baze i kinematičkih lanaca transformiše u složeno, trodimenzionalno, kretanje pokretne platforme. Na ovaj način se potvrđuje mogućnost ostvarivanja tri stepena slobode kretanja razmatranog mehanizma. Na slici 2 se može videti žičani model razmatranog mehanizma sa primenjenim zglobova koji su korišćeni u konfiguraciji mehanizma kao veza između krutih elemenata mehanizma. Zglobovi korišćeni za vezu između krutih elemenata mehanizma su translatorsni, rotacioni i sferni. Neophodno je naglasiti da rotacioni i translatorsni zglobovi dopuštaju po jedan stepen slobode kretanja dok sferni zglob dozvoljava rotacije u tri pravca, odnosno dozvoljava ukupno tri stepena slobode kretanja.



Slika 2. Žičani model razmatranog mehanizma [5]

Kao što je već naglašeno razmatrani mehanizam je sačinjen od tri kinematička lanca, pri čemu dva od pomenuta tri kinematička lanca, razmatranog mehanizma, poseduju slične konfiguracije. Svakaki od ova dva kinemtska lanca vrši povezivanje stacionarne baze sa pokretnom platformom pomoću zgloba tipa paralelograma. Kraće strane paralelograma čine delovi translatorsnog zgloba, kao i delovi pokterne platforme. Duže stranice zgloba tipa paralelograma su kruti štapovi koji su sa kraćim delovima povezani pomoću sfernih zglobova. Translatorsne ose koje povezuju ova dva kinematička lanca su međusobno paralelne, dok je veza između stacionarne baze i pokretne platforme takva da se razmatrana dva slična kinematička lanca međusobno

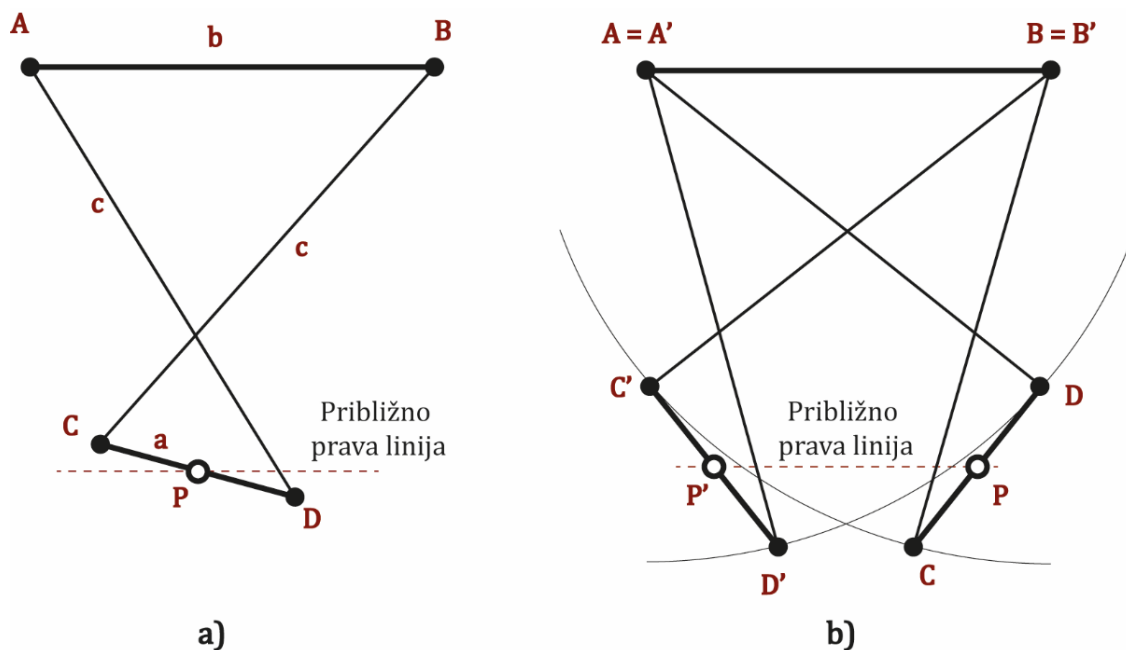
ukrščaju bez kolizije. Iz ovoga se može zaključiti da je osnovna razlika između dva razmatrana kinematička lanca slične konfiguracije u međusobnoj orijentaciji jednog u odnosu na drugi. Zahvaljujući ovoj osobini postiže se značajno viši nivo krutosti same konstrukcije mehanizma. Primenom razmatrana dva kinematička lanca slične konfiguracije postiže se ravansko kretanje pokretne platforme.

Treći kinematički lanac takođe vrši povezivanje stacionarne baze i pokretne platforme tako da se pomoću nega kompletira trodimenzionalno kretanje pokretne platforme. Baza trećeg kinematičkog lanca je Čebiševljev mehanizam. Treći kinematički lanac, takođe vrši povezivanje stacionarne baze i pokretne platforme pomoću zgloba tipa paralelograma. Ključna razlika u odnosu na prva dva kinematička lanca slične konfiguracije je u tome da su u ovoj konfiguraciji kruti štapovi zamenjeni pasivnim translatorno-obrtnim zglobovom. Veza između trećeg kinematičkog lanca i osnaženog translatornog zgloba na stacionarnoj bazi je rotacionog tipa, dok je veza između trećeg kinematičkog lanca i pokretne platforme ostvarena pomoću sfernih zglobova [5, 6].

3. ČEBIŠEVljeV MEHANIZAM KAO PASIVNI TRANSLATORNO-OBRTNI ZGLOB

Kao što je već ranije naglašeno kompletiranje složenog kretanja razmatranog mehanizma se vrši primenom pasivnog translatorno-obrtnog zgloba u konfiguraciji trećeg kinematičkog lanca. Za potrebe razmatranog paralelnog mehanizma odabran je Čebiševljev mehanizam kao adekvatan za obavljane uloge pasivnog translatorno-obrtnog zgloba.

Osnovna funkcija Čebiševljevog mehanizma je generisanje približno prave linije. Čebiševljev mehanizam je sačinjen od četiri kruta elementa međusobno povezana rotacionim zglobovima. Svaki element Čebiševljevog mehanizma je tačno definisanih dimenzija kako bi bilo moguće izvršiti generisanje teorijski prave linije. Prikaz konfiguracije Čebiševljevog mehanizma kao i načina generisanja teorijski prave linije je prikazan na slici 3.



Slika 3. Konfiguracija Čebiševljevog mehanizma (a) i način generisanja prave linije pomoću Čebiševljevog mehanizma (b) [7]

Način formiranja približno prave linije pomoću Čebiševljevog mehanizma se sprovodi simultanom rotacijom tačke C oko tačke B i tačke D oko tačke A pri čemu je u oba slučaja poluprečnik formirane kružnice jedan od parametara Čebiševljevog mehanizma (c). Na ovaj način središnja tačka duži CD, odnosno tačka P predstavlja karakterističnu tačku kojom se vrši formiranje teorijski prave linije Čebiševljevog mehanizma.

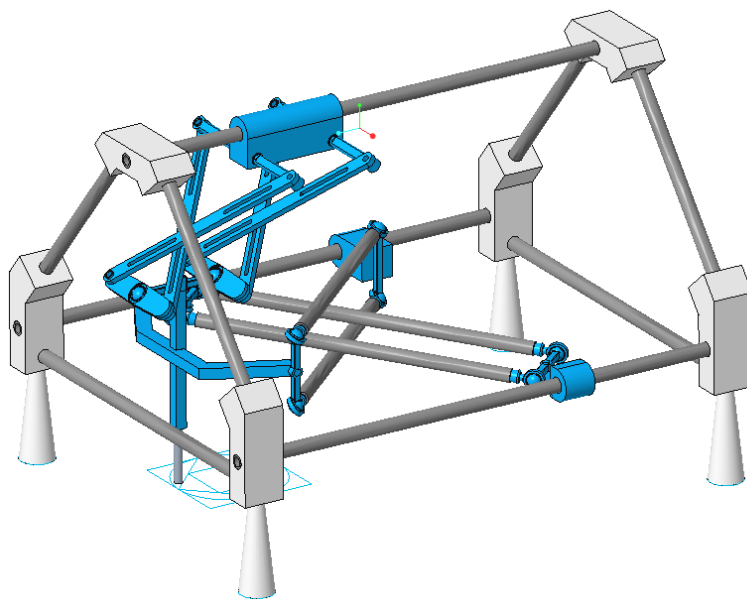
Kao što je prethodno naglašeno da bi bilo moguće opisati teorijski pravu liniju neophodno je pravilno odabrati dimenzije razmatranog mehanizma, odnosno ispoštovati proporciju između parametara mehanizma. Parametri Čebiševljevog mehanizma su dimenzije a, b i c sa slike 3 a), i nalaze se u proporcijском odnosu [8]:

$$a : b : c = 2 : 4 : 5 \quad (1)$$

4. SIMULACIJA RADA RAZMATRANOG MEHANIZMA U VIRTUELNOM OKRUŽENJU

Izrada trodimenzionalnog modela kao i simulacija rada samog mehanizma je izvršena u softverskom paketu *PTC Creo Parametric*. Neophodno je naglasiti da trodimenzionalni model razmatranog mehanizma predstavlja uprošćenu verziju čiji je osnovni cilj provera funkcionalnosti samog modela mehanizma. Simulacija rada razmatranog mehanizma će biti pokazana u funkciji mašinske obrade uklanjanja materijala, što znači da će u ovom konkretnom slučaju posmatrani mehanizam imati ulogu jedne troosne glodalice.

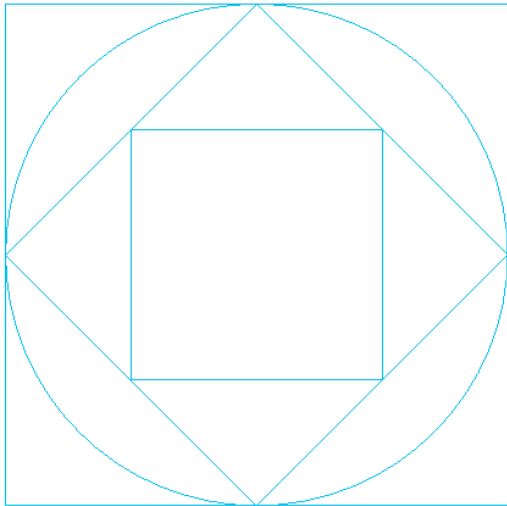
Trodimenzijski model razmatranog mehanizma sačinjen od pojednostavljenih delova je prikazan na slici 4. Osaženi translatorski zglobovi sva tri kinematička lanca se kreću duž vodica pravolinijski bez neželjenih rotacija oko ose kretanja. Ovako opisane translatorske veze se u virtuelnom okruženju softverskog paketa *PTC Creo Parametric* definišu funkcijom *Slider*. Veza između aktivnog translatorskog zgloba i Čebiševljevog mehanizma, kao i veze unutar samog Čebiševljevog mehanizma su rotacione veze koje dozvoljavaju jednu rotaciju, odnosno samo rotaciju oko zadate ose. Rotaciona veza u primenjenom softverskom paketu je definisana funkcijom *Pin*. Zajedničko za pethodno opisane aktivne translatorske i pasivne rotacione veze je u tome da oba tipa veza dozvoljavaju samo po jedan stepen slobode kretanja. Preostale veze koje povezuju krute elemente mehanizma su sferne veze. Karakteristično za ovaj tip veza je to da dozvoljavaju rotacije oko sve tri ose Dekartovog koordinatnog sistema. Ovaj tip veza je u softverskom paketu *PTC Creo* definisan komandom *Ball*. Nakon definisanja pokretnih veza kompletiran je trodimenzionalni virtuelni model razmatranog mehanizma.



Slika 4. Trodimenzionalni model razmatranog mehanizma

Naredni korak pre sprovođenja same simulacije je definisanje trajektorije kretanja alata, odnosno pokretne platforme. Ovaj korak je od izuzetne važnosti za simulaciju mehanizma jer se pravilnim odabirom trajektorije mogu posmatrati izolovana i kombinovana kretanja delova mehanizma, što za posledicu može imati značajno bolje razumevanje mobilnosti samog mehanizma. Izgled odabrane trajektorije mehanizma je prikazan na slici 5. Razmatrane trajektorije su sačinjene od osnovnih geometrijskih oblika kao što su veliki kvadrat (80x80 mm), u njega upisani krug, u krug upisan zakošeni kvadrat i u njega upisan mali kvadrat (40x40mm) koji su dovoljni da pokažu izolovana kretanja svakog pojedinačnog kinematičkog lanca kao i simultana, složena kretanja više kinematičkih lanaca.

Kako bi bilo moguće izvršiti simulaciju kretanja mehanizma neophodno je najpre izvršiti programiranje kretanja alata to zadatoj trajektoriji. U ovom konkretnom slučaju je za programiranje putanje alata odabrana komanda *2 Axis Trajectory* iz panela *Mill* softverskog paketa *PTC Creo Parametric*. Pomoću ove komande je moguće označiti željenu konturu nakon čega se vrši generisanje kompletne putanje alata duž zadate trajektorije. Drugi neophodan korak je uvođenje sklopa razmatranog mehanizma u simulaciono okruženje kako bi se izvršila simulacija rada mehanizma. Proces povezivanja programirane trajektorije i sklopa razmatranog mehanizma se vrši tako što se u modelu sklopa razmatranog mehanizma definiše pozicija koordinatnog sistema *MACH_ZERO*, nakon čega se kordinatni sistem sa istim nazivom definiše i u modelu projektovane trajektorije.

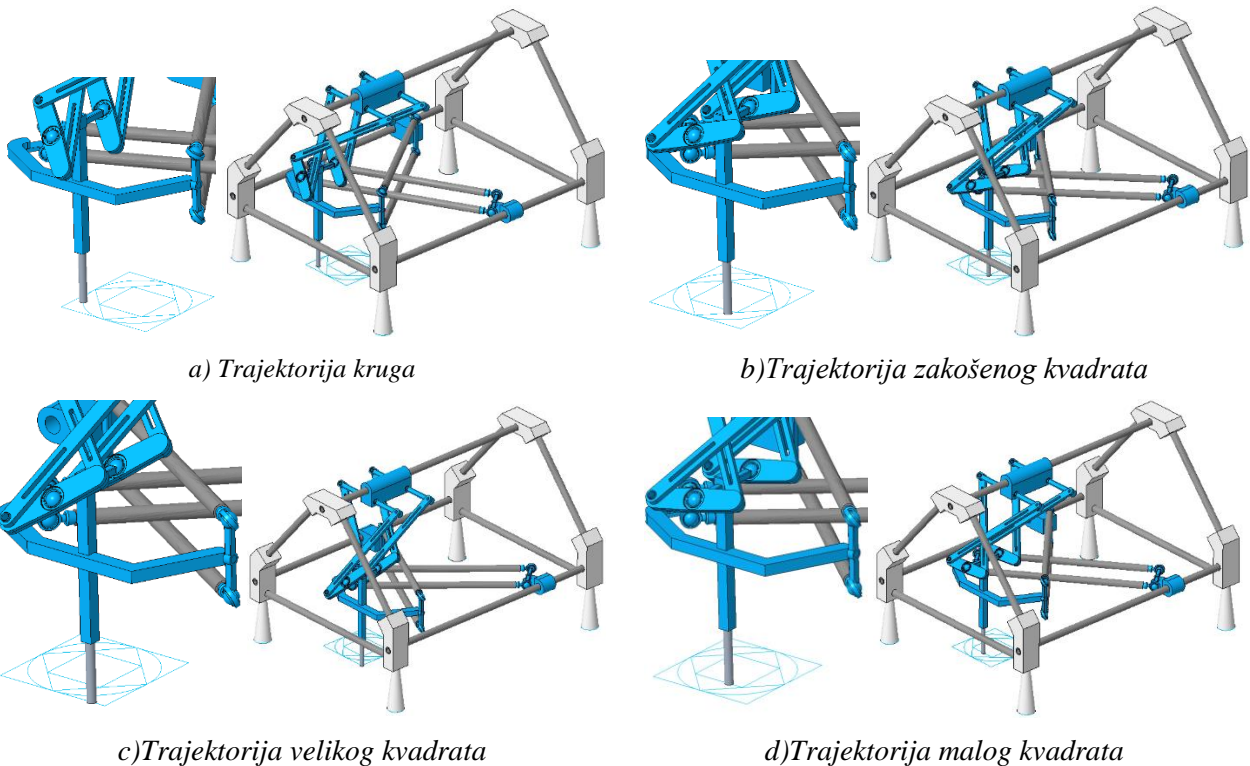


Slika 5. Odabrana trajektorija za simulaciju kretanja razmatranog mehan

Na ovaj način se nakon učitavanja mašine u simulaciono okruženje izvršava povezivanje dva koordinatna sistema istog naziva. Da bi proces povezivanja mehanizma i programa bio kompletan neophodno je definisati poziciju na samom mehanizmu gde će biti smešten alat. Pozicija alata se definiše postavljanjem koordinatnog sistema *TOOL_POINT* na željeno mesto postavljanja alata [9]. Na ovaj način su ispunjeni svi uslovi i moguće je izvršiti simulaciju rada razmatranog mehanizma.

Simulacijom kretanja razmatranog mehanizma tako alat prati zadatu trajektoriju potvrđuje se sposobnost opisivanja složenih trajektorija primenom razmatranog mehanizma. Na slici 6 su prikazane karakteristične pozicije mehanizma pri opisivanju svakog od četiri zadata geometrijska oblika. Posmatranjem kretanja alata pri opisivanju svake od zadatih trajektorija dolazi se do zaključka da kada se vrši pravolinijsko kretanje alata paralelno pravcu kretanja translatorskih zglobova mehanizma sva tri translatorska zgloba se kreću

istovremeno istim brzinama, što je i očekivano. U svim drugim slučajevima neophodno je izvršiti složeno simultano kretanje svakog od tri translatorska zgloba kako bi se ostvarila željena pozicija alata mehanizma na trajektoriji. Ovakvom vrstom simulacije je moguće analizirati ima li kolizionih situacija mehanizma u toku rada u planiranim granicama radnog prostora, što će biti poseban predmet analize.



Slika 6. Simulacija rada razmatranog mehanizma pri opisivanju različitih trajektorija

5. ZAKLJUČAK

Simulacijom rada razmatranog mehanizma došlo je se do pozitivnih zaključaka u pogledu pokretljivosti i funkcionalnosti mehanizma. Razmatrani mehanizam u toku simulacije nije pokazao nikakva nepredviđena i koliziona kretanja niti slabosti po pitanju blokada u toku rada. Neophodno je istaći da je simulacija pokazala i jednu od osnovnih mana paralelnih mehanizama – radni prostor mehanizma. Zbog svoje kompleksnosti po pogledu velikog broja krutih elemenata i zglobova, razmatrani mehanizam poseduje značajno ograničen radni prostor malih dimenzija.

Predmet budućih istraživanja će biti utvrđivanje tačnog izgleda radnog prostora razmatranog mehanizma, kao i uspostavljanje veze između dimenzija radnog prostoga i dimenzijama kinematičkih lanaca, što će sa sobom daje povući mogućnost optimizacije radnog prostora mehanizma variranjem dimenzija njegovih osnovnih parametara. Predstavljeni simulacioni model je takođe pokazao važnost optimizacije izgleda pokretne platforme kako bi se omogućio pun potencijal rotacionih i sfernih zglobova, a ujedno i maksimizirao radni prostor razmatranog mehanizma.

6. LITERATURA

- [1] Patel Z.D., George P.M.: *Parallel Manipulators Applications—A Survey*, Modern Mechanical Engineering, 2, pp.57-64, 2012.
- [2] Connolly C.: *ABB High-Speed Picking Robots Establish Themselves in Food Packaging*, Industrial Robot: An international Journal, Vol. 34, No. 4, pp. 281-284, 2007.
- [3] Briot S., Pashkevich A., Chablat D.: *Technology-oriented optimization of the secondary design parameters of robots for high-speed machining applications*, HAL open science, 1, pp. 1-11, 2019.
- [4] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S.: *Troosni paralelni mehanizam sa specifičnim rešenjima pasivnog translatornog zgloba*, 32. JUPITER konferencija, 28. simpozijum NU - Roboti - FTS, Zbornik radova, str.3.1-3.4, Mašinski fakultet, Beograd, Zlatibor, maj 2006.
- [5] Nešovanović Lj., Živanović S.: *Conceptual design of a novel mechanism with parallel kinematics based on Chebyshev's linkage*, 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI, Banja Luka, pp. 35–40, 2023.
- [6] Nešovanović Lj., Živanović S.: *Verification of kinematic joints on a physical prototype of a novel parallel mechanism based on Chebyshev's linkage*, 39th International Conference on Production Engineering of Serbia, Novi Sad, pp. 246-251, 2023.
- [7] Nešovanović, Lj., Živanović, S., Konjević, P.: *Inaccuracy analysis of Chebyshev's mechanism*, 10th International Scientific Conference on Flexible Technologies - mma 2024, Novi Sad, Serbia, September 24-26, 2024. (in print)
- [8] Shigley J.E., Uicker J. J., Pennock G.R.: *Theory of Machines and Mechanisms*, Oxford University Press 198 Madison Avenue, 1980.
- [9] Zivanovic, S., Tabakovic, S., Zeljkovic, M., Dimic, Z.: *Modelling and analysis of machine tool with parallel–serial kinematics based on O-X glide mechanism*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 43, No.456, 2021.

Nešovanović, Lj., Živanović, S., Popović, M.

SIMULATION OF A THREE-AXIS MECHANISM WITH PARALLEL KINEMATICS BASED ON CHEBYSHEV'S LINKAGE

This paper presents the conceptual design of a mechanism with parallel kinematic capable to achieve three degrees of freedom. A novel feature of the proposed mechanism is the application of the Chebyshev's linkage as a passive translational-rotary joint. As a representative of parallel kinematic mechanisms, the proposed design consists of numerous linkages connected with passive joints, resulting in a complex structure with a high number of dependent motions within the system. To gain insights into the mobility and overall performance of the mechanism, a simulation of the design in a virtual environment is required. This paper includes a simulation of the mechanism using the PTC Creo Parametric software package.

Key words: Mechanism with paralel kinematics, Chebyshev's linkage, Simulation, PTC Creo Parametric



Stanojković, J., Madić, M., Lazarević D.¹⁾

COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING FORCE PREDICTION MODELS

Abstract

Cutting force is an important machining process indicator. This paper is focused on comparative analysis of different models for the prediction of cutting force in minimum quantity lubrication (MQL) turning of AISI 4340 steel using nano fluid. Based on available experimental data from referential literature three simple cutting force models were developed, i.e., linear, quasi-linear and power model. In addition to the mutual comparison of their accuracy, using mean absolute percentage error (MAPE), a comparative analysis was also performed with the machine learning models, such as Gaussian process regression (GRP), support vector machines (SVM) and artificial neural network (ANN), that were developed in previous research. Moreover, an attempt has been made to investigate whether one can accurately approximate cutting force using only a fraction of available data. To this aim, only 2⁴ factorial design points were used (16, out of 60 available) and quasi-linear and power models again showed acceptable prediction results. The results for all 60 trials for quasi-linear and power model of cutting force yielded MAPE of about 4.25% and 4.31%, respectively.

Keywords: cutting force, turning, prediction, modeling

1. INTRODUCTION

New developments in machine tool technology, constant development of cutting tool materials and selection and optimization of machining parameters aim to improve production in terms of productivity, product quality, cost reduction and overall production system efficiency [1]. Regarding selection and optimization of machining parameters, this often requires specific models to be applied in the planning of the machining process. In order to achieve a high level of quality of parts or products, high productivity, high profit rates it is important to carefully select (optimal) machining conditions, suitable coolants and lubricants, suitable cutting tools, appropriate machining strategy, etc. In these activities process modeling is of great importance with the main goal to study the behavior of a system through the model, instead of through the system itself, in order to obtain information about the behavior of the real system by experimenting on the model [2]. Modeling the cutting process provides support for more efficient performance of activities within the process. When developing a process model, it is first necessary to define the process goals, possible process constraints and allowable parameter space of model's parameters. A mathematical model is used to describe the behavior of the system using appropriate mathematical procedures and operations, based on certain, most often experimental or simulation, data. In order for a mathematical model to serve its purpose, it must be conceptually defined, easy to use, and able to be constantly expanded or developed in accordance with new knowledge and requirements [3]. The main purpose of applying mathematical models is to describe the behavior of a real system as a whole or its individual segments under specific conditions [4].

Modeling the cutting force in turning is a key aspect of the machining processes. Accurate prediction of cutting force can help to increase power efficiency, reduce tool wear, improve machining quality and reduce production costs [5].

Different researchers have used previously different approaches to predict the cutting force during the turning process. Thangarasu et al. [6] developed a model of the cutting force during the turning process

¹⁾ Jelena Stanojković, University of Priština, Faculty of Technical Sciences (jelena.stanojkovic@pr.ac.rs), doc. dr Miloš Madić, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering (madic@masfak.ni.ac.rs), prof. dr Dragan Lazarević, University of Priština, Faculty of Technical Sciences (dragan.lazarevic@pr.ac.rs)

²⁾ This research was financially supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-65/2024-03/200109 and 451-03-65/2024-03/200155).

depending on the spindle speed, feed rate and depth of cut. For the prediction of the cutting force, they developed a linear model by regression analysis. Hanief et al. [7] compared artificial neural network (ANN) and multiple regression (MR) models for prediction of cutting forces in turning of red brass. From the analysis of variance (ANOVA) results it was concluded that MR model is capable of predicting the cutting forces with high accuracy, however even better results were attained by the ANN model. Kumar et al. [8] compared three different machine learning (ML) models, such as Random Forest Regressor (RF), Gradient Booster Regressor (GBR) and Extreme Gradient Booster Regressor (XGBoost), for predicting cutting force in turning of AISI 304 austenitic steel. The results showed that the XGBoost model provided the most reliable estimate of the cutting force. Makhfi et al. [9] considered eight different prediction models of machining force components during the hard turning and explored the feasibility of ML models. The results showed that decision tree and Gaussian process regression (GPR) outperformed other ML models. The GPR model also incorporated modeling uncertainty into the prediction of machining force components. Cukor and Jurković [10] developed and compared quadratic regression model and genetic programming (GP) model for prediction of main cutting force in rough longitudinal turning. In addition, a multi-objective turning optimization model was formulated and solved using genetic algorithm. Sharma et al. [11], by using data from Taguchi's L9 orthogonal array, developed regression and fuzzy logic (FL) models for cutting force prediction. The prediction results showed that the FL model was found adequate and better than regression model. Fodor et al. [12] introduced stochastic extensions of already existing cutting force models and showed through orthogonal cutting force measurements how stochastic processes, based on Gaussian white noise, can be used to describe the cutting force. The variance of the measured force signal is typically around 4-9% of the average value, which is orders of magnitude greater than the noise originating from the measurement system. Kaymakci et al. [13] developed single generalized mathematical model for the prediction of cutting force in turning, drilling and milling operations. Dorlin et al. [14] developed a mechanistic model using an inverse identification methodology in order to improve the prediction accuracy of cutting forces during turning operations of titanium alloy. Analysis is extended to cutting trials in boring, cylindrical turning and face turning. Huang and Liang [15] developed a three-dimensional oblique cutting model by extending a planar mechanistic approach based on the equivalent cutting geometries. Horvath [16] presented a review of the main directions and results of researches in recent years concerning cutting force, where the cutting forces during turning depend not only on material properties and cutting parameters but to a great extent on the edge geometry of the tool as well, which determines chip shape (thickness and width). He introduced a new cutting force model for fine turning which can be used to estimate the main cutting forces with ease and high accuracy. The model does not differ significantly from the widely used Kienzle-Victor formula, but operates with chip characteristic of fine turning.

As could be seen from literature review a number of models of different complexity and forms are being proposed for cutting force estimation in turning. This paper is focused on comparative analysis of different models for the prediction of cutting force in minimum quantity lubrication (MQL) turning of AISI 4340 steel using nano fluid. Based on available experimental data from referential literature [17, 18] three simple cutting force models were developed, i.e., linear, quasi-linear and power model. The cutting force predictions obtained by these models were compared with the experimental data as well as with the values obtained by the Gaussian Process Regression (GPR) model, support vector machine (SVM) model and ANN model [19]. In addition to comparative prediction accuracy analysis an attempt has been made to investigate whether one can accurately approximate cutting force using only a fraction of available data, i.e., 16 design points from 2^4 factorial design out of 60 available from the full factorial design.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The data used in this paper were retrieved from referential literature [17, 18]. In the experiment alloyed steel AISI 4340 was used as workpiece material. The experimental trials were performed under MQL conditions with nano fluid by using tungsten-coated carbide insert CCMT-090308 with a right-handed tool holder (grade K10). The experiment was performed on a Maxturn++ CNC lathe with a spindle power of 7 KW and for cutting force measurement a Kistler dynamometer was used. In the experiment four cutting parameters were considered such as cutting speed, tool nose radius, feed rate and depth of cut. The parameters with their labels, unit and values are shown in Table 1 [17, 19]. A full factorial orthogonal array of $2^2 \times 5^1 \times 3^1$, i.e., 60 experimental trials were conducted. For all other relevant data and experimental details readers are referred to literature [17, 19].

Parameter	Label	Unit	Values
Cutting speed	v	m/min	75 90
Tool nose radius	r	mm	0.4 0.8
Feed rate	f	mm/rev	0.04 0.06 0.08 0.1 0.12
Depth of cut	a_p	mm	0.5 1.0 1.5

3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on experimental data [17] and using the least squares method, linear, quasi-linear (linear model with interactions) and power models were developed as shown by equations (1), (2) and (3):

$$F = -179.7102 - 0.22882 \cdot v + 10.9181 \cdot r + 2550.1377 \cdot f + 242.909 \cdot a_p \quad (1)$$

$$F = -144.779 + 1.62 \cdot v + 165.552 \cdot r + 224.385 \cdot f + 150.1 \cdot a_p - 1.405 \cdot v \cdot r + 2.232 \cdot v \cdot f - 0.733 \cdot v \cdot a_p - 75.183 \cdot r \cdot f - 32.656 \cdot r \cdot a_p + 2161.385 f \cdot a_p \quad (2)$$

$$F = 2619.1932 \cdot v^{-0.048442} \cdot r^{0.049295} \cdot f^{0.82107} \cdot a_p^{0.97389} \quad (3)$$

Patole and Kulkarna [18], for the same experimental design, developed full quadratic nonlinear model with interactions in the following form:

$$F = -23.3 + 0.1185 \cdot v + 16.88 \cdot r + 177.2 \cdot f + 22.99 \cdot a_p - 953 \cdot f^2 - 3.84 \cdot a_p^2 - 0.143 \cdot v \cdot r + 0.237 \cdot v \cdot f - 0.079 \cdot v \cdot a_p - 7.7 \cdot r \cdot f - 3.33 \cdot r \cdot a_p + 220.4 \cdot f \cdot a_p \quad (4)$$

Based on the developed linear, quasi-linear and power model, the predicted cutting force values were compared with the experimental values in order to determine the mean absolute percentage error (MAPE). The error determines the percentage deviation of the predicted cutting force models in relation to the values obtained experimentally. The error value of the linear model is 12.47%, the error of the quasi-linear model with interactions is 3.42%, while the error of the power model is 3.45%. The MAPE of the quadratic cutting force prediction model [18] is 2.73%. Based on these results, one can say that the full quadratic, quasi-linear and power models give quite good results which are acceptable from an engineering point of view with error less than 5%. In Table 2 prediction performances of aforementioned models are given along with the results of GPR, SVM and ANN models, developed in previous research [19].

Model of cutting force-F	Linear model	Quasi-linear model	Power model	Quadratic model [11]	GPR model [19]	SVM model [19]	ANN model [19]
MAPE [%]	12.47	3.42	3.45	2.73	5.12	7.91	11.88

Based on the MAPE summary values for different cutting force prediction models, one can argue that full quadratic, quasi-linear and power models can provide very accurate estimation of cutting force in turning operations.

However, the conclusion does not go in the direction that these models outperform ML model, such in the present case, in terms of ability to approximate underlying unknown function, still one may argue that the cutting force during turning can be reliably approximated with less complex models. In addition, although complex ML may approximate very complex and nonlinear relationships there are several issues to be considered such as: ML models have, by default, more hyper-parameters which are to be fine tuned or optimized, ML models require substantial amounts of data, there is risk of overfitting or underfitting ML models, lack of model interpretability, need of domain expert knowledge to develop ML model, ML model bias, etc. These issues along with the obtained results from Table 2, shows multiple benefits and advantages of using quadratic, quasi-linear and power models for cutting force estimation in turning. These models are mathematically simpler, have a smaller number of unknown coefficients to be estimated from experimental data and their coefficients have a clear interpretation regarding the influence of each variable on the cutting force which enables easier understanding and analysis of the results. In addition, they are easy to implement in practice and their development requires much less experimental data by applying a well-structured,

relatively simple and easy to follow approach.

Another research part of the present study was related to the investigation whether one can accurately approximate cutting force using only a fraction of available data. To this aim, only 16 design points, from 2^4 factorial design (all four machining parameters are varied at two levels), were used to develop quasi-linear and power models, as these proved to provide quite good results. The square model of the cutting force in turning process was not considered in this case because in practice square models are used when the parameter levels are three or more. These models are particularly useful for force analysis in more complex machining conditions where linear models do not provide sufficient accuracy [18]. Quasi-linear and power models, developed using only data from 16 experimental trials, are obtained in the following form:

$$F = -176 + 1.669 \cdot v + 136.7 \cdot r + 360 \cdot f + 175 \cdot a_p - 1.165 \cdot v \cdot r - 1.57 \cdot v \cdot f - 1.09 \cdot v \cdot a_p + 113 \cdot r \cdot f - 46.3 \cdot r \cdot a_p + 22178 \cdot f \cdot a_p \quad (5)$$

$$F = 3293.4 \cdot v^{-0.13521} \cdot r^{-0.00859} \cdot f^{0.782419} \cdot a_p^{0.938665} \quad (6)$$

Quasi-linear and power model for 16 trails yielded MAPE of about 1.38% and 4.2%, respectively. The results for all 60 trials for quasi-linear and power model of cutting force yielded MAPE of about 4.25% and 4.31%, respectively. The performance of the quasi-linear model is slightly better, although one can expand the power model with interaction terms and additionally improve the prediction capability. These results further support the idea of developing less complex cutting force prediction models for turning operations which do not require a large number of experimental data. In this way, the time of conducting the experiment is reduced, the resources required for conducting the experiment are smaller, i.e., one achieves better economy and time saving experiments.

The developed quasi-linear is visualized in Figure 1. This figure shows 3D surface graphs for cutting forces at different constant values of cutting speed and tool nose radius. Cutting speed and tool nose radius were set at constant level since these parameters have negligible influence on the cutting force [20-24]. Their influence is imperceptible which is confirmed by quite identical surface diagrams [25, 26]. From Figure 1 one can observed dominant effect of the depth of cut on the resulting cutting force as well as significant effect of the feed rate. Also, one should note that there is no significant two-way interaction effect of these two machining process parameters in qualitative sense. In other words, for an arbitrarily chosen either feed rate or depth of cut, an increase in depth of cut or feed rate will result in an increase in cutting force.

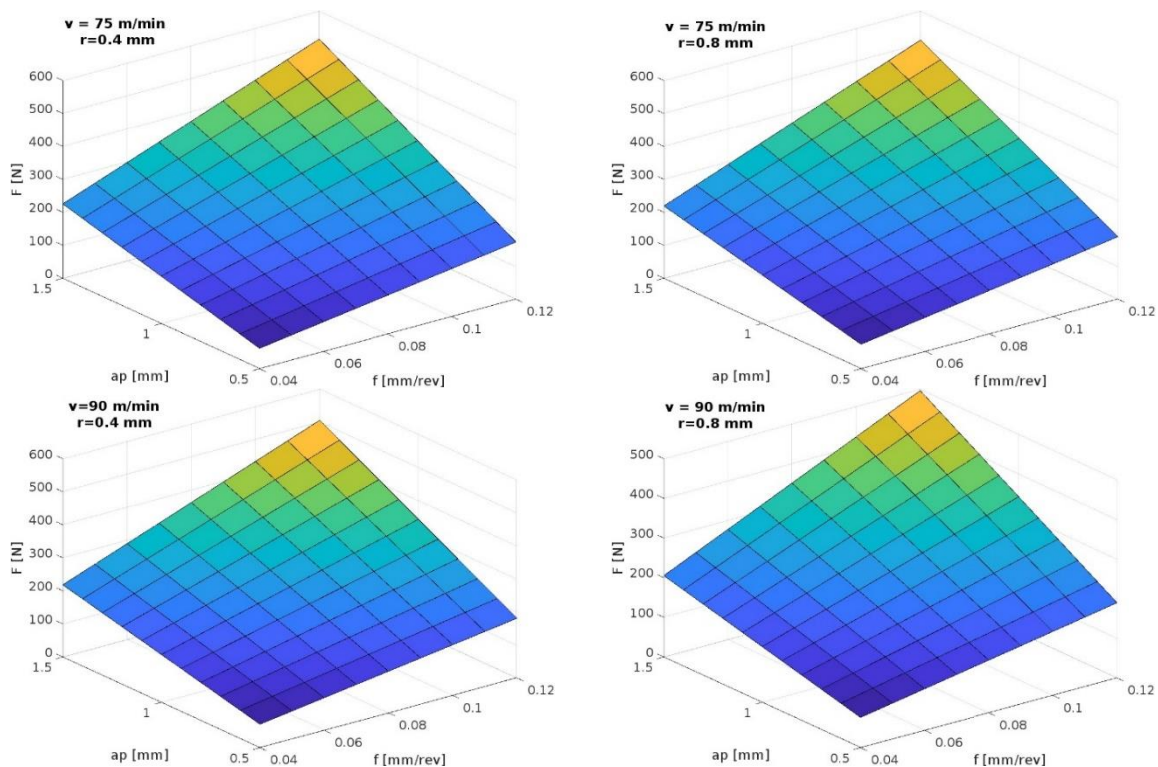


Figure 1. The response surface of cutting force according to change of depth of cut and feed rate at constant cutting speed and tool nose radius

4. CONCLUSION

This study focused on the analysis of different models for cutting force estimation in MQL turning of AISI 4340 using nano fluid. The cutting prediction force models were developed in terms of four parameters, cutting speed, tool nose radius, feed rate and depth of cut.

Cutting force predictions made by developed linear, quasi-linear and power models were compared with the experimentally measured cutting force values and also with one full quadratic model and three ML model (GRP, SVM and ANN) that were developed in previous research. Based on the comparative analysis, in terms of MAPE, it was shown that quadratic, quasi-linear and power models provide quite good results compared to GRP, SVM and ANN models. The results show that simpler approaches to modeling the cutting force in turning give excellent results and that it is not necessary to use methods that are more complex and complicated.

In order to check whether simpler models give good results when developed using limited experimental data, the full factorial design 2^4 experimental plan taking into account 16 trials where all four parameters varied at two level was used. The obtained results show that the MAPE of the quasi-linear model and power models for cutting force estimation is still less than 5% which is quite acceptable. These results show that smaller experiments may yield cutting force models with the same good results, thus saving time, materials, and the economy of performing experimental investigation. Further analysis showed that cutting force and tool nose radius have a negligible influence on the cutting force in turning, while the effect of depth of cut and feed rate are pronounced.

Experimental measurement and cutting force modeling for different workpiece materials and by using different modeling techniques is in the scope of future research.

5. REFERENCES

- [1] Zeman P., Kovalcik J.: *Principles of Cutting Process Modelling and New Algorithm Proposal*, Manufacturing Technology, Vol. 14, No. 4, 2014, pp. 658-664.
- [2] Sharma V., Kumar P., Prakash Misra J.: *Cutting force predictive modelling of hard turning operation using fuzzy logic*, Materials Today, Vol. 26, No. 2, 2020, pp. 740-744.
- [3] Investor R. W., Kenedy M., Davies M., Stevenson R., Thiele J., Furness R., Athavale S.: *Assessment of machining models: Progress report*, Machining Science and Technology, Vol. 4, No. 3, 2020, pp. 511-538.
- [4] Arrazola P. J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I. S.: *Recent advances in modelling of metal machining processes*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 62, 2013, pp.695-718.
- [5] Abdul-Ameer A. A., Farshidianfar, A., Ebrahimi, M.: *Modelling and simulation of the turning process*, Transactions on Engineering Sciences, Vol 44, 2003, pp. 170-180.
- [6] Thangarasu S. K., Shankar S. Tony Thomas A.: *Sridhar G., Prediction of Cutting Force in Turning Process-an Experimental Approach*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 310, 2018.
- [7] Hanief M, Wani M.F., Charoo M.S.: *Modeling and prediction of cutting forces during the turning of red brass (C23000) using ANN and regression analysis*, Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, 2017. pp. 1220-1226.
- [8] Kumar, V., Dubey, V., Sharma, A. K.: *Comparative analysis of different machine learning algorithms in prediction of cutting force using hybrid nanofluid enriched cutting fluid in turning operation*, Materials Today: Proceedings, 2023.
- [9] Makhfi, S., Dorbane, A., Harrou, F., & Sun, Y.: *Prediction of cutting forces in hard turning process using machine learning methods: a case study*, Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, pp. 1-17.
- [10] Cukor, G., Jurković, Z.: *Optimization of turning using evolutionary algorithms*, Engineering Review, Vol. 30, No. 2, 2010, pp. 1-10.
- [11] Bien, D. X.: *Predictive modeling of surface roughness in hard turning with rotary cutting tool based on multiple regression analysis, artificial neural network, and genetic programming methods*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 238, No. 1-2, 2024, pp. 137-150.
- [12] Sharma, V., Kumar, P., Misra, J. P.: *Cutting force predictive modelling of hard turning operation using fuzzy logic*, Materials Today: Proceedings, Vol. 26, 2020, pp. 740-744.

- [13] Fodor, G., Sykora, H. T., Bachrathy, D.: *Stochastic modeling of the cutting force in turning processes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 111, 2020, pp. 213-226.
- [14] Kaymakci, M., Kilic, Z. M., Altintas, Y.: *Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations* International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 54, 2012, pp. 34-45.
- [15] Dorlin, T., Fromentin, G., Costes, J. P.: *Generalised cutting force model including contact radius effect for turning operations on Ti6Al4V titanium alloy*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 86, 2016, pp. 3297-3313.
- [16] Huang, Y., Liang, S. Y.: *Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect*. J. Manuf. Sci. Eng., Vol. 127, No. 2, 2005, pp. 262-270.
- [17] Horváth, R.: *A new model for fine turning forces*, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 12, No. 7, 2015, pp. 109-128.
- [18] Patole P. B., Kulkarni V.: *Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness*, Materials Today: Proceedings, Vol. 5, 2018, pp. 104-112.
- [19] Patole P. B., Kulkarni V.: *Prediction of surface roughness and cutting force under MQL turning of AISI 4340 with nano fluid by using response surface methodology*, Manufacturing Rev., vVol. 5, No. 5, 2018.
- [20] Jadhav J.S., Jadhav B.R.: *Experimental study of Effect of Cutting Parameters on Cutting Force in Turning Process*, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering, Vol. 1, No. 6, 2014, pp. 240-248.
- [21] Stephenson, D. A., Agapiou, J. S.: *Metal cutting theory and practice*, CRC pres, 2018.
- [22] Trifunović, M., Madić, M.: *Application of fractional factorial design for analysis of cutting energy in turning*, Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 65, 2022, pp. 46-50.
- [23] Zheng G, Cheng X., Li L., Xu R., Tian Y.: *Experimental investigation of cutting force, surface roughness and tool wear in high-speed dry milling of AISI 4340 steel*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 1, 2019, pp. 341-349.
- [24] Saadat Ali R., Wajahat A.: *Mathematical modeling and optimization of surface roughness and material removal rate during the machining of AISI 1040 steel*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 19. No. 3, 2021.
- [25] Elbah M., Aouici H., Meddour I., Athmane Yallese M., Boulanouar L.: *Application of response surface methodology in describing the performance of mixed ceramic tool when turning AISI 4140 steel*, Mechanics & Industry, Vol. 17, 2016, pp. 309-320.
- [26] Bouchelaghem H., Yallese M.A., Amirat A., Mabrouki T. Rigal J-F.: *Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3)*, Mach. Sci. Technol., Vol.14, 2010, pp. 471-501.

Stanojković, J., Madić, M., Lazarević D.

UPOREDNA ANALIZA PREDVIĐANJA MODELA OTPORA REZANJA

Rezime: Otpor rezanja je važan indikator procesa obrade. Ovaj rad je fokusiran na uporednu analizu različitih modela predviđanje otpora rezanja pri minimalnoj količini podmazivanja (MKL) pri struganju čelika AISI 4340 korišćenjem nano fluida. Na osnovu dostupnih eksperimentalnih podataka iz referentne literature razvijena su tri jednostavna modela otpora rezanja, odnosno linearni, kvazi-linearni i stepeni model. Pored međusobnog poređenja njihove tačnosti, korišćenjem srednje apsolutne procentualne greške (SAPG), urađena je i uporedna analiza sa modelima mašinskog učenja, kao što su Gausova Regresija, Metoda Potpornih Vektora i Veštačka Neuronska Mreža, koji su razvijeni u prethodnim istraživanjima. Štaviše, istraživano je da li se može tačno aproksimirati otpor rezanja koristeći samo delić dostupnih podataka. U tom cilju korišćen je 2^4 faktorni plan (16, od 60 dostupnih), kvazi-linearni i stepeni modeli su pokazali prihvatljive rezultate predviđanja. Rezultati za 60 ispitivanja, kvazi-linearnearni i stepeni model otpora rezanja, dali su SAPG od oko 4,25% i 4,31%.

Ključne reči: otpor rezanja, struganje, predviđanje, modeliranje



UPOREDNA ANALIZA ALGORITAMA ZA DETEKCIJU POZICIJE I ORIJENTACIJE OBJEKATA U OKVIRU SISTEMA VEŠTAČKOG GLEDANJA²⁾

Rezime

Automatski sistemi za montažu imaju ključnu ulogu u današnjoj proizvodnji, omogućavajući visoku preciznost, povećanu efikasnost i smanjene troškove proizvodnje. Zadaci manipulacije i montaže često zahtevaju informacije o poziciji i orijentaciji delova u okviru radnih stanica. U automatskim sistemima ove informacije dobijaju se korišćenjem sistema veštačkog gledanja koji imaju implementirane različite tehnike za obradu i analizu slike. Iako su tradicionalne tehnike u praksi pokazale dobru funkcionalnost, robusnost i brzinu rada, njihova primenljivost u kompleksnim okruženjima često je okarakterisana lošijim performansama. Sa druge strane, tehnike veštačke inteligencije, pre svega veštačke neuronske mreže, kroz koncept dubokog učenja donose značajna unapređenja u vidu performansi, posebno u složenim aplikacijama, ali često prouzrokujući kašnjenja koja mogu biti neprihvatljiva za primenu u realnom vremenu. U ovom radu kreirani su sistemi veštačkog gledanja za prepoznavanje pozicije i orijentacije izabranog dela korišćenjem tradicionalnih tehnika i tehnika zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. Poređenje performansi primenjenih tehnika izvršeno je na osnovu više usvojenih kriterijuma.

Ključne reči: sistemi veštačkog gledanja, analiza slike, Hofova transformacija, YOLOv8-obb

1. UVOD

Automatizacija procesa montaže podrazumeva primenu industrijskih robota koji u cilju izvođenja određenih zadataka poput manipulacije ili spajanja često zahtevaju precizne informacije o položaju delova. U tom kontekstu, slika postaje glavni nosilac informacija, a sistemi veštačkog gledanja sastavni deo robotizovane ćelije za montažu koji obezbeđuje da potrebni podaci dobijeni iz slike budu dostupni robotu. Zadaci robotskog hvatanja zahtevaju informaciju o poziciji i orijentaciji objekta na sceni.

Pozicija, koja je najčešće definisana koordinatama težišta objekta i orijentacija, koja je definisana uglom, mogu se dobiti primenom različitih tehnika za obradu i analizu slike. Tradicionalne tehnike za detekciju pozicije i orijentacije objekta u opštem slučaju karakteriše nizak nivo računске složenosti, jednostavnost implementacije, kao i nezavisnost od skupa podataka za obučavanje [1]. Postoji čitav niz metoda za detekciju objekata koje su zasnovane na obeležjima, poput metode transformacije obeležja invarijantne na skaliranje – SIFT (engl. *Scale-Invariant Feature Transform*) [2] i ubrzanih robusnih obeležja – SURF (engl. *Speeded-Up Robust Features*) [3]. Ove metode identifikuju specifične tačke u slici i kreiraju deskriptore koji opisuju karakteristike okoline tih tačaka. Generalizovana verzija Hofove transformacije [4] takođe je korišćena u različitim pristupima za detekciju pozicije i orijentacije objekta [5]. Tehnika poklapanja šablona (engl. *Template Matching*) spada u metode zasnovane na poređenju slika, gde se vrši pretraga regija na slici koje se podudaraju sa definisanim šablonom. Kada se objekat detektuje, moguće je odrediti njegovu poziciju i orijentaciju [6]. Međutim, u dinamičnom i kompleksnom okruženju, tradicionalne tehnike često pokazuju određena ograničenja. Promena osvetljenja, složena geometrija i varijantnost oblika i veličine delova mogu negativno uticati na performanse ovih tehnika.

¹⁾ Živojin Suvajac, mast. inž. maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (1004.2022mfbg@gmail.com), Doc. dr Dušan Nedeljković, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja u okviru projekta podržanog od strane Ministarstva nauke, Tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije po Ugovoru 451-03-65/2024-03/200105.

Sa druge strane, tehnike zasnovane na veštačkoj inteligenciji, posebno neuronske mreže kroz koncept dubokog učenja (engl. *Deep Learning* – DL), imaju sposobnost da iz slika automatski identifikuju obrasce različite složenosti, samim tim i mogućnost bolje adaptacije na promene u okruženju. Navedene karakteristike čine DL tehnike pogodnim za primenu u kompleksnim industrijskim aplikacijama.

U slučaju DL, tehnike za detekciju objekata mogu se podeliti na jednostepene (engl. *one-stage*) i dvostepene (engl. *two-stage*) [1]. Jednostepene tehnike su, po pravilu, brže tehnike koje izvršavaju detekciju objekata u jednom prolasku kroz mrežu. *YOLO* (engl. *You Only Look Once*) [7] i *SSD* (engl. *Single Shot MultiBox Detector*) [8] kao primeri jednostepenih tehnika, našli su široku primenu u različitim industrijskim aplikacijama [9]. Sa druge strane, dvostepene tehnike, koje karakteriše visoka tačnost, detekciju objekta izvršavaju kroz dva koraka. U prvom koraku vrši se identifikacija regije od interesa, da bi se u drugom koraku kreirali okviri i odredila njihova pozicija i orijentacija. *R-CNN* (engl. *Regions with Convolutional Neural Networks features*) [10] i ubrzana verzija ovog algoritma [11] predstavljaju često primenjivane dvostepene DL tehnike [12].

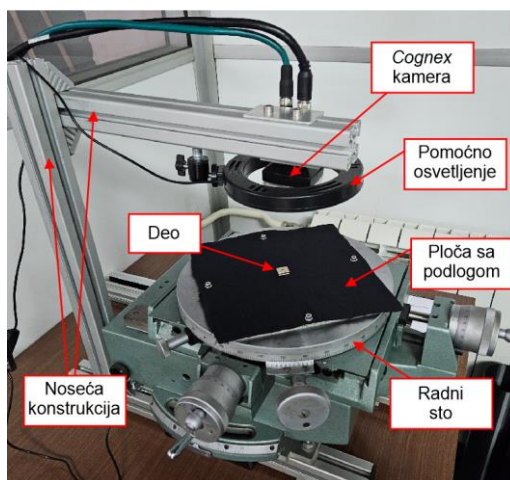
Ipak, primena DL tehnika zbog složenosti modela može prouzrokovati kašnjenja koja su prevelika za industrijske aplikacije u kojima se upravljačke odluke donose u realnom vremenu. Pored toga, za obučavanje DL modela neophodan je veliki broj slika, čija akvizicija i priprema često predstavljaju izazovan zadatak. Iz navedenog, može se zaključiti da izbor odgovarajuće tehnike zavisi od zahteva konkretne aplikacije.

U ovom radu, za potrebe detekcije pozicije i orijentacije izabranog dela, razvijena su dva algoritma, jedan baziran na tradicionalnom pristupu, dok je drugi algoritam zasnovan na primeni Hofove transformacije. Pored toga, za detekciju pozicije i orijentacije korišćen je i *YOLO* model koji je prilagođen za rad sa slikama izabranog dela. Za potrebe obučavanja *YOLO* modela, kao i za potrebe testiranja sva tri algoritma, u Laboratoriji za automatizaciju proizvodnje kreiran je odgovarajući skup podataka. Performanse algoritama poređene su na osnovu razlike detektovanih i stvarnih vrednosti pozicije i orijentacije.

Nastavak rada biće strukturiran na sledeći način. Poglavlje 2 prikazuje eksperimentalnu postavku korišćenu za akviziciju slika. U trećem poglavlju ukratko su predstavljeni algoritmi za detekciju pozicije i orijentacije izabranog dela, dok poglavlje 4 prikazuje eksperimentalne rezultate. Na kraju, zaključne napomene i pravci daljih istraživanja dati su u poglavlju 5.

2. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

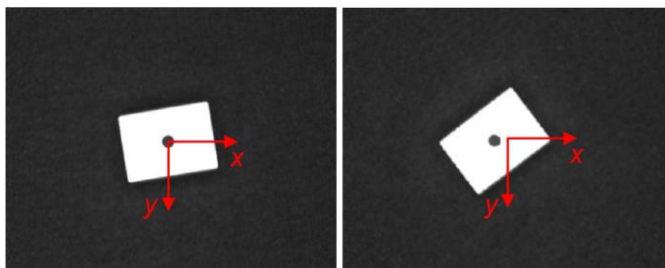
Eksperimentalna instalacija korišćena za akviziciju slika sastoji se od kamere, radnog stola, pomoćnog osvetljenja, noseće konstrukcije i ploče sa podlogom (slika 1). Glavni deo ove instalacije predstavlja monohromatska kamera *Cognex In-Sight 2000-120* [13] sa rezolucijom od 640×480 piksela i mogućnošću generisanja 75 slika (frejmova) u sekundi. Akvizicija slika izvršena je korišćenjem softvera *In-Sight Explorer* [14] instaliranog na računaru koji je sa kamerom povezan putem Ethernet/IP protokola.



Slika 1. Eksperimentalna instalacija

Kalibracija kamere sprovedena je u okviru softvera *MATLAB 2023b* korišćenjem modula *Camera Calibrator* koji je deo paketa za obradu i analizu slike. Za potrebe kalibracije generisan je skup slika gde se šablon šahovske table sa 5×8 polja dimenzija 10×10 mm nalazi u različitim pozicijama i orijentacijama. Izlaz iz procesa kalibracije predstavljaju vrednosti koeficijenta radialne i tangencijalne distorzije, kao i matrica kamere koja se sastoji od žižnih daljina i koordinata optičkog centra.

Na slici 2 prikazani su primeri slika dela iz kreiranog skupa podataka sa naznačenim koordinatnim početkom, kao i smerom osa x i y referentnog koordinatnog sistema. Crna platnena podloga koja je izabrana zbog niskog stepena refleksije i ostvarivanja dobrog kontrasta postavljena je na radnu ploču.



Slika 2. Primeri slika iz kreiranog skupa podataka

Tokom akvizicije, deo je bio mehanički pozicioniran u centru radnog stola sa ručno upravljanim mehanizmom sa dve translatorne (x i y) i jednom obrtnom osom (C). Različite pozicije i orijentacije dela postignute su translatornim kretanjem osa x i y , kao i rotiranjem radnog stola. Kreirani skup podataka sadrži ukupno 1.800 slika.

3. DETEKCIJA POZICIJE I ORIJENTACIJE IZABRANOG DELA

U okviru ovog poglavlja biće ukratko objašnjena tri algoritma koja su korišćena u zadacima detekcije pozicije i orijentacije izabranog dela:

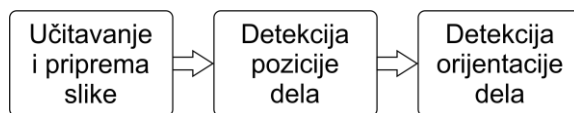
- 1) Tradicionalni algoritam;
- 2) Algoritam baziran na Hofovoj transformaciji;
- 3) *YOLOv8-obb* algoritam.

3.1 Tradicionalni algoritam

Tradicionalni algoritam za detekciju pozicije i orijentacije objekta na slici oslanja se na analizu sledećih geometrijskih karakteristika:

- Površine objekta – A ;
- Statičkih momenata površine objekta u odnosu na ose x i y – S_x i S_y ;
- Aksijalnih momenata inercije površine objekta u odnosu na ose x i y – I_x i I_y ;
- Centrifugalnog momenta inercije površine objekta – I_{xy} .

Razvoj tradicionalnog algoritma može se podeliti na tri osnovna koraka koji su prikazani na slici 3. Nakon što se učita slika, priprema podrazumeva ispravljanje distorzije i prevođenje monohromatske slike u binarni oblik.



Slika 3. Osnovni koraci tradicionalnog algoritma

Kako bi se izvršila detekcija pozicije objekta neophodno je izračunati njegovu površinu i statički moment. U slučaju binarne slike, površina objekta jednaka je broju nenultih piksela, što se može zapisati na sledeći način:

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B[i, j] \quad (1)$$

gde $B[i, j]$ predstavlja vrednost piksela na poziciji $[i, j]$ u matrici binarne slike dimenzija $m \times n$.

Sa druge strane, statički momenti inercije S_x i S_y izračunavaju se kao zbir proizvoda elementarnih površina i normalnih rastojanja posmatranih elementarnih površina od referentne ose.

U slučaju objekta u okviru binarne slike oni se određuju relacijama:

$$S_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i \cdot B[i, j]; \quad S_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n j \cdot B[i, j] \quad (2)$$

gde i i j predstavljaju indeks vrste i kolone matrice, tim redom; ostala notacija je ista kao u (1). Koordinate težišta (x_c, y_c) objekta dalje se izračunavaju korišćenjem relacija:

$$x_c = \frac{S_y}{A}; \quad y_c = \frac{S_x}{A} \quad (3)$$

U cilju određivanja orijentacije objekta neophodno je izračunati I_x i I_y , koji se mogu definisati kao zbir proizvoda elementarne površine i kvadrata rastojanja posmatrane elementarne površine od referentne ose, što je u slučaju binarne slike:

$$I_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i^2 \cdot B[i, j]; \quad I_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n j^2 \cdot B[i, j] \quad (4)$$

pri čemu je notacija ista kao u (1) i (2). Pored I_x i I_y , neophodno je izračunati i centrifugalni moment inercije I_{xy} definisan kao određeni integral po celoj površini proizvoda elementarne površine i njenog rastojanja od referentnih osa, a prilikom analize binarne slike, računa se na sledeći način:

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i \cdot j \cdot B[i, j] \quad (5)$$

U (4) i (5) dobijene su vrednosti I_x , I_y i I_{xy} za spoljašnji koordinatni sistem koji je smešten u gornjem levom uglu binarne slike. Međutim, za određivanje orijentacije dela potrebno je odrediti vrednosti ovih momenata u odnosu na težišni koordinatni sistem. Zbog ograničene dužine ovog rada, neće biti prikazana cela procedura (može se naći u [15]), pa se navodi krajnji izraz kojim se određuje ugao rotacije α novog koordinatnog sistema u odnosu na težišni koordinatni sistem:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{2 \cdot I_{xy}}{I_x - I_y} \quad (6)$$

3.2 Algoritam baziran na Hofovoj transformaciji

Hofova transformacija [4] predstavlja tehniku koja se često koristi u sistemima veštačkog gledanja, posebno u zadacima detekcije objekata na slici. Ovom tehnikom moguće je detektovati objekat na osnovu geometrijskih oblika (prava, kružnica, elipsa...) koji se mogu predstaviti parametarskim jednačinama. Proces se zasniva na preslikavanju iz ravni slike u parametarski prostor, gde se vrši odabir parametara koji zadovoljavaju postavljeni kriterijum. Kako se primena Hofove transformacije u ovom radu svodi na detekciju pravih, neophodno je definisati parametarsku jednačinu prave:

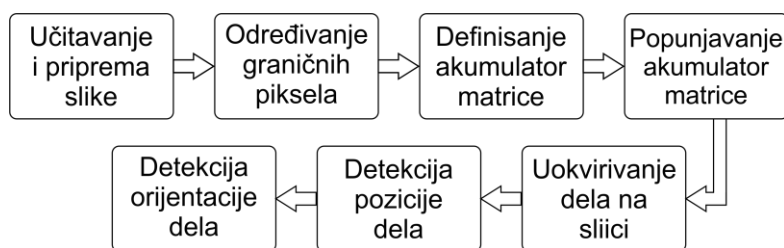
$$x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi = r \quad (7)$$

gde r predstavlja poteg, odnosno najkraće rastojanje posmatrane prave od koordinatnog početka, φ je ugao koji poteg zaklapa sa pozitivnim krajem x ose, dok su sa x i y označene koordinate tačke koja pripada posmatranoj pravoj. Može se zaključiti da je svaka prava definisana tačno jednim parom parametara r i φ , što znači da je ekvivalent prave u ravni slike tačka u parametarskom prostoru i obrnuto. U cilju definisanja konačnog broja vrednosti parametara r i φ , neophodno je izvršiti diskretizaciju njihovih vrednosti, što rezultira akumulator matricom dimenzija $N \times M$, gde N predstavlja broj intervala potega r , dok M predstavlja broj intervala ugla φ . Pod pretpostavkom da su određeni granični pikseli objekta na sceni, za svaki granični piksel (x_g, y_g) inkrementiraju se polja akumulator matrice koja zadovoljavaju sledeću jednačinu [16]:

$$x_g \cdot \cos \varphi + y_g \cdot \sin \varphi = r \quad (8)$$

Nakon što se izvrši inkrementacija svih polja koja zadovoljavaju postavljeni kriterijum, pretražuju se i izdvajaju polja koja imaju vrednosti veće od zadatog praga. Izdvojena polja preslikavaju se u ravan slike, čime se dobijaju prave koje obuhvataju najveći broj graničnih piksela.

Razvoj algoritma za detekciju pozicije i orijentacije objekta baziranog na Hofovoj transformaciji može se podeliti na sedam glavnih koraka (slika 4). Prvi korak je identičan kao u slučaju Tradicionalnog algoritma. Za potrebe drugog koraka razvijen je algoritam za identifikaciju graničnih piksela baziran na 4 povezanom okruženju. Ovaj pristup podrazumeva da se posmatrani piksel koji pripada objektu, smatra graničnim pikselom ukoliko bar jedan od njegovih vertikalnih ili horizontalnih suseda ne pripada tom objektu. Primenom ovog algoritma formira se matrica graničnih piksela.



Slika 4. Osnovni koraci algoritma baziranog na Hofovoj transformaciji

Kako će Hofova transformacija biti primenjena za detekciju pravih, korišće se dvodimenzionalna akumulator matrica. Za rezoluciju ugla φ usvojena je vrednost od 1° , a za rezoluciju potega r vrednost od 1 piksela.

Uokvirivanje dela podrazumeva izdvajanje četiri prave koje formiraju zatvorenu konturu oko dela na slici. Ovaj korak započinje pretragom pravih koje su definisane parovima (r, φ) čije su vrednosti veće od zadatog praga. U okviru ovog rada, početna vrednost praga je 150 i smanjuje se do trenutka kada je bar jedna vrednost u akumulator matrici veća od trenutnog praga. Postupak kreće sa izdvajanjem članova akumulator matrice čije su vrednosti veće od trenutnog praga, nakon čega sledi identifikacija prve prave (ili više njih), dok se na kraju sprovodi razvrstavanje pravih. Razvrstavanje se prvo sprovodi prema uglu φ što rezultira sa dva skupa pravih, gde prvi skup podrazumeva orijentacije pravih koje su približne orijentaciji duže stranice dela na slici, dok se drugi skup odnosi na orijentacije pravih približne orijentaciji kraće stranice dela na slici. Kako se nakon razvrstavanja prema uglu φ može desiti da su sve detektovane prave iz istog skupa grupisane sa iste stranice dela, izvršava se grupisanje po potegu r , čime se postiže da se prave nalaze uz sve četiri ivice dela. Međutim, moguće je da se uz jednu ivicu nalazi više pravih, što se rešava izborom srednjeg člana ulaznog vektora. U slučaju da je broj članova vektora paran, usvaja se prvi od dva srednja člana.

Za detekciju pozicije dela neophodno je pronaći presečne tačke pravih koje su određene u prethodnom postupku. Presečnu tačku moguće je definisati ukoliko prave nisu paralelne. Iz tog razloga, usvojeno je da su dve prave paralelne ukoliko je apsolutna razlika njihovih uglova φ manja od 15° . Nakon što su kreirane sve presečne tačke, moguće je odrediti koordinate težišta izabranog dela, odnosno izvršiti detekciju pozicije.

Detekciju orijentacije moguće je izvršiti koristeći jedan od uglova pravih koje su prethodno određene. Međutim, neophodno je odrediti koja prava će biti izabrana kao referentna. Da bi se rešio ovaj problem, uvodi se kriterijum kojim se porede prave na osnovu njihovih presečnih tačaka. Kao referentna prava usvaja se ona prava kojoj pripadaju dve presečne tačke sa najmanjim rastojanjem od graničnih piksela.

3.3 YOLOv8-obb algoritam

YOLO predstavlja DL model namenjen za detekciju objekata u realnom vremenu čija je prva verzija pokrenuta 2015. godine [7]. Ovaj algoritam spada u klasu jednostepenih algoritama za detekciju, što znači da u jednom prolazu kroz sliku obezbeđuje koordinate temena okvira oko objekta, kao i verovatnoću odabrane klase kojoj objekat pripada.

Proces detekcije objekta počinje podelom slike na mrežu $S \times S$ ćelija, gde svaka ćelija ima zadatak da detektuje objekte koji se celom površinom nalaze unutar nje i/ili objekte čiji centar pripada toj ćeliji. Podela slike na ćelije omogućava YOLO modelu da istovremeno obrađuje različite delove slike, što čini ovaj model brzim i pogodnim za aplikacije koje se izvode u realnom vremenu. Svaka ćelija nezavisno detektuje postojanje objekata, njihovu poziciju i orijentaciju, kao i klasu kojoj objekat pripada.

Iako se sa pojavom novih verzija YOLO algoritma arhitektura modela menjala i postajala složenija, svaka do sada razvijena verzija u osnovi koristi CNN. U okviru ovog rada, izabran je model YOLOv8-obb (engl. *Oriented Bounding Box*) koji pored ostalih poboljšanja u odnosu na prethodne verzije, nudi mogućnost određivanja orijentacije objekta. Naime, još od YOLOv5 modela postoji mogućnost određivanja orijentacije, ali uz dodatne modifikacije i prilagođavanje modela, što u izabranoj verziji (YOLOv8-obb) nije neophodno. Arhitektura YOLOv8-obb modela sastoji se iz tri osnovna bloka: Kičma (engl. *Backbone*), Vrat (engl. *Neck*) i Glava (engl. *Head*) [17].

Blok Kičme koristi CSPDarknet53 arhitekturu [17] koja je sastavljena od niza konvolucionih modula (konvolucionni sloj, sloj normalizacije grupe [18], aktivacija), CSP (engl. *Cross Stage Partial*) slojeva i SPPF (engl. *Spatial Pyramid Pooling Fast*) modula. U okviru ovog bloka, iz ulazne slike izdvajaju se obeležja nižeg i višeg reda, čime se postiže detekcija osnovnih šablona poput ivica, jednostavnih oblika i tekstura. Glavna funkcija drugog bloka (Vrat) je povezivanje prethodnog i narednog bloka. Ovaj blok sastoji se iz niza konvolucionih modula i CSP sloja, čime se postiže integracija izdvojenih obeležja kako bi se detektovali objekti različitih dimenzija. Primenom poslednjeg bloka (Glava) generiše se izlaz iz modela, što znači da se u

unutar ovog bloka kreiraju okviri, odnosno detektuje se pozicija i orijentacija objekta. Arhitektura poslednjeg bloka bazirana je na upotrebi konvolucionih modula i konvolucionih slojeva.

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U okviru ovog poglavlja biće prikazane performanse detekcije pozicije i orijentacije za sva tri razmatrana pristupa. Tradicionalni algoritam i algoritam zasnovan na Hofovoj transformaciji primenljivi su u obliku koji je prikazan u poglavlju 3 bez potrebe za pripremom podataka i podešavanjima u okviru algoritma. Međutim, kada je reč o *YOLOv8-obb* modelu, neophodno je podatke pripremiti, strukturirati ih u definisani format i nakon toga kroz proces finog podešavanja (engl. *fine-tuning*) prilagoditi unapred obučeni model specifičnom zadatku. U ovom slučaju, taj zadatak odnosi se na detekciju pozicije i orijentacije izabranog dela koji će predstavljati novu klasu.

Kako za *YOLOv8-obb* postoji pet različitih modela koji se razlikuju po kompleksnosti (broju obučavajućih parametara) i tačnosti koju ostvaruju, neophodno je izabrati odgovarajući model za postavljeni zadatak. U cilju primene modela u zadacima koji zahtevaju rad u realnom vremenu, izabrana je *nano* verzija modela (u nastavku označen sa *YOLOv8n-obb*) kojeg odlikuje najmanja računaska složenost (3,1 milion obučavajućih parametara), ali i nešto manja tačnost u poređenju sa drugim modelima. *YOLOv8n-obb* implementiran je u programskom jeziku *Python* korišćenjem biblioteke *Ultralytics* koja je kreirana za zadatke veštačkog gledanja i uključuje segment namenjen za detekciju objekata. Skup podataka koji se koristi za fino podešavanje sastoji se iz dva različita tipa podataka:

- 1) slike koje sadrže objekte koje je potrebno detektovati;
- 2) tekstualne datoteke koja obuhvata indeks klase objekta i normalizovane koordinate četiri temena okvira u sledećem formatu:

$$\text{indeks klase, } x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4 \quad (9)$$

gde x_i i y_i , $i \in \{1, \dots, 4\}$ predstavljaju normalizovane koordinate temena okvira sa redosledom koji prati kontinuitet poligona. Za fino podešavanje *YOLOv8n-obb* modela korišćeno je ukupno 1.500 slika koje sadrže izabrani deo u različitim pozicijama i orijentacijama na sceni. Koordinate temena okvira koje su bile neophodne za fino podešavanje, određene su primenom algoritma baziranog na Hofovoj transformaciji. U procesu finog podešavanja varirana su ukupno dva parametra: broj epoha koji je uzimao vrednosti iz skupa $\{50, 100, 150, 200\}$ i veličina grupe (engl. *batch size*) koja je uzimala vrednosti iz skupa $\{2, 4, 8, 16, 32\}$. Vrednosti greške validacije i obučavanja nakon 100 epoha bile su beznačajno male, stoga je ovaj broj epoha izabran. Radna stanica koja je korišćena u procesu obučavanja sadrži tri grafičke karte *Nvidia Quadro RTX6000*, dva procesora *Intel Xeon Silver 4208* i 192 GB DDR4 RAM.

Skup slika namenjen za testiranje performansi razvijenih algoritama dobijen je pomeranjem radnog stola duž x i y ose, kao i rotacijom stola za ugao α . Vrednost jednog parametra (x , y ili α) varirana je između akvizicije dve uzastopne slike, što znači da je svaka generisana slika imala jedinstvenu kombinaciju vrednosti ova tri parametra koji definišu poziciju i orijentaciju. Linearno kretanje stola po x i y osi ostvareno je za vrednosti $x, y \in \{-10, -5, 0, 5, 10 \text{ mm}\}$, dok je ugao α bio variran u opsegu $\alpha \in \{0, 15, \dots, 165^\circ\}$. Sve varirane vrednosti definisane su kao relativne u odnosu na inicijalnu poziciju $x, y, \alpha = [0, 0, 0]$, u kojoj se deo nalazi u centru, dok su njegove spoljašnje stranice paralelne sa ivicama generisane slike. Izvršene varijacije vrednosti x, y i α rezultirale su sa ukupno 300 različitih slika koje su u nastavku korišćene za procenu performansi razvijenih algoritama.

Evaluacija performansi razmatranih algoritama za detekciju pozicije i orijentacije izabranog dela sprovedena je korišćenjem četiri statističke karakteristike: maksimalna greška (*max*), minimalna greška (*min*), srednja vrednost greške (μ) i standardna devijacija (σ). Navedene statističke karakteristike računaju se na osnovu razlike realne vrednosti (definisane pomeranjem radnog stola) i estimirane vrednosti, što se u slučaju x ose može zapisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \min_x &= \min(|x_i - \hat{x}_i|) \\ \max_x &= \max(|x_i - \hat{x}_i|) \\ \mu_x &= \frac{\sum_i^n (|x_i - \hat{x}_i|)}{n} \\ \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum_i^n (|x_i - \hat{x}_i| - \mu_x)^2}{n}} \end{aligned} \quad (10)$$

gde x_i i \hat{x}_i predstavljaju realnu i estimiranu vrednost x koordinate centra izabranog dela, dok je $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ trenutna slika iz skupa za testiranje. Vrednosti statističkih karakteristika za y koordinatu centra i ugao α računaju se po istom principu kao u (10).

Rezultati detekcije pozicije i orijentacije dela (izraženi u mm za koordinate centra x i y , a u $^\circ$ za ugao α) za sva tri razmatrana algoritma prikazani su u tabeli 1. U slučaju *YOLOv8n-obb* modela prikazani su rezultati modela koji se pokazao kao najbolji (veličina grupe=8). Dobijene srednje vrednosti greške za parametre koji određuju poziciju (x i y), kao i za ugao α kojim je definisana orijentacija, zadovoljavaju zahteve industrijskih aplikacija, kao što je robotsko hvatanje. Maksimalne vrednosti višestruko su veće od srednjih vrednosti greške, ali kada se u razmatranje uključi i standardna devijacija, može se zaključiti da vrednosti maksimalne greške označavaju pojedinačne slučajeve i ne mogu predstavljati glavnu metriku za procenu performansi algoritama. Najbolji rezultati (najmanje vrednosti) prikazani su podebljanim ciframa.

Tabela 1. Performanse detekcije pozicije i orijentacije izabranog dela				
Statistička karakteristika		Tradic. algoritam	Hofova transform.	<i>YOLOv8n-obb</i>
minimalna greška	min_x	0,0011	0,0000	0,0026
	min_y	0,0000	0,0000	0,0004
	min_α	0,0010	0,0000	0,0061
maksimalna greška	max_x	0,6000	0,6346	0,8249
	max_y	0,5850	0,6145	0,5580
	max_α	1,3607	1,0000	2,1451
srednja greška	μ_x	0,2211	0,2225	0,2399
	μ_y	0,1733	0,1708	0,1736
	μ_α	0,3668	0,3700	0,6814
standardna devijacija	σ_x	0,1450	0,1467	0,1615
	σ_y	0,1242	0,1217	0,1314
	σ_α	0,2976	0,4828	0,4700

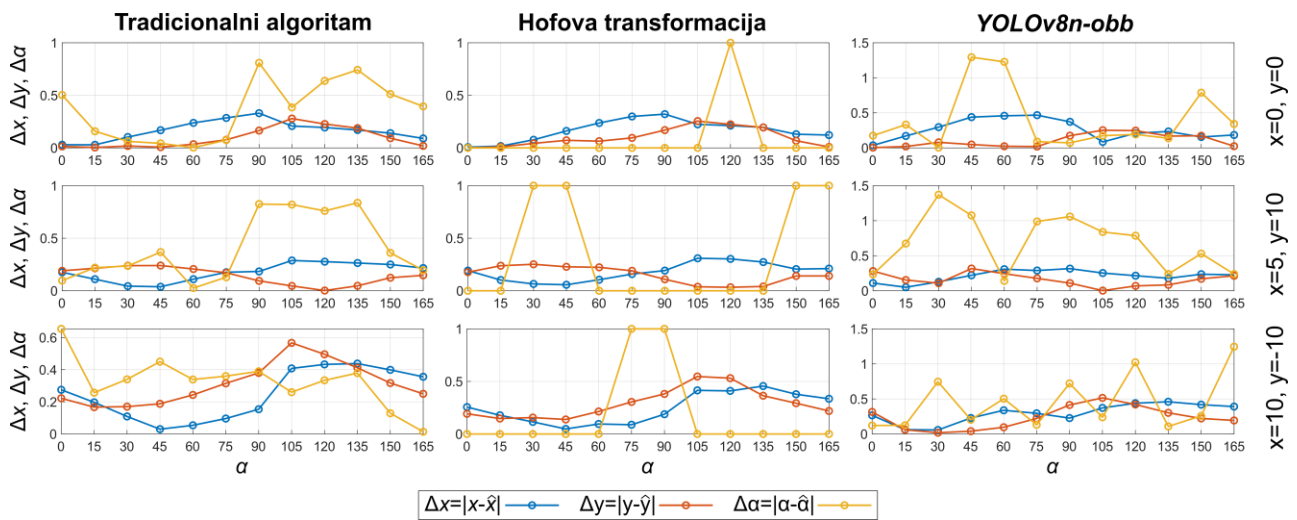
Može se primetiti da je primenom tradicionalnog algoritma od ukupno 12 slučajeva, ostvareno 6 najboljih rezultata (za svaku statističku karakteristiku bar po jedan najbolji rezultat). Primenom algoritma baziranog na Hofovoj transformaciji postignuto je 6 najboljih rezultata (uz idealan učinak kada je u pitanju minimalna greška), dok je predikcija dobijena *YOLOv8n-obb* modelom bila najbolja samo u slučaju maksimalne greške y koordinate (max_y). Iako su tradicionalni algoritam i algoritam baziran na Hofovoj transformaciji pokazali bolje performanse u odnosu na *YOLOv8n-obb* model, treba primetiti da su razlike u većini slučajeva izuzetno male i da se na osnovu ovih rezultata ne može jasno izdvojiti jedan algoritam koji daje najbolje rezultate.

Kako bi se analizirao uticaj promene ugla α na tačnost određivanja pozicije, izabrane su tri različite pozicije definisane koordinatama x i y (slika 3). Prva pozicija predstavljala je centar dela (0, 0), druga pozicija (10, -10) je obuhvatala krajnje pozicije u pozitivnom smeru za x osu i negativnom smeru za y osu, dok je treća pozicija bila proizvoljna (5, 10) sa koordinatama na polovini i na kraju hoda radnog stola. Ukoliko se isključe pojedinačni slučajevi, može se primetiti da su vrednosti Δx i Δy prilično uniformne (nalaze se u opsegu 0-0.5 mm). Međutim, analizom $\Delta \alpha$ nije moguće uvideti jasnu zavisnost, pa se može primetiti da varijacija vrednosti x i y koordinata dovodi do naglih promena $\Delta \alpha$ (u opsegu od 0-1.45°).

Greška estimacije orijentacije nije uniformno raspoređena duž x i y ose, što se može videti na 3D dijagramima prikazanim na slici 4. U slučaju x ose, za tradicionalni algoritam i algoritam baziran na Hofovoj transformaciji, može se primetiti gotovo ista zavisnost, gde je Δx najmanja kada je $x=0$, dok bilo kakva promena x koordinate dovodi do povećanja Δx (slika 4a). Slična zavisnost prisutna je i kod *YOLOv8n-obb* algoritma, s tim što je Δx najmanja za $x=5$. Promena y koordinate nije izazvala značajan uticaj na Δx ni u jednom slučaju.

Po analogiji na x osu i grešku Δx , varijacija vrednosti y izazvala je promenu Δy čija je najmanja vrednost postignuta za $y=0$ (za sva tri algoritma). Povećanje ili smanjenje koordinate y prouzrokovalo je linearno povećanje Δy , dok je varijacija koordinate x imala zanemarljiv uticaj (slika 4b).

Na kraju, određena zavisnost promene koordinata x i y na grešku $\Delta \alpha$ može se videti samo u slučaju tradicionalnog algoritma (slika 4c). Naime, smanjenje vrednosti x i povećanje vrednosti y uzrokovale su i povećanje $\Delta \alpha$, pa je najveća vrednost $\Delta \alpha$ ostvarena u poziciji (-10, 10). U ostala dva slučaja, ne može se uvideti jasna zavisnost, a najveće vrednosti $\Delta \alpha$ ostvarene su u poziciji (-10, 10) za algoritam baziran na Hofovoj transformaciji, odnosno u poziciji (-5, 10) u slučaju *YOLOv8n-obb* algoritma.



Slika 3. Uticaj promene ugla α na tačnost detekcije pozicije i orijentacije dela

U cilju procene mogućnosti primene algoritama u realnom vremenu, izvršena je njihova implementacija na mikroprocesorskom sistemu *Raspberry Pi 4 Model B* sa 8GB RAM. Konekcija između kamere i *Raspberry Pi* računara ostvarena je Ethernet protokolom, dok je upravljanje radom kamere i slanje odgovarajućih komandi izvršeno putem Telnet protokola. Preuzimanje generisane slike sa kamere na *Raspberry Pi* računar ostvareno je korišćenjem FTP (engl. *File Transfer Protocol*) protokola.

Vreme koje je svakom algoritmu potrebno da detektuje poziciju i orijentaciju dela na sceni biće korišćeno kao pokazatelj njihove računске složenosti. Vremena prikazana u nastavku predstavljaju aritmetičke sredine dobijene iz deset uzastopnih merenja na *Raspberry Pi* računaru:

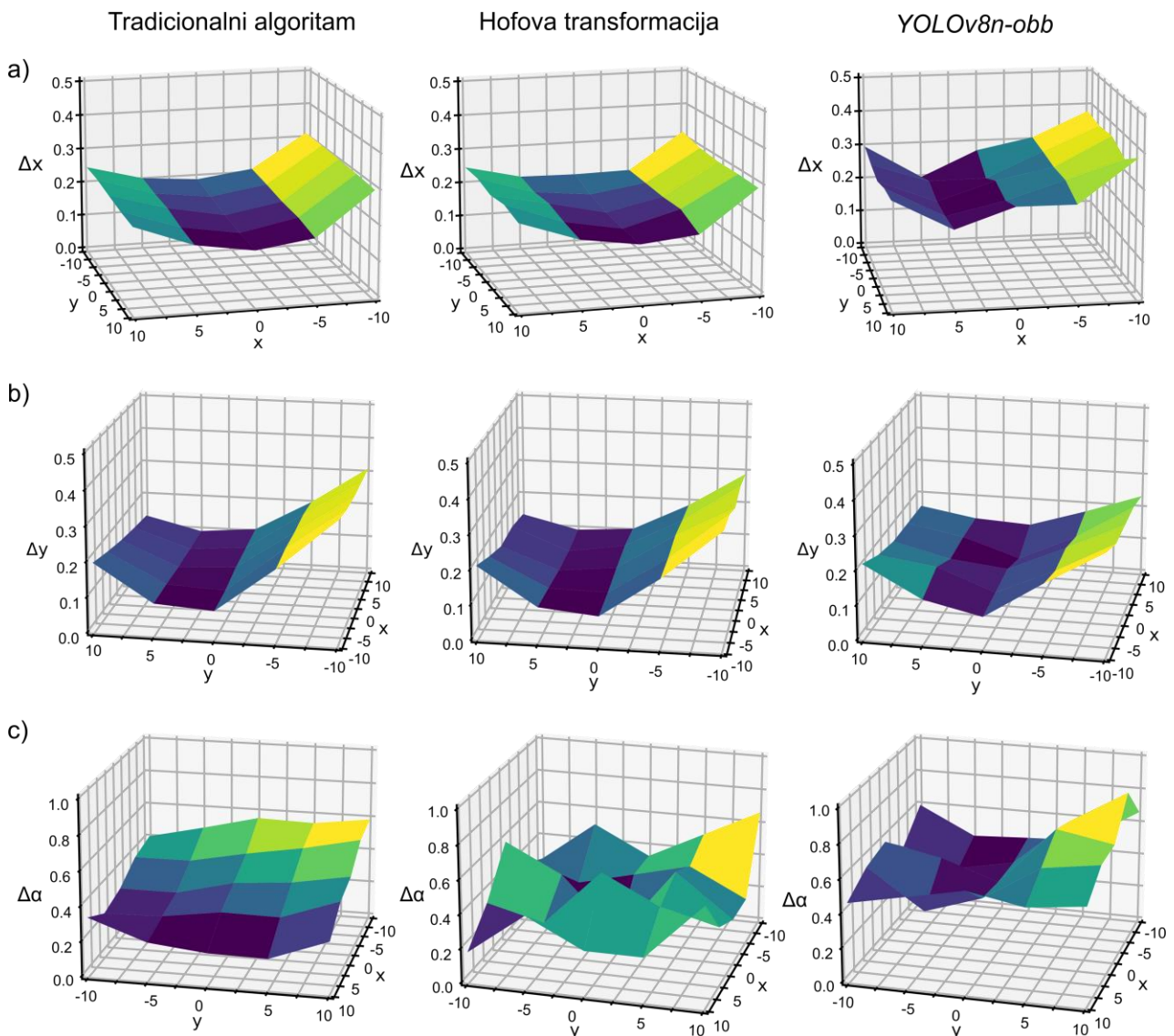
- 1) Tradicionalni algoritam: 0,24434 [s]
- 2) Algoritam baziran na Hofovoj transformaciji: 1,18019 [s]
- 3) *YOLOv8n-obb*: 1,72114 [s]

Analizom prikazanih rezultata, može se primetiti da je tradicionalnom algoritmu potrebno najmanje vremena za detekciju pozicije i orijentacije dela, što ga sa aspekta brzine čini najefikasnijim algoritmom. Sa druge strane, *YOLOv8n-obb* algoritam pokazao se kao najsporiji, bilo mu je potrebno čak 7 puta više vremena u poređenju sa tradicionalnim algoritmom.

5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada ispitane su i poređene performanse detekcije pozicije i orijentacije izabranog dela korišćenjem ukupno tri algoritma. Razvijeni su tradicionalni algoritam i algoritam baziran na Hofovoj transformaciji, dok je *YOLOv8n-obb* model kroz proces finog podešavanja prilagođen za rad sa izabranim delom. Za evaluaciju performansi algoritama korišćeno je ukupno 300 slika dobijenih sa realne eksperimentalne instalacije. Poređenje performansi algoritama izvršeno je pomoću četiri statističke karakteristike. Postignuti rezultati za sva tri algoritma odgovaraju zahtevima industrijskih aplikacija poput robotskog hvatanja i manipulacije. Iako su u nekim slučajevima razlike zanemarljivo male, dobijeno je da su najbolje performanse ostvarene primenom tradicionalnog algoritma. Pored statističkih karakteristika koje se zasnivaju na razlici realne vrednosti i estimacije, poređenje algoritama izvršeno je i sa aspekta računске složenosti. Naime, svaki od algoritama implementiran je na *Raspberry Pi* računaru gde je mereno vreme potrebno za određivanje pozicije i orijentacije izabranog dela. Tradicionalni algoritam pokazao se kao najbrži sa vremenom od 0,24434 sekunde.

Pravci daljeg istraživanja biće usmereni na detekciju pozicije i orijentacije više objekata (sa kompleksnijom geometrijom) na sceni. Pored toga, buduća istraživanja mogu podrazumevati implementaciju algoritama na realnim sistemima za automatsku montažu.



Slika 4. Uticaj promene vrednosti x i y na tačnost: a) Δx ; b) Δy ; c) $\Delta \alpha$

6. LITERATURA

- [1] Zou, Z., Chen, K., Shi, Z., Guo, Y., Ye, J.: *Object detection in 20 years: A survey*, Proceedings of the IEEE, Vol. 111, No. 3, pp. 257-276, 2023.
- [2] Lowe, D.G.: *Object recognition from local scale-invariant features*, Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision, Vol. 2, pp. 1150-1157, IEEE, Corfu, Greece, 1999.
- [3] Bay, H.: *Surf: Speeded up robust features*, in 9th European Conference on Computer Vision (ECCV 2006), Vol. 3951, Springer Berlin, Graz, Austria, 2006, doi: https://doi.org/10.1007/11744023_32
- [4] Hough, P.V.: *Method and means for recognizing complex patterns*, U.S. Patent, No. 3,069,654, 1962.
- [5] Chen, H., Gao, T., Qian, G., Chen, W., Zhang, Y.: *Tensored generalized Hough transform for object detection in remote sensing images*, IEEE J of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 13, pp. 3503-3520, 2020.
- [6] Jiao, J., Wang, X., Deng, Z., Cao, J., Tang, W.: *A fast template matching algorithm based on principal orientation difference*, Int J of Adv Robotic Systems, Vol. 15, No. 3, article 1729881418778223, 2018.
- [7] Ultralytics, YOLO (2015), [Online], Available: <https://docs.ultralytics.com/models/>, datum pristupa: Oktobar, 2024.
- [8] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.Y., Berg, A.C.: *SSD: Single shot multibox detector*, Proceedings of the 14th European Conf on Computer Vision (ECCV), pp. 21-37, Amsterdam, Netherlands, Springer, 2016.
- [9] Yao, K., Ortiz, A., Bonnin-Pascual, F.: *A DCNN-based arbitrarily-oriented object detector with application to quality control and inspection*, Comput. Ind., Vol. 142, article 103737, 2022.

- [10] Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J.: *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*, Proceedings of the IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 580-587, IEEE, USA, 2014.
- [11] Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J.: *Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks*, IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, Vol. 39, No. 6, pp. 1137-1149, 2016.
- [12] Mouzenidis, P., Louros, A., Konstantinidis, D., Dimitropoulos, K., Daras, P., Mastos, T.: *Multi-modal variational faster r-cnn for improved visual object detection in manufacturing*, Proceedings of the IEEE/CVF Int Conf on Computer Vision, pp. 2587-2594, IEEE/CVF, Montrael, Canada, 2021.
- [13] Cognex, In-Sight 2000 Vision Sensors, 2024, <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-sensors/in-sight-2000-vision-sensors>. datum pristupa: Oktobar, 2024.
- [14] Cognex, In-Sight Explorer Software, 2024, <https://support.cognex.com/en/downloads/in-sight/software-firmware>. datum pristupa: Oktobar, 2024.
- [15] Suvajac, Ž., *Poređenje algoritama za detekciju pozicije i orijentacije izabranog dela korišćenjem sistema veštačkog gledanja*, master rad, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, 2024.
- [16] Vernon D.: *Image analysis, Machine Vision – Automated Visual Inspection and Robot Vision*, pp. 118-139, Prentice-Hall, New York, USA, 1991.
- [17] Terven, J., Córdova-Esparza, D.M., Romero-González, J.A.: *A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS*, Mach Learn Knowl Extr, Vol. 5, No. 4, pp. 1680-1716, 2023.
- [18] Ioffe, S., Szegedy, C.: *Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift*, in 32nd International conf. on machine learning, JMLR, pp. 448-456, Lille, France, 2015.

Suvajac, Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR OBJECT POSITION AND ORIENTATION DETECTION IN THE COMPUTER VISION SYSTEMS

Abstract: *Automated assembly holds a key role in today's manufacturing by offering high precision, improved efficiency, and reduced production costs. Applications that include manipulation and mating often require information about object position and orientation. In automated systems, such information is provided by computer vision-based systems that employ different techniques for image processing and analysis. Although traditional techniques have proven to be well-performing, robust, and time-efficient in practice, their performance in more complex environments is often limited. On the other hand, artificial intelligence (AI) techniques, particularly neural networks through deep learning (DL), offer significant performance improvements in complex applications, but often at the cost of delays that are not suitable for real-time applications. In this paper, computer vision-based systems were developed to detect the position and orientation of a selected part using both traditional and AI-based techniques. The performance comparison of these techniques was conducted using several different criteria.*

Key words: *computer vision-based systems, image analysis, Hough transform, YOLOv8-obb*



MODERNIZACIJA PROIZVODNE OPREME U MSP KROZ INTEGRACIJU NAPREDNIH REŠENJA UPRAVLJAČKE ELEKTRONIKE

Rezime

U eri digitalizacije, mala i srednja preduzeća (MSP) se suočavaju sa značajnim izazovima usled zastarelosti proizvodne opreme koja ne može da odgovori savremenim zahtevima poslovanja. Preduzeća koja se bave mašinskom obradom metala, drveta i ostalih materijala karakteriše značajan udeo opreme starije generacije za koju se smatra da je neupotrebljiva sa aspekta savremenih trendova u oblasti proizvodnje. Cilj ovog rada je razmatranje mogućnosti modernizacije postojeće proizvodne opreme starije generacije, sa posebnim naglaskom na CNC mašine, pomoću prikaza primera iz prakse. Modernizacija proizvodne opreme starije generacije kao finansijski isplativo rešenje ostvaruje brojne prednosti u vidu produženja radnog veka mašina, značajnog poboljšanja performansi, održanja konkurentnosti na tržištu i sl.

Ključne reči: modernizacija, revitalizacija, proizvodna oprema, CNC mašine, MSP, zastarelost mašina

1. UVOD

Obrada materijala pomoću alatnih mašina, upotreba numerički kontrolisanih mašina, odnosno CNC (eng. computer numerically controlled), primena CAM (eng. computer-aided manufacturing) tehnologija je izuzetno široka oblast koja zahteva kako akademsko znanje tako i inženjersko iskustvo. Nemoguće je biti ekspert koji bi bio u stanju da pokrije sve ove oblasti, ali sa druge strane mašinski inženjer koji radi u proizvodnji bi trebalo da bude upoznat sa osnovama prethodno navedenih oblasti, ali i sa ekonomskim aspektom procesa proizvodnje. Upravljački elektronski sistemi na CNC mašinama su uglavnom izvan interesovanja inženjera koji rade u proizvodnji obzirom da je kod novih mašina taj deo posla gotovo isključivo odgovornost isporučioaca opreme. Ovaj rad pokušava da napravi iskorak u smeru ohrabivanja inženjera da aktivnije krenu u analizu sistema za upravljanje CNC mašina, a kasnije i u mogućnost njene modernizacije posebno kod mašina starije generacije.

U savremenom industrijskom okruženju, koje odlikuje razvoj novih inovativnih tehnologija, mala i srednja preduzeća (MSP) suočavaju se sa značajnim izazovom održavanja konkurentnosti na svetskom tržištu. Usled visokih finansijskih izdataka za nabavku novih mašina u MSP sve veća pažnja se posvećuje revitalizaciji postojećih mašina, kao alternativni prihvatljivoj sa ekonomskog i ekološkog aspekta [1].

U izveštaju [2] se navodi da je prosečan broj zaposlenih u MSP koja se bave mašinskom obradom u EU u 2017. godini iznosio 106. Takođe se navodi velika raznovrsnost mašina u razmatranim preduzećima. Prosečna starost instaliranih mašina u Italiji 2014. godine je bila 12,8 godina [2]. U Nemačkoj je 2015. godine prosečna starost CNC mašina bila 10,5 godina, dok je prosečna starost ostalih mašina bila 19,7 godina [2,3]. MSP u našoj zemlji, ali i u okruženju, koja se bave mašinskom obradom metala, drveta i drugih materijala, uglavnom u svojim pogonima imaju značajan udeo opreme starije generacije. Usled nedostatka pristupa izvorima koji bi pomenutu činjenicu potvrdili, naveden stav može da se izvede na osnovu iskustva autora ovog rada. Razmatrajući zastupljenost CNC mašina može se reći da MSP u našoj zemlji u svojim pogonima još uvek imaju proizvodnu opremu koja potiče iz osamdesetih godina prošlog veka do početka XXI veka. Sistemi upravljanja na pomenutim mašinama su gotovo bez izuzetka zastareli i ne mogu da odgovore savremenim zahtevima upravljanja. Postavlja se pitanje, da li je nužno ulaziti u nabavku savremenih CNC mašina u cilju praćenja savremenih trendova u ovoj oblasti, ili je moguće izvršiti modernizaciju postojeće proizvodne opreme? Pre svega imajući u vidu intenzivan napredak u razvoju elektronike, pogotovo u oblasti mikrokontrolera i upravljačkih sistema baziranih na njihovoj upotrebi. Sa druge strane uočljiv je problem servisiranja opreme starije generacije usled nedostatka originalnih, pre svega elektronskih sklopova.

Menadžment u MSP se suočava sa dilemom da li je neophodno ulagati finansijska sredstva u nabavku

¹⁾ Prof. dr Petar Todorović, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, (petar@kg.ac.rs), Prof. dr Ivan Mačužić, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, (ivanm@kg.ac.rs), Marija Savković, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, (marija.savkovic@kg.ac.rs)

novih, savremenih CNC mašina kako bi se pratili aktuelni trendovi u industriji, ili je moguće modernizovati postojeće mašine nadogradnjom hardvera i opremanjem novim upravljanjem i na taj način poboljšati njihove performanse [4,5]. Pre donošenja konačne odluke potrebno je pažljivo razmotriti odnos troškova i koristi i potencijalne prednosti modernizacije u odnosu na zamenu postojećih mašina novim.

Zastarelost mašina je povezana sa njihovom sposobnošću da obavljaju funkciju u skladu sa željenim specifikacijama. Ovo stanje se može odložiti revitalizacijom [6]. Revitalizacija ili retrofit se definiše kao proces uvođenja promena u tradicionalne, konvencionalne mašine i sisteme kako bi se povećala efikasnost, produžio radni vek mašina, minimizirala finansijska ulaganja i smanjili rizici [7,8]. Termin „retrofit“ se odnosi na bilo koju vrstu modernizacije, nadogradnje i adaptacije mašina [9].

U ovom radu se razmatra mogućnost modernizacije (retrofit) postojećih CNC mašina što u širem kontekstu može da doprinese ostvarivanju više ciljeva. Prvi cilj je korišćenje postojeće proizvodne opreme, za koju obično vlada mišljenje da je gotovo neupotrebljiva sa aspekta savremenih trendova u oblasti proizvodnje (nemogućnost povezivanja sa računarom, manjak memorije, zastareo prikaz i praćenje rada na monitorima starije generacije i sl.). Sa druge strane, mašine starije generacije su, gotovo bez izuzetka, masivne, stabilne, sa izuzetno krutom nosećom konstrukcijom što može da se posmatra kao njihova značajna komparativna prednost. Ugradnjom savremenih upravljačkih komponenti i sistema možemo da očekujemo da će pomenute mašine po upotrebljivosti, brzini kretanja, radnim režimima i fleksibilnosti u nekim slučajevima moći da prevaziđu performanse svojevremeno propisane od samog proizvođača.

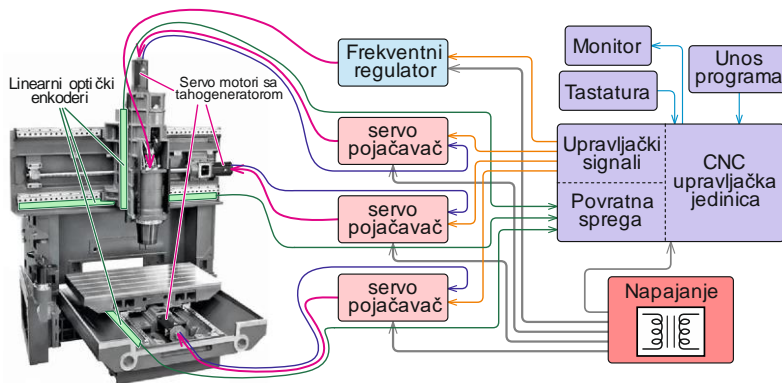
Drugi cilj je korišćenje upravljačke elektronike domaćih proizvođača. Time bi bila smanjena zavisnost od stranih dobavljača opreme ili njihovih predstavnika, što može značajno da utiče na rokove isporuke opreme, kao i niže cene modernizacije proizvodne opreme. Oprema domaćih proizvođača podrazumeva uputstva na srpskom jeziku, obezbeđen servis, što može da donese prevagu u donošenju odluke o izboru upravljačke elektronike.

Treći cilj bi bio formiranje stručnih timova koji bi bili obučeni za realizaciju poslova modernizacije proizvodne opreme. Pomenuti cilj ima širi društveni značaj kroz podizanje opšteg znanja iz navedene oblasti, zatim obezbeđivanje dodatnog angažovanja postojećih stručnjaka ali i stvaranje prostora za usavršavanje i zapošljavanje novih stručnjaka.

2. UPRAVLJAČKI SISTEMI CNC MAŠINA

Najuopštenije posmatrano, CNC mašina se sastoji od tri osnovne celine: mehaničkog dela mašine, izvora kretanja (motora i elektronike za njihov pogon) i CNC upravljačke jedinice. Ako malo detaljnije razmotrimo upravljački sistem CNC mašine (slika 1), možemo da kažemo da se uglavnom sastoji od sledećih modula:

- CNC upravljačke jedinice,
- Servo pojačavača (drajvera) koji upravljaju AC ili DC servo motorima,
- AC ili DC servo motora za pogon po osama,
- Mernih sistema za određivanje pozicije po osama, obično optički linearni enkoderi.
- Izvora napajanja za AC ili DC servo motore koji se koriste za pogon po osama CNC mašine,
- Motora i sistema za pogon obradne glave,
- Magacina sa alatima i sistema za izmenu alata,
- Pomoćnih sistema, krajnjih prekidača, sistema za podmazivanje, sistema za hlađenje i dr.

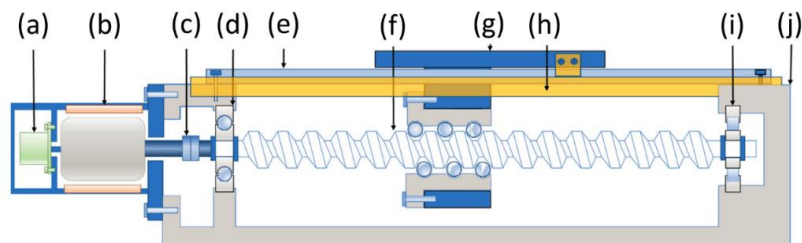


Slika 1. Blok dijagram sistema upravljanja CNC mašine

Kod CNC mašina starije generacije upravljačke jedinice su realizovane sa specijalizovanim računarima starije generacije i ovaj modul upravljačkog sistema je često najkritičniji i ograničavajući za dalje korišćenje celog sistema upravljanja. Pomenuti modul interpretira standardne G i M komande. Na osnovu pozicija po

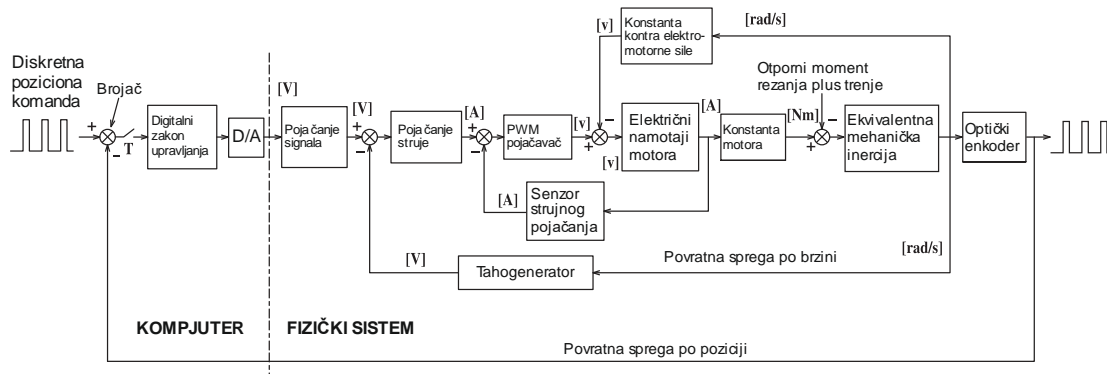
osama koje obično dobija sa linearnih enkodera, CNC upravljačka jedinica generiše upravljački signal u opsegu $\pm 10V$ (tzv. analogna tehnologija) ili preko posebnog komunikacionog protokola (tzv. digitalna tehnologija) za upravljanje po osama. CNC upravljačka jedinica je gotovo uvek predmet zamene tokom postupka modernizacije sistema upravljanja na CNC mašinama starije generacije.

Mehaničko-elektronski sklop koji obezbeđuje pogon po osama treba da savlada kako statička, tako i dinamička opterećenja na CNC mašini. Izvori statičkog opterećenja, tj. otpora pri kretanju, su otpori usled trenja na linearnim vođicama, navojnom vretenu, kotrljajnim ležajevima i sl. Dinamička opterećenja nastaju usled zaletanja i usporavanja pokretnih masa po osama mašine, ali i usled promenljivih otpora rezanja. Pogonski servo motori kao i njihova upravljačka elektronika (servo pojačavači) moraju da budu dimenzionisani tako da obezbede dovoljan obrtni moment kako bi savladali pomenuta opterećenja prilikom obrade predmeta obrade tokom životnog veka CNC mašine. Na slici 2. je dat tipičan izgled sklopa koji obrtno kretanje servo motora pretvara u pravolinijsko kretanje radnog stola CNC mašine, obezbeđuje precizno pozicioniranje, kao i povratnu informaciju upravljačkom sistemu CNC mašine o trenutnoj poziciji preko obrtnog enkodera na servo motoru i linearnog enkodera na radnom stolu [10,11].



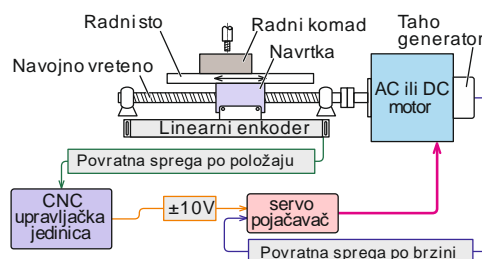
Slika 2. Mehanička struktura jedne linearne servo ose CNC mašine, a) rotacioni inkrementalni enkoder, b) servo motor, c) spojnica, d) ležaj, e) linearna vođica, f) navojno vreteno i navrtka, g) radna površina stola, h) linearni optički enkoder, i) ležaj i j) ram mašine [10,11]

Kod mašina starije generacije pogonski servo motori za pogon po osama su u najvećem broju slučajeva motori jednosmerne struje sa permanentnim magnetima. Ređe su zastupljeni AC servo sistemi. Blok dijagram uobičajenog servo-upravljačkog sistema za pogon po osama jedne CNC mašine dat je na slici 3.



Slika 3. Blok dijagram servo-upravljačkog sistema jedne ose CNC mašine [11]

Detaljnija analiza upravljačkog sistema sa slike 3. će u daljem tekstu biti izostavljena jer bi prevazilazila obim ovog rada. Potrebno je primetiti da upravljački sistem ima dve povratne sprege, po brzini i po poziciji. Povratnu spregu po brzini obezbeđuje tahogenerator, a po poziciji linearni optički enkoder. Postoje i izvesna odstupanja u praktičnim realizacijama pojedinih proizvođača upravljačkih sistema (datim na slici 3.) na CNC mašinama starije generacije, što u značajnoj meri može da oteža postupak modernizacije CNC mašine. Pojednostavljeni prikaz servo-upravljačkog sistema sa slike 3. dat je na slici 4.



Slika 4. Sistem servo-upravljanja po jednoj osi

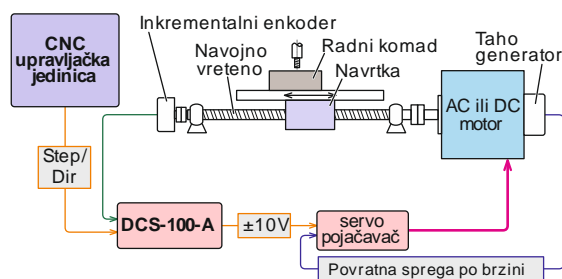
Kod mašina starije generacije CNC upravljačka jedinica u zavisnosti od G koda koji interpretira, u

najvećem broju slučajeva generiše analogni upravljački signal $\pm 10V$ koji preko servo pojačavača određuje brzinu obrtanja servo motora. Brzinska povratna sprega u servo pojačavaču je zatvorena pomoću tahogeneratora koji broj obrtaja servo motora pretvara u napon proporcionalan broju obrtaja servo motora (slika 4). Povratna sprega po položaju se zatvara u samoj CNC upravljačkoj jedinici i neophodna je za ostvarenje programiranog pozicioniranja ili interpolacije. Različite nesavršenosti prenosnika (zazori u ležajevima navojnog vretena ili u paru vreteno/navrtka) predstavljaju poremećaj, koji dovodi do grešaka pozicioniranja i interpolacije. Uobičajena opcija, čak i kod starijih upravljačkih jedinica je softverska kompenzacija ovih zazora, što zahteva njihovo merenje i upisivanje u vidu odgovarajućih parametara u sistemski softver upravljačke jedinice.

3. PRIMERI MODERNIZACIJE UPRAVLJANJA CNC MAŠINA STARIJE GENERACIJE

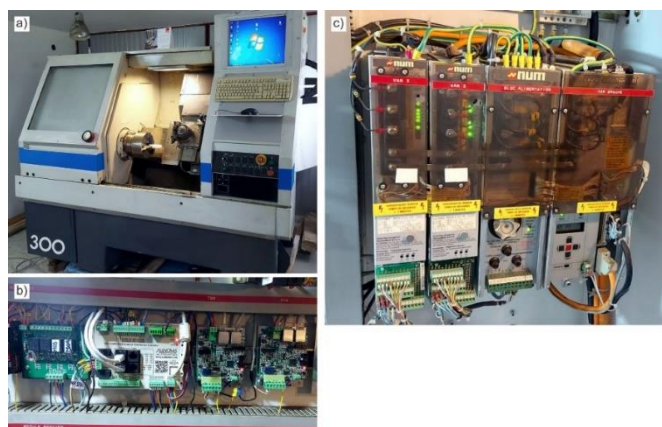
U ovom radu će kroz reprezentativne primere biti date ideje o mogućim pristupima modernizaciji CNC mašina starije generacije. Pomenuti primeri modernizacije CNC mašina su razmatrani u članku [12]. Kao osnova za modernizaciju CNC mašina u datim primerima korišćena je oprema domaćeg proizvođača elektronike za upravljanje CNC mašinama [13]. Već je navedeno da je CNC upravljačka jedinica sistem koji najčešće otkáže ili zastari, tako da je on najčešće predmet zamene. CNC upravljačke jedinice novije generacije dominantno generišu digitalne signale (Step/Dir, CW/CCW i sl.) za upravljanje servo drajverima. Pored pomenutih tipova digitalnih upravljačkih signala, u industrijskom okruženju se koriste različiti standardni protokoli za upravljanje servo sistemima (EtherCAT, Modbus i dr.) i oni neće biti razmatrani u ovom radu.

Ukoliko su postojeći servo pojačavači ispravni, poželjno je da se oni zadrže obzirom na njihovu robusnu konstrukciju. Za konverziju digitalnog upravljačkog signala sa savremenih CNC upravljačkih jedinica (obično u formi Step/Dir ili CW/CCW) u analogni signal $\pm 10V$ koji je potreban za servo pojačavače starije generacije može se iskoristiti servo drajver sa analognim izlazom DCS-100-A [14]. Drajver je baziran na 16-to bitnom mikrokontroleru u koji je ugrađen PID upravljački algoritam i namenjen je za retrofit CNC mašina starije generacije.



Slika 5. Sistem servo-upravljanja po jednoj osi

Jedan od mogućih pristupa korišćenja servo drajvera sa analognim izlazom DCS-100-A je prikazan na slici 5. Signal sa dodatnog inkrementalnog enkodera, koji je postavljen na navojnom vretenu kako bi se obezbedila povratna sprega po ugaonoj poziciji navojnog vretena, se vodi u servo drajver DCS-100-A. Na osnovu Step/Dir komandi sa CNC upravljačke jedinice i pozicije koju dobija sa inkrementalnog enkodera, a u zavisnosti od podešenih parametara PID regulatora, servo drajver DCS-100-A generiše upravljački analogni signal $\pm 10V$ koji je neophodan za upravljanje originalnim servo pojačavačem.



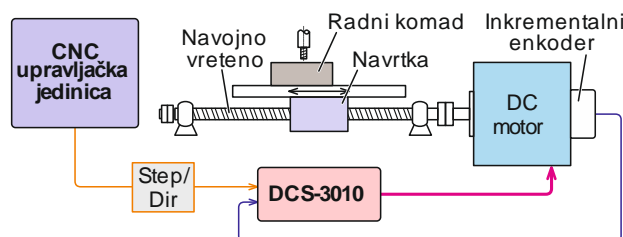
Slika 6. Modernizacija CNC struga, a) izgled CNC struga nakon modernizacije, b) ugrađeni servo drajveri DCS-100-A i ISO-USB-BOX kontroler kretanja i c) originalni servo pojačavači

Slika 6. daje primer modernizacije CNC struga Somab Unimab 300 primenom servo drajvera DCS-100-A,

pri čemu su na strugu zadržani postojeći servo pojačavači, servo motori, kao i originalni izvor napajanja. Kao nova CNC upravljačka jedinica je upotrebljen 6-osni ISO-USB-BOX kontroler kretanja [15]. Kontroler kretanja je baziran na 32-bitnom mikrokontroleru i ima interno ugrađen izolacioni USB port čime se postiže galvanska izolacija između kontrolera kretanja i računara koji se koristi za upravljanje. Time je značajno povećava pouzdanost sistema upravljanja na CNC mašini u zahtevnom industrijskom okruženju.

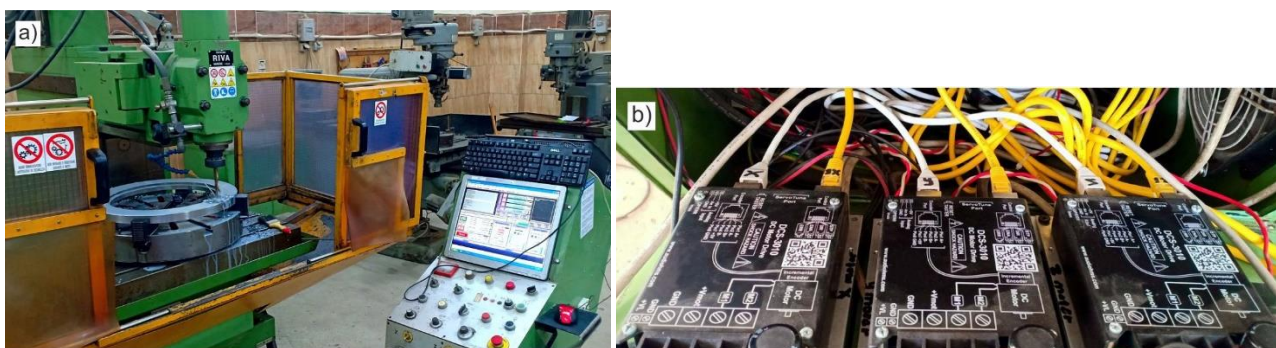
Kada na CNC mašini starije generacije nije moguće iskoristiti originalne servo pojačavače za pogon servo motora, a ukoliko je postojeći sistem upravljanja realizovan sa servo motorima jednosmerne struje sa stalnim magnetom, tada je za modernizaciju CNC mašine moguće iskoristiti DC servo drajver DCS-3010 [16]. Servo drajver je mikrokontrolerski PWM drajver namenjen za upravljanje DC motorima sa stalnim magnetom napona napajanja do 115 VDC (opciono do 180 VDC) i za maksimalne struje do 30A. Drajver je baziran na 16-to bitnom mikrokontroleru u koji je ugrađen PID upravljački algoritam. Kao povratna sprega po poziciji koristi se inkrementalni enkoder [16].

Modernizacija sistema upravljanja na CNC mašini starije generacije pomoću servo drajvera DCS-3010 prikazana je blok dijagramom na slici 7. Umesto tahogeneratora koji je u najvećem broju slučajeva inicijalno postavljen na DC motoru, potrebno je postaviti inkrementalni enkoder kako bi servo drajver DCS-3010 imao informaciju o ugaonoj poziciji DC motora, odnosno navojnog vretena.



Slika 7. Servo drajver DCS-3010 u sistemu upravljanja

Primena servo drajvera DCS-3010 data je na primeru modernizacije CNC glodalice Rigiva RS80 (slika 8) [17]. Osnovne karakteristike glodalice su: površina radnog stola 1200x460 mm, radni prostor 600x500x400 mm, prihvat nosača alata ISO 40. Potrebno je napomenuti da je povratnu spregu po poziciji na servo drajveru DCS-3010 moguće zatvoriti i preko linearnog inkrementalnog enkodera, koji bi se koristio umesto obrtnog inkrementalnog enkodera, ali je u tom slučaju potrebno da u mehaničkom sistemu prenosa od DC servo motora do radnog stola postoje jako mali zazori. U slučaju postojanja većeg zazora, PID upravljački algoritam ugrađen u servo drajver neće biti u stanju da izvrši kompenzaciju postojećeg zazora, što u krajnjem slučaju može da dovede do nestabilnog rada upravljačkog sistema. Stoga je potrebno posebnu pažnju posvetiti postupku podešavanja parametara upravljanja novo ugrađenih servo drajvera.



Slika 8. Modernizacija CNC glodalice Rigiva RS80, a) izgled CNC glodalice nakon modernizacije i b) ugrađeni servo drajveri DCS-3010

U obe varijante primenjenih enkodera (obrotni/linearni) zazor u prenosniku je krajnje nepoželjna pojava. U varijanti direktno praćenja pozicije pomoću linijskog enkodera očekuje se veća tačnost pozicioniranja i interpolacije. Pored neophodnih ispitivanja na osnovu kojih se vrši iterativno podešavanje osnovnih parametara upravljačkih petlji brzine i pozicije, poželjno je i eksperimentalno odrediti zazore po servo osama, kako bi se nakon unošenja tih vrednosti, u vidu odgovarajućih parametara, stvorile pretpostavke da upravljačka jedinica vrši njihovu softversku kompenzaciju tokom rada ovih osa.

4. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrane mogućnosti modernizacije proizvodnih mašina starije generacije u MSP. Modernizacija podrazumeva integraciju savremenih upravljačkih sistema u robusne mašine i opremu starije generacije koji su već prisutni u proizvodnim pogonima, omogućavajući postizanje optimalne ravnoteže između modernizacije i zadržavanja funkcionalnih karakteristika mašina. Prednosti se ogledaju u povećanju efikasnosti, funkcionalnosti, produženju radnog veka i dr. Za MSP, koja često nemaju mogućnosti za veća finansijska ulaganja u nove mašine i opremu, modernizacija postojeće proizvodne opreme predstavlja održiv izbor u skladu sa principima cirkularne ekonomije. Šire posmatrano, organizovaniji pristup modernizaciji postojeće proizvodne opreme, mogao bi da doprinese ostvarivanju više ciljeva. Prvi cilj je korišćenje postojeće proizvodne opreme, što je pre svega ekonomski isplativo. Drugi cilj je korišćenje opreme domaćih proizvođača upravljačke elektronike i konačno treći cilj bi bio formiranje stručnih timova koji bi bili sastavljeni od domaćih inženjera i tehničara koji bi bili obučeni za realizaciju poslova modernizacije proizvodne opreme.

5. LITERATURA

- [1] T. Lins, R.A.R. Oliveira, Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0, *Comput. Ind. Eng.* 139, 2020.
- [2] The European machine tool sector and the circular economy, European Association of the Machine Tool Industries and related Manufacturing Technology, 2019.
- [3] Živanović, S., et. al., Revitalizacija horizontalne bušilice glodalice LOLA HBG80 upravljanjem otvorene arhitekture na LinuxCNC platformi, 43. JUPITER konferencija, Beograd 2022., pp 3.1-3.12
- [4] D. H. Arjoni, et. al., Manufacture equipment retrofit to allow usage in the industry 4.0, in 2017 2nd international conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC). IEEE, 2017., pp 155-161
- [5] K. A. Nsiah, et. al., An open-source toolkit for retrofit industry 4.0 sensing and monitoring applications, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2018.
- [6] Edwards, K L., Systematic Retrofit Design for Manufacture - Critical Component Substitution in Machine Design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218 (1), 2004, pp 129-133.
- [7] J.I. García, et. al., Digital retrofit: a first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises, *Proc. Inst. Mech. Eng. B* 234, 2020, pp. 1156-1169
- [8] Guerreiro, B.V., Lins, R.G., Sun, J., Schmitt, R., Definition of smart retrofitting: first steps for a company to deploy aspects of industry 4.0, *Advances in Manufacturing*, 2018., pp. 161-170
- [9] Du, Yanbin, Huajun Cao, Fei Liu, Congbo Li, and Xiang Chen, An Integrated Method for Evaluating the Remanufacturability of Used Machine Tool, *Journal of Cleaner Production* 20 (1), 2012, pp. 82 - 91
- [10] Tero Kaarlela, Tero Niemi, Tomi Pitkääho, Jari Harjula, Retrofitting enables sustainability, Industry 4.0 connectivity, and improved usability, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 9, 2024
- [11] Yusuf Altintas, *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Cambridge University Press, 2012.
- [12] Petar Todorović, Staro, a opet novo. Šta nam je za to potrebno? *Mehatronika*, 01/24, 2024.
- [13] www.audiohms.com [pristup: septembar 2024.]
- [14] <http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/servo-drajver-dcs-100-a-v3> [pristup: septembar 2024.]
- [15] <http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/ulazno-izlazne-kartice/kontroleri-kretanja/iso-usb-mc-kontroler-kretanja> [pristup: septembar 2024.]
- [16] <http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/dc-servo-drajver-dcs-3010> [pristup: septembar 2024.]
- [17] <http://www.audiohms.com/sr/iskustva/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/item/210-retrofit-cnc-rigiva> [pristup: septembar 2024.]

Todorović P., Mačužić I., Savković M.

MODERNIZATION OF PRODUCTION EQUIPMENT IN SME THROUGH THE INTEGRATION OF ADVANCED CONTROL ELECTRONICS SOLUTIONS

Abstract: *In the era of digitization, small and medium-sized enterprises (SMEs) face significant challenges due to the obsolescence of production equipment that cannot meet modern business requirements. Enterprises engaged in mechanical processing of metal, wood and other materials are characterized by a significant share of older generation equipment, which is considered to be unusable from the aspect of modern trends in the field of production. The aim of this paper is to consider the possibility of modernizing the existing production equipment of the older generation, with special emphasis on CNC machines, by means of examples from practice. Modernization of production equipment of the older generation as a financially profitable solution achieves numerous advantages in the form of extending the working life of machines, significantly improving performance, maintaining competitiveness on the market, etc.*

Key words: *modernization, revitalization, production equipment, CNC machines, SMEs, machine obsolescence*



Trifunović, M., Madić, M., Janković P.¹⁾

DEVELOPMENT OF EMPIRICAL MODEL FOR ANALYSIS OF CHIP COMPRESSION RATIO IN MEDIUM TURNING OF C45E STEEL²⁾

Abstract

Given the multiple significance of chip compression ratio (CCR) for machinability assessment, this study focuses on the analysis of CCR in medium longitudinal turning of C45E steel. The standard 2³ full factorial design was used to arrange three main cutting parameters, i.e., depth of cut, feed rate and cutting speed at two levels. Based on experimental data, a quasi-linear CCR prediction model was developed for better understanding of the main and interaction effects of the considered cutting parameters. The obtained results suggest the dominant main effect of the depth of cut and interaction effect of the cutting speed and feed rate.

Keywords: turning, chip compression ratio, C45E, modelling

1. INTRODUCTION

Turning technology still has wide application in today's industry due to favourable cutting mechanics for a wide variety of metal materials and the fact that it is a receptive technology which can ensure high productivity and quality, along with acceptable costs [1]. Input parameters of the turning production system, alone or in interaction, affect multiple cutting phenomena during the actual cutting process, which are consequently reflected on different process performance measures, such as quality of machined surface, machining time and costs, and power consumption. In this regard, it is very important to analyse the influence of these inputs on different process outputs, model them and ultimately determine more favourable cutting regimes through optimization. A commonly considered performance measures in machining include [2]: cutting forces, power, tool wear and tool life, chip flow angle, chip curling and chip-breaking, built-up edge, cutting temperature, workpiece surface finish and surface integrity, burr formation, part distortion and accuracy, tool deflection, dynamic stability limits and thermal damage of the tool/workpiece. Therefore, numerous investigations and studies analysed the influence of inputs on surface roughness [1,3], surface integrity [4], burr formation [5], dimensional accuracy [6,7], cutting forces [8,9], part distortion [10], deflection of the cutting tool [11], tool wear [12,13], tool life [14,15], cutting temperature [16], cutting power [17], energy consumption [18], and chip formation [19-22].

Given that chip compression ratio (CCR) indicates the amount of plastic deformation that the material experiences during the chip formation process [19] and the frictional behaviour at the chip-tool interaction points [12], the analysis of the CCR in medium turning of unalloyed medium carbon steel C45E is in the focus of the present study. To this aim a 2³ factorial design was performed to define eight turning regimes with two levels of feed rate, cutting speed and depth of cut. The change in CCR was analysed using 3D surface plots for better understanding of the combined effects of input parameters.

2. EXPERIMENTAL SETUP

For the purposes of CCR prediction model development and analysis, an experimental investigation was performed. In order to determine model coefficients, three input parameters, i.e., feed rate (f), cutting speed (v)

¹⁾ prof. dr Milan Trifunović, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, (milan.trifunovic@masfak.ni.ac.rs), doc. dr Miloš Madić, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, (milos.madic@masfak.ni.ac.rs), prof. dr Predrag Janković, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, (predrag.jankovic@masfak.ni.ac.rs)

²⁾ This research was financially supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-65/2024-03/200109).

and depth of cut (a_p) were considered and varied at two levels in accordance with the classical 2^3 factorial design (Table 1). Cutting parameter ranges were selected considering machine tool characteristics, recommendations for selected cutting insert and workpiece material characteristics.

Run	f (mm/rev)	v (m/min)	a_p (mm)
1	0.142	218	1
2	0.285	218	1
3	0.142	322	1
4	0.285	322	1
5	0.142	218	3
6	0.285	218	3
7	0.142	322	3
8	0.285	322	3

Unalloyed medium carbon steel C45E (Ck45 DIN 17200) was used as workpiece material. Experimental unit was in the form of bar with a diameter of 63 mm. Cutting experiment was performed using a CORUN PCLNR 3225P 12 holder and CNMG120404-MA insert manufactured by Mitsubishi with the grade of UE6110 (coated carbide). The cutting tool geometry was as follows: rake angle of $\gamma_o = 16^\circ$ and nose radius $r_n = 0.4$ mm. The tool cutting edge angle was held constant during experimentation ($\kappa = 95^\circ$). Longitudinal turning tests were performed without coolant, in line with recent trends [23], on universal lathe machine POTISJE PA-C 30.

In order to calculate the chip compression ratio, apart from knowing the undeformed (uncut) chip thickness, which is estimated based on feed rate and tool cutting edge angle, it is necessary to experimentally measure actual chip thickness for each run. To this aim, chip thickness measurement was performed with a Mitutoyo digital micrometer (range of 0-25 mm and resolution of 1 μm). Chip shapes obtained under investigated cutting conditions are shown in Figure 1.



Figure 1. Chip shapes obtained in the experiment

3. RESULTS AND DISCUSSION

With the application of design of experiments (DOE) theory for analysis of 2^k experimental designs [24], the effects, sums of squares and percentage contribution of each model term were estimated (Table 2).

Factor	Effect estimate	Sum of squares	Percent contribution
f	-0.066	0.0088	1.31
v	0.153	0.0467	6.94
a_p	0.356	0.2540	37.78
$f \cdot v$	0.389	0.3036	45.15
$f \cdot a_p$	-0.008	0.0001	0.02
$v \cdot a_p$	0.171	0.0586	8.71

Based on data from Table 2, it can be apparently seen that the depth of cut (a_p) is the factor with the greatest effect on the chip compression ratio. Since the coefficient (effect estimate) is positive, this relationship is directly proportional. The effects of the cutting speed and feed rate are less pronounced, with the direct and inverse proportionality with the chip compression ratio, respectively. However, the two-way interaction of the cutting speed and feed rate, accounting for 45 percent of the total variability, has the strongest effect on the resulting chip compression ratio. The importance of the significant interaction effect with the cutting speed is consistent with previous conclusions. Namely, it has been previously discussed that feed rate, tool cutting edge angle, and cutting edge inclination angle may differently influence the CCR at different cutting speeds [25].

To confirm the magnitude of the observed effects, analysis of variance (ANOVA) was conducted (Table 3). Based on ANOVA table one can determine which terms have statistically significant effects on the chip compression ratio. One can conclude that the depth of cut and interaction of feed rate and cutting speed are statistically significant, confirming the preliminary interpretation based on data in Table 2. To determine how well the empirical model, which could be obtained based on estimated coefficients, fits chip compression experimental data, several R^2 statistics are estimated (Table 3). As can be observed, the proportion of total variability in chip compression ratio explained by model is 99.99%. In addition, the high value of predicted square correlation coefficient shows that the model is likely to be a good predictor with 95% expected variability to explain when using new experimental data.

Table 3. Analysis of variance for the experiment					
Factor	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F ₀	p
f	1	0.0088	0.0088	16.88	0.1520
v	1	0.0467	0.0467	89.20	0.0672
a_p	1	0.2540	0.2540	485.23	0.0289
$f \cdot v$	1	0.3036	0.3036	579.96	0.0264
$f \cdot a_p$	1	0.0001	0.0001	0.23	0.7177
$v \cdot a_p$	1	0.0586	0.0586	111.92	0.0600
Error	1	0.0005	0.0005		
Total	7				
$R^2 = 0.999, R^2_{pred} = 0.95, R^2_{adj} = 0.994$					

Based on results, the regression model for predicting the chip compression ratio has the following form:

$$CCR = 1.845 - 0.033x_1 + 0.076x_2 + 0.178x_3 + 0.195x_1x_2 - 0.004x_1x_3 + 0.086x_2x_3 \quad (1)$$

where the coded variables x_1 , x_2 and x_3 represent feed rate (f), cutting speed (v) and depth of cut (a_p), respectively.

The derived empirical model was visualized by creating 3D surface plots, allowing the individual (main) and two-way interactions to be presented in a more detailed and comprehensive way. In Figure 2, changes in chip compression ratio values were presented for various combinations of feed rate, cutting speed and depth of cut.

As can be observed in Figure 2 b) and c), an increase in the depth of cut consistently increases chip compression ratio regardless of the values of cutting speed and feed rate. While the effect is almost similar across the entire range of feed rate values, in the case of interaction with the cutting speed, it is evident that an increase in CCR with an increase in depth of cut is much more pronounced when using high cutting speed. One can argue that this phenomenon is due to the formation of higher chip volume. This observation aligns with a related studies in turning of AISI 4340 steel [26] and polyoxymethylene copolymer (POM-C) [22].

As can be observed in Figure 2 b), an increase in the feed rate results in constant light decreasing trend of CCR due to increased undeformed chip thickness. However, there exists significant interaction between feed rate and cutting speed for a constant depth of cut (Figure 2 a)). It is reflected in the fact that at low cutting speeds an increase in the feed rate decreases CCR, while at high cutting speeds an increase in the feed rate increases CCR. Similarly, variable effects of the cutting speed could be seen in Figure 2 a) and c). Namely, CCR increases with an increase in the cutting speed for high levels of feed rate as well as depth of cut. However, CCR tends to be reduced with an increase in the cutting speed for low levels of feed rate as well as depth of cut. As discussed by Astakhov and Shvets [19], variable effect of the cutting speed on the CCR that may arise for certain experimental hyper-space is a result of multiple cutting speed effects, such as its influence on the

energy spent on the deformation of the chip through the temperature, dimensions of the deformation zone adjacent to the cutting edge and velocity of deformation.

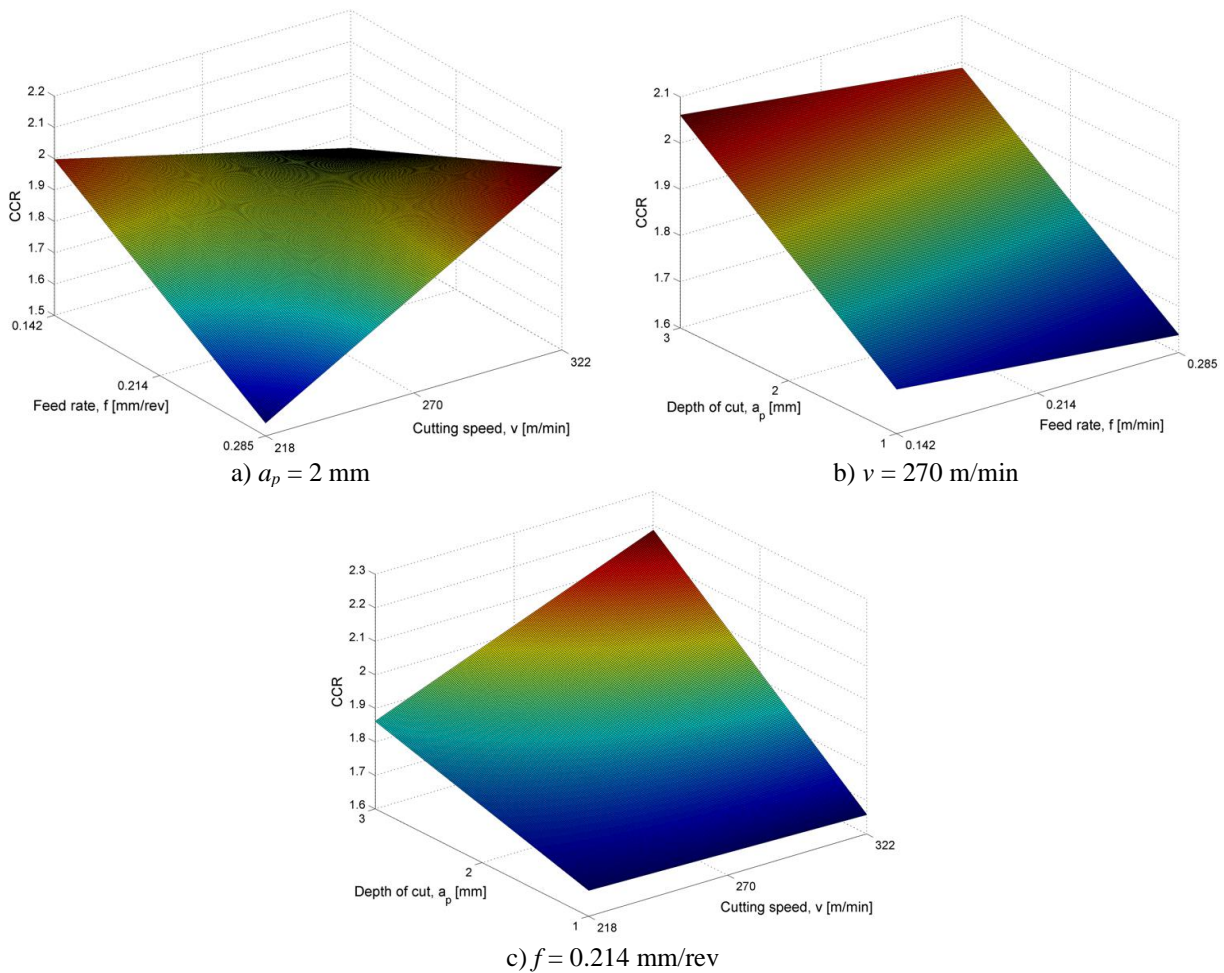


Figure 2. Response surface plots presenting the dependence of the chip compression ratio on the considered cutting parameters

4. CONCLUSION

The present study analysed the effects of feed rate, cutting speed and depth of cut on CCR in medium turning of unalloyed medium carbon steel C45E. Analysis of the obtained results lead to the following conclusions:

- For the covered experimental hyper-space, the depth of cut is the most influential parameter affecting the CCR, followed by cutting speed and feed rate.
- There is a significant interaction effect of the cutting speed and feed rate on CCR. In other words, feed rate may be in direct or indirect relationship with CCR, depending on the specific value of the cutting speed. The same applies to the variable effect of the cutting speed.
- Based on developed empirical model one can observe that the minimal CCR of about 1.45 corresponds to the combination of $f = 0.285$ mm/rev, $v = 218$ m/min and $a_p = 1$ mm, while the maximal CCR of about 2.34 corresponds to the combination of $f = 0.285$ mm/rev, $v = 322$ m/min and $a_p = 3$ mm.

Analysis of the effects of other important parameters, such as cutting edge angle, cutting edge inclination angle and rake angle, type of coating, and workpiece material, on CCR is in the scope of future research.

5. REFERENCES

- [1] Madić M., Trifunović M., Janković T.: *Development and Analysis of a Surface Roughness Model in Dry Straight Turning of C45E Steel*, Innovative Mechanical Engineering, Vol 1, No 2, 2022, pp. 11-21.
- [2] Grzesik W.: *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications, Second Edition*, Elsevier, Amsterdam, 2017.
- [3] Sung A.N., Loh W.P., Ratnam M.M.: *Simulation Approach for Surface Roughness Interval Prediction in Finish Turning*, International Journal of Simulation Modelling, Vol 15, No 1, 2016, pp. 42-55.
- [4] Che-Haron C.H.: *Tool Life and Surface Integrity in Turning Titanium Alloy*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 118, No 1-3, 2001, pp. 231-237.
- [5] Toropov A., Ko S.L.: *A Model of Burr Formation in the Feed Direction in Turning*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 46, No 15, 2006, pp. 1913-1920.
- [6] Rafai N.H., Islam M.N.: *An Investigation into Dimensional Accuracy and Surface Finish Achievable in Dry Turning*, Machining Science and Technology, Vol 13, No 4, 2009, pp. 571-589.
- [7] Gundarneeeyya T.P., Golakiya V.D., Ambaliya S.D., Patel S.H.: *Experimental Investigation of Process Parameters on Surface Roughness and Dimensional Accuracy in Hard Turning of EN24 Steel*, Materials Today: Proceedings, Vol 57, No 2, 2022, pp. 674-680.
- [8] Hamasur S.A., Abdalrahman R.M.: *The Effect of Tool's Rake Angles and Infeed in Turning Polyamide 66*, Engineering, Technology and Applied Science Research, Vol 13, No 4, 2023, 11204-11209.
- [9] Korkmaz M.E., Yaşar N., Günay M.: *Numerical and Experimental Investigation of Cutting Forces in Turning of Nimonic 80A Superalloy*, Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol 23, No 3, 2020, pp. 664-673.
- [10] Toubhans B., Viprey F., Fromentin G., Karaouni H., Dorlin T.: *Study of Phenomena Responsible for Part Distortions when Turning Thin Inconel 718 Workpieces*, Journal of Manufacturing Processes, Vol 61, 2021, pp. 46-55.
- [11] Kiyak M., Kaner B.: *Determination of the Actual Deflection of the Cutting Tool in Turning by the Castigliano Theorem*, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol 16, No 4, 2023, Article ID: 100744, 6 pages.
- [12] Shalaby M.A., El Hakim M.A., Abdelhameed M.M., Krzanowski J.E., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K.: *Wear Mechanisms of Several Cutting Tool Materials in Hard Turning of High Carbon-Chromium Tool Steel*, Tribology International, Vol 70, 2014, pp. 148-154.
- [13] Kuntoğlu M., Sağlam H.: *Investigation of Progressive Tool Wear for Determining of Optimized Machining Parameters in Turning*, Measurement, Vol 140, 2019, pp. 427-436.
- [14] Rao C.J., Sreemulu D., Mathew A.T.: *Analysis of Tool Life During Turning Operation by Determining Optimal Process Parameters*, Procedia Engineering, 97, 2014, pp. 241-250.
- [15] Mikołajczyk T., Nowicki K., Bustillo A., Pimenov D.Y.: *Predicting Tool Life in Turning Operations Using Neural Networks and Image Processing*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 104, 2018, pp. 503-513.
- [16] Dhar N.R., Kamruzzaman M.: *Cutting Temperature, Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4037 Steel Under Cryogenic Condition*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 47, No 5, 2007, pp. 754-759.
- [17] Rosa S.D.N., Diniz A.E., Andrade C.L.F., Guesser W.L.: *Analysis of Tool Wear, Surface Roughness and Cutting Power in the Turning Process of Compact Graphite Irons with Different Titanium Content*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol 32, No 3, 2010, pp. 234-240.
- [18] Stojković M., Madić M., Trifunović M., Turudija R.: *Determining the Optimal Cutting Parameters for Required Productivity for the Case Of Rough External Turning of AISI 1045 Steel with Minimal Energy Consumption*, Metals, Vol 12, No 11, 2022, Article ID: 1793, 23 pages.
- [19] Astakhov V.P., Shvets S.: *The Assessment of Plastic Deformation in Metal Cutting*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 146, No 2, 2004, pp. 193-202.
- [20] Uysal A., Jawahir I.S.: *Analysis of Slip-Line Model for Serrated Chip Formation in Orthogonal Machining of AISI 304 Stainless Steel Under Various Cooling/Lubricating Conditions*, Journal of Manufacturing Processes, Vol 67, 2021, pp. 447-460.
- [21] Kuruc M., Vopat T., Peterka J., Nepal M., Šimna V., Milde J., Jurina F.: *The Influence of Cutting Parameters on Plastic Deformation and Chip Compression during the Turning of C45 Medium Carbon Steel and 62SiMnCr4 Tool Steel*, Materials, Vol 15, No 2, 2022, Article ID: 585, 18 pages.

- [22] Trifunović M., Madić M., Janković P.: *Analysis of Chip Compression Ratio in Turning of Polyoxymethylene Copolymer*, Journal of Production Engineering, Vol 26, No 2, 2023, pp. 13-17.
- [23] Barać M., Vitković N., Stanković Z., Rajić M., Turudija R.: *Description and Utilization of an Educational Platform for Clean Production in Mechanical Engineering*, Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research, Vol 1, No 1, 2024, pp. 145-158.
- [24] Montgomery D.C.: *Design and Analysis of Experiments, 9th edition*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2017.
- [25] Astakhov V.P.: *Metal Cutting Mechanics*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1999.
- [26] Singh B.K., Roy H., Mondal B., Roy S.S., Mandal N.: *Measurement of Chip Morphology and Multi Criteria Optimization of Turning Parameters for Machining of AISI 4340 Steel Using Y-ZTA Cutting Insert*, Measurement, Vol 142, 2019, pp. 181-194.

Trifunović, M., Madić, M., Janković P.

KREIRANJE EMPIRIJSKOG MODELA ZA ANALIZU FAKTORA SABIJANJA STRUGOTINE KOD POLUZAVRŠNOG STRUGANJA ČELIKA C45E

Rezime: S obzirom na višestruki značaj faktora sabijanja strugotine za procenu obradljivosti, ova studija se bavi analizom faktora sabijanja strugotine kod poluzavršnog uzdužnog struganja čelika C45E. Standardni 2^3 pun faktorni plan je korišćen za variranje tri glavna parametra rezanja, tj. dubine rezanja, koraka i brzina rezanja na dva nivoa. Na osnovu eksperimentalnih podataka kreiran je kvazilinearni model za predikciju faktora sabijanja strugotine radi boljeg razumevanje glavnih i interakcijskih uticaja razmatranih parametara rezanja. Dobijeni rezultati sugerišu dominantan glavni uticaj dubine rezanja i interakcijski uticaj brzine rezanja i koraka.

Ključne reči: struganje, faktor sabijanja strugotine, čelik C45E, modeliranje



Vasilić, G.¹⁾, Živanović, S.²⁾, Milutinović, M.¹⁾ Dimić, Z.³⁾

KONCEPT KOMPLEKSNE REDUDANTNE MAŠINE ALATKE NAMENJENE ZA PROCES OBRADJE SEČENJA ŽICOM⁴⁾

Rezime

U okviru rada je prikazan koncept jedne mašine alatke koja predstavlja unapređenje prethodno već izgrađene kompleksne mašine MOMA-W. Predložena mašina, namenjena za proces obrade sečenja žicom, sačinjena je od dva mehanizma sa paralelnom kinematikom. Svaki od mehanizama poseduje po tri stepena slobode, što ukupno čini šest stepeni slobode koje poseduje predložena mašina. Kako je za proces obrade sečenja žicom neophodno da mašina poseduje četiri stepena slobode, kojima se obezbeđuje željena pozicija i orijentacija žice, dodatna dva stepena slobode predloženu mašinu čini redudantnom. Kako bi bilo moguće rešiti kinematičke probleme uvode se dodatni uslovi za rešavanje kinematičkih problema kojima se sam proces obrade poboljšava.

Ključne reči: kompleksna mašina, redudantna mašina, sečenje žicom, paralelni mehanizmi

1. UVOD

Mašine alatke namenjene za sečenje materijala žicom se mogu podeliti u tri kategorije, i to: i) mašine namenjene za sečenje metala WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), ii) mašine namenjene za sečenje tvrdih nemetalnih materijala i, iii) mašine namenjene za sečenje mekih penastih materijala usijanom žicom. Mašine namenjene za sečenje metala su najzastupljenije, a istraživanja su u najvećoj meri usmerena ka inovativnom dizajnu mašina specijalne namene [1] kao i ka optimizaciji režima obrade [2,3]. Za sečenje tvrdih nemetalnih materijala se koristi dijamantska žica [4], a ovaj proces obrade je našao primenu u arhitekturi i građevini. Naučnoistraživački radovi mnogih istraživača, iz finansijskih razloga su usmereni ka razvoju mašina alatki i industrijskih robota namenjenih za proces obrade sečenja mekih penastih materijala usijanom žicom [5,6]. Bez obzira na vrstu materijala za koju su namenjene, istraživači predlažu mašine alatke i industrijske robote zasnovane na serijskim mehanizmima. Mogućnost primene mehanizama sa paralelnom kinematikom za gradnju mašina alatki namenjenih za proces obrade sečenja žicom nije dovoljno istražena uprkos činjenici da mehanizmi sa paralelnom kinematikom poseduju izvesne prednosti u odnosu na serijske mehanizme [7,8].

Značajni rezultati istraživačkog rada, iz oblasti mašina alatki namenjenih za proces obrade sečenja žicom, objavljeni su u naučnom radu [9]. Predložena kompleksna višeosna mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom (slika 1), u svojoj strukturi poseduje dva dvoosna rekonfigurabilna mehanizma sa paralelnom kinematikom MOMA [10,11]. Kako je prikazano na slici 1, platforme paralelnih mehanizama su međusobno povezane zategnutom žicom koja ujedno i predstavlja alat kojim se vrši obrada (sečenje materijala). Kretanjima platformi P_1 i P_2 mehanizama RPKM MOMA' i RPKM MOMA'', realizuje se kretanje žice po programiranoj putanji. Kako kompleksni mehanizam poseduje četiri stepena slobode, žica (alat) tokom procesa obrade ima mogućnost translatorskih kretanja u pravcu dve ose kao i mogućnost obrtnih kretanja oko istih osa. Opisan koncept je potvrđen izradom većeg broja delova složenih oblika i različitih veličina [12]. Analizom rada kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W [12], a zatim analizom radnog prostora mašine i kinematike samog procesa obrade i [9,12,13], ustanovljeno je da se prikazan koncept može značajno unaprediti.

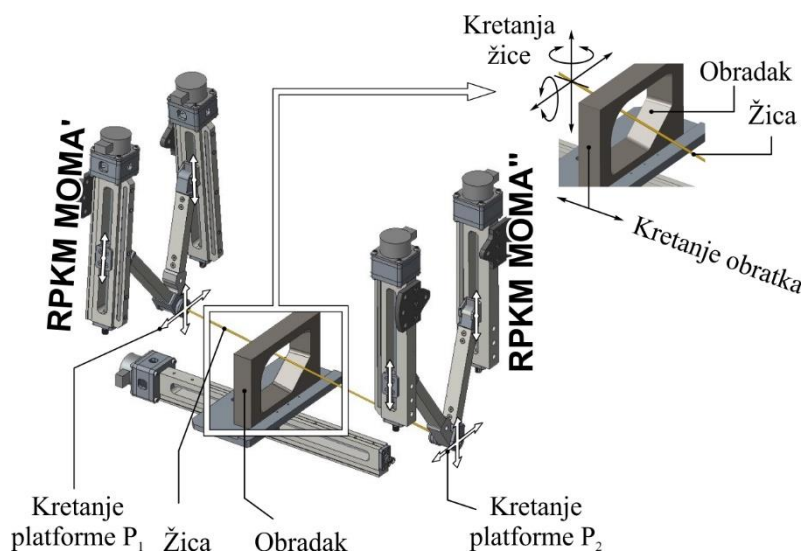
¹⁾ dr Goran Vasilić, Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd, (gvasilic@politehnika.edu.rs)

²⁾ prof. dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs)

³⁾ dr Milan Milutinović, Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd, (mmilutinovic@politehnika.edu.rs)

⁴⁾ dr Zoran Dimić, LOLA Institut, Beograd, (zoran.dimic@li.rs)

U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekata koje finansijski podržava Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije po ugovorima: ev. br: 451-03-65/2024-03/200105

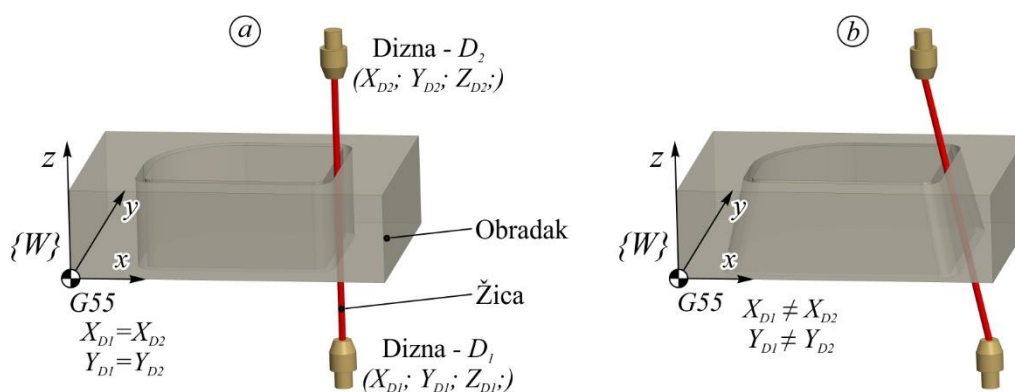


Slika 1. Kompleksna višeosna mašina alatka MOMA-W namenjena za proces obrade sečenja žicom (preuzeto i doručeno [9, 12])

U okviru ovoga rada, po uzoru na opisan koncept, predložena je kompleksna mašina alatka koja u svojoj strukturi takođe sadrži dva mehanizma sa paralelnom kinematikom ali, svaki od upotrebljenih mehanizama poseduje po tri stepena slobode. Tako predložena kompleksna mašina, namenjena je za proces obrade sečenja žicom, sačinjena je od dva troosna mehanizma i samim time poseduje ukupno šest stepeni slobode te nosi naziv MOMA-W 6D. Uzimajući u obzir činjenicu da je za proces obrade sečenja žicom potrebno samo četiri stepena slobode, dva stepena slobode predložene mašine su suvišna što mašinu čini redundantnom.

2. OPIS KOMPLEKSNE MAŠE ALATKE MOMA-W 6D

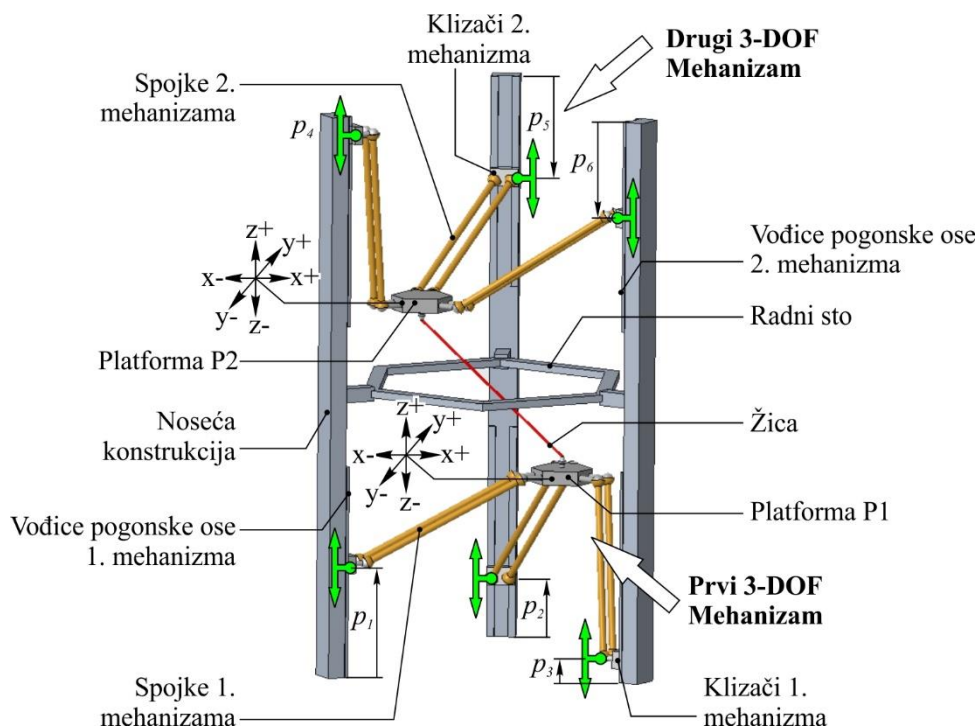
Kao što je poznato, procesom obrade sečenje žicom se izrađuju delovi kojima su bočne (obrađene) stranice upravne na ravan u kojoj se nalazi kontura po kojoj se kreće žica (slika 2a) kao i delovi kod kojih su bočne stranice pod određenim uglom u odnosu na ravni u kojima leže konture po kojima se kreće žica (slika 2b). U prvom slučaju, koordinate dizni X_{D1} i X_{D2} su jednake kao i koordinate dizni Y_{D1} i Y_{D2} . U ovom slučaju, Z_{Di} koordinate dizni nemaju uticaj na kinematiku procesa obrade, a G-kôd programi se veoma lako izrađuju. U drugom slučaju, koordinate dizni X_{D1} i X_{D2} kao i Y_{D1} i Y_{D2} međusobno se razlikuju, a na ovaj način obezbeđuje se željena orijentacija žice tokom procesa obrade. U ovom slučaju koordinate Z_{Di} , osim što utiču na kinematiku procesa obrade [13], utiču i na koordinate X_{Di} i Y_{Di} . Drugačije rečeno, svaka vrednost koordinata Z_{Di} ima odgovarajuće koordinate X_{Di} i Y_{Di} kojima se realizuje programirana pozicija i orijentacija žice tokom procesa obrade.



Slika 2. Proces obrade sečenja žicom: a) sa konstantnom orijentacijom žice; b) sa promenljivom orijentacijom žice

Kompleksna redundantna mašina alatka MOMA-W 6D koja se razmatra u ovom radu, po uzoru na kompleksnu mašinu alatku MOMA-W [9,12], sadži dva troosna mehanizma sa paralelnom kinematikom kako je i prikazano na slici 3. Pogonske ose mehanizama su translatorne, a za početna istraživanja se razmatra slučaj kada su svih šest pogonskih osa (po tri od svakog upotrebljenog mehanizma) međusobno paralelne i vertikalne.

Svaka od pogonskih osa poseduje vođice duž kojih se mogu kretati klizači pogonskih osa. Pozicije klizača na vođicama pogonskih osa predstavljaju unutrašnje koordinate mehanizma i nose oznake p_i ($i=1-6$). Za svaki od klizača sfernim zglobnim vezama, jednim svojim krajem vezane su po dve spojke mehanizma. Svojim drugim krajem, takođe sfernim zglobnim vezama, sve spojke su povezane sa platformom mehanizma. Na platformama mehanizma nalaze se dizne kojima se obezbeđuje precizno vođenje žice. Kretanjima klizača duž vođica pogonskih osa svakog od upotrebljenih meha, omogućeno je kretanje platformi mehanizama u pravcu tri ose što ukupno čini šest kretanja platformi mehanizma kompleksne redundantne mašine MOMA-W 6D.

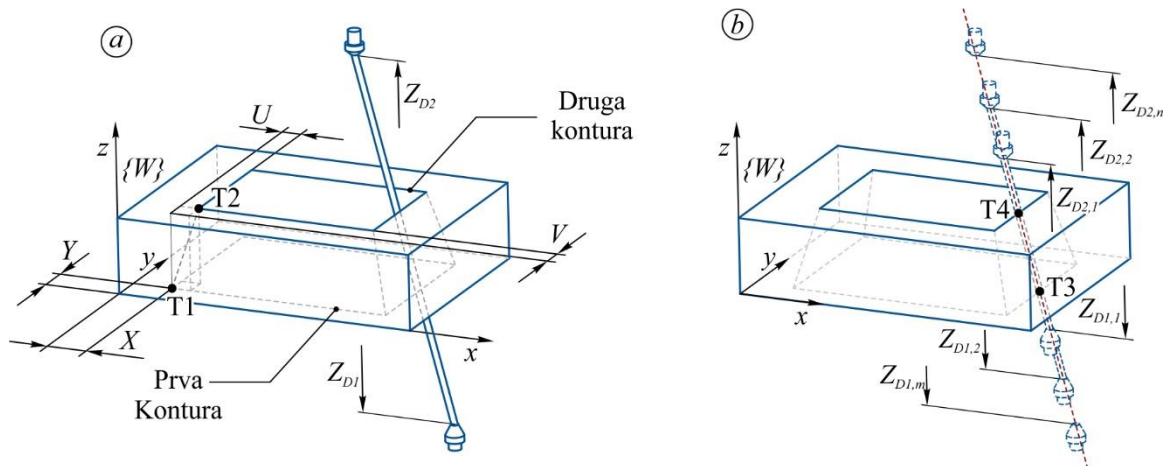


Slika 3. 3D model redundantne kompleksne mašine alatke MOMA-W 6D

Za razliku od kompleksne mašine alatke MOMA-W sa slike 1, kod koje se vrednosti koordinata Z_{Di} zadaju pozicioniranjem obratke duž ose Z i kod koje je rastojanje između dizni konstantno, kod kompleksne mašine alatke MOMA-W 6D obradak je nepokretn. Dizne koje se nalaze na platformama mehanizma se kretanjem duž ose Z mogu približavati i odaljavati od obratka koji se postavlja na radni sto mašine. Ovakvim pristupom se u značajnoj meri može uticati na kinematiku alata (žice) tokom procesa obrade ali i na druge karakteristike mašine kao što je veličina korisnog radnog prostora uz određene zadate orijentacije žice.

3. REDUDANTNOST KOMPLEKSNE MAŠINE MOMA-W 6D

Proces obrade sečenja žicom se realizuje kretanjem žice po konturama koje leže u ravnima koje su upravne na osu Z koordinatnog sistema obratka $\{W\}$ (Slika 4a). Svaka od kontura se sastoji od niza tačaka, a prema standardu ISO-6983 [14] pozicije tačaka prve konture su definisane koordinatama X i Y . Pozicije tačaka druge konture su definisane koordinatama U i V . Koordinate U i V predstavljaju poziciju tačke druge konture u odnosu odgovarajuće tačke prve konture i to u pravcima osa x i y , respektivno. Tako, prema slici 1a, apsolutne koordinate tačaka $T1$ i $T2$ u koordinatnom sistemu obratka $\{W\}$ prema pripremljenom G-kôd programu imaju sledeće vrednosti $X_{T1}=X$, $Y_{T1}=Y$, $X_{T2}=X_{T1}+U$ i $Y_{T2}=Y_{T1}+V$. Za svaku mašinu namenjenu za proces obrade sečenja žicom, koordinate X , Y , U i V predstavljaju spoljašnje koordinate mašine i one se realizuju dovođenjem dizni koje nose krajeve žice u tačno određenu poziciju. Uzimajući u obzir sliku 3, pozicije dizni koje se nalaze na platformama kompleksnog redundantnog mehanizma MOMA-W 6D ostvaruje se dovođenjem klizača pogonskih osa u tačno određenu poziciju odnosno realizacijom tačno određenih vrednosti unutrašnjih koordinata p_i ($i=1-6$). Vrednosti unutrašnjih koordinata mehanizma p_i ($i=1-6$) određuju se jednačinama koja predstavljaju rešenja inverznog kinematičkog problema (IKP) mehanizma i uz dodatne analize mehanizma biće prezentovana u nekim od narednih publikacija.

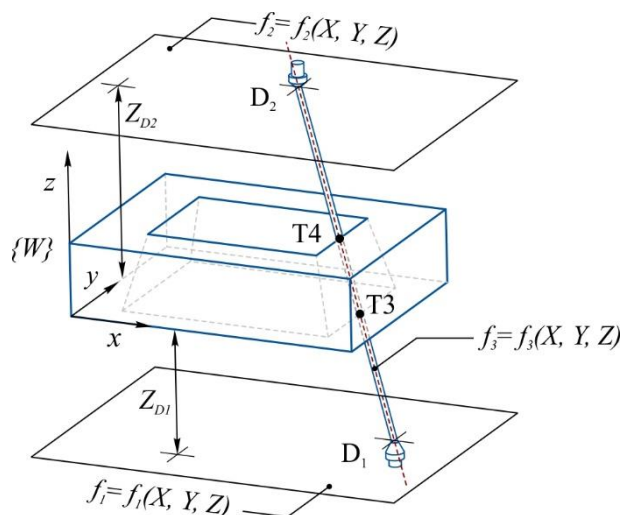


Slika 4. Proces obrade sečenja žicom: a) Koordinate koje se prema standardu ISO-6983 koriste za izradu G-kôd programa; b) Višestrukost rešenja

Obzirom da sam mehanizam poseduje šest stepeni slobode što se ogleda u broju unutrašnjih koordinata p_i , a kretanje alata (žice) se zadaje programom koji sadrži četiri koordinate X, Y, U i V , nedvosmisleno se može zaključiti da mehanizam poseduje dva stepena slobode više nego što je potrebno za realizaciju procesa obrade sečenja žicom. Iz ove činjenice proizilazi da za razmatrani mehanizam ne postoje jedinstvena rešenja kinematičkih problema što je i prikazano na slici 4b. Na prikazanom primeru, da bi se ostvarila željena pozicija i orijentacija alata (žice), u nekom trenutku procesa obrade žica mora prolaziti kroz tačke $T3$ i $T4$. Tačke $T3$ i $T4$ u potpunosti određuju pravu na kojoj mora da leži žica, a samim time i dizne kroz koje žica prolazi. Kako je prikazano na slici 4b, postoji beskonačan broj rešenja kojima su određene pozicije dizni i kojima se realizuje željena (programirana) pozicija i orijentacija žice.

4. METODOLOGIJA ZA IZBOR JEDINSTVENIH REŠENJA IKP-a KOMPLEKSNE MAŠINE MOMA-W 6D

Za konfigurisanje upravljanja i za sam rad redundantne kompleksne mašine MOMA-W 6D višestruka rešenja nisu od značaja. Iz tog razloga neophodno je izdvojiti po jedno od mnogih rešenja koja daju tačno određene i jedinstvene pozicije dizne, a sa kojima se ostvaruje programirana pozicija i orijentacija alata (žice). U najjednostavnijem slučaju, kada su dizne mehanizma tokom procesa obrade na konstantnoj udaljenosti od obratka (slika 5), tada se u stvari dizne tokom celog procesa obrade dizne D_1 i D_2 kreću po ravnima određene funkcijama f_1 i f_2 . U slučaju da su ravni određene funkcijama f_1 i f_2 paralelne ravni Oxy , onda je njihov oblik dat jednačinama (1).



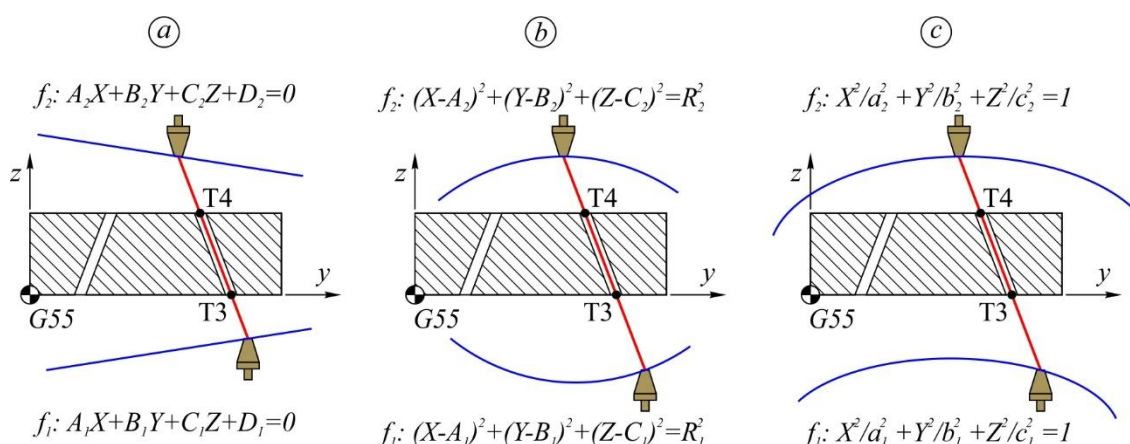
Slika 5. Određivanje pozicije dizni kompleksne mašine alatke MOMA-W 6D prema zadatim tačkama kontura i u slučaju kada je zadato njihovo konstantno rastojanje od obratka

$$\begin{aligned} f_1: Z &= Z_{D1} \\ f_2: Z &= Z_{D2} \end{aligned} \quad (1)$$

Tačke T3 i T4 određuju pravu, definisanu funkcijom f_3 , na kojoj je neophodno da leži žica a njen oblik je dat jednačinom (2)

$$f_3: \frac{x - x_3}{x_4 - x_3} = \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} = \frac{Z_{Di} - z_3}{z_4 - z_3} \quad (2)$$

Rešavanjem sistema jednačina $f_1 \cap f_3$ i $f_2 \cap f_3$, dobijaju se koordinate dizni X_{D1} , Y_{D1} , X_{D2} i Y_{D2} kojima se obezbeđuje programirana pozicija i orijentacija žice tokom procesa obrade. Definisanjem funkcija f_1 i f_2 , za mehanizam kompleksne mašine MOMA-W 6D uvedena su ograničenja kojima je onemogućeno kretanje platformi mehanizama P₁ i P₂ u pravcu ose Z. Drugačije rečeno, dva stepena slobode su iskorištena za formiranje zadržavajuće veze između dizni D₁ i D₂ i horizontalnih ravni definisanih funkcijama f_1 i f_2 . Na isti način se određuju koordinate dizni ukoliko se zadržavajuće veze definišu nešto složenijim jednačinama kao što je prikazano primerima na slici 6. Koordinate dizni se određuju rešavanjem sistema jednačina od kojih je jedna jednačina prave f_3 određena koordinatama tačaka T3 i T4, a preostale dve jednačine mogu biti jednačine kosih ravni (slika 6a), jednačine sfera (slika 6b), jednačine elipsoida (slika 6c) ili jednačine bilo kog drugog tela poput cilindričnih, konusnih i hiperboličkih površi.



Slika 6. Određivanje pozicije dizni kompleksne mašine alatke MOMA-W 6D ukoliko su zadate jednačine površina po kojima se kreću: a) kose ravni; b) sfere; c) elipsoidi

Opisana metodologija kojom se dobijaju koordinate dizni je međukorak u postprocesorskom računu i predstavlja deo rešenja IKP-a. Dalje, određivanjem vrednosti unutrašnjih koordinata p_i ($i=1-6$) na osnovu poznatih koordinata dizni X_{Di} , Y_{Di} i Z_{Di} ($i=1-2$), rešenja IKP-a se upotpunjuju te se mogu koristiti za dalje analize mehanizma ali i za konfigurisanje upravljanja mašine.

5. ZAKLJUČAK

Kao što je poznato, kinematičke karakteristike paralelnih mehanizama nisu iste u svakom delu radnog prostora što u najvećoj meri zavisi od vrednosti determinante Jakobijan matrice $det(J)$ mehanizma. Prema ranije dobijenim rezultatima autora, za očekivati je da predložena kompleksna mašina MOMA-W 6D poseduje različitu rezoluciju i preciznost u različitim delovima radnog prostora. Opisanim pristupom, tj. uvođenjem zadržavajućih veza u obliku površina po kojima se mogu kretati dizne, utiče se na rad mehanizma tako što se kretanje platformi ograničava na tačno određeni deo zapreminskog radnog prostora. Osim rešavanja kinematičkih problema predložene mašine i neophodne analize radnog prostora, buduća istraživanja će biti usmerena ka određivanju površina koje predstavljaju zadržavajuće kinematičke veze i koje će kretanja platformi mehanizma ograničiti na onaj deo radnog prostora za koji se može reći da je u njemu preciznost značajno bolja u odnosu na mašine iste namene ali drugačije konfiguracije.

6. LITERATURA

- [1] Cheng X., Wang Z.G., Kobayashi S., Nakamoto K., Yamazaki K.: *Tool fabrication system for micro/nano milling function analysis and design of a six-axis wire edm machine*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.46(1-4), 2010, pp.179–189
[DOI: 10.1007/s00170-009-2094-8](https://doi.org/10.1007/s00170-009-2094-8)
- [2] Yan M.T., Huang C.W., Fang C.C., Chang C.X.: *Development of a prototype Micro-Wire-EDM machine*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.149(1-3), 2004, pp. 99–105,
[DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.057](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.057)
- [3] Liao Y.S., Chen S.T., Lin C.S.: *Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-edm for making intricate micro parts*, Journal of Micromechanics and Microengineering Vol.15(2), 2005, pp.245–253, [DOI: 10.1088/0960-1317/15/2/001](https://doi.org/10.1088/0960-1317/15/2/001)
- [4] 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)
- [5] Jovanovic M., Rakovic M., Tepavcevic B., Borovac B., Nikolic M.: *Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels*, Automation in Construction Vol.74, 2017, pp. 28–38, [DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.003)
- [6] Abeysinghe A., Abeysiriwardena S., Nanayakkarawasam R., Wimal Siri W.: *Development of a numerically controlled hot wire foam cutting machine for wing mould construction*, Moratuwa Engineering Research Conference, IEEE, 2016, pp.60–65 [DOI: 10.1109/MERCCon.2016.7480116](https://doi.org/10.1109/MERCCon.2016.7480116)
- [7] Šika Z., Hamrle V., Valášek M., Beneš P.: *Calibrability as additional design criterion of parallel kinematic machines*, Mechanism and Machine Theory, Vol.50, 2012, p.48-63.
[DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.12.001)
- [8] Jinson W., Tiemin L., Liping W.: *Dynamic analysis of the 2-DOF planar parallel manipulator of a heavy-duty hybrid machine tool*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, 2007, pp. 413-420. [DOI: 10.1007/s00170-006-0605-4](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0605-4)
- [9] Vasilic G., Živanović S.: *Configuring And Analysis Of Complex Multi-Axis Reconfigurable Machine For Wire Cutting Process*, Mechanism and Machine Theory Vol. 149, July 2020, 103833, pp.1-16.
[DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833)
- [10] Vasilic G., Živanović S.: *Modelling And Analysis Of 2-Axis Reconfigurable Parallel Mechanism MOMA With Translatory Actuated Joints*, TECHNICS special edition, Magazine of the Society of Engineers and Technicians of Serbia, Mechanical Engineering, Year 2022, 2016, pp. 59-66, [URL: TECHNICS - special edition](https://www.technics.rs/special-edition)
- [11] 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, Broj 4/2018, Godina LXXIII 2018, str 519-526, [DOI:10.5937/tehnika1804519Z](https://doi.org/10.5937/tehnika1804519Z)
- [12] Vasilic G.: *Koncepcijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet univerziteta u Beogradu, 2023. [URL: NaRDuS](https://www.nardus.rs)
- [13] Vasilic G., Živanović S., Milutinović M., Dimić Z.: *Kinematics Of The Wire Cutting Process*, 39th International Conference on Production Engineering of Serbia, Novi Sad, Serbia, 2023, pp.206-211
- [14] ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration - numerical control of machines - program format and definitions of address words. <https://www.iso.org/standard/34608.html> [pristup: septembar 2024]

Vasilic, G., Živanović, S., Milutinović, M., Dimić, Z.

CONCEPT OF A COMPLEX REDUNDANT MACHINE TOOL INTENDED FOR THE WIRE-CUTTING PROCESS

Abstract: This paper presents the machine tool concept, which improves the previously built complex machine MOMA-W. The proposed machine, intended for wire-cutting, consists of two mechanisms with parallel kinematics. Each of the mechanisms has three degrees of freedom, which makes a total of six degrees of freedom possessed by the proposed machine. Since the wire-cutting process requires the machine to have four degrees of freedom, which ensures the desired position and orientation of the wire, the additional two degrees of freedom make the proposed machine redundant. To solve kinematic problems, additional conditions are presented, that in principle improve the machining process.

Key words: Complex machine, Redundant machine, Wire cutting, Parallel mechanisms

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



46. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNЈOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2024.

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

Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B., Marković, J., Čulum, M.
PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKOG PROCESA PRIMJENOM GRUPNE TEHNOLOGIJE 4.1

Đorđević, V., Karić, M., Erić Obućina, J.
OCENA SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA NA PRIMERU ZUPČANIK..... 4.8





Borojević, S.¹⁾, Čiča, Đ.¹⁾ Sredanović, B.¹⁾, Marković, J.¹⁾ Čulum, M.²⁾

PROJEKTOVANJE TEHNOLOŠKOG PROCESA PRIMJENOM GRUPNE TEHNOLOGIJE

Rezime

Ovaj rad opisuje metodologiju projektovanja tehnoloških procesa primjenom grupne tehnologije na konkretnim primjerima iz prakse. Metodologija se sastoji od analize sličnih dijelova, formiranja operacionih grupa, projektovanja kompleksnog dijela, definisanja operacija i zahvata za kompleksni dio, kao i definisanja operacija i zahvata za konkretan dio iz operacione grupe. Primjenjena metodologija omogućava, kako značajne uštede tokom aktivnosti tehničke pripreme proizvodnje, odnosno tokom aktivnosti projektovanja tehnoloških procesa, tako i u fazi izrade dijelova.

Ključne reči: grupna tehnologija, kompleksni dio, projektovanje tehnoloških procesa

1. UVOD

Projektovanje tehnoloških procesa ima za cilj da obezbjedi povećanje konkurentnosti preduzeća na tržištu. Od proizvođača se zahtijeva da u što kraćem vremenu "osvoje" novi proizvod/dio, predstave cijenu njegovog koštanja kao prihvatljivu za kupca, te da kvalitet izrade bude na propisanom nivou. Značajan napredak u ovoj oblasti, koji se prije svega ogleda u organizacionom i ekonomskom pogledu, ostvaren je primjenom tipske i grupne tehnologije, čija je osnovna karakteristika unifikacija procesa. Tipska tehnologija se koristi u serijskoj i velikoserijskoj proizvodnji i omogućuje značajne ekonomske i proizvodne uštede [1].

2. GRUPNA TEHNOLOGIJA

Grupna tehnologija je varijanta tipske tehnologije i koristi se u uslovima pojedinačne i maloserijske proizvodnje. Definisana je opremom koja je potrebna za izvođenje jedne operacije ili za izradu radnog predmeta. Primjenom grupne tehnologije dobija se tehnološka grupa dijelova na bazi tehnološke klasifikacije [2]. Krajnji cilj ovog rada je prezentacija metodologije kako se, uz pomoć grupisanja dijelova po njihovim elementarnim površinama – odnosno tehnološke klasifikacije, projektovanja kompleksnog dijela i kasnije projektovanja tehnologije za grupne operacije, dolazi do mogućnosti da različitom kombinacijom elementarnih zahvata iz grupnih operacija generiše tehnološki postupak mašinske obrade sa svaki od dijelova iz operacione grupe. Primjenom ove metodologije ostavaruju se značajne uštede projektantskog rada tokom faze tehničke pripreme proizvodnje, ali i skraćenja vremena izrade i povećanja produktivnosti u fazi realizacije proizvodnje.

2.1 Kompleksni dio

Polazna osnova grupne tehnologije predstavlja projektovanje kompleksnog dijela. Kompleksni dio se definiše se kao stvarni ili imaginarni dio (iskustveno formiran), koji u svojoj strukturi sadrži sve elementarne površine spoljašnje i unutrašnje konture, te se on označava kao konstruktivno-tehnološki predstavnik grupe dijelova. Osim elementarnih oblika površina kompleksni dio mora da sadrži sve ostale zahtjeve u vezi sa tačnošću i kvalitetom obrade, kao i ostalim karakteristikama koje su prisutne kod svih dijelova operacijske grupe [3].

¹⁾ prof. dr Stevo Borojević, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (stevo.borojevic@mf.unibl.org), prof. dr Đorđe Čiča Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (djordje.cica@mf.unibl.org), prof. dr Branislav Sredanović, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (branislav.sredanovic@mf.unibl.org), Jelena Marković, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (jelena.markovic@mf.unibl.org),

²⁾ Milan Čulum, dipl.maš.inž, Kolektor LLC, Laktaši (milan.culum@kolektor.com)

Između elementarnih površina i dijelova grupe postoji zavisnost koja se može predstaviti odgovarajućom matricom:

$$L = [l_{ij}] \quad (1)$$

$$l_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{– ako } i \text{ dio grupe sadrži } j \text{ elementarnu površinu} \\ 0 & \text{– ako } i \text{ dio grupe ne sadrži } j \text{ elementarnu površinu} \end{cases}$$

2.2 Klasifikacija i kodiranje

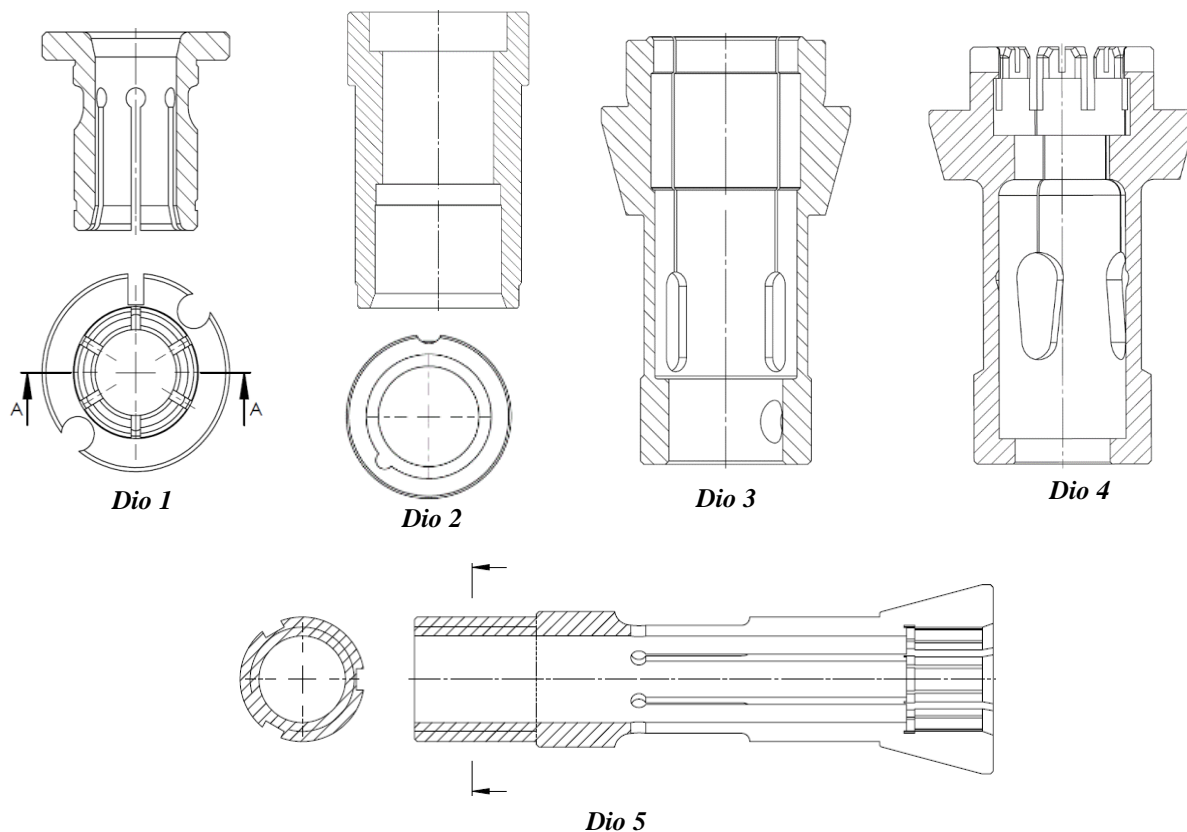
Postupak kojim se dijelovi svrstavaju u grupe naziva se klasifikacija. Vršiti se na osnovu tehničkih pravila, tačnije klasifikatora dijelova. Postoje dva oblika sličnosti dijelova: projektni, koji je izražen geometrijskim oblikom i veličinom dijela, odnosno geometrijskim karakteristikama dijelova i tehnološki, zasnovan na redosljedu obrade, odnosno tehnološkim karakteristikama dijelova. Tri osnovna tipa sistema za klasifikaciju su [4]:

- klasifikatori sa hijerarhijskom strukturom,
- klasifikatori sa lančanom strukturom i
- klasifikatori sa hibridnom strukturom.

Primjenom klasifikatora generiše se jedinstvena klasifikaciona, najčešće numerička, oznaka dijela. Ovaj postupak se naziva kodiranje dijela. Kôd dijela, generisan na ovakav način, omogućava razvrstavanje dijelova i formiranje operacionih grupa. Kasnije se ovaj kôd koristi kao podloga za identifikaciju i praćenje dijela kroz proces proizvodnje [5].

3. PRIMJENA GRUPNE TEHNOLOGIJE

Primjena grupne tehnologije, tokom projektovanja tehnološkog postupka, prikazana je na primjeru pet dijelova alata za brizganje (Slika 1). Ovi dijelovi alata za brizganje su izmjenjivog karaktera i za njih je potrebno projektovati tehnološki postupak. Sa slike se može uočiti da su prikazani dijelovi srednje složenosti i da zahtijevaju pojedinačno značajno vrijeme za projektovanje tehnološkog postupka. U tom smislu potrebno je implementirati metodologiju na bazi grupne tehnologije koja bi dovela do vremenskih ušteda tokom projektovanja tehnoloških procesa za posmatranu grupu radnih predmeta.

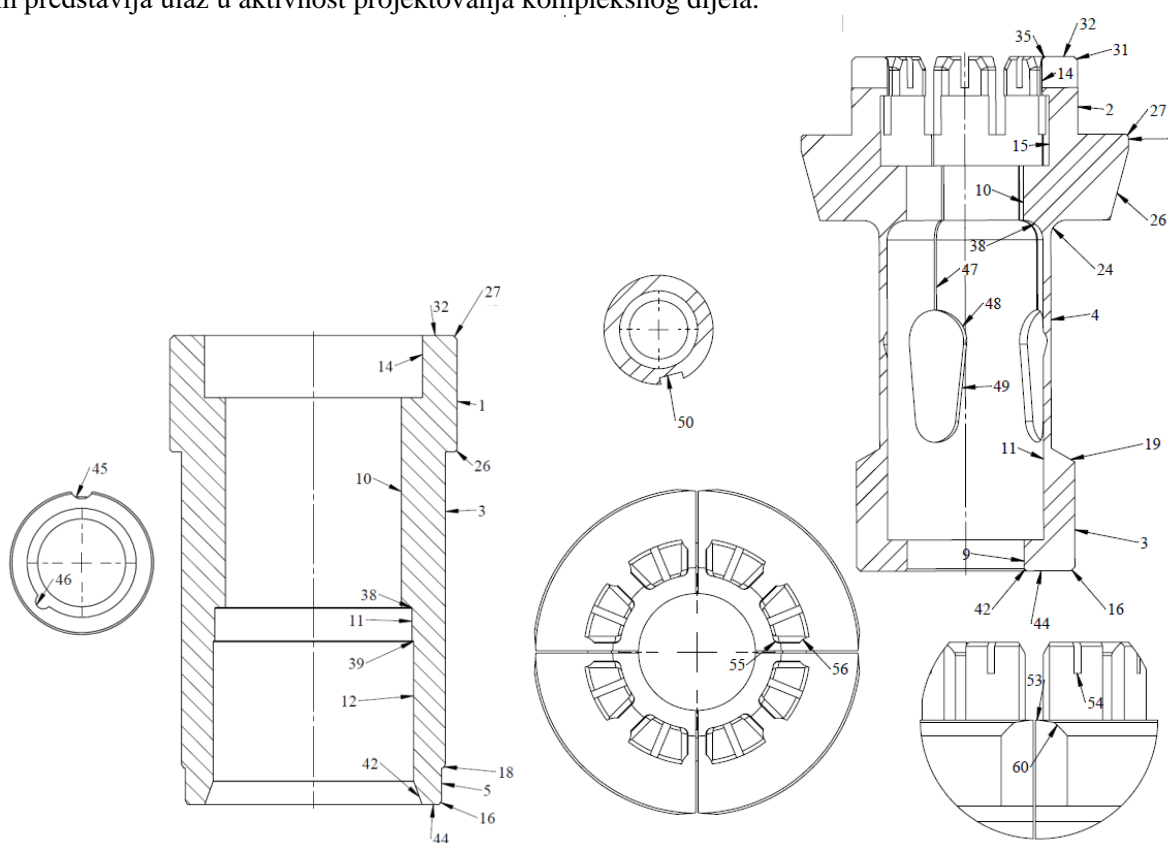


Slika 1. Operaciona grupa dijelova alata za brizganje

Početna aktivnost tokom primjene grupne tehnologije na posmatranu grupu radnih predmeta je postupak klasifikacije. Postupak klasifikacije je izvršen primjenom klasifikatora IAMA razvijenog na Mašinskom fakultetu u Beogradu od strane Katedre za proizvodno mašinstvo. Primjenom ovog klasifikatora dobijeni su klasifikacioni brojevi prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Klasifikacioni brojevi za prikazanu grupu radnih predmeta	
Oznaka dijela	Klasifikacioni broj
Dio 1	102.4530.0
Dio 2	102.2601.0
Dio 3	102.4632.0
Dio 4	102.4650.0
Dio 5	102.4650.0

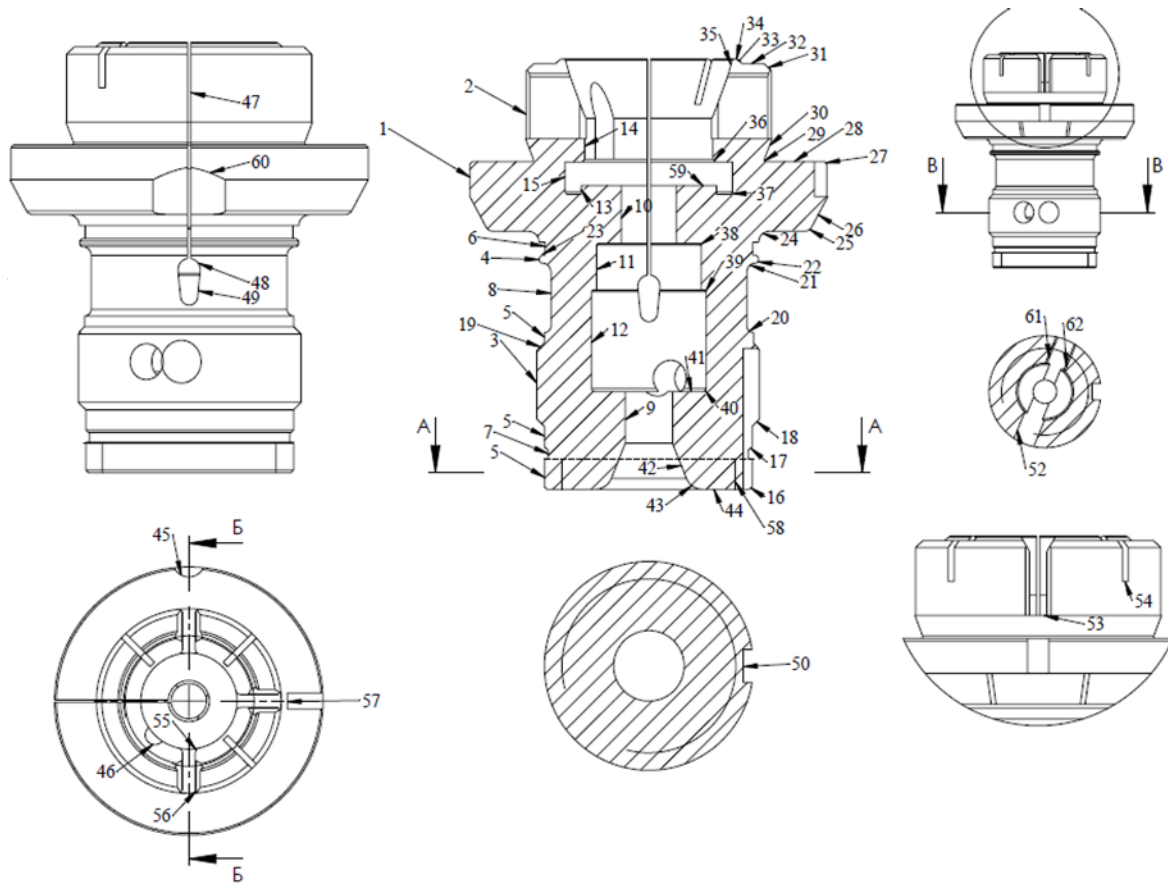
Naredna aktivnost predstavlja definisanje plana kodova, odnosno označavanje elementarnih površina za svaki dio iz posmatrane grupe dijelova. Na slici 2 prikazan je plan kodova za dio 2 i 4. Ova aktivnost na neki način predstavlja ulaz u aktivnost projektovanja kompleksnog dijela.



Slika 2. Plan kodova za dijelove 2 i 4

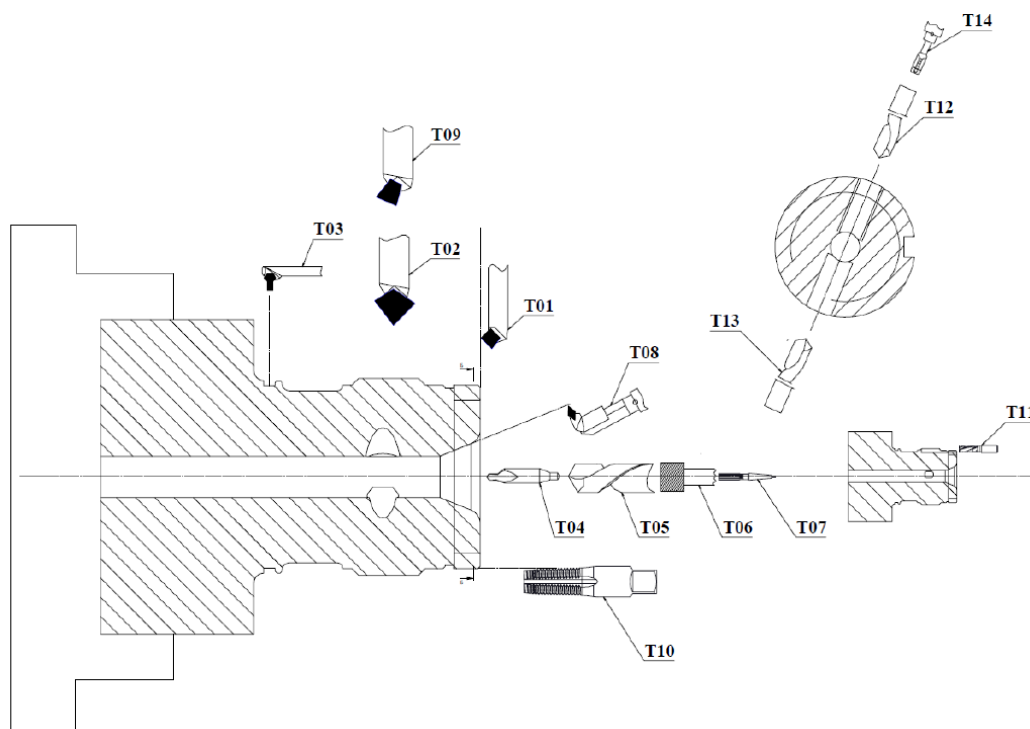
Na osnovu plana kodova pristupa se aktivnosti projektovanja kompleksnog dijela. Kompleksni dio u ovom slučaju je imaginarni, odnosno njegov oblik se ne poklapa sa nekim od već postojećih dijelova iz operacione grupe. Svaha projektovanja kompleksnog dijela je kreiranje podloge za razvoj tehnološkog postupka izrade za sve elementarne površine koje se nalaze na kompleksnom dijelu. Kompleksni dio za posmatranu operacionu grupu dijelova je prikazan na slici 3.

U opštem slučaju elementarna površina je direktno povezana sa (najčešće) jednim ili više elementarnih zahvata obrade. U tom smislu kompleksni dio predstavlja skup elementarnih zahvata za sve dijelove iz operacione grupe. Daljom analizom pripadnosti elementarnih površina odgovarajućem realnom dijelu iz operacione grupe, na relativno jednostavan i brz način je moguće generisati tehnološki postupak obrade za svaki pomenuti dio. Pripadnost elementarnih površina odgovarajućem dijelu se prikazuje matricom zavisnosti između dijelova grupe.



Slika 3. Kompleksni dio za posmatranu operacionu grupu dijelova

Na osnovu geometrijskih i tehnoloških karakteristika kompleksnog dijela izvršeno je projektovanje tehnološkog postupka. Izrada posmatranih dijelova je predviđena da se realizuje na postojećem obradnom centru za struganje *Max Mueller – MDW 20 Mx3000*. U svrhu izvođenja grupne operacije struganja za kompleksni dio identifikovano je ukupno 24 alata. Rezultat projektovanja tehnološkog postupka je plan obrade za dvije grupne operacije. Plan obrade za grupnu operaciju 1 kompleksnog dijela je prikazan na slici 4.



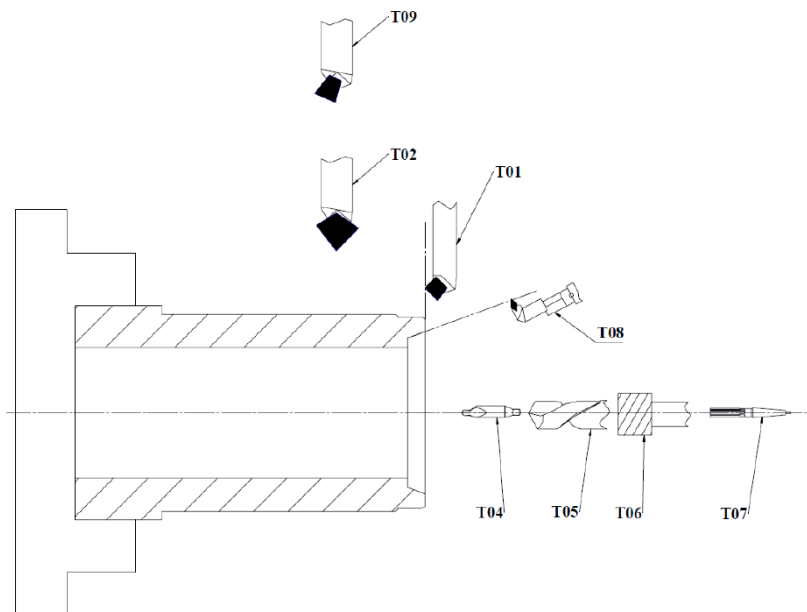
Slika 4. Plan obrade za grupnu operaciju struganjem 1 za kompleksni dio

Sadržaj tehnološkog postupka je takođe podijeljen na dvije grupne operacije struganjem. U okviru grupne operacije struganjem 1 za kompleksni dio ukupno je identifikovano 19 zahvata, dok je za grupnu operaciju struganjem 2 identifikovano 24 zahvata. Segment sadržaja tehnološkog procesa za grupnu operaciju struganjem 1 za kompleksni dio je prikazan na slici 5.

GRUPNI TEHNOLOŠKI POSTUPAK		SADRŽAJ TEHNOLOŠKOG PROCESA		Proizvod: KOMPLEKSNI DIO		
				Veličina serije:		
Mašina: Max Mueller – MDW 20 Mx3000			Operacija: 20		Tipz	Ti
Br.	NAZIV ZAHVATA	Kod alata	PARAMETRI OBRADJE			
			v	n	δ	s
1.	Grubo poprečno poravnanje ϕD_p sa L_p na $L + R + 2\delta_{b_p} + 2\delta_{f_p} + \delta_{g_p} + b$	T01	190	420	b	0,3
2.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa ϕD_p na $\phi D_3 + \delta_b + \delta_f$ na dužini $L + \delta_{b_p} + \delta_{f_p} - L_{16}$	T02	215	410	δ_g	0,3
3.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa $\phi D_3 + \delta_b + \delta_f$ na $\phi D_4 + \delta_b + \delta_f$ na dužini $L_2 + \delta_{b_p} + \delta_{f_p} - L_{16} - L_3$	T02	215	410	δ_g	0,25
4.	Prethodna obrada sa $\phi D_4 + \delta_b + \delta_f$ na $\phi D_5 + \delta_b + \delta_f$ na dužini $L + \delta_{b_p} + \delta_{f_p} - L_4 - L_3$	T02	215	405	δ_g	0,3

Slika 5. Segment sadržaja tehnološkog procesa za grupnu operaciju struganjem 1 za kompleksni dio

Na osnovu projektovanog tehnološkog procesa za kompleksni dio, kao i na osnovu matrice međuzavisnosti elementarnih površina konkretnog dijela i kompleksnog dijela, moguće je projektovati tehnološki proces izrade za bilo koji dio koji je obuhvaćen operacionom grupom. Tako je na slici 6 prikazan plan obrade za dio 2.



Slika 6. Plan obrade za grupnu operaciju struganjem 1 za dio 2

Segment sadržaja tehnološkog procesa izrade za grupnu operaciju 1 za konkretni dio 2 generisan je na osnovu sadržaja tehnološkog procesa za kompleksni dio i prikazan na slici 7. Ukupan broj zahvata za grupnu operaciju struganjem 1 za posmatrani konkretni dio br. 2 iznosi 8, a za grupnu operaciju struganjem 2 iznosi 12. Na osnovu ovih činjenica moguće je izvršiti veoma brzo generisanje tehnoloških procesa izrade za bilo koji dio koji pripada operacionoj grupi, što utiče na smanjenje projektantskog rada i rezultuje uštedama u tehničkoj pripremi proizvodnje.

GRUPNI TEHNOLOŠKI POSTUPAK		SADRŽAJ TEHNOLOŠKOG PROCESA		Proizvod: KOMPLEKSNI DIO			
				Veličina serije:			
Mašina: Max Mueller – MDW 20 Mx3000			Operacija: 20		<table border="1"> <tr> <td>Tpz</td> <td>Ti</td> </tr> </table>	Tpz	Ti
Tpz	Ti						
Br.	NAZIV ZAHVATA	Kod alata	PARAMETRI OBRADE				
			v	n	δ	s	
1.	Grubo poprečno poravnanje Ø42mm sa dužine 66 mm na dužinu 64,5 mm	T01	190	420	1,4	0,3	
2.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa Ø42mm na Ø35,7 mm na dužini 46,8 mm	T02	215	410	3	0,25	
3.	Prethodna obrada sa Ø 35,7na Ø 34,7 na dužini 6 mm	T02	215	410	3	0,3	
4.	Zabušivanje prije bušenja	T04	100	145	-	0,15	

Slika 7. Segment sadržaja tehnološkog procesa za grupnu operaciju struganjem 1 za dio 2

4. ZAKLJUČAK

Cilj grupne tehnologije je smanjenje troškova tehničke pripreme i povećanje iskorišćenja moderne proizvodne opreme tokom procesa izrade dijelova, kao i podizanje nivoa proizvodnje sa pojedinačne i maloserijske na nivo velikoserijske i masovne proizvodnje. Grupisanje dijelova na osnovu potrebne opreme za izradu (mašina) stvara uslove za unifikaciju svih parametara obrade, uključujući kodove alata, brojeve obrtaja, brzine rezanja, dodatke za obradu, pomake, što značajno ubrzava i olakšava proces izrade dijelova na odgovarajućim operacijama.

U okviru ovog rada prikazana je i testirana metodologija primjene grupne tehnologije na grupi realnih dijelova alata za brizganje plastike. Osnovne prednosti koje su prikazane na praktičnom primjeru ogledaju se u značajnom smanjenju pripremno-završnih vremena, zbog značajne redukcije zahvata koji se odnose na podešavanje mašine. Redukcija pripremno završnih vremena utiče na povećanje raspoloživih vremena za izradu, a samim tim se postiže povećanje produktivnosti na odgovarajućim operacijama.

5. LITERATURA

- [1] Jovišević V.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Udžbenik, Mašinski fakultet Banjaluka, 2005.
- [2] Babić B.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Udžbenik, Mašinski fakultet Beograd, 1999.
- [3] Zrilić R., Borojević S.: *Projektovanje tehnoloških procesa – priručnik za vježbe*, Mašinski fakultet Banjaluka, 2011.
- [4] Reddy, C. A. K., Venkatesh, B., Ram, K. S.: *Impact of Group Technology in Manufacturing Industry-State-of-art*, Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, India, 2022, pp. 251-255.
- [5] Kostal, P., Mudrikova, A., Michal, D.: *Group technology in the flexible manufacturing system*, MATEC Web of Conferences 299, 2019, pp.1-8.

Borojević, S., Sredanović, B., Čulum, M.

PROCESS PLANNING DESIGN USING GROUP TECHNOLOGY

Abstract: *This paper describes the methodology of process planning design using group technology on concrete examples from practice. The methodology consists of the analysis of similar parts, the formation of operational groups, the design of a complex part, the definition of set-up`s and operations for the complex part, as well as the definition of set-up`s and operations for a specific part from the operational group of concrete parts. The applied methodology enables both significant savings during the activity of technical preparation of production, i.e. during the activity of process planning design as well as significant savings in the phase of the production of the parts.*

Keywords: *group technology, complex part, process planning design*



Dorđević, V., Karić, M., Erić Obućina J.¹⁾

OCENA SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA NA PRIMERU ZUPČANIKA

Rezime

Rezime: Nijedna aktivnost upravljanja kvalitetom nije moguća bez poznavanja sposobnosti procesa tehnološkog sistema. U ovom radu su prikazani eksperimentalni podaci merenja osnovnih karakteristika pogonskog zupčanika. Podaci su iz dokumentacije preduzeća Petoletka DOO – Hidraulika, deo nekadašnje Prve Petoletke Trstenik. Tokom procesa kontrole obavljena su merenja, na osnovu kojih je izvršena ocena sposobnosti tehnološkog sistema. Princip ocene je zasnovan na poređenju eksperimentalnih podataka koji su dobijeni u procesu kontrole i izračunatih podataka na osnovu kontrolnih granica, a zatim se na osnovu tih rezultata donosi zaključak o sposobnosti tehnološkog sistema.

Ključne reči: sposobnost tehnološkog sistema, pogonski zupčanik, kontrola, kvalitet

1. UVOD

Sposobnost tehnološkog sistema, odnosno, sposobnost procesa je aktivnost koja se odvija u okviru postupka upravljanja kvalitetom. Da bi se obezbedio zadovoljavajući kvalitet proizvoda i procesa potrebno je sprovesti određene metode statističke kontrole, koje pomažu da se posmatraju svi relevantni faktori za poboljšanje kvaliteta u posmatranom procesu i da se tim faktorima upravlja. Na osnovu ove ocene moguće je odrediti potrebne korektivne mere koje treba sprovesti u cilju obezbeđivanja zadovoljavajućeg kvaliteta i, ako je potrebno, poboljšanja trenutnog kvaliteta proizvoda i procesa.

2. OCENA SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA

Sposobnost procesa određuje da li je proces u prisustvu opštih, prirodnih poremećaja u mogućnosti da zadovolji zahteve kupca [1]. Posmatrani proces, odnosno, tehnološki sistem nije sposoban ako su granice zahteva manje od prirodne tolerancije, što znači da treba obezbediti takve uslove da granice zahteva budu veće ili jednake sa prirodnom tolerancijom. Ocena sposobnosti se određuje računanjem indeksa sposobnosti i potencijala procesa.

Indeks potencijala procesa C_p je mera rasipanja procesa i predstavlja odnos propisane i prirodne tolerancije [2].

Indeks sposobnosti procesa C_{pk} uzima u obzir i centriranost, odnosno udaljenost srednje vrednosti od nominalne. Indeks sposobnosti procesa C_{pm} naspram C_p i C_{pk} uzima u obzir i disperziju i kvadratno odstupanje srednje vrednosti od nominalne i predstavlja efikasnu ocenu sposobnosti procesa [3].

Kada je proces pod kontrolom, manja je verovatnoća da se kontrolna promenljiva nađe izvan kontrolnih granica [4].

Osnovni uslov sposobnosti procesa, odnosno, tehnološkog sistema je u tome da raspon zahteva bude veći ili jednak od raspona procesa, odnosno, tehnološkog sistema. Raspon zahteva, odnosno tolerancijsko polje T je područje između gornje i donje granice zahteva [5].

Kod ocene sposobnosti procesa, potrebno je duži vremenski period pratiti uticaje parametara procesa, jer ovaj proces u sebi obuhvata uticaj radnika, mašine, materijala, metoda i radnih uslova. Najmanji zahtev za rasipanje procesa proizvodnje iznosi $X \pm 3\sigma$ (standardna odstupanja - 6σ) u odnosu na sredinu procesa. To

¹⁾ MSc Violeta Dorđević, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek u Trsteniku, (vdjordjevic@asss.edu.rs), dr Marina Karić, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek u Trsteniku, (mkaric@asss.edu.rs), mr Jelena Erić Obućina, Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek u Trsteniku, (jobucina@asss.edu.rs)

obuhvata 99,73% proizvedenih proizvoda koji se nalaze u granicama $0,6 \div 0,7$ polja tolerancije karakteristika proizvoda [6].

Kompletan skup pokazatelja ocene sposobnosti - kvaliteta procesa, odnosno, tehnološkog sistema, čine pet pokazatelja sposobnosti procesa i opreme C_p , CPU, CPL, k i C_{pk} , i svi oni su prikazani u tabeli 1 [2, 7].

Tabela 1. Pet pokazatelja sposobnosti		
Pokazatelji	Zavisnost	Naziv
C_p	$\frac{GGT - DGT}{6 \cdot \sigma}$	Potencijal procesa
CPU	$\frac{GGT - \bar{X}}{3 \cdot \sigma}$	Pokazatelj sposobnosti procesa u odnosu na gornju granicu odstupanja
CPL	$\frac{\bar{X} - DGT}{3 \cdot \sigma}$	Pokazatelj sposobnosti procesa u odnosu na donju granicu odstupanja
k	$\frac{2 \cdot m - \bar{X} }{GGT + DGT}$	Koeficijent odstupanja srednje vrednosti procesa od sredine tolerantnog polja
C_{pk}	$\min\{CPL, CPU\} = (1 - k) \cdot C_p$	Indeks sposobnosti procesa

U najširoj primeni su dva indeksa: indeks potencijala C_p i indeks sposobnosti C_{pk} . Primena ovih indeksa je počela u Japanu (Sullivan 1984.) i automobilske industriji SAD (Ford od 1984.) [2, 7]. U današnje vreme mnoge japanske kompanije u različitim industrijskim granama primenjuju svih 5 pokazatelja.

Ako se posmatraju dva indeksa koja su najviše u upotrebi, može se reći da je tehnološki sistem ili posmatrani proces sposoban kada ovi indeksi imaju sledeće vrednosti [2, 7]:

- Indeks preciznosti $C_p \geq 1,33$ (atributivna ocena: precizan) i
- Indeks tačnosti $C_{pk} \geq 1,33$ (atributivna ocena: tačan-podešen).

Korišćenjem ovih indeksa, mogućnosti procesa se mogu oceniti na sledeći način [2, 7]:

- Ako je $C_p \geq 1,33$ i $|C_p - C_{pk}| \leq 0,1$ | C_p | mogućnosti procesa su visoke (proces je precizan i tačan),
- Ako je $1 \leq C_p \leq 1,33$ i $|C_p - C_{pk}| \leq 0,1$ | C_p | mogućnosti procesa su zadovoljavajuće, ali je neophodno stalno praćenje i monitoring procesa,
- Ako je $C_p < 1$ mogućnosti procesa su nezadovoljavajuće i pod hitno je potrebno preduzeti mere unapređenja mogućnosti procesa (povećanje tačnosti tehnološkog procesa zamenom ili remontom opreme...).

3. ZUPČANIK ZPB F16 21 05

Pogonski zupčanik ZPB F16 21 05 (i.š. 757856) je deo proizvodnog programa preduzeća Petoletka DOO – Hidraulika (deo nekadašnje Prve Petoletke Trstenik). Ovo preduzeće proizvodi veliki broj hidrauličnih pumpi, u velikim serijama, za domaće i inostrano tržište. Navedeni zupčanik je sastavna komponenta jednog dela njihovog proizvodnog programa, zupčastih pumpi. Kako bi se obezbedio precizan i kvalitetan proces izrade i kontrole ovog proizvoda, sprovodi se postupak ocene sposobnosti tehnološkog sistema.

Prikaz pogonskog zupčanika ZPB F16 21 05 iz procesa proizvodnje i kontrole je dat na slici 1, a izgled modela zupčanika modeliranog u programu ProEngineer Wildfire 5.0 i skica dela sa potrebnim kotama i podacima o broju zuba (pravi zubi) zupčanika, modulu zupčanika, kvalitetu i polju tolerancije, uglu nagiba profila i meri preko dva zuba, su prikazani na slici 2.



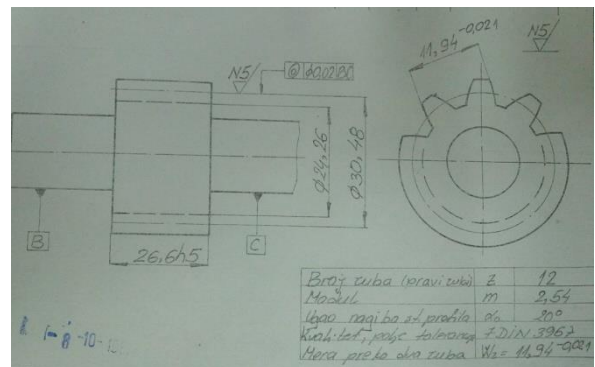
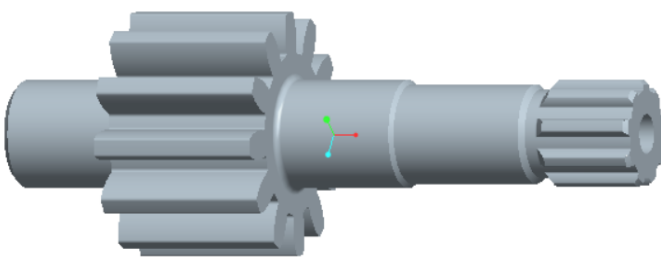
Slika 1. Zupčanik ZPB F16 21 05

Na navedenom pogonskom zupčaniku postoje dva zupčanika različitih dimenzija i sprovedena je kontrola pet različitih dimenzija. Na prvom zupčaniku kontrolisane su sledeće mere:

- mera preko dva zuba $11,94^{-0,021}$
- prečnik podeone kružnice $30,48^{+0,010}$

Na drugom zupčaniku kontrolisane su sledeće mere:

- mera preko iglica $19,534^{-0,040}$
- prečnik temene kružnice $16,3^{+0,100}$
- prečnik podnožne kružnice $13,3^{-0,200}$



Slika 2. Model i skica zupčanika ZPB F16 21 05

Izveštaj o oceni sposobnosti tehnološkog sistema se sastoji od četiri dokumenta: kontrolnog lista operacije, lista za obradu podataka, lista za obradu podataka sa graficima i glavnog dokumenta. Na sledećoj slici prikazan je Kontrolni list kao jedan od dokumenata Izveštaja o oceni sposobnosti tehnološkog sistema za dve od pet prethodno navedenih kota.

IZVEŠTAJ O OCENI SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA										Oznaka dokumenta	
KONTROLNI LIST OPERACIJE										H 055Q 60331 A	
Fabrika	Pogon		Linija		Skica						
PPT Hidraulika AD							30,48		-0,010		
Deo	Naziv	I-sifra	br crteža	Br Dela							
	Pogonski zupčanik	757856		ZPB F16 21 05							
Mašina	Naziv i tip	RC	I-sifra	Dat pret kon.							
	0	3311339	0								
Režim obrade	Br obrt rad kom.	Pomak	br obrt rez.	br operac.							
	1268	0,03	190								
Rezni alat	Naziv	I-sifra	br crteža	Ugačenje							
	Pužni bus										
Broj kontrolisanih komada:					30						
Kontrolisane kote											
Kota	toler	Ra	Kota	toler	Ra	Datum	Kontrolor	Potpis			
30,48	30,490	N5				1.2.2018	V Mijatović				
	30,470										

IZVEŠTAJ O OCENI SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA										Oznaka dokumenta	
KONTROLNI LIST OPERACIJE										H 055Q 60331 A	
Fabrika	Pogon		Linija		Skica						
PPT Hidraulika AD							16,3		0,100		
Deo	Naziv	I-sifra	br crteža	Br Dela							
	Pogonski zupčanik	757856		ZPB F16 21 05							
Mašina	Naziv i tip	RC	I-sifra	Dat pret kon.							
	0	3314085	0								
Režim obrade	Br obrt rad kom.	Pomak	br obrt rez.	br operac.							
	250	0,16	90								
Rezni alat	Naziv	I-sifra	br crteža	Ugačenje							
	nož za ređisanje	7280472									
Broj kontrolisanih komada:					30						
Kontrolisane kote											
Kota	toler	Ra	Kota	toler	Ra	Datum	Kontrolor	Potpis			
16,3	16,400	N7				21/2018	V Mijatović				
	16,230										

Slika 3. Izveštaj o oceni sposobnosti tehnološkog sistema-kontrolni list operacije

U ovom dokumentu su prvo navedeni svi podaci vezani za obradu zupčanika: mašina na kojoj se komad obrađuje, rezni alat i režimi obrade. Navedeni su i podaci koji se odnose na kontrolu kvaliteta zupčanika, tj. kota koja se kontroliše, uz toleranciju i kvalitet obrade. Ovaj dokument sadrži i skicu zupčanika sa potrebnim kotama i podacima.

4. MERENJE I OCENA PREKO INDEKSA SPOSOBNOSTI

Merenje i ocena sposobnosti tehnološkog sistema, u ovom radu, biće prikazana na primeru dve navedene kote. Na prvom zupčaniku mera preko dva zuba i na drugom zupčaniku prečnik podnožne kružnice. To su kote 11,94mm sa tolerancijom -0,021 i kota 13,3mm sa tolerancijom -0,200. U oba slučaja broj kontrolisanih komada je 30. Izmerene vrednosti se kreću u opsegu 11,920mm do 11,923mm za prvu kotu i u rasponu 13,210mm do 13,240mm za drugu kotu, što odgovara navedenoj toleranciji u oba slučaja. Sve dobijene vrednosti merenja su prikazane na slici 4.

n \ r	1	2	3	4	5
1	11.922	11.921	11.922	11.922	11.921
2	11.921	11.920	11.920	11.921	11.920
3	11.922	11.922	11.921	11.922	11.922
4	11.922	11.921	11.921	11.921	11.921
5	11.923	11.923	11.921	11.921	11.921
6	11.922	11.922	11.921	11.921	11.921
ΣX	71.532	71.529	71.526	71.528	71.526
\bar{X}	11.922	11.922	11.921	11.921	11.921
ω_i	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002

n \ r	1	2	3	4	5
1	13.220	13.220	13.230	13.230	13.220
2	13.230	13.220	13.230	13.230	13.220
3	13.220	13.220	13.220	13.240	13.230
4	13.220	13.210	13.210	13.220	13.220
5	13.210	13.220	13.210	13.220	13.220
6	13.240	13.230	13.230	13.230	13.230
ΣX	79.340	79.320	79.330	79.370	79.340
\bar{X}	13.223	13.220	13.222	13.228	13.223
ω_i	0.030	0.020	0.020	0.020	0.010

Slika 4. Rezultati merenja zupčanika

Nakon završenog procesa merenja, pomoću dobijenih rezultata nastavlja se proces obrade podataka. Pristupa se izračunavanju svih potrebnih indeksa potencijala i sposobnosti tehnološkog sistema. Obrada podataka se izvodi prema obrascima navedenim u tabeli 2. U istoj tabeli su prikazani i rezultati obrade podataka za posmatrana dva slučaja.

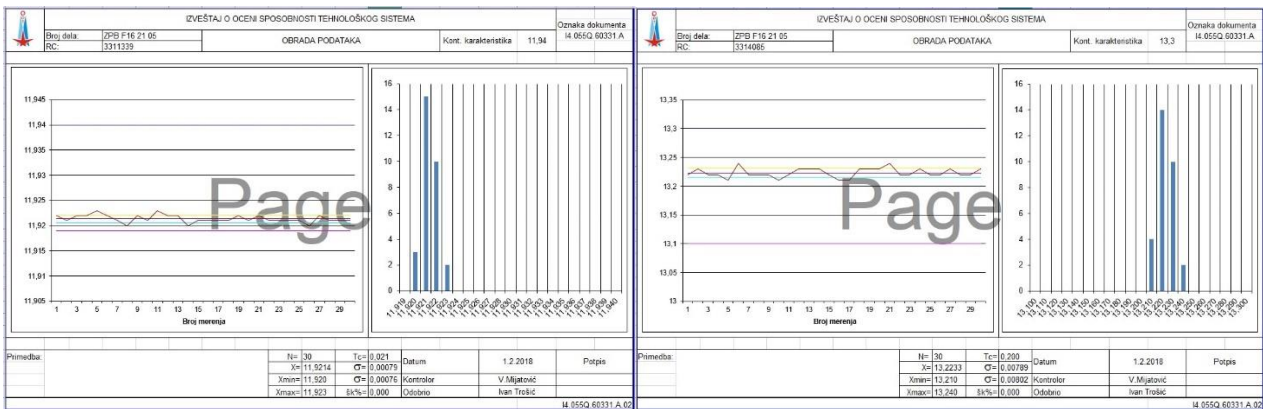
Tabela 2. Obrasci i rezultati obrade podataka		
Obrasci	Rezultati (11,94mm)	Rezultati (13,3mm)
$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^r \bar{X}_i}{r}$	$\bar{X} = 11,92137$	$\bar{X} = 13,22333$
$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^r \bar{\omega}_i}{r}$	$\bar{\omega} = 0,002$	$\bar{\omega} = 0,02$
dn – usvojena vrednost	dn=2,534	dn=2,534
$\bar{\sigma} = \frac{\bar{\omega}}{d_n}$	$\bar{\sigma} = 0,000789$	$\bar{\sigma} = 0,007893$
$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (X_i - \bar{X})^2}{r \cdot n - 1}}$	$\sigma = 0,000765$	$\sigma = 0,008023$
TNM=6·σ	TNM=0,004736	TNM=0,047356
TNP=6·σ	TNP=0,004589	TNP=0,048138
$C_p = \frac{T}{6 \cdot \sigma}$	$C_p = 4,575818$	$C_p = 4,154745$
$C_{pk} = \frac{\Delta_{krit.}}{3 \cdot \sigma}$	$C_{pk} = 1,031375$	$C_{pk} = 3,185304$
$\Delta_{krit.} = GGT - \bar{X}$	0,018633333	0,076666667
$\Delta_{krit.} = \bar{X} - DGT$	0,002366667	0,123333333
$f_p = \frac{6 \cdot \sigma}{T} \cdot 100\%$	$f_p = 21,85401$	$f_p = 24,06887$

Svi eksperimentalni rezultati koji su dobijeni tokom procesa merenja i svi izračunati rezultati iz obrade podataka se navode u narednom dokumentu u okviru Izveštaja o sposobnosti procesa, koji je prikazan na sledećoj slici.

Slika 5. Izveštaj o oceni sposobnosti tehnološkog sistema- obrada podataka

Drugi deo dokumenta koji se odnosi na obradu podataka sadrži grafike, gde su eksperimentalne vrednosti koje su dobijene merenjem prikazane i grafički, u dva grafika. Na prvom grafiku je prikazana zavisnost dobijenih brojevanih vrednosti merenja i broja izvršenih merenja. Na drugom grafiku je prikazan histogram raspodele, odnosno zavisnost izmerenih vrednosti i broja ponavljanja istih vrednosti.

U samom dokumentu je data nazivna mera, kao kontrolna karakteristika, broj kontrolisanih komada, minimalna i maksimalna izmerena vrednost, srednja vrednost rezultata merenja, vrednost tolerancije, procenat škarta. Iz ovog dokumenta se vidi da se sve izmerene vrednosti nalaze u okviru propisane tolerancije, za obe kontrolisane kote i da je procenat škarta jednak nuli.



Slika 6. Izveštaj o oceni sposobnosti tehnološkog sistema- obrada podataka (grafici)

Ocena sposobnosti tehnološkog sistema se određuje na osnovu vrednosti indeksa preciznosti i indeksa tačnosti, koji se računaju prema obrascima koji su dati u tabeli 2. Dobijene vrednosti u prvom primeru (za kotu 11,94mm) su: $C_p = 4,575818$ i $C_{pk} = 1,031375$, a za kotu 13,3mm su: $C_p = 4,154745$ i $C_{pk} = 3,185304$. Da bi postupak bio precizan potrebno je da vrednost indeksa preciznosti bude veća ili jednaka od 1,33 što je u oba slučajeva zadovoljeno, tako da zaključujemo da je postupak precizan. Da bi postupak bio tačan potrebno je da vrednost indeksa tačnosti bude veća ili jednaka od 1,33 što je za kotu 13,3mm zadovoljeno, tako da zaključujemo da je postupak tačan-podešen, dok za kotu 11,94mm nije zadovoljeno, tako da se zaključuje da je postupak kritično tačan.

Apsolutna vrednost razlike posmatranih indeksa za kotu 11,94mm je $|C_p - C_{pk}| = 3,544443$ i ona je veća od vrednosti $0,1|C_p| = 0,4575818$, a za kotu 13,3mm je $|C_p - C_{pk}| = 0,969441$ i ona je veća od vrednosti $0,1|C_p| = 0,4154745$. Na osnovu toga se zaključuje da su mogućnosti postupka zadovoljavajuće, ali je neophodno stalno praćenje i monitoring.

Na osnovu svih ovih pokazatelja zaključuje se da mašina obezbeđuje precizan i tačan postupak za kotu 13,3mm, a precizan i kritično tačan postupak za kotu 11,94mm. Sve to se unosi u konačan Izveštaj o sposobnosti tehnološkog sistema. Ovaj izveštaj je prikazan na slici 7. Takođe, u ovom dokumentu se navodi da nije potrebno preduzimati nikakve korektivne mere.

IZVEŠTAJ O OCENI SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA				Oznaka dokumenta I4.055Q.60331.A	
Fabrika:	PPT Hidraulika AD	Pogon:		Datum provere	1.2.2018
Naziv mašine-RC					
Radni centar (RC)	3311339	I-šifra RC			
PODACI O DELU:					
Naziv dela/Pogonski zupčanik	Br. dela:	ZPB F16 21 05	Šifra dela:	757856	
Kontrolisana karakteristika:	11,94	Veličina tolerantnog polja:	0,021		
Ocena provere:					
Mašina obezbeđuje	precizan	i	kritično tačan	postupak	
Preduzeti korektivnu meru:					
	DA	NE	x		
Kontrolor kvaliteta SR		Rukovodilac biroa kontrole kvaliteta sredstava rada			

IZVEŠTAJ O OCENI SPOSOBNOSTI TEHNOLOŠKOG SISTEMA				Oznaka dokumenta I4.055Q.60331.A	
Fabrika:	PPT Hidraulika AD	Pogon:		Datum provere	1.2.2018
Naziv mašine-RC					
Radni centar (RC)	3314085	I-šifra RC			
PODACI O DELU:					
Naziv dela/Pogonski zupčanik	Br. dela:	ZPB F16 21 05	Šifra dela:	757856	
Kontrolisana karakteristika:	13,3	Veličina tolerantnog polja:	0,200		
Ocena provere:					
Mašina obezbeđuje	precizan	i	tačan	postupak	
Preduzeti korektivnu meru:					
	DA	NE	x		
Kontrolor kvaliteta SR		Rukovodilac biroa kontrole kvaliteta sredstava rada			

Slika 7. Izveštaj o oceni sposobnosti tehnološkog sistema

5. ZAKLJUČAK

U okviru postupka kontrole kvaliteta proizvoda i procesa primenjuju se metode statističke kontrole kvaliteta, kao što su krive rasipanja i kontrolne karte. Pored toga, mogu se ocenjivati pokazatelji sposobnosti procesa i na osnovu njihove vrednosti doneti ocena o sposobnosti tehnološkog sistema, koja je analizirana u ovom radu. Na ovaj način se zaključuje da li je moguće obezbediti zahtevani nivo kvaliteta proizvoda, sa stanovišta procesa, radnika, mašina, alata i pribora.

Prednost primene indeksa pokazatelja sposobnosti je u tome što se aktivnosti usmeravaju na prevenciju pojave neusaglašenosti, defektnih proizvoda, odnosno škarta. Takođe, pomoću ovih podataka proces može da se prati i stalno unapređuje.

6. LITERATURA

- [1] Wu C.W., Pearn W.L., Kotz S.: *An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance*, International Journal of Production Economics, 117 (2):338 – 359, 2009.
- [2] Lazić M.: *Sposobnost procesa - merenje i ocena kvaliteta procesa*, 38. nacionalna konferencija o kvalitetu festival kvaliteta, FQ2011.
- [3] Chandra M. J.: *Statistical quality control*, CRC Press, 2001.
- [4] Montgomery D. C.: *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons, Inc, 7th edition, 2013.
- [5] Kovačić G., Kondić Ž.: *Statistička analiza sposobnosti procesa proizvodnje stretch folije*, Tehnički glasnik 6, 2(2012), 191-198.
- [6] Alagić I.: *Osiguranje kvaliteta procesa mašinske obrade kočionog diska IJ0 615 601 korištenjem SPC tehnika kvaliteta*, 3. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "KVALITET 2003", Zenica, B&H, 13. i 14. Novembar 2003.
- [7] Lazić M.: *Alati, metode i tehnike unapređenja kvaliteta*, univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet Kragujevac, 2006.
- [8] Kolarević M., Radičević B., Premović B., Živković O.: *Indeksi za ocenu sposobnosti procesa*, IMK-14, Istraživanje i razvoj, Godina XVI, Broj (37) 4/2010.
- [9] Oakland S. J.: *Statistical Process Control, Fifth Edition*, Butterworth Heinemann, 2003.

Dorđević, V., Karić, M., Erić Obućina, J.

ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL SYSTEM CAPABILITIES ON THE EXAMPLE OF GEARS

Abstract: Not a single quality management activity is possible without knowing the process capability of the technological system. This paper presents the experimental data of the measurement of the basic characteristics of the drive gear. The data is from the documentation of the company Petoletka DOO - Hidraulika, part of the former Prva Petoletka Trstenik. During the control process, measurements were taken, on the basis of which the capability of the technological system was assessed. The evaluation principle is based on the comparison of experimental data obtained in the control process and calculated data based on control limits, and then based on those results, a conclusion is made about the capability of the technological system.

Key words: technology system capability, drive gear, control, quality

44. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

44th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



24. simpozijum

MENADŽMENT KVALITETOM

Beograd, oktobar 2024.

MENADŽMENT KVALITETOM QUALITY

Stojadinović, S., Živanović, S., Marjanović, M. INTEROPERABILNOST PODACIMA I DIGITALNI MERNI BLIZANCI U KOORDINATNOJ METROLOGIJI.....	5.1
Gegić, M. PLATFORMA ISO 9001:2015 I JEDAN MODEL PROJEKTOVANJA ZA KVALITET U METALOPRERAĐIVAČKOJ INDUSTRIJI.	5.13
Matin, I., Štrbac, B., Ranisavljev, M., Vukelić, Đ., Hadžistević, M. THE ADVANCED SYSTEM FOR DETERMINING THE DEVIATION OF PLASTIC INJECTED MOLDED PARTS.....	5.21
Majstorović, V. 75. GODINA PROIZVODNE METROLOGIJE NA MAŠINSKOM FAKULTETU U BEOGRADU.....	5.27
Радовановић, С., Стојадиновић, С. ПРОЈЕКТОВАЊЕ, ОБРАДА И ИНСПЕКЦИЈА ГЕОМЕТРИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА КВАЛИТЕТА КУЋИШТА РУЧНОГ САТА.	5.44
Ranisavljev, M., Štrbac, B., Matin, I., Hadžistević, M., Runje, B., Horvatić Novak, A. PREGLED RAZLIČITIH ARTEFAKATA KOJI SE POJAVLJUJU U KOMPJUTERSKOJ TOMOGRAFIJI.	5.53
Stepanović M., Živković S., Malbašić S. INSPEKCIJA GEOMETRIJE BAKARNIH OTKOVAKA KUMULATIVNE BOJEVE GLAVE RAKETE „MALJUTKA“.....	5.61
Šibalić, N., Milatović, V. MJERENJE NIVOVA OSVJETLJENJA NA RADNOM MJESTU.	5.67

← NAZAD



Stojadinović, S., Živanović, S., Marjanović, M. ¹⁾

INTEROPERABILNOST PODACIMA I DIGITALNI MERNI BLIZANCI U KOORDINATNOJ METROLOGIJI ²⁾

Rezime

U radu je predstavljeno jedno rešenje problema interoperabilnosti između dva različita DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard) koda u kontekstu digitalnih mernih blizanaca (DMB) za Industriju 4.0. U svrhu istraživanja, konfigurisan je merni sistem koji uključuje numerički upravljaju mernu mašinu (NUMM), merni predmet i stezni pribor. DMB obuhvata virtuelne i fizičke komponente, pri čemu je virtuelna komponenta kreirana u CAD okruženju korišćenjem PTC Creo softvera. Krajnji izlaz iz virtuelnog i realnog merenja jesu DMIS datoteke. U radu je sprovedena analiza i poređenje DMIS kodova iz različitih softverskih okruženja (PTC Creo i PC-DMIS) kako bi se identifikovale i prevazišle prepreke interoperabilnosti. Istraživanje naglašava značaj usklađivanja kodova za tačno i efikasno funkcionisanje komunikacionog protokola između virtuelne i fizičke komponente DMB, kao i za poboljšanje simulacije i optimizaciju mernih putanja. Razlike u strukturi i sintaksi kodova mogu uticati na tačnost merenja i zahtevaju dodatne korake kako bi se osigurala ispravna komunikacija između različitih NUMM. Ovaj rad pruža i pregled procesa inspekcije od modeliranja do stvarnih merenja na NUMM, ističući osnovne razlike između dva DMIS koda. Rezultati ukazuju na informacione praznine i izazove interoperabilnosti, te predlažu načine za njihovo prevazilaženje.

Ključne reči: digitalni merni blizanac, interoperabilnost podacima, Industrija 4.0, simulacija, koordinatna metrologija

1. UVOD

Koncept Industrije 4.0 predstavlja četvrtu industrijsku revoluciju koja integriše napredne digitalne tehnologije u proizvodne procese. Jedan od ključnih elemenata Industrije 4.0 su digitalni blizanci koji omogućavaju stvaranje virtuelnih replika fizičkih objekata i tehnoloških sistema. Tako, digitalni blizanci služe za simulaciju, optimizaciju, monitoring ili praćenje stvarnih sistema u realnom vremenu, što omogućuje povećanje efikasnosti i tačnosti u različitim industrijskim granama. U kontekstu mernih sistema i istraživanja u okviru njih, digitalni merni blizanci (DMB) igraju značajnu ulogu jer omogućavaju simulaciju mernih procesa u virtuelnom okruženju pre nego što se oni izvedu na fizičkim mernim mašinama. Ova integracija virtuelnih i fizičkih komponenti mernih sistema zahteva tačan i pouzdan protok informacija između ova dva okruženja. Međutim, jedan od glavnih izazova u postizanju ove integracije je interoperabilnost između različitih softverskih sistema koji generišu i obrađuju merne podatke. Potreban skup podataka da bi se kreirao jedan digitalni blizanac se razmatra u [1,2] dok su neophodne tehnologije i alati predstavljeni u [3,4]. Stanje istraživanja u oblasti digitalnih blizanaca je dato u [5,6], a njihov uticaj na izvrsnost u proizvodnji opisan je u [7].

Interoperabilnost, odnosno sposobnost različitih sistema da razmenjuju i koriste informacije, ključna je za tačnost i efikasnost mernih procesa. Stoga se u ovom radu istražuje problem interoperabilnosti između dva različita DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard) koda korišćena u kontekstu DMB za Industriju 4.0. Cilj istraživanja je identifikacija i prevazilaženje prepreka interoperabilnosti kako bi se omogućio tačan i efikasan protok informacija između virtuelnih i fizičkih komponenti DMB.

¹⁾ dr Slavenko Stojadinović, van. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (sstojadinovic@mas.bg.ac.rs), dr Saša Živanović, redovni prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Miladin Marjanović, Master inženjer mašinstva, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.

²⁾ U okviru ovog rada predstavljen je deo rezultata istraživanja koja su realizovana u okviru projekta „Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva”, koji finansijski podržava Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-65/2024-03/200105.

U radu je predstavljen jedan model potrebnih podataka kako bi se razvio model digitalnih blizanaca kao i do sada razvijeni modeli mernih blizanaca od strane autora [8-12]. Novost rada je istraživanje problema interoperabilnosti digitalnim podacima u koordinatnoj metrologiji, sa posebnim fokusom na digitalne merne blizance i informacioni tok fizički-virtuelni blizanac na bazi merne mašine. Kroz detaljnu analizu *DMIS* kodova, rad identifikuje ključne prepreke i nudi rešenja za poboljšanje interoperabilnosti između softverskih sistema koji podržavaju ovu oblast. Tako, glavni rezultat rada je unapređenje tačnosti i efikasnosti razmene informacija između virtuelnih i fizičkih komponenti blizanca, što predstavlja značajan korak ka optimizaciji mernih procesa u kontekstu Industrije 4.0.

2. MODEL PODATAKA

2.1 Matematički model i metrološki primitivi

Primarna uloga matematičkog modela (MM) je da uspostavi vezu između koordinatnog sistema (KS) primitiva, KS mašine i KS dela. Pri tome apsolutni KS je vezan za mašinu i u odnosu na njega se definiše inicijalna merna putanja (IMP) koja se primenom kolonije mrava optimizuje ili skraćuje. Sekundarna uloga MM je da eliminiše koliziju (neželjeni kontakt) između mernog senzora (pipka merne glave) i mernog dela. Drugim rečima, njegova uloga je definisanje *point-to-point* putanje bez kolizije za unapred poznato postavljanje (pozicioniranje) mernog dela, odabran i postavljen merni pribor, kao i odabranu ili poznatu konfiguraciju mernog senzora. Osnovna jednačina MM je predstavljena izrazom (1).

$${}^M\mathbf{r}_p = {}^M\mathbf{r}_w + {}^W\mathbf{r}_f + {}^F\mathbf{r}_p = {}^M\mathbf{r}_f + {}^F\mathbf{r}_p \quad (1)$$

IMP se najpre definiše u KS primitiva, a potom na osnovu osnovne jednačine (1) i u zavisnosti od odabira KS mernog dela, ona se definiše i u apsolutnom KS ili KS mašine. Prema [13] generisanje *point-to-point* IMP u KS primitiva je definisano distribucijom dva skupa tačaka, i to (i) skupom mernih tačaka i (ii) skupom čvornih tačaka.

Distribucija mernih tačaka za različite osnovne geometrijske primitive kao što su ravan, krug, polusfera, cilindar itd. se dobija modifikovanjem *Hammersley*-jeve sekvence predstavljene u [13]. Jedan primer jednačina za izračunavanje koordinata mernih tačaka $P_i(s_i, t_i, w_i)$ u Dekartovom KS za primitiv ravan je dat izrazom (2)

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{i}{N} \cdot a \\ t_i &= \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot b \\ w_i &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

gde su: k - *Hammersley*-jeva konstanta, $\text{Mod} 2$ - matematički operator, N -ukupan (željeni) broj mernih tačaka, a [mm] - vrednost ograničenja ravni po x -osi, b [mm] - vrednost ograničenja ravni po y -osi.

Drugi skup tačaka IMP ili skup čvornih tačaka se prema [13] sastoji iz dva podskupa tačaka, i to $P_{i1}(s_{i1}, t_{i1}, w_{i1})$ i $P_{i2}(s_{i2}, t_{i2}, w_{i2})$, gde je $i = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$. Podskup tačaka $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ predstavlja tačke prelaza iz praznog (brzog) u radni (spori) hod mašine. Rastojanje između parova odgovarajućih tačaka $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ i $P_i(x_i, y_i, z_i)$ predstavlja (slika 1b i 1d) d_1 - dužinu radnog hoda, dok na istoj slici rastojanje između parova odgovarajućih tačaka $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ i $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ predstavlja d_2 - dužinu praznog hoda mašine.

Dalje, prema [13] koordinate čvornih tačaka $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ i $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ mogu se izračunati analitički uz pomoć izraza (3)

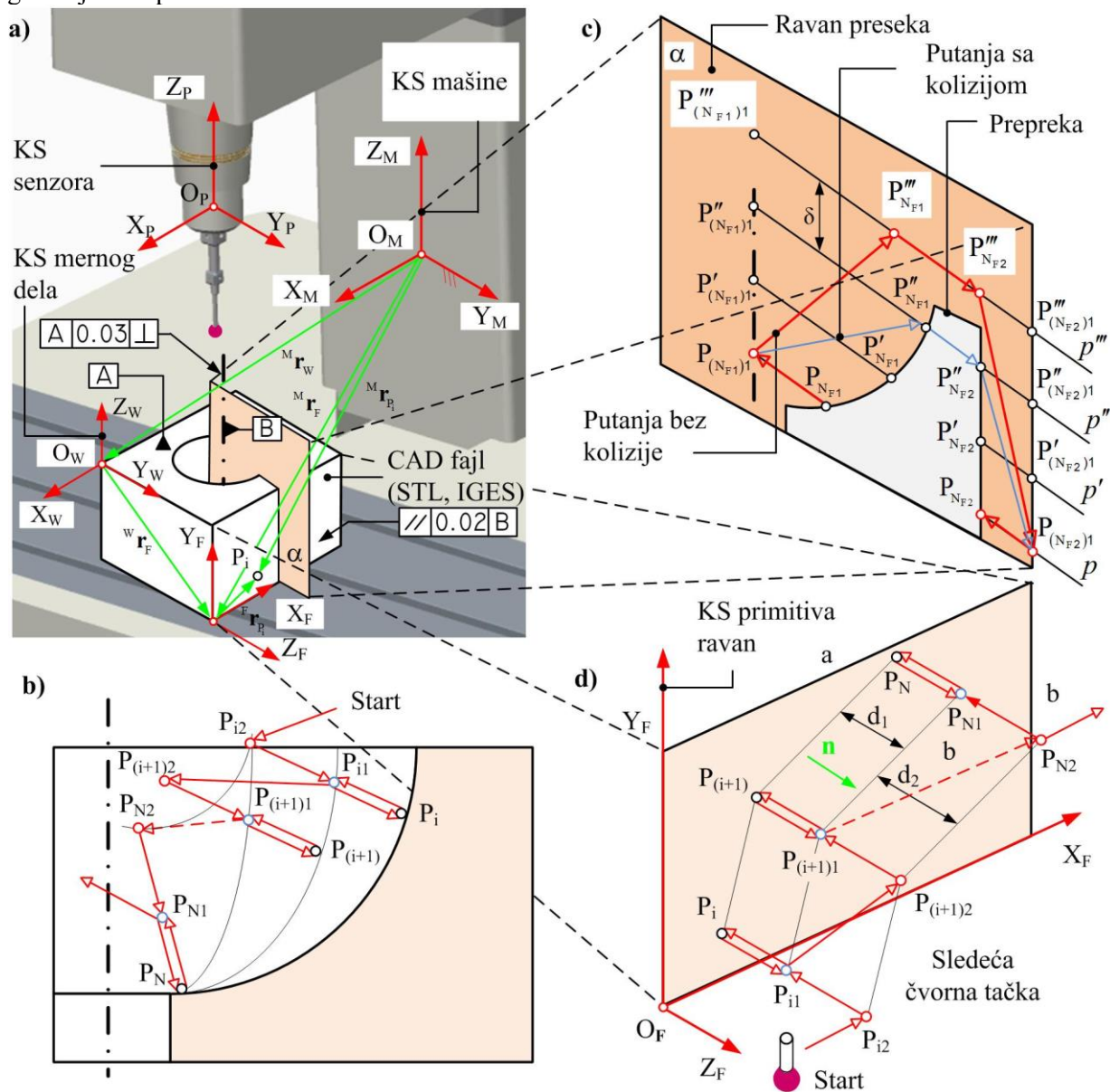
$$\begin{aligned} x_{i1} &= x_{p_{p_{i1}}} + x_i, \quad y_{i1} = y_{p_{p_{i1}}} + y_i, \quad z_{i1} = z_{p_{p_{i1}}} + z_i, \\ x_{i2} &= x_{p_{p_{i2}}} + x_i, \quad y_{i2} = y_{p_{p_{i2}}} + y_i, \quad z_{i2} = z_{p_{p_{i2}}} + z_i \end{aligned} \quad (3)$$

gde su koordinate $x_i = s, y_i = t, z_i = w_i$ ustvari koordinate mernih tačaka $P_{i1}(s_{i1}, t_{i1}, w_{i1})$, dok se druge nepoznate coordinate izračunavaju na osnovu poznatih d_1 i d_2 i na osnovu izraza (4)

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_{i1}P_{i1}} &= \overrightarrow{n_{pi}} \cdot d_1 = x_{p_{p_{i1}}} \vec{i} + y_{p_{p_{i1}}} \vec{j} + z_{p_{p_{i1}}} \vec{k} \\ \overrightarrow{P_{i1}P_{i2}} &= \overrightarrow{n_{pi}} \cdot (d_2 + d_1) = x_{p_{p_{i2}}} \vec{i} + y_{p_{p_{i2}}} \vec{j} + z_{p_{p_{i2}}} \vec{k} \end{aligned} \quad (4)$$

gde je $\overrightarrow{n_{pi}}$ vector punoće geometrijskog primitiva (GF) koji je takođe poznat odnosno opisan.

Na osnovu STL modela predstavljanja geometrije dela, tolerancija dela (slika 1a), koordinata poslednje tačke za inspekciju zarubljene polusfere $P_{(N_{F1})1}$ i koordinata za inspekciju prve tačke ravni $P_{(N_{F2})1}$, uprošćeni princip izbegavanja kolizije između mernog dela i senzora za zadatu toleranciju paralelnosti je predstavljen na slici 1c. Princip je iterativan i sastoji se iz translacije prave p za rastojanje δ do trenutka kada ona ne preseca odgovarajuću zapreminu dela.



Slika 1. Matematički model: a) tolerancije mernog dela, b) IMP za zarubljenu polusferu, c) princip izbegavanja kolizije, d) IMP za ravnu površinu [14]

Ukupna pređena IMP mernog senzora prilikom merenja N mernih tačaka se može izračunati uz pomoć izraza (5)

$$D_{\text{tot}} = \sum_{i=0}^{N-1} (|\overline{P_{i2}P_{i1}}| + 2 \cdot |\overline{P_{i1}P_i}| + |\overline{P_{i1}P_{(i+1)2}}|) + \sum_{i=1}^P (|\overline{P_{(NF1)1}P_{(NF1)1}}| + |\overline{P_{(NF1)1}P_{(NF1)1}''}| + |\overline{P_{(NF1)1}P_{(NF1)1}'''}| + |\overline{P_{(NF2)1}P_{(NF2)1}}|) \quad (5)$$

gde su: p – broj prelaza sa jednog na drugi primitiv (npr. posebno izraženo kod tolerancija položaja), $|\overline{P_{i2}P_{i1}}|$ rastojanje praznog hoda i $2 \cdot |\overline{P_{i1}P_i}|$ dvostruko rastojanje radnog hoda, i $|\overline{P_{i1}P_{(i+1)2}}|$ rastojanje koje pipak pređe iz i -te tačke u $(i+1)$ čvornu tačku.

Kao što je poznato generisanj mernih tačaka u KS mašine se odvija na bazi direktnog kontakta mernog senzora i objekta dodira ili GP na mernom delu. Odnos ili veza primitiva je definisana zadatom tolerancijom. Da bi se uspostavio i primenio opisani matematički model za prizmatične merne delove ključno je definisati obim obuhvaćenih GP kao i parametre koji ih jednoznačno opisuju. GP obuhvaćeni ovim istraživanjem su: tačka, ravan, krug, cilindar, zarubljeni konus i zarubljena polusfera.

Parametri koji jednoznačno određuju navedene GP u njihovom KS (O_F, X_F, Y_F, Z_F) i KS mernog dela (O_W, X_W, Y_W, Z_W) su: koordinate (X, Y, Z), prečnici (D, D_1), visine (H, H_1), širina (a), dužina (b), vektor primitiva (\mathbf{n}), vektor punoće primitiva (\mathbf{n}_p). Koordinate definišu položaj KS GP u odnosu na KS mernog dela. Prečnici su definisani za rotacione GP. Visine su definisane za 3D GP, dok širina i dužina za ravnu površinu. Vektor \mathbf{n} definiše orijentaciju GP u prostoru. Vektor punoće i vektor GP definišu pravac pristupa mernog senzora pri inspekciji GP.

2.2 Optimizacija merne putanje

Optimizacija merne putanje je sprovedena na bazi veštačke kolonije mrava primenom postojećeg algoritma *ants colony optimization* (ACO). Naime, princip ove tehnike je slučajan obilazak svih, u ovom slučaju, tačaka i polaganje feromona po takvoj putanji, a potom pronalaženje najkraćeg puta po kriterijumu najvećeg broja položenih feromona duž pređene putanje. Putanja koja sadrži najveći broj feromona je najkraća putanja. Uprošćeno, putanja kolonije mrava se konstruiše na osnovu sledeća tri koraka:

- prema određenom kriterijumu izabrati početni grad gde će se kolonija pozicionirati,
- koristeći parametre τ_{ij} i η_{ij} konstruisati moguću putanju iterativnim dodavanjem gradova koje kolonija nije već posećivala,
- povratak nazad u početni grad.

Parametar $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ je heuristička informacija i predstavlja heurističku težnju odlaska iz grada i direktno u grad j i obrnuto proporcionalna je rastojanju između dva grada. Feromonska putanja se prikazuje u vidu feromonske matrice čiji elementi su τ_{ij} . Ulazni podaci za algoritam su podaci o IMP čiji postupak generisanja je objašnjen u prethodnom poglavlju. Model polazi od jednačine za izračunavanje ukupnog pređenog puta (5) mernog senzora pri merenju N mernih tačaka, potom definiše ograničenja pristupa pomoću zona kolizije i dolazi do jednačine optimalne putanje (6)

$$\min \{D_{tot}\} = K + \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \left(\min \left\{ \left| \overline{P_{i1} P_{(i+1)2}} \right| \right\} \vee \min \left\{ \left| \overline{P_{i1} P_{(i+1)1}} \right| \right\} \vee \min \left\{ \left| \overline{P_{i(i+1)} P_{(i+1)2}} \right| \right\} \vee \min \left\{ \left| \overline{P_{i2} P_{(i+1)1}} \right| \right\} \right) \right\}$$

gde je konstanta $K = N \cdot (2 \cdot d_1 + d_2)$.

Da bi se dobijena OMP poredila, dve nove putanje su generisane za iste uslove i ista dva tipa GP (ravan i cilindar) jednoznačno definisana parametrima. Za obrađeni merni deo prva merna putanja je generisana i preuzeta sa merne mašine ZEISS UMM50 ručnim (on-line) programiranjem, dok je druga generisana u simulacionom okruženju PTC Creo softvera na bazi 3D CAD modela mernog dela. Prema [15] rezultati poređenja OMP, PTC Creo i on-line programirane merne putanje su dati u tabeli 2. Vrednosti optimizacije su iskazane impaktima I_C i I_S u vrstama četiri i pet respektivno.

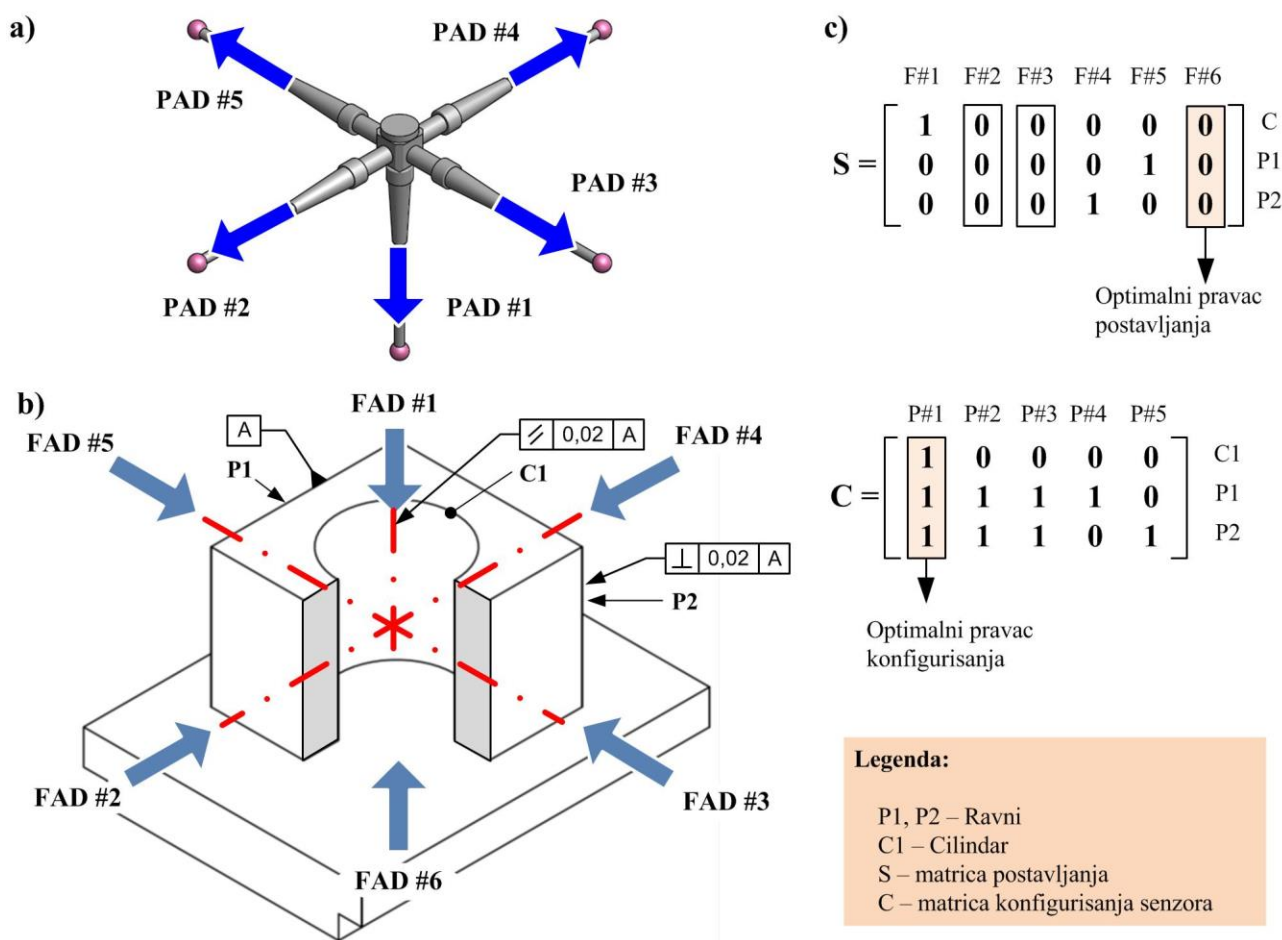
Tabela 2 Rezultati poređenja OMP sa ostalim putanjama			
RB	Naziv merne putanja / impakt	GP	
		Ravan	Cilindar
1	PTC Creo MP* (D_C) [mm]	202.6522	228.9870
2	On-line programirana MP (D_S) [mm]	203.3896	290.9837
3	OMP na bazi kolonije mrava (D_O) [mm]	159.4604	172.2142
4	$I_C=100 - D_O/D_C$ [%]	21.31	24.80
5	$I_S=100 - D_O/D_S$ [%]	21,60	40,81
*MP – merna putanja			

2.3 Analiza i optimizacija postavljanje mernih delova i konfigurisanja mernih senzora

Analiza postavljanja prizmatičnih mernih delova i konfigurisanje mernih pipaka se uglavnom integrišu u tzv. analizu pristupačnosti. Ako se dezintegrisano posmatra osnovna razlika je u tome što je analiza postavljanja orijentisana ka geometriji celog dela dok analiza pristupačnosti ka primitivima iz kojih se sastoji deo sa tendencijom da se na osnovu nje konfiguriraju potrebni merni pipci. Drugim rečima, za svako postavljanje dela

neophodno je sprovesti analizu pristupačnosti i na osnovu nje konfigurisati merne pipke. Analiza se najčešće bazira na pravcima pristupa koji odgovaraju vektoru primitiva, kao jednom od njegovih parametara. Za idealan prizmatičan deo čiji oblik odgovara kvadru, maksimalna broj postavljanja je jednak broju stranica kvadra tj. šest. Analiza postavljanja ima za cilj da zadovolji tehnološke uslove (merne baze itd.), minimalan broj postavljanja mernog dela, optimalnu konfiguraciju mernih pipaka (minimalan broj pipaka) itd.

Prema [13] planiranje inspekcije prizmatičnih delova na NUMM u zavisnosti od broja, pozicije i orijentacije mernih pipaka postavljenih u merni senzor se uglavnom vrši iz tri međusobno ortogonalna pravca koji odgovaraju Dekartovom koordinatnom sistemu. Ova pretpostavka služi kao osnova za razvoj modela konfigurisanja mernih pipaka i postavljanja delova pri merenju. Iz navedena tri pravca mogu se izvesti šest mogućih smerova pristupa mernog pipka (*Probe Approach Direction (PAD)*). S obzirom da je prizmatičan deo neophodno postaviti na radni sto mašine, jedan smer pristupa mernog pipka se izostavlja tako da preostaje pet: PAD #1, PAD #2, PAD #3, PAD #4, i PAD #5 (slika 2a). Sa stanovišta pristupa primitivu uvode se smerovi pristupa primitivima (*Feature Approach Direction (FAD)*), slika 2b. Oni definišu mogućnost pristupa primitivu i osim FAD#1 imaju suprotan smer u odnosu na PAD.



Slika 2. Analiza postavljanja mernih delova i konfigurisanja mernih pipaka: a) pravci PAD, b) merni deo sa tolerancijama i pravci FAD, c) primer definisanja matrice postavljanja S i matrice konfigurisanja mernih pipaka C

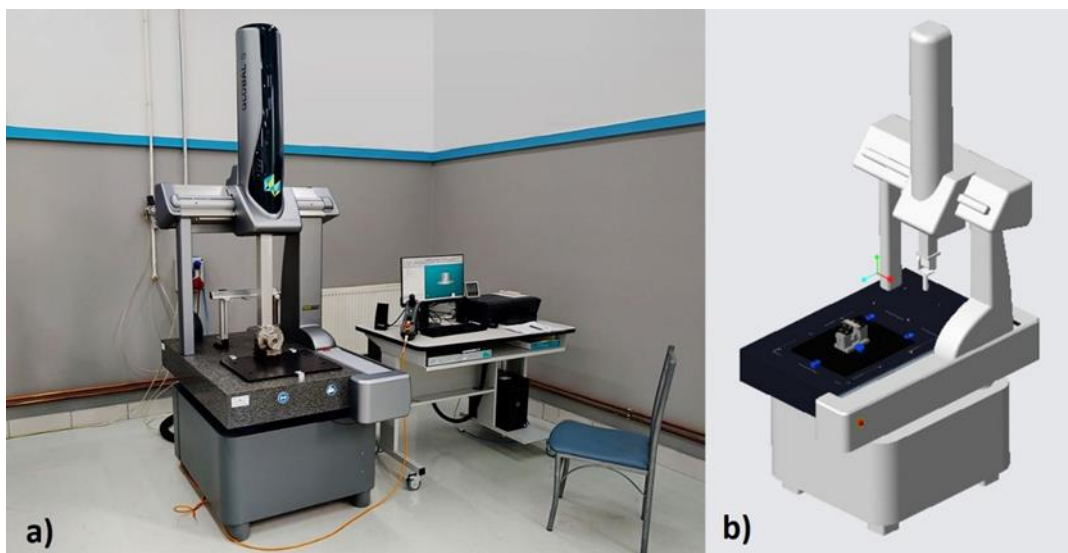
Na osnovu definisanih pravaca PAD# i FAD#, a u cilju primene genetskih algoritama (GA), neophodno je definisati i Bulovu matricu postavljanja S i matricu konfigurisanja C. Elementi matrice S su vezani za pravce FAD# i mogu uzeti vrednost 0 ili 1. Na primer, za zadate tolerancije i obeležene primitivne prema slici 2b element matrice S (C,F#1) (slika 2c) uzima vrednost 1 jer se cilindru C može pristupiti iz pravca FAD#1. Slično, element matrice S (F,F#4) uzima vrednost 0 jer se cilindru C ne može pristupiti iz FAD # 4. Analogno formiranju matrice S, formira se i C korišćenjem odgovarajućih PAD#. Važno je napomenuti da je broj vrsta u obe matrice isti i jednak broju primitiva koji učestvuju u kreiranju tolerancija. U ovom slučaju prisutne su dve tolerancije u kojima učestvuju tri primitiva.

3. DIGITALNI BLIZANCI NA BAZI CAD SOFTVERA I STEP-NC STANDARDA

3.1 Konfigurisanje mernog sistema na bazi CAD softvera

Konfigurisanje mernog sistema obuhvata definisanje svih ključnih elemenata odnosno sklopova i podsklopova mašine, mernog predmeta, pomoćnog mernog pribora i mernih senzora neophodnih za izvođenje realnih i virtuelnih procesa merenja. Merni sistem u ovom radu uključuje:

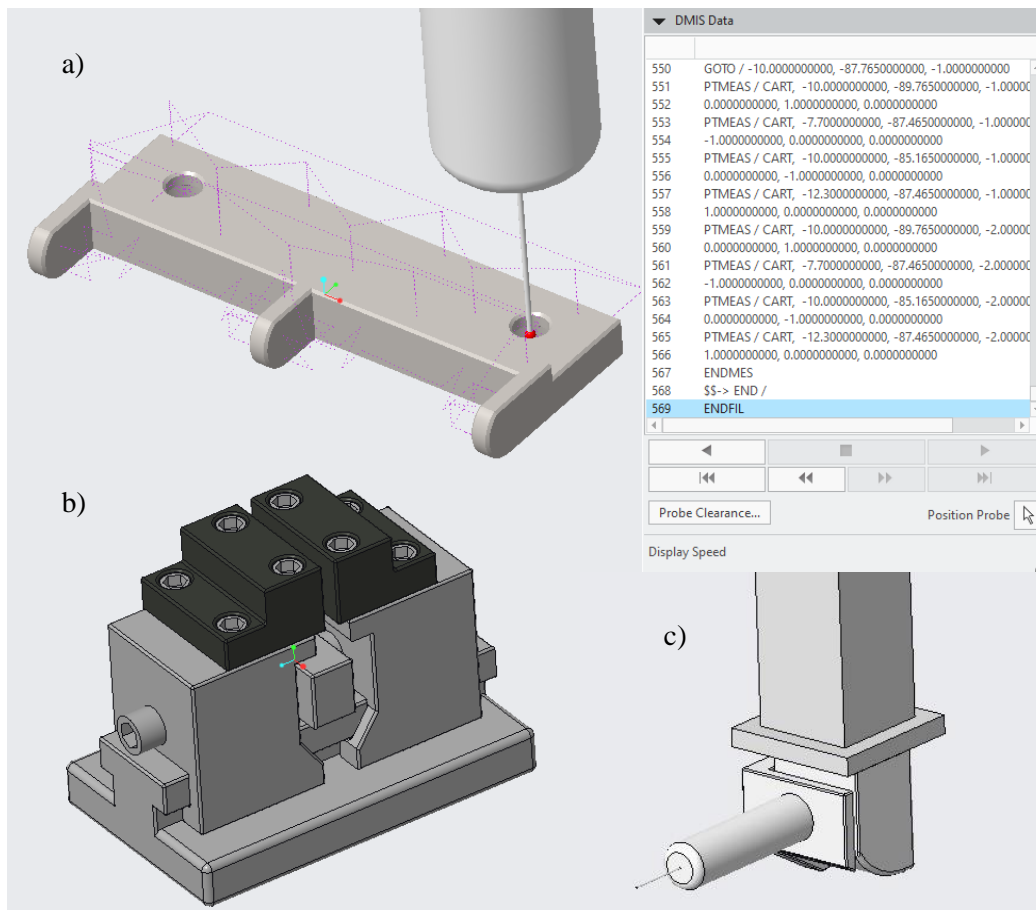
- Realnu i virtuelnu HEXAGON DEA GLOBAL S mernu mašinu (slika 3), koju karakterišu tzv. *point to point* i kontinuirana merenja malih, srednjih i relativno velikih kontura. Postolje mašine se sastoji od granitnog radnog stola na čijoj površini se nalaze vođice duž kojih se kreće glavni portal. Po vođicama na radnom stolu se kreće glavni portal (Y - osa), sačinjen od levog i desnog stuba. Centralni stub se kreće duž grede glavnog portala (X - osa). Kretanje u vertikalnom pravcu (Z - osa) obezbeđuje centralni stub. Sve tri ose mašine (X,Y,Z) za merenje su opremljene zasebnim servo motorom, kretanje osa je uvek pod nadzorom upravljačkog sistema koji može da se kontroliše mernim softverom ili uz pomoć kontrolnog džojstika. Različiti tipovi i konfiguracije mernih glava mogu biti montirane na stub.



Slika 3. DEA GLOBAL S merna mašina: a) realno okruženje (b) virtuelni model

- Merni predmet je fizički objekat koji se meri. U kontekstu ovog istraživanja, odabran je merni predmet koji pripada klasi delova koji se izrađuju serijski (slika 4a). U tom smislu, vrši se programiranje merne putanje za prvi merni komad, nakon čega se isti merni program primenjuje na sve ostale komade. Tehnička dokumentacija odnosno definisane tolerancije mera, oblika i međusobnog položaja imaju direktan uticaj na programiranje mernih putanja na razmatranom predmetu.
- Slično kao kod procesa obrade, stezni pribor ima ulogu u obezbeđivanju stabilnosti mernog dela tokom procesa merenja. Pravilno pozicioniranje i stezanje mernog predmeta su od suštinskog značaja za tačnost merenja. Stezni pribor je dizajniran tako da minimizuje deformacije i osigura ponovljivost mernih rezultata, u kontekstu graničnika koji će svaki naredni put omogućiti automatizovano i ponovljivo merenje (slika 4b).
- Merni senzor (slika 4c) uz pomoć mernih sistema, upravljačke jedinice i softvera vrši akviziciju mernih tačaka odnosno kontakata i prati njihove koordinate u prostoru kontinualno ili prekidno.

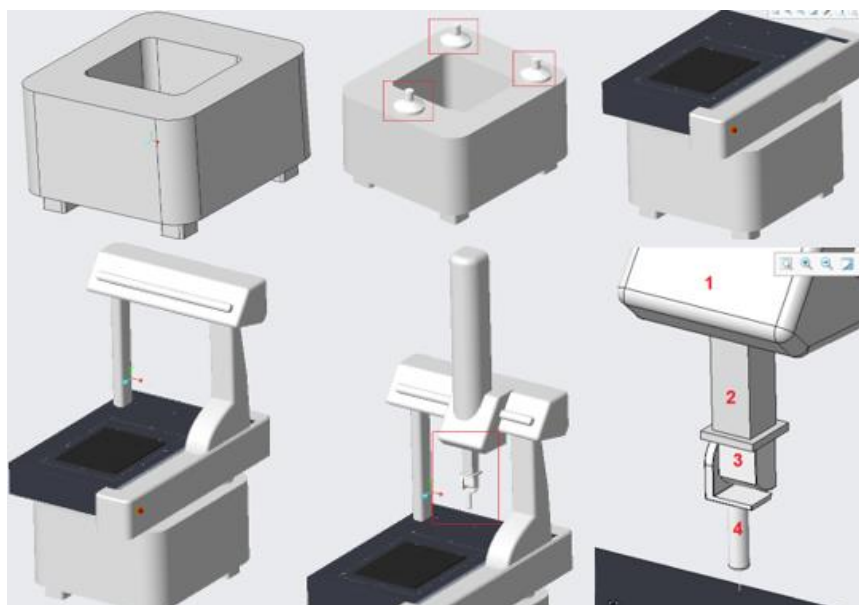
Kombinacija ovih virtuelnih elemenata omogućava kreiranje 3D CAD mernog sistema na bazi merne mašine i generisanje DMIS kodova koji se koriste za programiranje mašine. Virtuelni merni sistem kreiran u CAD okruženju korišćenjem PTC Creo softvera omogućava simulaciju i verifikaciju mernih putanja pre nego što se izvrše realna merenja.



Slika 4. Komponente virtuelnog mernog sistema: a) 3D CAD merni predmet i merni pipak u simulaciji zahvata i deo prikaza DMIS fajla, b) stezni pribor, c) merni senzor

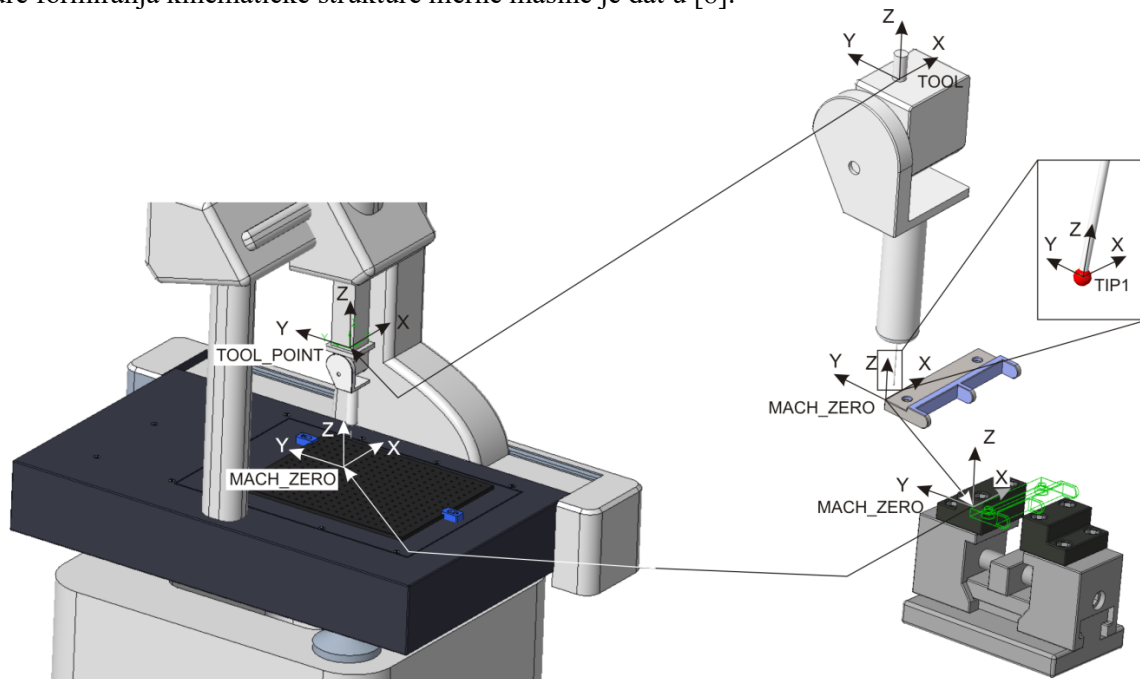
3.2 Definisane kinematičkih veza

U okviru ovog rada, virtuelne komponente (slika 5) su modelirane i integrisane kako bi se kreirao funkcionalan DMB, a sve to na osnovu realnih komponenti korišćenih pri stvarnim merenjima. Virtuelne komponente su kreirane korišćenjem CAD softvera *PTC Creo*, dok realne komponente uključuju mernu mašinu, merni predmet i stezni pribor.



Slika 5. Virtuelne komponente mašine DEA GLOBAL S

Kako bi simulacija bila verifikovana, definisane su kinematičke veze između različitih delova merne mašine. Kinematičke veze uključuju stepene slobode tipa translacija i rotacija. Kao što je poznato, translacija omogućava linearno kretanje komponente hardverske strukture duž određene ose, dok rotacija omogućava rotaciono kretanje komponente oko određene ose. Kombinacija translacije i rotacije predstavlja složeno kretanje odnosno višeosnu mernu mašinu, koja se zapravo najčešće i sreće u realnim industrijskim uslovima merenja. Kinematičke veze sa pripadajućim koordinatnim sistemima (slika 6) su definisane i verifikovane u *PTC Creo* softveru kako bi se osigurala tačnost simulacije i kasnije generisao DMIS fajl. Detaljan opis procedure formiranja kinematičke strukture merne mašine je dat u [8].

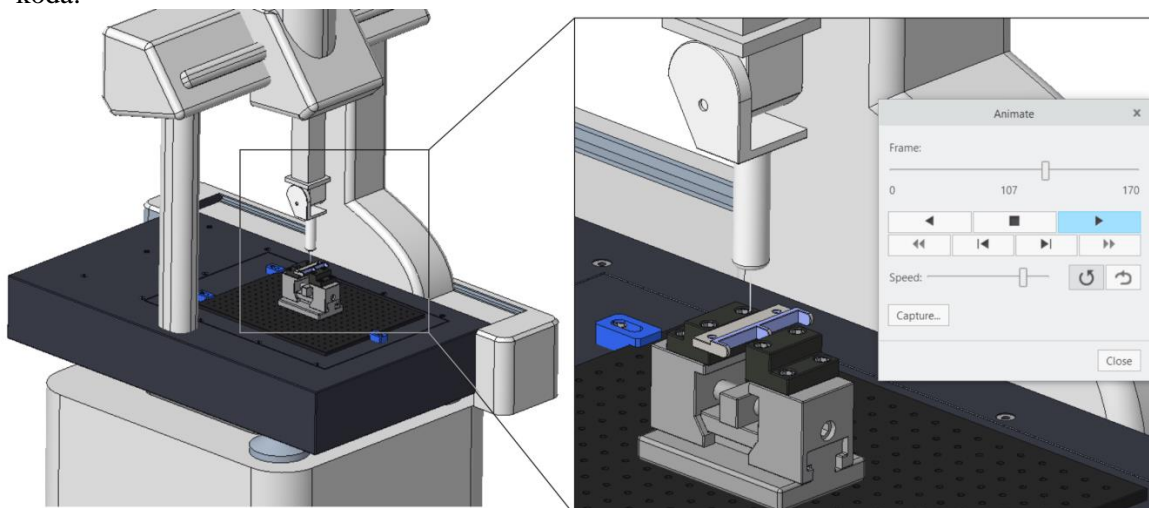


Slika 6. Koordinatni sistemi u okruženju *PTC Creo* [8]

3.3 Simulacija merenja

Simulacija u virtuelnim uslovima prikazana je na slici 7. Proces simulacije uključuje i podrazumeva sledeće korake:

- Kreiranje 3D *CAD* modela: izrada detaljnih 3D *CAD* modela merne mašine, mernog predmeta i steznog pribora u *PTC Creo* softveru.
- Definisane merne putanje: programiranje merne putanje u softveru za sve zahtevane (tražene) geometrijske karakteristike na delu.
- Generisanje *DMIS* fajla – virtuelno merenje: kreiranje *DMIS* (*.ncl) fajla koji sadrži sve instrukcije za rad merne mašine. Ovo je ključni korak kada govorimo o interoperabilnosti i poređenju dva *DMIS* koda.



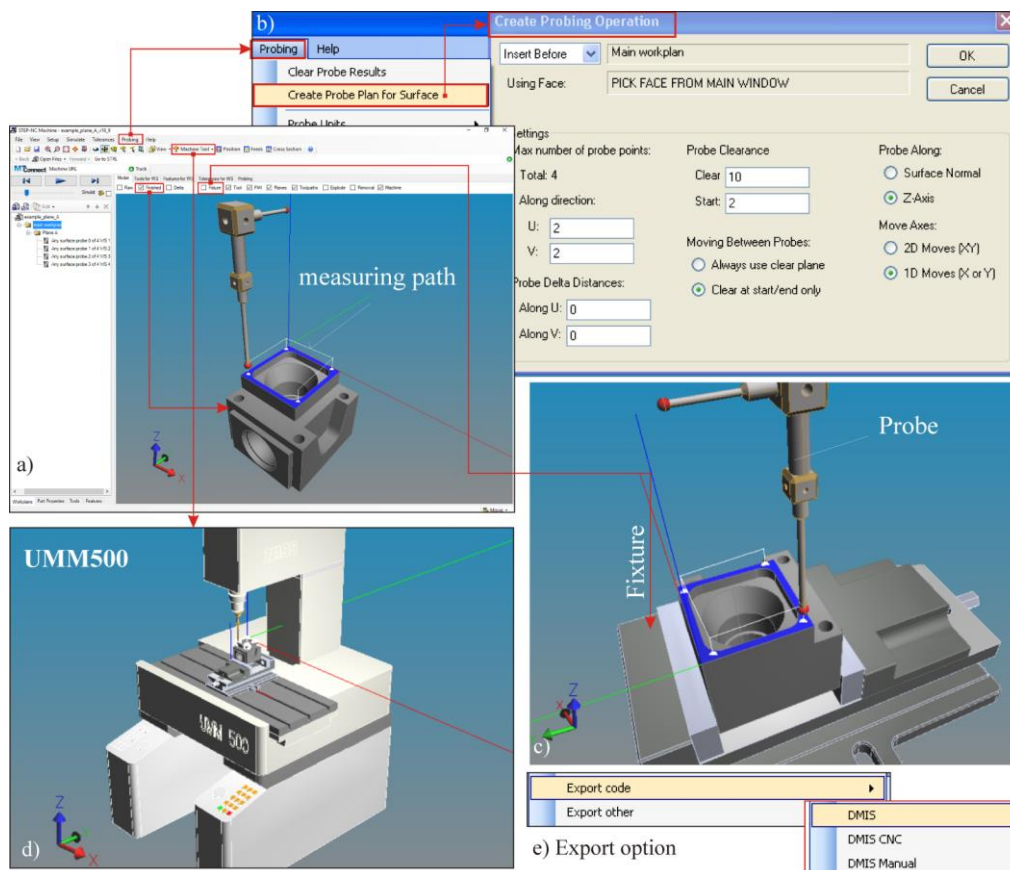
Slika 7. Simulacija merne inspekcije u okruženju *PTC Creo* [8]

- Simulacija operacija: izvođenje simulacije mernih operacija u virtuelnom okruženju kako bi se identifikovali i ispravili eventualni problemi (kolizije) pre realnih merenja.
- Prenos na realni merni sistem: programiranje merne putanje u realnim uslovima i softveru *PC-DMIS*, nakon čega se generiše *DMIS* kod kao rezultat merenja u realnim uslovima.

3.4 Digitalni blizanci na bazi STEP-NC merne strategije

Za programiranje i generisanje merne putanje korišćen je STEP-NC Machine softver koji ima mogućnost da čita dimenzije, tolerancije i osobine (kvalitet) površina i poveže ih sa geometrijom dela. Uz pomoć STEP-NC fajla moguće je kreirati vizuelni merni proces sa putanjom mernog sistema koji se sastoji iz mernog dela, mernog pribora mernog senzora. STEP-NC Machine može prikazati i simulirati merne informacije u okviru STEP-NC fajla, uključujući simulaciju virtuelnog modela mašine. Tokom procesa simulacije moguće je uključiti ili isključiti merni deo i pomoćni merni pribor da bi se bolje videle putanje alata (slika 8a,c).

Za ovaj način programiranja potrebno je realizovati sledeće korake: (i) kreiranje CAD modela mernog dela u raspoloživom CAD sistemu, (ii) definisati koordinatni sistem na mernom delu, (ii) eksportovati kreirani CAD model kao STEP fajl prema definisanom koordinatnom sistemu, (iii) postavljanje definisane jedinice pre učitavanja pripremljenog STEP fajla, (iv) izabrati opciju *Probing and Create probing operation*, slika 8b, (v) podešavanje mernih parametara za izabrani korak kao što su: maksimalan broj tačaka senzora, razmak senzora, orijentacija pipka (normalna površina ili Z-osa), itd. slika 8b, (vi) generisanje merne putanje i čuvanje STEP-NC fajla, (vii) simulacija merne putanje uključujući mernu glavu i (viii) simulacija merne putanje na konfigurisanoj virtuelnoj mernoj mašini UMM500 u STEP-NC Machine, slika 8d, kao digitalni blizanac, (viii) izvoz *DMIS* datoteke, slika 8e. Informacioni tok podataka je obezbeđen povezivanjem fizičkog i virtuelnog blizanca parsiranjem upravljačke liste podataka za mašinu UMM500 u P21 fajl prema proceduri predstavljenoj u [10].



Slika 8. Programiranje i simulacija merne putanje u STEP-NC Machine okruženju [10]

4. INTEROPERABILNOST PODACIMA

Identifikovane prepreke interoperabilnosti često proizlaze iz informacionih praznina između različitih softverskih okruženja. Ove praznine se manifestuju kroz različite načine interpretacije *DMIS* kodova, različite komunikacione protokole i specifične načine optimizacije mernih putanja. Jedan od načina za prevazilaženje

ovih praznina je standardizacija *DMIS* kodova. Implementacija standardizovanih protokola i uniformnih sintaksičkih pravila može pomoći u smanjenju nesporazuma između različitih softverskih alata i mernih mašina.

Takođe, korišćenje naprednih softverskih alata za simulaciju i verifikaciju *DMIS* kodova može pomoći u identifikaciji i otklanjanju potencijalnih problema pre nego što dođe do stvarnog merenja. Ovi alati mogu analizirati generisane kodove, identifikovati potencijalne nesporazume i predložiti korektivne mere kako bi se osigurala tačna i efikasna komunikacija između virtuelnih i fizičkih komponenti DMB-a. Integracija povratnih informacija iz stvarnog merenja u proces simulacije može dodatno poboljšati tačnost i efikasnost mernih procesa. Korišćenjem podataka iz stvarnog merenja za iterativno poboljšanje virtuelnih modela i mernih putanja, moguće je kontinuirano unapređivati pouzdanost rada DMB-a.

4.1 Razlike između *DMIS* kodova iz *PTC Creo* i *PC-DMIS*

DMIS (*Dimensional Measuring Interface Standard*) je standardni jezik za opisivanje merne putanje i instrukcija koje se koriste za mernu mašinu. *DMIS* kodovi omogućavaju komunikaciju između različitih softverskih alata i mernih mašina, čineći proces merenja automatizovanim i efikasnim. U kontekstu ovog istraživanja, *DMIS* kodovi su generisani iz dva različita softverska okruženja: *PTC Creo* (virtuelno merenje) i *PC-DMIS* (stvarno merenje). Uprkos činjenici da oba softverska okruženja generišu *DMIS* kodove u skladu sa standardima, postoje određene razlike koje mogu uticati na tačnost i efikasnost merenja. Ove razlike se mogu posmatrati u nekoliko aspekata:

- **Struktura koda:** *DMIS* kodovi generisani iz *PTC Creo* i *PC-DMIS* mogu imati različitu strukturu, što uključuje različite načine definisanja putanja, koordinatnih sistema, i mernih instrukcija. Na primer, neki *DMIS* kodovi mogu koristiti različite sintakse za istu operaciju, što može dovesti do različitih interpretacija od strane različitih upravljačkih jedinica.
- **Specifikacija tolerancija:** različiti softverski alati mogu imati različite načine definisanja (opisa) tolerancija i uslova merenja. Na primer, jedan softver može koristiti određeni format ili sintaksu za opisivanje ravnosti ili pravosti površine, dok drugi može koristiti drugi format zapisa za iste te tolerancije. To može dovesti do različitih interpretacija kada se ti *DMIS* kodovi prenose između različitih softverskih platform,
- **Komunikacioni protokoli:** ovi protokoli određuju kako se instrukcije *DMIS* koda prenose sa softvera na upravljački mehanizam mašine, što može uticati na brzinu i tačnost merenja.
- **Optimizacija putanja:** softverski alati mogu koristiti različite algoritme za optimizaciju mernih putanja. Na primer, jedan softver može generisati putanju koja minimizira vreme merenja, dok drugi može optimizovati putanju za maksimalnu preciznost. Ove razlike imaju uticaj na tačnost merenja.

Oba generisana *DMIS* koda (slika 9) imaju sličnu osnovnu strukturu, ali postoje neminovne razlike.

The image shows two side-by-side screenshots of DMIS code. The left screenshot, labeled 'a)', is from PTC Creo and shows a series of feature definitions for planes and boundaries, such as 'F(M_PL02)=FEAT / PLANE, CART, \$' and 'F(BND_48)=FEAT / PLANE, CART, \$'. The right screenshot, labeled 'b)', is from PC-DMIS and shows similar feature definitions but with a different syntax, including 'F(PLN2)=FEAT/PLANE, CART, 95.241, -6.008, 0, 0, 0, 1' and 'CALL/M(PCD_AUTO_PLANE_606)'. Both screenshots are highlighted in yellow.

Slika 9. Deo *DMIS* koda: a) *PTC Creo*, b) *PC-DMIS*

U *DMIS* kodu iz *Creo Parametric-a*, svaka merna karakteristika zahteva posebno pozivanje koordinatnog sistema i parametara kao što su brzina, rastojanje i ubrzanje, što povećava obim koda. Nasuprot tome, u *PC-DMIS-u*, koordinatni sistem i parametri su definisani na početku i primenjuju se na sve sledeće karakteristike, što pojednostavljuje strukturu koda. Slična pravila važe za druge parametre. Dalje, u *Creo DMIS* kodu,

poravnanja nisu eksplicitno definisana, već je definisan samo koordinatni sistem. Ta poravnanja (definisane koordinatnog sistema dela u odnosu na koordinatni sistem merne mašine) se određuju kasnije, tokom stvarnog merenja. Kada se DMIS kod iz PTC Creo-a uveze u upravljačku jedinicu, softver obično zahteva definisanje poravnanja, što uključuje odabir karakteristika koje će se koristiti za poravnanje koordinatnog sistema. U zavisnosti od softvera, poravnanja mogu biti definisana prilikom uvoza DMIS datoteke ili ručno unutar DMIS-a, dok neki softveri koriste podrazumevano poravnanje ako već nije navedeno.

Creo DMIS kod ne uključuje temperaturnu kompenzaciju, što može uticati na tačnost merenja. Temperaturna kompenzacija na mašini prilagođava podatke merenja prema temperaturnim varijacijama koje mogu izazvati širenje ili skupljanje komponenti, što rezultira greškama. PC-DMIS softver uključuje ovu funkciju, koristeći u pozadini određene matematičke algoritme i podatke sa temperaturnih senzora za prilagođavanje merenja na osnovu očitavanja temperature. Obim Creo DMIS koda se povećava i zbog načina na koji se generišu merne karakteristike. Na primer, za merenje ravni koriste se granice ravni koje zahtevaju više redova koda za definisanje koordinata. Nasuprot tome, PC-DMIS kod ne zahteva definisanje granica jer su koordinatni sistem i poravnanje već postavljeni na početku, što olakšava određivanje geometrijskih karakteristika.

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljeno jedno rešenje problema interoperabilnosti između dva različita DMIS koda u kontekstu DMB. U svrhu istraživanja, konfigurisan je merni sistem koji uključuje mašinu, merni deo i stezni pribor. DMB obuhvata virtuelne i fizičke komponente, pri čemu je virtuelna komponenta kreirana u CAD okruženju korišćenjem PTC Creo softvera. Krajnji izlaz iz virtuelnog i realnog merenja jesu DMIS kodovi.

Virtuelni merni sistem je baziran na realnoj mernoj mašini DEA GLOBAL S, dok je u kontekstu primene STEP-NC strategije korišćena i virtuelna merna mašina ZEISS UMM500.

Proučavajući strukturu DMIS kodova, uočene su značajne razlike. PTC Creo-ov DMIS kod detaljnije opisuje određene izmerene geometrijske karakteristike, što doprinosi povećanju obima koda sa druge strane. PC-DMIS je usvojio jednostavniji pristup definisanjem koordinatnog sistema i relevantnih parametara na početku, naglašavajući jednostavnost i upravljivost koda. Osim toga, odsustvo eksplicitnih definicija poravnanja u Creo-ovom DMIS kodu predstavlja potencijalni izazov za tačnost merenja, zahtevajući dodatne korake tokom procesa merenja. Ne uzimanje u obzir kompenzacije temperature u Creo-ovom DMIS kodu je dodatni nedostatak. Kada je reč o širim implikacijama ovog komparativnog istraživanja, važno je napomenuti da su ovi zaključci primenjivi samo za razmatrane softvere u radu i ne mogu se univerzalno primeniti bez analize DMIS kodova koje generišu drugi softveri.

Novost sprovedenih istraživanja se ogleda u jednom novom pristupu razvoja DMB i otklanjanju problema interoperabilnosti podacima u komunikaciji fizički – virtuelni merni blizanac u kontekstu pametne proizvodnje i Industrije 4.0.

6. LITERATURA

- [1] Warmefjord K., Soderberg R., Lindkvist L., Lindau B., Carlson S. J.: *Inspection Data to Support a Digital Twin for Geometry Assurance*, Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Tampa, Florida, USA, November 3-9, 2017.
- [2] Gohari H., Berry C., Barari A.: *A Digital Twin for Integrated Inspection System in Digital Manufacturing*, Elsevier IFAC PapersOnLine 52-10 (2019) 182–187.
- [3] Qia Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A.: *Enabling technologies and tools for digital twin*, Elsevier Ltd - Jour of Manuf Sys 2019, Volume 19.
- [4] Lu Y., Liu C., Wang K., Huang H., Xu X.: *Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*, Elsevier Ltd 2019, Volume 14.
- [5] Cimino C., Negri E., Fumagalli L.: *Review of digital twin applications in manufacturing*, Elsevier Ltd 2019, Volume 15.
- [6] Liu M., Fang S., Dong H., Xu C.: *Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications*, Elsevier Ltd - Jour of Manuf Sys 2019, Volume 16.
- [7] Grieves M.: *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*, A Whitepaper by Dr. Michael Grieves 2015, Volume 9.
- [8] Marjanovic, M.A., Stojadinovic, S.M., Zivanovic, S.T.: *Modelling and Simulating the Digital Measuring Twin Based on CMM*, Modelling 2023, 4, 382–393.
- [9] Stojadinovic, S., Durakbasa, N., Zivanovic, S.: *An Optimized and Virtual on-Machine Measurement Planning Model*, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions, ISSN 1451-2092, Vol. 48, No. 4, pp. 745-752, 2020.

- [10] Stojadinovic S., Zivanovic S., Slavkovic N., Durakbasa N.: *Digital measurement twin for CMM inspection based on STEP-NC*, Inter Jour of Com Integ Manuf, 34:12, 1327-1347.
- [11] Rakic, A., Zivanovic, S., Dimic, Z., Knezevic, M.: *Digital twin control of multi-axis wood CNC machining center based on LinuxCNC*, BioResources, Vol. 16, No. 1, pp.1115-1130, 2021.
- [12] Stojadinovic S., Majstorovic V., Durakbasa N.: *An approach to development of the digital inspection twin based on CMM*, Elsevier, Measurement: Sensors 2021, Volume 5.
- [13] Stojadinović, S., Majstorović, V.; *An intelligent inspection planning system for prismatic parts on CMMs*, Springer International Publishing., ISBN 978-3-030-12806-7, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12807-4>
- [14] Stojadinovic, S., Majstorovic, V.D., Gaška, A., Sładek, J., Durakbasa, N.M.: *Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0*, Appl. Sci. 2021, 11, 8411.
- [15] Stojadinovic S., Majstorovic, V., Durakbasa N., Sibaliija T.: *Ants colony optimisation of a measuring path of prismatic parts on a CMM*, Metrol. Meas. Syst., Vol. XXIII (2016), No. 1, pp. 119–132.

Stojadinović, S., Živanović, S., Marjanović, M.

DATA INTEROPERABILITY AND DIGITAL MEASUREMENT TWINS IN COORDINATE METROLOGY

Abstract: *The paper presents a solution to the interoperability problem between two different DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard) codes in the context of digital measuring twins (DMT) for Industry 4.0. For the purpose of the research, a measuring system based on coordinate measuring machine (CMM), a measuring part and a fixture was configured. DMT includes virtual and physical components, with the virtual component created in a CAD environment using PTC Creo software. The final output from virtual and real measurements are DMIS files. The paper analyzes and compares DMIS codes from different software environments (PTC Creo and PC-DMIS) in order to identify and overcome interoperability barriers. The research emphasizes the importance of code alignment for the accuracy and efficient functioning of the communication protocol between the virtual and physical components of the DMT, as well as for the improvement of simulation and optimization of measurement paths. Differences in code structure and syntax can affect to the measurement accuracy and require additional steps to ensure proper communication between different CMMs. This paper also provides an overview of the inspection process from modeling to real measurements on CMM, highlighting the basic differences between the two DMIS codes. The results indicate information gaps and interoperability challenges, and suggest ways to overcome them.*

Key words: *digital measuring twin, data interoperability, Industry 4.0, simulation, coordinate metrology*



Gegić, M.¹⁾

PLATFORMA ISO 9001:2015 I JEDAN MODEL PROJEKTOVANJA²⁾ ZA KVALITET U METALOPRERAĐIVAČKOJ INDUSTRIJI

Rezime

Međunarodno priznata platforma sistema menadžmenta kvaliteta (QMS) odnosno ISO 9001:2015 je standard koji se tokom dugogodišnje primene pokazao kao izuzetno koristan poslovni alat kojeg su iskoristile mnoge organizacije za poboljšanje sopstvene konkurentnosti na domaćem i međunarodnom tržištu. Zahtevi ove specifikacije se odnose na sve poslovne procese u organizaciji. Projektovanje QMS-a prema ovim zahtevima obezbeđuje konstantno visok kvalitet proizvoda i usluga u metaloprerađivačkoj industriji. U ovom radu je opisan model projektovanja i primene ovog standarda na primeru procesa isporuke gotovih proizvoda fabrike "Beli limovi" Šabac HBIS GROUP Iron & Steel. Projektovanje zahteva QMS-a na ovaj proces unapređuje njegovu efektivnost podstičući konkurensku prednost fabrike zasnovanu na rezultatima ostvarene veze cena-kvalitet-rok.

Ključne reči: *Projektovanje, kvalitet, performansa, merenje, analiza, poboljšanje*

1. UVOD

Efektivnost u implementaciji platforme ISO 9001:2015 značajno utiče na poslovni uspeh organizacije. Pored toga što je potpuni "katalizator" promena primetni su pozitivni rezultati na učinak internih performansi poslovnog sistema. Evidentan je učinak u interaktivnoj komunikaciji sa kupcima i isporučiocima čime se bitno unapređuju konkurentski prioriteti. Procesno baziran QMS je oblik kružno uspostavljenog sistema u kojem su podržavajući procesi manje ili više u međusobnoj interakciji [1, 2, 8]. Poremećaj u jednom segmentu implicira smanjenju efektivnosti kompletnog procesnog modela. Rizični faktori dizbalansa funkcionisanja procesno baziranog QMS-a su uglavnom ljudski a ređe tehničko-tehnološki i finansijski. Sama ta spoznaja naglašava značaj efikasnosti upravljanja procesima QMS-a.

Platforma ISO 9001:2015 se tokom niza godina u primeni dokazala kao "regulatorni okvir" u sistemu kontinualnog poboljšanja kvaliteta proizvoda. Ovaj generički sistem je opšte preporučen za poboljšanje konkurentne prednosti na domaćem ali i međunarodnom tržištu. Preporuka Evropske komisije je da se konkurentnost organizacije u budućnosti postiže kroz strateški i inovativni pristup. [4, 5 10] Ova preporuka "Ojačati inovativnu politiku kompanije", otvara nove mogućnosti u implementaciji efektivnog QMS-a jer je on sam po sebi orijentisan poboljšanju kvaliteta u svim fazama proizvodnje ali i isporuci proizvoda do konačne analize potreba tržišta.

Preporuka Evropske komisije u vezi sa strateškim pristupom se odnosi na razvoj tehnologija, optimizaciju i efikasnije korišćenje resursa. Inovacije treba izvesti u oblasti produktivnosti i u oblasti organizacionog upravljanja sa osnovnim ciljem smanjenja potrošnje energije i materijalnih troškova u proizvodnji. Pri tome treba imati u vidu da je dokumentaciju QMS-a potrebno stalno prilagođavati organizacionim inovacijama. Inovacije su podržane standardom ISO 56002:2019 Sistem za upravljanje inovacijama - Smernice za implementaciju upravljanja inovacijama u kontinuitetu. Ovaj standard pruža podršku ISO 9001:2015 kroz generičke smernice za inovacije u svim organizacijama. [1, 5]

¹⁾ Mr Milorad Gegić, „Beli limovi“ d.o.o - Šabac HBIS GROUP Iron & Steel, (miloradgegic@gmail.com),

²⁾ U okviru ovog rada saopšten je deo rezultata istraživanja u području projektovanja i primene ISO 9001:2015 sa ciljem dostizanja projektovanih performansi jednog segmenta QMS-a koji neposredno unapređuje fabričku konkurentnost.

Takođe prema preporukama Evropske komisije iz 2020.g. ovaj razvoj konkurentnosti mora uključiti: niske troškove, visok kvalitet, rok isporuke, vreme upotrebe i fleksibilnost. Ova grupa "de facto" pisanih očekivanja mora poboljšati proizvodne i operativne performanse u industriji sa obaveznim poboljšanim finansijskim implikacijama.

2. ISO 9001:2015 I ODRŽIVA KONKURENTKA PREDNOST

Platforma ISO 9001:2015 je standard sistematizacije i formalizacije poslovnih procesa i procedura koje je potrebno dokumentovati. On se primenjuje u procesima, merenju, kontrolisanju i dizajniranju proizvoda ili usluga bilo koje namene u cilju zadovoljenja potreba interesnih grupa. Jedan od osnovnih benefita njegove primene je unapređenje konkurentnosti i bolji odnos sa interesnim grupama. [4] Ovaj standard je aktuelna i najnovija međunarodna usaglašenost sa svrhom unapređenja institucionalnog kvaliteta. On uspostavlja zahteve za kvalitetnim sistemom za upravljanje organizacijama ali i u prevenciji rizika. Rizici u poslovnim procesima se mogu staviti pod kontrolu na taj način da se mogu smanjiti ublažiti ili eliminisati. U odnosu na prethodnu verziju ISO 9001:2008 nova platforma struktuirala rizike na "visokom nivou" i lakše integriše različite sisteme upravljanja. To je njegova najvažnija odlika tj. "pristup zasnovan na prevenciji rizika". [6, 8, 10]

Nova grupa zahteva standarda ISO 9001:2015 ukazuje na prioritete u upravljanju rizicima kojim bi se zadržala konkurentska prednost organizacije. Podrška najvišem menadžmentu je model upravljanja rizicima zasnovan na PDCA (Plan-Do-Check-Act) ciklusu upravljanja. Planiranje - identifikovanje rizika, Uradi - analiza rizika, Provera - lečenje rizika, Postupanje - pregled sprovođenja i efikasnost. Obzirom na rizike, za potrebe uspostavljanja efektivnog QMS-a, pravilno je iskoristiti ISO 31000:2018 - Smernice za upravljanje rizikom u organizaciji a mogu se primeniti za bilo koju aktivnost u donošenju odluka. [1, 8]

Preventivne poslovne strategije povezane sa rizikom primenjuju se za postizanje zadovoljstva kupaca i stvaranja održive konkurentske prednosti. Održiva konkurentnost je pojam-kategorija kreirana od strane Svetskog ekonomskog foruma 2011 godine. Održiva konkurentska prednost je jedinstvena konkurentska prednost koja omogućava organizaciji da kontinualno nadmašuje svoje konkurente tokom dugog perioda. Ova prednost je održiva ako je konkurentima teško da je dupliraju, repliciraju ili na drugi način neutrališu. Sama konkurentska prednost je ono u čemu organizacija radi bolje od bilo koga drugog. Element održivosti se odnosi na sposobnost organizacije da dugoročno zadrži prihvatljivu uspešnost. Održiva konkurentska prednost ima dve bitne osobine jedinstvenost organizacije i vrednost za interesne grupe. [4, 5, 10]

3. FABRIKA "Beli limovi" ŠABAC HBIS GROUP IRON & STEEL I JEDAN OBLIK KONKURENTNOSTI OBZIROM NA KVALITET PROCESA

Fabrika "Beli limovi" Šabac je ogranak poslovnog sistema HBIS GROUP Iron & Steel d.o.o Beograd. Ona proizvodi beli lim u obliku ravnih tabli i namotaja-koturova koji kupci koriste u industriji ambalaže za proizvodnju kontenera za hranu, boje, hemikalije, farmaceutske proizvode i kozmetiku. Kvalitet proizvoda predstavlja primarni fokus u svim delovima proizvodnog procesa. Uspeh u ovoj oblasti obeležen je priznanjima za kvalitet a u njenom posedu je i sertifikat ISO 9001:2015 i sertifikat HACCP standarda čime se garantuje ispravnost naših proizvoda u korišćenju prehrambene i druge ambalaže. Stalni napredak u aktivnostima je obezbeđen posebnim programima kontinualnog poboljšanja koji je postao deo kulture celog poslovnog sistema. Prisutni su i CI-timovi (timovi za kontinualno poboljšanje) a njihove aktivnosti su usredsređene na smanjenje troškova, kvalitet proizvoda i zadovoljstvo kupca. Obzirom da se specificirane tehničke karakteristike kvaliteta proizvoda podrazumevaju, jedan od bitnih elemenata zadovoljstva kupca je visok stepen kvaliteta procesa koji se odnose na isporuku gotovih proizvoda. [7]

Odgovornost rukovodstva je naglašena za proces isporuke proizvoda a pored dokumentovanih aktivnosti podrazumeva odluke koje se moraju doneti i izvršiti. Ove odluke uglavnom zavise od poslovnih procesa u proizvodnji ali često postoji potreba za višedimenzijalnim pristupom u odlukama drugih poslovnih procesa.

Sa aspekta kvaliteta poslovni procesi se mogu opisati kao skup procesa, podprocesa i aktivnosti. Njihov cilj je zadovoljenje potreba kupaca i interesnih grupa u vremenskom intervalu kroz optimalne troškove. Odrednica optimalni a ne minimalni trošak je dosta bitna obzirom na nivo kvaliteta koji se pruža, jer se ne radi o najvišem već o optimalnom kvalitetu procesa. Minimalni a ne optimalni troškovi mogu bitno uticati na poremećaj funkcionisanja poslovnog sistema i izazvati kašnjenje u isporuci proizvoda. Korisnici ovog procesa su skoro uvek spremni da plate razumnoj ceni za efektivnost u isporuci belog lima nego da rizikuju

lošu uslugu radi minimalnih troškova. Najbolja vrednost za kupca je kombinacija povoljne cene i izvrsne usluge u isporuci proizvoda. [2]

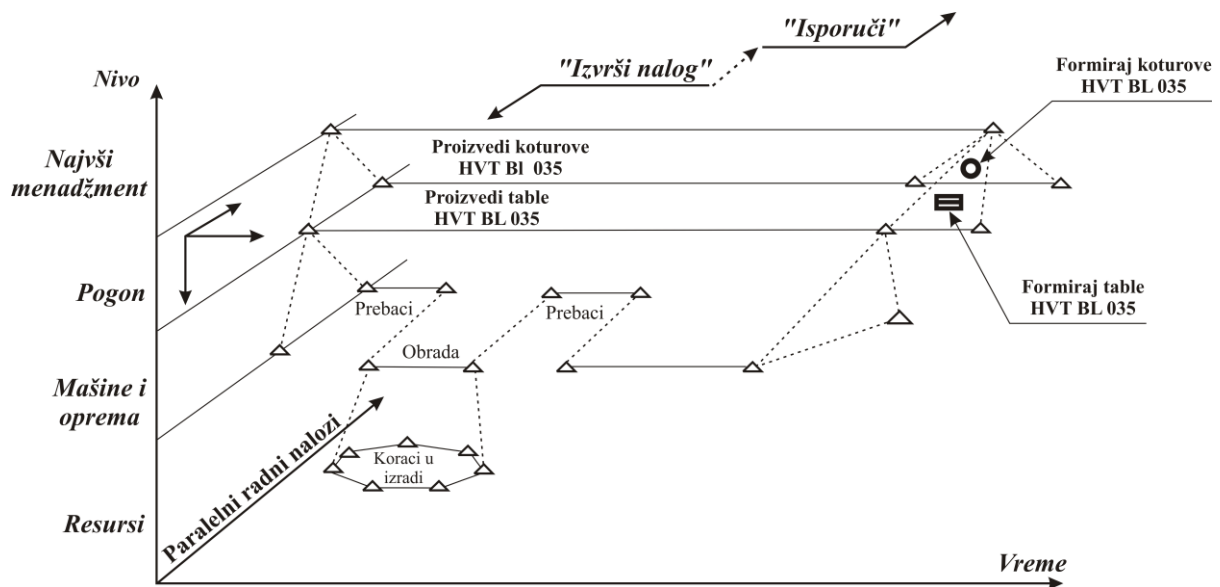
Kvalitet procesa koji se odnosi na isporuku proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji je rezultat kvaliteta drugih poslovnih procesa unutar organizacije ali i ne manje važnog kvaliteta celog skupa drugih procesa u proizvodnom sistemu. Kvalitet procesa isporuke proizvoda je početna tačka i osnov kvaliteta drugih procesa u logističkom lancu isporuke. Iz tog razloga je potrebno organizacionim merama preventivno isključiti propuste, slabosti, kašnjenje zastoj te neočekivani otkaz procesa isporuke proizvoda. [7]

Na kvalitet procesa isporuke neposredno utiče kvalitet procesa skladištenja proizvoda. Nizak nivo kvaliteta skladištenja direktno utiče na slabljenje kvaliteta isporuke proizvoda ali i na sve naknadne logističke procese. [2] Ova problemska stanja se mogu bitno prevazići procesnim pristupom u projektovanju za kvalitet prema zahtevima standarda ISO 9001:2015. Prethodno je potrebno formulirati zahteve za kvalitet procesa isporuke, obezbediti upravljanje resursima, utvrditi odgovornosti i ovlašćenja, meriti zadovoljstvo korisnika i na kraju projektovati poboljšanje performansi kvaliteta. Svi navedeni elementi moraju biti dokumentovani. Kontinualna unapređenja su jedan od osnova serije ISO 9000. Njihovo projektovanje mora biti zasnovano na učenju iz grešaka i korišćenjem novih mogućnosti.

4. PROJEKTOVANJE ZA KVALITET ISPORUKE BELOG LIMA

Osnovni zadatak fabrike je proizvodnja i izvršenje porudžbine odnosno dostava proizvoda kupcu. Ceo proces započinje od najvišeg menadžmenta izdavanjem dokumenta „Izvrši nalog“, na niže hijerarhijske nivoe u organizaciji. Zaposleni u pogonima su raspoređeni u više radnih grupa. Sa organizacionog aspekta radne grupe su povezane zajedničkim sistemom razmene materijala i informacija te proizvodnom i mernom opremom. Zadatak pogona je da proizvede asortiman proizvoda po specifikaciji kupca.

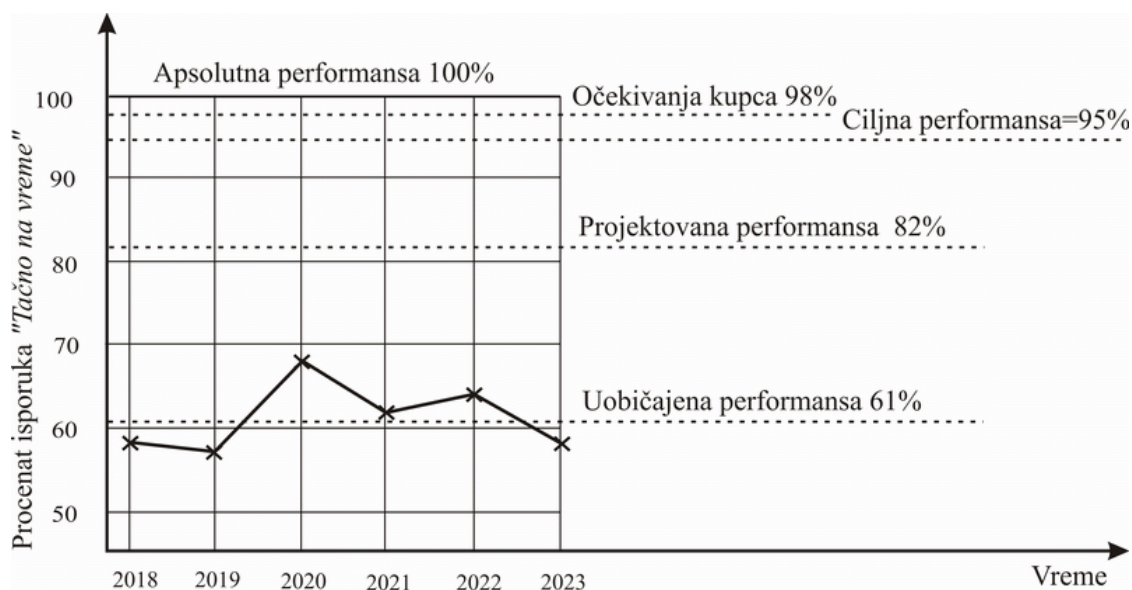
Zadatak radnih grupa je izvođenje proizvodnih operacija na deklarisanom materijalu, prosleđivanje materijala do opreme na kojoj se operacije izvode, preventivno održavanje tehnoloških postrojenja kao i niz drugih zadataka. Na najnižem hijerarhijskom nivou zadaci su nedeljive operacije obrade, merenja i prenosa materijala. Izvršavanje skupa takvih operacija koje zajedno čine kompleksnu proceduru rezultira gotovim proizvodima koji se isporučuju kupcu. Na slici 1., pokazana je struktura zadatka u proizvodnji posmatranog sa više nivoe. Oni prethode procesu isporuke belog lima. [7]



Slika 1. Hijerarhija strukture zadataka u proizvodnji nakon prispeća dokumenta "Izvrši nalog"

Radni nalozi se kreću odozgo na dole, a uz odgovarajuću komunikaciju generišu i paralelne naloge. Zadatak višeg nivoea je završen kada su završeni svi zadaci nižeg nivoea. Ako su oni efikasno realizovani započinje proces isporuke proizvoda u kojem je potrebno dostići projektovani cilj sa aspekta najznačajnije - vremenske performanse.

Projektovanje ciljnih performansi za proces isporuke vrši se na osnovu stepena njihove prihvatljivosti za kupca, zatim, uobičajeno ostvarenih performansi iz prethodnih perioda i na kraju standarda apsolutnih performansi koji uzimaju u obzir teorijske krajnje granice (npr. „bez greške“ „bez zaliha“) slika 2. Za potrebe ovog rada analizirane su opisane performanse šestogodišnjeg perioda kao izveštaji službe razvojnog marketinga fabrike "Beli limovi" u Šapcu. [7]



Slika 2. Realizacija isporuke za period 2018 - 2023 u odnosu na ciljnu performansu isporuke

Ključne procese QMS-a prati niz podržavajućih procesa sa međusobnim uticajima. Podržavajući procesi procesa isporuke belog lima su složena i međusobno povezana struktura a njihova odgovarajuća veza sa zahtevima standarda ISO 9001:2015 analizirana je i pokazana je tabelom 1. [6, 8]

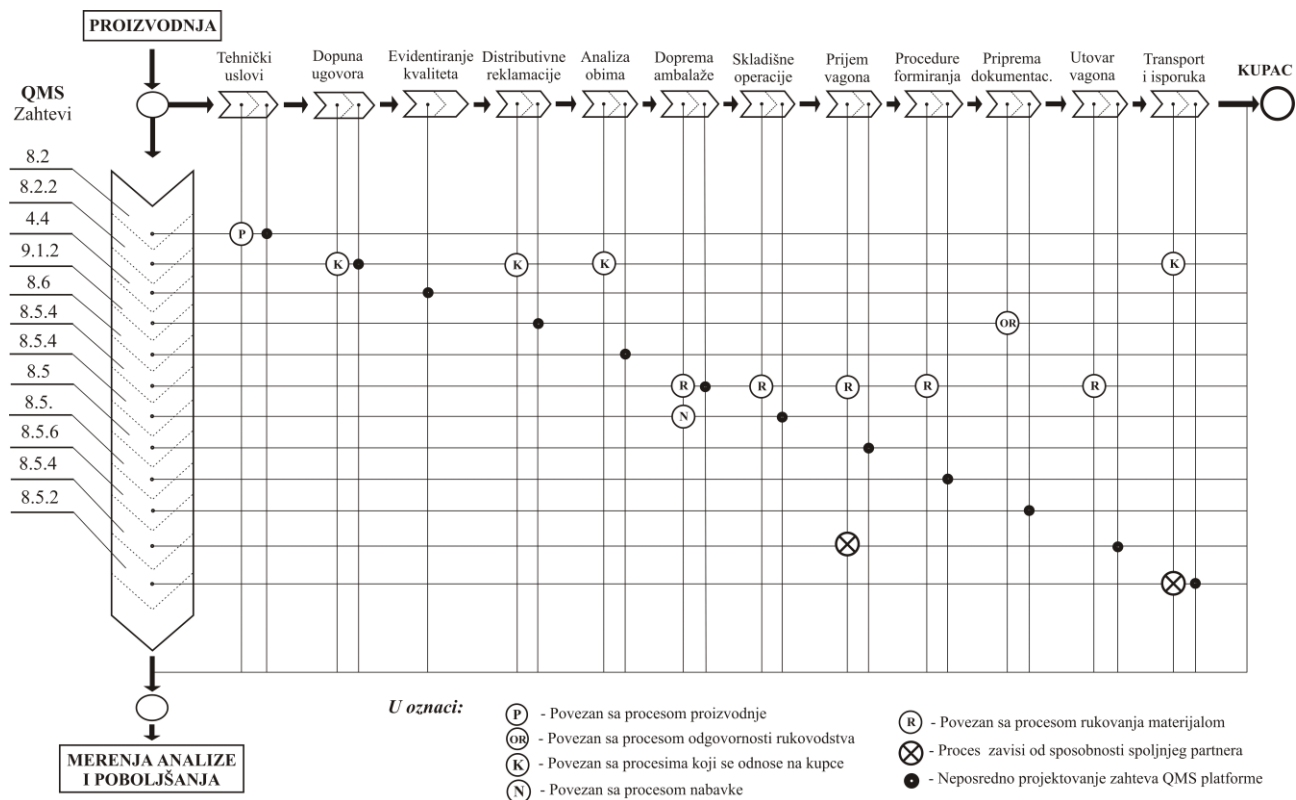
Tabela 1. Struktura procesa "Isporuka belog lima" - Podržavajući procesi			
R.br.	PODRŽAVAJUĆI PROCESI	Zahtev ISO 9001:2015	Zavisnost od drugih procesa
1.	Izrada tehničkih uslova isporuke belog lima	8.2	DA - Proces proizvodnje
2.	Dopuna distributivnog ugovora	8.2.2	DA - Procesi koji se odnose na kupce
3.	Evidentiranje kvaliteta proizvoda i zapisi o kvalitetu	4.4	NE
4.	Analiza reklamacija u vezi sa isporukom	9.1.2	DA - Procesi koji se odnose na kupce
5.	Analiza obima i količine isporuka u proteklom periodu	8.6	NE
6.	Doprema transportne ambalaže	8.5.4	DA - Nabavka i rukovanje materijal.
7.	Skladišne operacije	8.5.4	DA - Rukovanje materijalom
8.	Prijem željezničkih vagona u glavnu halu	8.5	DA - Sposobnost spoljašnjeg partnera
9.	Procedure formiranja transportnih pošiljki	8.5.4	DA - Rukovanje materijalom
10.	Priprema transportne carinske i dokumentacije špedicije	8.5.6	DA - Odgovornost rukovodstva
11.	Utovar vagona	8.5.4	DA - Rukovanje materijalom
12.	Transport i isporuka proizvoda kupcu	8.5.2	DA - Sposobnost spoljašnjeg partnera

Zahtev 7.1.2 standarda ISO 9001:2015 je bezuslovan. On se odnosi na analizu stanja resursa zaposlenih i njihovo angažovanje u okviru procesa. Njihova obuka za kvalitet se projektuje u odnosu na smernice standarda ISO 10015:2022 i to kao opšta i posebna obuka za kvalitet, Tabela 2. [6, 8, 9].

Tabela 2. Resursi: Angažovanje zaposlenih u procesu: "Isporuka belog lima"

R.br.	NAZIV RADNOG MESTA	Kvalifikacija	Opšta obuk. za kvalitet	Posebna obuka za kvalitet	Broj izvršilaca
1.	Referent za izvoz i prodaju	ekonomista	DA	DA	1
2.	Ekspeditor i fakturista	ekonomista	DA	DA	1
3.	Referent za otpremu i špediciju	ekonomista	NE	NE	1
4.	Referent za reklamac. procedure	ekonomista	DA	DA	1
5.	Referent za propratnu tehničku dokumentaciju	inž. mašinstva	DA	DA	1
6.	Skladištar	inž. mašinstva	DA	NE	5
7.	Šef unutrašnjeg transporta	inž. saobraćaja	NE	NE	1
8.	Tehničar pripreme	maš. tehničar	DA	NE	1
9.	Pružni radnik	tr. radnik	NE	NE	3
10.	Vozač teretnog vozila	vozač mot. voz.	NE	NE	4
11.	Rukovalac utovarivača	vozač mot. voz.	NE	NE	4
12.	Rukovalac mosnog kрана	kranista	NE	NE	5
13.	Viljuškrista	viljuškarista	NE	NE	6
14.	Rukovalac uređaja za paletizaciju	radnik un. transp.	DA	NE	4
15.	Smenski radnik za pakovanje i ambalažiranje	radnik unutraš. transporta	DA	DA	6

Proces isporuke belog lima podržava grupa od 12-podprocesa koji se dominantno svrstavaju oko osme tačke zahtava standarda ISO 9001:2015. Projektovanje procesa izvršeno je povezivanjem podržavajućeg procesa sa odgovarajućim zahtevom standarda a za ovu svrhu upotrebljena je tkzv. "matrica procesa". Neposredno projektovanje procesa "ISPORUKA BELOG LIMA" u odnosu na zahteve ISO 9001:2015 pokazano je slikom 3.

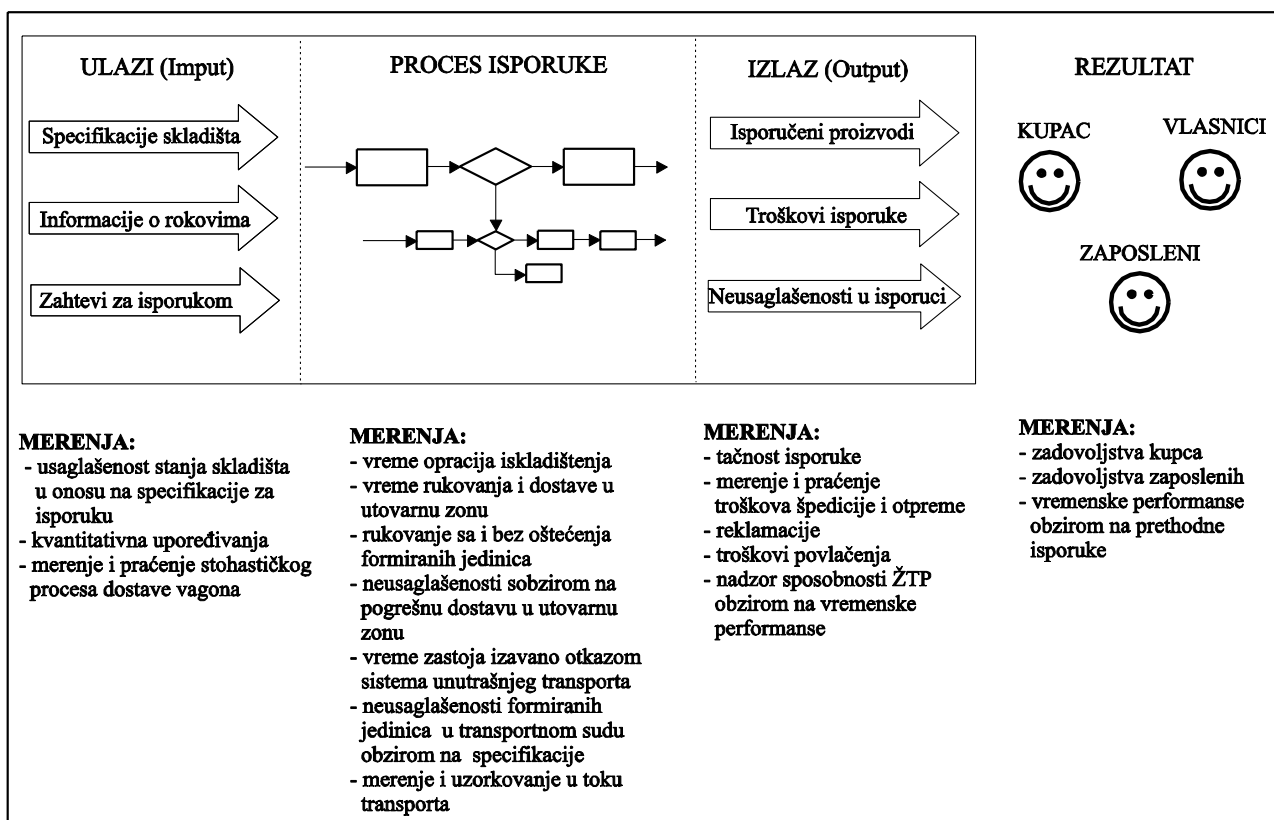


Slika 3. Projektovanje procesa "Isporuka proizvoda" u odnosu na zahteve ISO 9001:2015

5. MERENJA PERFORMANSI U TOKU PROCESA ISPORUKE

Proces isporuke belog lima direktno utiče na zadovoljstvo kupca. Samim tim je obavezno uspostavljanje neprekidnog merenja u toku celog procesa. Merenja potvrđuju sposobnost ovog procesa da ostvari planirani rezultat. Izvode se u pojedinim fazama isporuke, a zasnovana su na specifikacijama isporuke za proizvode upoređenim sa kriterijumima prihvatljivosti o čemu se vode zapisi. Ona se izvode u skladu sa metodama merenja, određenim principima i odgovarajućom dokumentacijom. Obavezno se definiše šta se meri zašto i kako se meri i šta učiniti nakon merenja, odnosno kakve mere preduzeti za poboljšanje performansi. [6]

Određivanje predmeta merenja zavisi od ciljeva isporuke. Zašto i kako se meri, zavisi od ključnih faktora uspeha pojedine performanse. Kontrolisanje efektivnosti preuzima deo poslova oko merenja performansi, koji je povezan sa analizom vrednosti i skupom indikatora za praćenje aktivnosti procesa isporuke. Pozicioniranje merenja izvodi se na ulazu i izlazu procesa, samom procesu, kao i kod kupca što je pokazano slikom 4.



Slika 4. Mesta merenja u procesu isporuke proizvoda

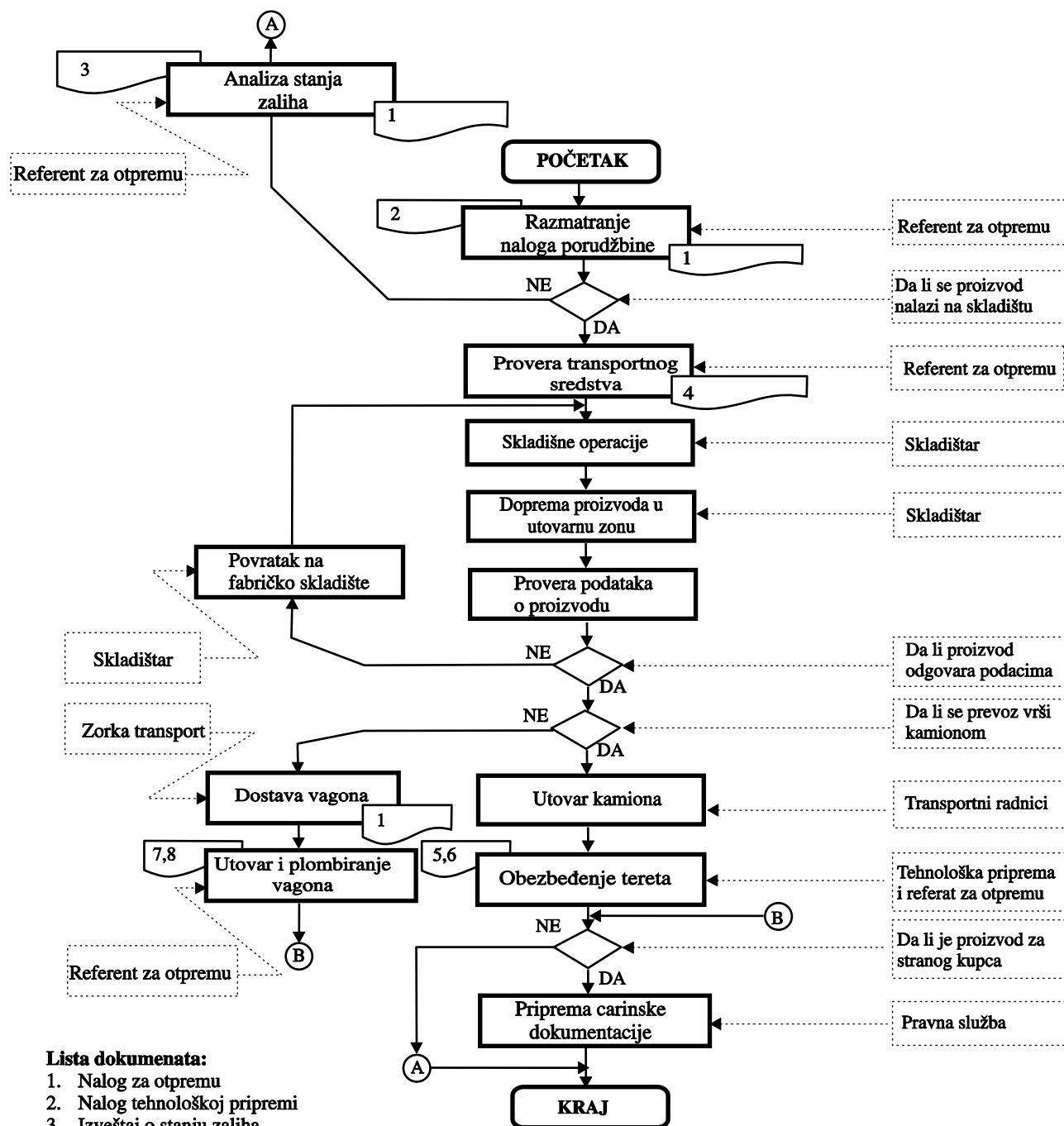
Efikasnost isporuke po principu "tačno na vreme" ne prelazi 62%. Dostizanjem performanse isporuke od 82% ukupna stopa konkurentnosti bi se promenila odnosno poboljšala. Uticaj performanse isporuke na stopu fabričke konkurentnosti i modeliranje konkurentnosti je tema posebne istraživačke studije.

6. TOK PROCESA ISPORUKE BELOG LIMA

Dijagram toka procesa je načešći i najjednostavniji alat kvaliteta. Umesto termina "dijagram" često se koristi i termin "algoritam" koji je preuzet iz matematičke logike i informatike. Tok procesa isporuke proizvoda se opisuje dijagramom toka. On je oblik sistematičnog prikaza redosleda i uzajamnih delovanja koraka u procesu isporuke proizvoda i čini ovaj proces transparentnim. To je pre svega alat vizuelizacije koji poboljšava orijentaciju i komunikaciju zaposlenih pre svega u procesu isporuke ali i drugim procesima od uticaja na ovaj proces. [3, 6]

Dijagram toka procesa isporuke pokazuje sve aktivnosti zaposlenih angažovanih na ovom procesu uključujući tačke odlučivanja, paralelne putanje, petlje grananja sa redosledom izvršenja te zapisima o

kvalitetu kao dokumentovanim informacijama o odvijanju toka procesa. Grafički elementi dijagrama nisu jednoznačno određeni kao ni njegove jednoznačne forme. Dijagram ima izuzetan značaj u fazi planiranja za postizanje cilja procesa i dodeljivanje ovlašćenja i odgovornosti angažovanim u procesu koji najviše utiču na probleme u vezi kvaliteta a u cilju preventivnog uticaja na moguće rizike. Dijagram toka procesa isporuke belog lima pokazan je slikom 5.



Slika 5. Dijagram toka procesa isporuke belog lima [3, 6]

7. ZAKLJUČAK

Konkurentnska prednost fabrike „Beli limovi“ Šabac HBIS GROUP Iron & Steel, rezultat je ostvarene veze cena-kvalitet-rok. Tehnički kvalitet proizvoda belog lima u tablama ili koturovima je dosta blizu teorijskog kvaliteta specificiranog od strane kupca. U načinu funkcionisanja isporuke proizvoda kupcu postoje izvesni problemi što je jasno vidljivo na samom dijagramu „Performanse isporuke“ sa početka ovog rada. Dosta ovih problema može biti pripisano tkzv. „sposobnosti“ spoljašnjeg partnera. Na sam proces isporuke proizvoda kupcu pod kontrolom fabričkog menadžmenta za sada nisu upućene zabrinjavajuće reklamacije.

Projektovanje za kvalitet isporuke prema zahtevima standarda ISO 9001:2015, opisano ovim radom, doprinosi poboljšanju opšteg stepena zadovoljstva kupaca fabričkih proizvoda što podstiče fabričku konkurentnost. Preporuka Evropske komisije je da se konkurentnost organizacija postiže i kroz inovativni pristup. Delimična, opšta ili posebna obuka za kvalitet angažovanih u procesu isporuke belog lima obavlja se u skladu sa smernicama ISO 10015:2022. Obuka za kvalitet podstiče inovativnost, nove aktivnosti, napore ali i želju za uspehom svih.

8. LITERATURA

- [1] Maljugić, B., Đorđević, D., Čočkalo, D., *Sistem upravljanja kvalitetom i konkurentnost u savremenom poslovnom okruženju: Pregled literature i poslovne prakse*, TEHNIKA - KVALITET IMS, STANDARDIZACIJA I METROLOGIJA, No 5, UDC: 005.6; 658.8, DOI : 10.5937/tehnika2105680M Beograd, 2022.g.
- [2] Gegić, M., *Logistički pristup projektovanju za kvalitet isporuke proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji*, Naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem: Dobra praksa u drumskom saobraćaju, Zbornik radova, ISBN-978-86-7498-112-2 Beograd, 2024.g.
- [3] Gegić, M., *Analiza nekih pokazatelja efikasnosti isporuke proizvoda fabrike USS „Beli limovi“ d.o.o - Šabac*, TQM, Br. 1 - 2, Vol. 35, YU ISSN 1452-0680, JUSK - Beograd, Beograd, 2007.g.
- [4] Lushi I, Mane A, Kapaj I, Keco R. *A Literature Review on ISO 9001 Standard*, European Journal of business, Economics and Accountancy, Vol. 4, No. 2, pp. 81-85, 2016.
- [5] Sharipov K. A, Abdullaeva N. S. *The Importance of Quality Management in Innovative-Investment Development of Industrial Enterprises of Uzbekistan (on the Example of Andizhan Automobile Industry)*, Vol. 9, No 3, pp. 99-104, 2020.
- [6] Dokumentacija QMS-a fabrike HBIS GROUP Iron & Steel „Beli limovi“ d.o.o Šabac, 2021.g.
- [7] Upravljačka dokumentacija fabrike HBIS GROUP Iron & Steel „Beli limovi“ d.o.o Šabac, 2022.g.
- [8] ISO 9001:2015 Menadžment kvalitetom - *Zahtevi*, ZSS, Beograd, 2021.g.
- [9] SRP ISO 10015:2021 Menadžment kvalitetom - *Smernice za menadžment kompetentnošću i razvoj ljudi*, ZSS, Beograd, 2021.g.
- [10] Olsen, E., *Sustainable Competitive Advantages*; <https://onstrategyhq.com/resources/sustainable-competitive-advantages/> (Pristup 21.08.2024.g)

Gegić, M.

ISO 9001:2015 PLATFORM AND ONE DESIGN MODEL FOR QUALITY IN THE METAL PROCESSING INDUSTRY

Abstract: *The internationally recognized platform of the quality management system (QMS), i.e. ISO 9001:2015, is a standard that, during many years of application, has proven to be an extremely useful business tool used by many organizations to improve their own competitiveness on the domestic and international market. The requirements of this specification apply to all business processes in the organization. Designing QMS according to these requirements ensures consistently high quality of products and services in the metal processing industry. This paper describes the design and application model of this standard on the example of the delivery process of the finished products of the factory HBIS GROUP Iron & Steel "Beli limovi" Sabac. Projecting QMS requirements onto this process improves its effectiveness by fostering a factory's competitive advantage based on the results of an accomplished relationship of price-quality-deadline.*

Keywords: *Design, quality, performance, measurement, analysis, improvement*



Matin, I., Štrbac, B., Ranisavljev, M., Vukelić, Đ., Hadžistević, M. ¹⁾

THE ADVANCED SYSTEM FOR DETERMINING THE DEVIATION OF PLASTIC INJECTED MOLDED PARTS

Abstract

There are a many of deviation studies on injection molded products. Research has compared the results of numerical simulation with experimental data of injection molded plastic parts. The paper presents an advanced system for determining deviation by simulation and experiment. The results showed that shrinkage change is almost the same for both numerical simulation and experiment study. Divergence in deviation is negligible and injected molded part is fully technically usable. The measurement is performed on three diameters of the circle using a CMM. The software Moldex 3D was used for the simulation, and special software SAPA is used for optimization injection molding parameters.

Key words: injection molding, deviation, CMM

1. INTRODUCTION

Injection molding is a manufacturing process for producing plastic parts by injecting molten material into a mold. Injection molding is mass production technology used to manufactured many products such as bottle caps, automotive parts and components, some musical instruments and parts of them, chairs, containers, mechanical parts, and most other plastic products available today. The injection molding process enables the manufacturing of directly usable quality parts in short cycle times. Various studies have already compared the results of numerical computations with data measured during the experiments. It has been shown that the model results (maximum injection pressures, cooling calculations, shrinkage, and warpage) are in some cases underestimated and in other cases overestimated depending on the material or model used (dual domain and 3D calculations) compared with the experimentally measured values [1, 2]. Clear correlations between the model or material used and the congruence between numerical simulation and experiment could not be observed.

However, using numerical simulation as a substitute for experimentation remains a major challenge to this day. This is due to the unknown congruence between numerical simulation and experiment. Comparisons of the calculated dimensions of the parts with experimental measurements [3-9] have already shown that the calculated and experimentally measured part characteristics can deviate from each other when the injection molded machine settings (mold temperature, melt temperature, cooling time, packing pressure time, packing pressure, and filling time) were varied. It was shown that the influence of various parameter changes can be qualitatively represented using computational results compared to the experiment, but not quantitatively.

The investigations show that commercially available simulation programs are not yet completely able to calculate the properties of injection molded parts. The presented literature already indicates that the correspondence between simulation and experiment depends on the part characteristics considered and the respective production scenario.

As part of the digitalization of injection molding processes, the aim is often to substitute experiments, which are usually associated with high costs, with a digital representation. Commercially available numerical simulation programs are therefore used to obtain information about the process as early as possible in the development process of injection molds. However, the extent to which simulations can actually be used as a

¹⁾ Dr Ivan Matin (matini@uns.ac.rs), prof. dr Branko Štrbac (strbacb@uns.ac.rs), MSc Miloš Ranisavljev (ranisavljev@uns.ac.rs), prof. dr Đorđe Vukelić (vukelic@uns.ac.rs), prof. dr Miodrag Hadžistević (miodrags@uns.ac.rs), University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Production Engineering.

substitute for experiments is still unknown. On the one hand, it remains to be investigated to what extent simulation and experiment deviate from each other depending on the production scenario depicted.

A comprehensive assessment of this has not yet been published in the literature. As a distinction to previous investigations, not only the properties of the final parts were compared as part of the studies, but also the time series of the process parameters, which provide more detailed information on the process sequence. On the other hand, potential causes that result in a deviation between the measured and calculated values were discussed and analyzed in detail. In this context, the boundaries of the simulation, the correspondence of the material data and the influence of the mesh and solver parameters were considered [10, 11]. For the investigations, different process conditions were achieved by varying the operating points in both the simulation and the experiment, and the time series of the process parameters as well as the part characteristics were measured during the experiment and contrasted with the simulation results.

The cooling step is critical role in the performance of the injection molding cycle. The construction of cooling channel, the choice of the cooling agent and the determination of the optimal cooling time have the greatest influence on the injection molding cycle time. Zink et al. [12] analyzed the effect of mold designing and mold material on cooling efficiency using numerical methods. The simulation model was adjusted to the measurement results by considering the gap between the mold inserts. Jahan et al. [13] proposed a modeling procedure for designing optimized layouts of conformal cooling systems in injection molding. The authors applied the design of experiments methodology to analyze the influence of the main design dimensions, as well as the cross-section topologies. Many other authors emphasize the special importance of the cooling phase in the injection molding cycle. They use advanced methods to design cooling channels and optimize cooling parameters [14-18].

2. METHODS AND MATERIALS

2.1 System for numerical simulation and experiment

The system for numerical simulation of injection molding and experiment consists of advanced equipment and software as is presented in Fig.1.

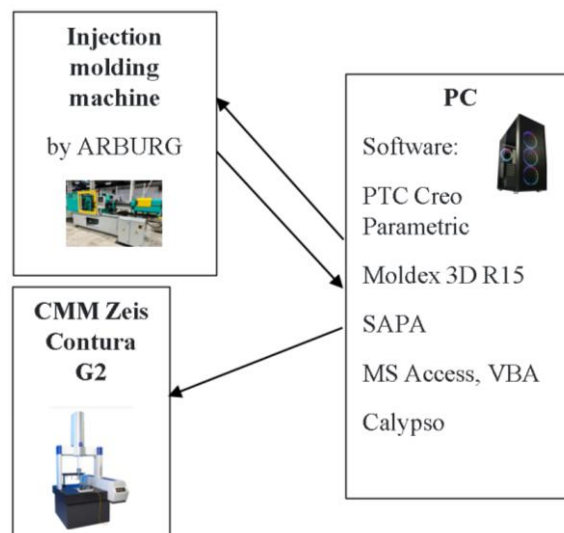


Fig. 1. The system for numerical simulation and experiment

2.2 Simulation model design and material

The product name is desktop wire routing housing. The need is to produce 10000 pcs/year. The simulation model design of the part and its dimension are shown in 2D drawing as is shown in Fig. 2.

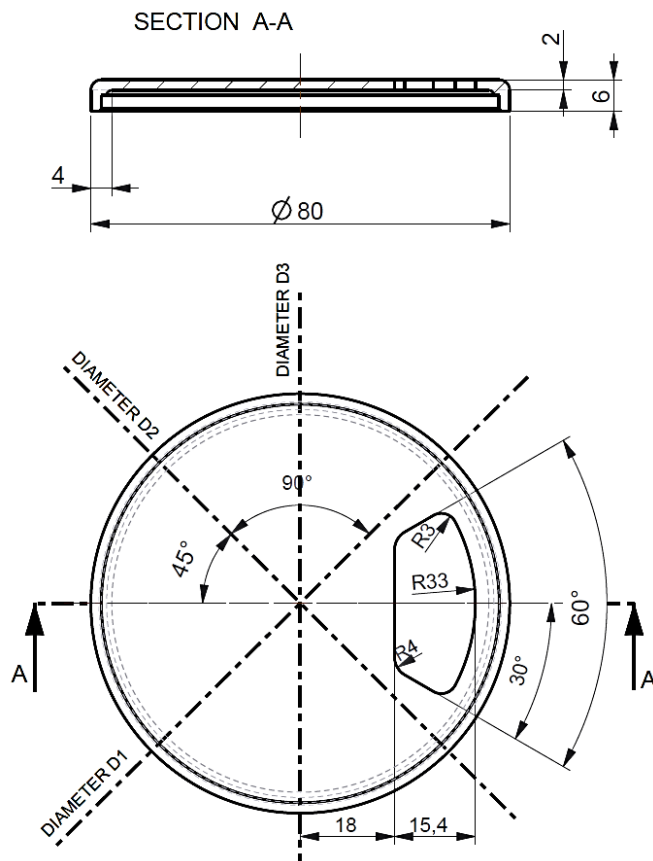


Fig. 2. Technical drawing of the plastic part

The authors defined three measuring diameters (D_1 , D_2 , D_3) needed for determining the deviation, as indicated in Fig. 2. Those three diameters have been measured individually and mean (average) value will be calculated.

The material used is ABS 720 by Kumho manufacturer. The material has an amorphous structure which means that the simulation according to the Modified Cross Williams-Landel-Ferry viscosity model will be applied. The properties of the material are taken from the Moldex 3D software data-base. The material properties of selected material according to injection molding conditions is indicated in Fig. 3.

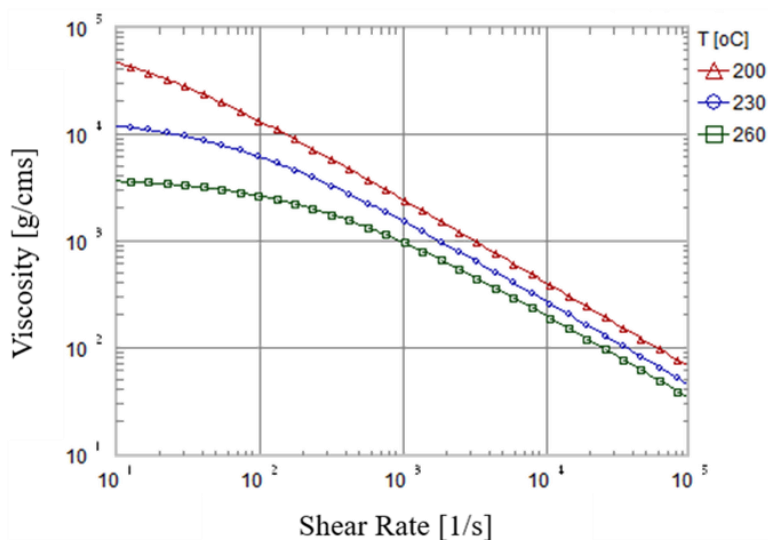


Fig. 3. The properties of selected material of the part

2.3 Cooling system design

The cooling step takes the most time in this injection molding process, accounting for approximately 80% of the cycle duration. That is why the design of the cooling channels plays a critical role in the performance of the injection mold. Traditionally, straight cooling channels prevent uniform and effective cooling in free form parts. Despite all the advantages of conformal cooling channels, their benefits are maximized only when an automated design method capable of optimizing the heat exchange process between the part and the coolant flow is carried out. The convenient cooling system position is shown in Fig. 4.

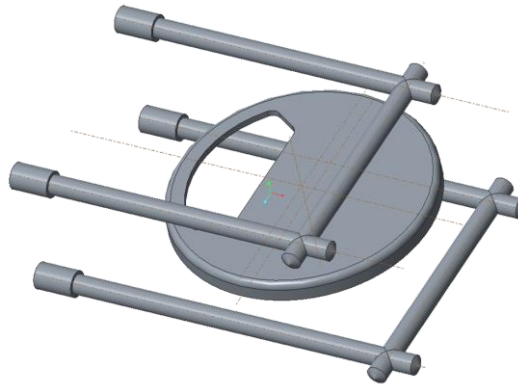


Fig. 4. The convenient cooling channels layout of the plastic part

We used the most applied cooling system U-type. To ensure that the analysis results are sufficiently accurate, Finite Element Method (FEM) plays a significant role in simulation. According to the geometry of samples, the triangle mesh for FEM analysis is shown as in Table 1.

Table 1. Total number for FEM analyze	
Total element number of part	213545
Total node number of part	119812
Total element number of cold runner	9102
Total node number of cold runner	8671

The cooling time is the time from the end of packing to the instant when the molded part cools to the ejection temperature. The cooling time is optimized to minimum value relative to good quality. The cooling time is 25 (s); Ejection temperature is 95⁰C; and Temperature of coolant liquid is 20⁰C. The coolant liquid is compound of (H₂O+12%C₂H₆O₂). The cooling channel diameter is 9 mm. Both values obtained considering the calculated in the software SAPA.

Moldability is most supreme analysis in numerical simulation by Moldex 3D software. Moldability of the designed part is shown in Fig. 5.

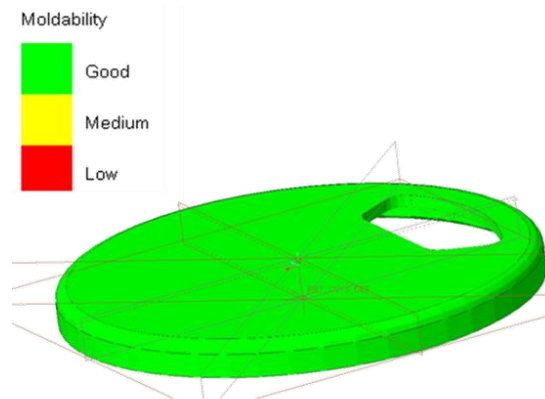


Fig. 5. Moldability of the designed part

The Confidence of fill (moldability) result measures the expected quality of the model's appearance and its mechanical properties. The quality is derived from combinations of the following results: flow front temperature, injection and packing pressures, cooling time, shear rate and shear stress. Only if all results in an area are acceptable, the area is green and the part has a high quality. All regions of the part, are is green color and that means that the part has a good moldability.

Part shrinkage can be thought of as a geometric reduction in the size of the part. If the shrinkage is uniform, the part does not deform and change its shape, it simply becomes smaller. Warpage results when shrinkage is not uniform, and its important to consider. If regions of the part shrink unequally, stresses are created within the part which, depending on part stiffness, may cause the part to deform or change shape. In this study, volumetric shrinkage is uniform in accordance with numerical simulation results as shown in Table 2.

Volumetric shrinkage on diameter D ₁	0, 262%
Volumetric shrinkage on diameter D ₂	0, 262%
Volumetric shrinkage on diameter D ₃	0, 262%

2.4 Experimental results

The diameters of injected molded product are shown in Table 3.

Method	Diameter measurement (mm)		
	D ₁	D ₂	D ₃
Simulation (D _{sim})	79,99	79,99	79,99
Experiment (D _{exp})	79,987	79,996	79,996

Moreover, the deviation from the target value D₁=D₂=D₃=80 mm (see Fig. 2) is defined as the difference between the injected diameter and the design diameter as is Equation 1.

$$\text{Deviation} = D_{\text{design}} - D_{\text{avg}} \quad (1)$$

The average diameter of simulation is D_{sim avg}=79,99 mm;

The average diameter of experiment is D_{exp avg}=79,993 mm.

Deviation_{sim} =0,01 mm (numerical simulation) and

Deviation_{exp} =0,007 mm (experiment).

3. CONCLUSION

In this study, the authors have proposed advanced system for numerical simulation and experiment. The system consists of modern equipment and software. The authors have proposed a procedure to determine the deviation difference between simulation and experiment. We obtained that shrinkage is almost the same for both numerical simulation and experiment. From the observation, there is no significant difference between numerical simulation and experiment. There is still some difference which exists and future research will be carried out. The authors measured only three diameters (D₁, D₂, D₃) on the part using CMM, and that is the smallest satisfactory number for correct circle measurement.

In future research, the number of measurements will be increased. The authors used the most applied cooling system called U-type, because it is the simplest and the cheapest for manufacture. In future research, a cylindrical type of cooling system will also be used.

REFERENCES

- [1] Knoll J., Heim H.P.: *Analysis of the similarity between injection Molding simulation and experiment*, Polymers, Vol 16, No 9, 2024, pp. 112-148.
- [2] Kitayama S., Tamada K., Takano M., Aiba S.: *Numerical and experimental investigation on process parameters optimization in plastic injection molding for weldlines reduction and clamping force*

- minimization*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 97, 2018, pp. 2087-2098.
- [3] Xu G., Yang Z.: *Multiobjective optimization of process parameters for plastic injection molding via soft computing and grey correlation analysis*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 78, 2015, pp. 525-536.
- [4] Wu T.L., Ou K.L., Cheng H., Huang C.F., Shen Y.H., Chian Y.C., Chan Y.H., Li, C.P.: *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol 35, 2008, pp. 1101-1105.
- [5] Guo W., Yu Z., Wei W., Meng Z., Mao H., Hua L.: *Effect of film types on thermal response, cellular structure, forming defects and mechanical properties of combined in-mold decoration and microcellular injection molding parts*, Journal of Materials Science and Technology, Vol 92, 2021, pp. 98-108.
- [6] Annicchiarico D., Alcock J.R.: *Review of factors that affect shrinkage of molded part in injection molding*, Material Manufacturing Process, Vol 29, 2014, pp. 662-682.
- [7] Moayyedian M., Abhary K., Marian R.: *Gate design and filling process analysis of the cavity in injection molding process*, Advances in Manufacturing, Vol 4, 2016, pp.123-133.
- [8] He X., Wu W.: *A practical numerical approach to characterizing non-linear shrinkage and optimizing dimensional deviation of injection-molded small module plastic gears*, Polymers, Vol 13, No 13, 2021.
- [9] Kurt M., Kaynak Y., Kamber O.S., Mutlu B., Bakir, B., Koklu U.: *Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 46, 2010, pp. 571-578.
- [10] Bela Z., Szabo F., Hatos I., Suplicz A., Kovacs N.K., Hargitai H., Tabi T., Kovacs J.G.: *Enhanced Injection Molding Simulation of Advanced Injection Molds*, Polymers, Vol 9, 2017, pp. 77-88.
- [11] Mao, H., Wang, Y., Yang, D.: *Study of injection molding process simulation and mold design of automotive back door panel*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 36, No 5, 2022, pp. 2331-2344.
- [12] Zink B., Szabo F., Hatos I., Suplicz A., Kovacs N., Hargitai H., Kovacs J.: *Enhanced injection molding simulation of advanced injection molds*, Polymers, Vol 9, No 2, 2017, pp. 77-88.
- [13] Jahan S., El-Mounayri H.: *A thermomechanical analysis of conformal cooling channels in 3D printed plastic injection molds*, Applied Sciences, Vol 8, 2018, pp. 2567-2585.
- [14] Mercado-Colmenero J.M., Rubio-Paramio M.A., De Juanes Marquez-Sevillano J., Martin-Donate C.: *A new method for the automated design of cooling systems in injection molds*, Computer Aided Design, Vol 104, 2018, pp. 60-86.
- [15] Dimla D., Camilotto M., Miani F.: *Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*, Journal of Materials Processing Technology, Vol 164, 2005, pp. 1294-1300.
- [16] Agazzi A., Sobotka V., Goff R.L.: *A methodology for the design of effective cooling system in injection moulding*, International Journal of Material Forming, Vol 3, 2010, pp. 13-16.
- [17] Hassan H., Regnier N., Le Bot C., Defaye G.: *3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding*, International Journal of Thermal Sciences, Vol 49, 2010, pp. 161-169.
- [18] Pirc N., Schmidt F., Mongeau M.: *Optimization of 3D cooling channels in injection molding using DRBEM and model reduction*, International Journal of Material Forming, Vol 2, No 5, 2009, pp. 271-274.

Matin, I., Štrbac, B., Ranisavljev, M., Vukelić, Đ., Hadžistević, M.

NAPREDNI SISTEM ZA ODREĐIVANJE DEVIJACIJE INJEKCIONO PRESOVANIH DELOVA OD PLASTIKE

Rezime: Postoji veliki broj istraživanja devijacije na injekciono presovanim proizvodima. Istraživanja su upoređivala rezultate numeričke simulacije sa eksperimentalnim podacima presovanim plastičnim delovima. U radu se predstavlja napredni sistem za određivanje devijacije simulacijom i eksperimentom. Rezultati su pokazali da je promena skupljanja skoro ista i za numeričku simulaciju i za eksperimentalno proučavanje. Divergencija u odstupanju je zanemarljiva, a injekciono presovani deo je u potpunosti tehnički upotrebljiv. Merenje se vrši na tri prečnika kruga pomoću KMM. Softver Moldex 3D se koristi za simulaciju presovanja, a specijalizovani softver SAPA za optimizaciju parametara brizganja.

Ključne reči: injekciono presovanje, devijacija, KMM



Majstorović, V.¹⁾ [0000-0001-9534-8461]

75. GODINA PROIZVODNE METROLOGIJE NA MAŠINSKOM FAKULTETU U BEOGRADU

Rezime

Proizvodna metrologija je nauka o merenju u proizvodnom inženjerstvu i oduvek je bila važna disciplina inženjerstva a posebno proizvodnog mašinstva. Metrologija se deli na naučnu, zakonsku i primenjenu, što važi i za proizvodnu metrologiju. Sam rad se odnosi na primenjenu proizvodnu metrologiju iz ugla njenog razvoja kao inženjerske discipline na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za proizvodno mašinstvo. Zato, ovaj rad predstavlja istorijsku retrospektivu njenog razvoja na ovom Fakultetu, a sam rad ima nekoliko celina: (i) pregled razvoja proizvodne metrologije u svetu, (ii) njen razvoj na Katedri za Proizvodno mašinstvo, u periodu od 75. godina, sa nekoliko aspekata: obrazovanje inženjera, istraživanja i industrijske primene. Na kraju, prikazan je opšti pogled autora na budući razvoj ove discipline.

Ključne reči: *Proizvodna metrologija, Obrazovanje inženjera, Istraživanja, Razvoj.*

1. UVODNE NAPOMENE

Metrologija je nauka o merenju, koja se bavi mernim jedinicama i njihovim etalonima, mernim uređajima, metodama merenja, njihovom tačnošću i greškama, kako uređaja, tako i metoda. Metrologija takođe obuhvata određivanje fizičkih konstanti i svojstva materijala i materije. U zavisnosti od fizičke veličine koju razmatra, onda se ona deli na metrologiju dužina, metrologiju vremena, metrologija temperature itd. Takođe, prema oblasti primene, ona se deli na tehničku metrologiju (uključuje i proizvodnu metrologiju), astronomsku metrologiju, medicinsku metrologija, itd. Na kraju, metrologija se deli na naučno-istraživačku, zakonsku i primenjenu.

Metrologija ima dugu istoriju svog razvoja, ali istraživači danas njen početak kao nauke uzimaju 18. vek, odnosno period od francuske revolucije, koja je dala značajan podstrek njenom razvoju. Naime, u tom periodu nastala je ideja o stvaranju decimalnog metarskog sistema i o usvajanju definicije za jedinicu dužine – metar. Nakon potpisivanja Međunarodne metarske konvencije 20. maja 1875. godine u Parizu, kojoj su ubrzo posle toga, pristupile skoro sve razvijene zemlje, uključujući i tadašnju Srbiju, metrologija se kao nauka od opšteg interesa ubrzano razvija.

Proizvodna metrologija je deo tehničke metrologije i odnosi se na merenja u oblasti proizvodnog inženjerstva. Ona je izuzetno važna oblast ove inženjerske discipline, pa je zato važan deo obrazovanja proizvodnih inženjera.

Cilj ovog rada je da prikaže razvoj Proizvodne metrologije na Mašinskom fakultetu u Beogradu, od vremena kada je ona uvedena kao obrazovna i naučno – istraživačka disciplina na Katedri za proizvodno mašinstvo u Beogradu, a ti je bilo 1. oktobra 1949. godine, do danas.

Ovaj rad ima nekoliko celina: (i) razvoj proizvodne metrologije u svetu i kod nas, (ii) obrazovanje inženjera proizvodnog mašinstva i udžbenička literatura, (iii) naučna istraživanja, značajne publikacije i Konferencije Laboratorije za proizvodnu metrologiju i kvalitet, (iv) današnji istraživački model Laboratorije, (v) Laboratorija, članstva u međunarodnim organizacijama, nagrade i priznanja, i (v) jedan pogled autora na budućnost ove oblasti.

¹⁾ Prof. dr Vidosav D. Majstorović, Redovni član Akademije za proizvodno inženjerstvo (CIRP - www.cirp.net), Pariz, Francuska. (vidosav.majstorovic@sbb.rs).

2. RAZVOJ PROIZVODNE METROLOGIJE – PREGLED LITERATURE

Matična oblast Proizvodne metrologije, kao inženjerske discipline je Proizvodno mašinstvo, ali je ona deo obrazovanja i istraživanja i ostalih grana Mašinstva (vazduhoplovstvo, motorna vozila, brodogradnja, itd.). Svaki inženjerski proizvod, odnosno njegovi vitalni delovi (automobil, avion, lokomotiva, itd.), sadrži tolerancije, koje se u njegovoj proizvodnji moraju ostvariti i verifikovati metodama i mernim sistemima Proizvodne metrologije.

Detaljna analiza razvoja Proizvodne metrologije, posebno u poslednjoj deceniji, koja se poklapa i sa definisanjem i razvojem modela Industrija 4.0, je prikazana u tabeli 1.

Tabela 1. Pregled razvoja Proizvodne metrologije u kontekstu modela Industrija 4.0

Karakteristika	Ref. / god.	Metod	Cilj	Primena
Metrologija kao podrška međunarodne trgovine	[1] 2007	Međunarodni sistem mera (CIPM)	Sledljivost jedinica (i onih koje se odnose na Proizvodnu metrologiju)	Nacionalni metrološki institut (Zavod za mere i dragocene metale)
Koordinatna merna mašina (CMM) kao sajber fizički sistem (CPS)	[2] 2007	Mikro-nano scale merenja	Metrološka inspekcija svih vrsta tolerancija	Pametna proizvodnja
Inspekcija velikih delova na CMM	[3] 2011	Inspekcija svih vrsta tolerancija, uključujući i mikro geometriju obrađenih površina	On line praćenje prametara kvaliteta na mašinama alatkama kao CPS	Delovi velikih dimenzija, preko 1000 mm u pravcu jedne ose
Interoperabilnost metroloških podataka	[4] 2011	RAMI model za informacionu integraciju	PC DMIS metrološki interface	Integracija metroloških informacija
Razvoj proizvodne metrologije	[5] 2012	Sedam etapa od početka 20. veka do danas	Proširenje obima tolerancija za inspekciju i povećanje tačnosti	CT CMM (inspekcija unutrašnjeg sastava mernog predmeta)
3D metrološki modeli	[6] 2013	GDT standardi	Nominalni 3D virtuelni metrološki model	Inspekcija na CMM kao CPS
Rezolucija i ponovljivost merenja	[7] 2013	Kalibracija CMM	Visoka tačnost merenja u radnom prostoru	Red veličine manja od tolerancija
Proizvodna metrologija - razvoj	[8] 2013	Sinteza i analiza tolerancija za inspekciju	Analiza povećanja tačnosti merenja	Pregled razvoja metroloških sistema
Tačnost CMM	[9] 2016	Ispitivanje tačnosti u radnom prostoru	Eliminacija grešaka merenja	Modeli za ispitivanje tačnosti
Pametna metrologija	[10] 2017	Podrška AI i mašinskog učenja (ML)	Inteligentna metrologija	Deo pametne proizvodnje
Senzori 4.0	[11] 2018	Pametni senzori, podržani AI i ML	Deo modela Industrije 4.0	Nova paradigma proizvodne metrologije
Proizvodna metrologija 4.0	[12] 2018	Virtuelna metrologija	Tačna i pouzdana merenja	Primena elemenata Industrije 4.0
CMM u Industriji 4.0	[13] 2018	Virtuelna metrologija	Metrološka integracija	Deo modela Industrije 4.0 u primeni
Napredna proizvodna metrologija	[14] 2019	CPM ³	Virtuelna metrologija	Kontekst Industrije 4.0
Nacionalni metrološki instituti	[15] 2019	Razvoj virtuelne metrologije	Povezivanje sa modelom Industrija 4.0	NIST, NPL i PTB
Inteligentno planiranje inspekcije na CMM	[16] 2019	Primena AI i ML	Plan inspekcije za deo	Prizmatični merni predmeti
Proširena realnost (AR) kao podrška modelu proizvodne metrologije	[17] 2020	SPC model	Online upravljanje kvalitetom	Kontrolna karta
Inteligentna inspekcija	[18] 2020	Metodi AI	Min vreme inspekcije	Krive površine
Inteligentna CMM	[19] 2021	MES	Integracija u model pogona	Pametna proizvodnja
3D skener	[20]	Online kontrola	Proizvodnja bez škarta	3D kontrola delova od lima

	2021			
Pametna metrologija za pametnu proizvodnju	[21] 2021	Novi metodi i tehnike	Razvoj pametnih metroloških sistema	Evropski projekat
Pametna proizvodnja	[22] 2022	Obim i vrsta digitalizacije	Vrsta metrološke aktivnosti	Digitalizacija metrologije (CPM ³)
Industrija 4.0	[23] 2022	AI i ML	Online merenje	Pametna metrologija
Pametna proizvodnja	[24] 2022	Online merenje	Operativni proces	Procesno merenje
Virtuelna metrologija	[25] 2022	Cloud i MES	Veličina organizacije	Industrija 4.0
Integracija CAM i CAI modela	[26] 2023	Zajednički koordinatni sistem obrade i merenja	Veća tačnost obrade	Prizmatski delovi

Realizacija i razvoj međunarodne trgovine se zasniva i na metrologiji, koristeći različite merne jedinice i uređaje. Razvoj međunarodnog sistema jedinica, kao i nacionalnih instituta za metrologiju, su izuzetno važni za obezbeđenje metrološke sledljivosti mera (preko nacionalnih etalona), je od esencijalnog značaja za ceo svet [1]. Ovim aktivnostima se na nivou sveta upravlja preko Međunarodnog komiteta za tegove i mere (CIPM). CMM su uvele revoluciju u proizvodnu metrologiju, od 1960. godine (DEA je proizvela prvi model CMM), do danas (Zeiss CPS za proizvodnu metrologiju, kao element Industrije 4.0) [2]. One danas predstavljaju metrološke sisteme u proizvodnoj metrologiji kojima se mere sve vrste tolerancija, od makro, preko mikro i nano veličina (CT CMM), a primena modela Industrije 4.0 u praksi se ne može realizovati bez CMM kao CPS metrološkog sistema. Posebno važna oblast industrijske proizvodne metrologije je inspekcija delova velikih dimenzija [3]. Za ove slučajeve digitalne proizvodnje se primenjuju digitalne metrološke ćelije, integrisane u proizvodnom pogonu sa drugim mašinama, kao CPS moduli. Metrološkim aktivnostima u njima se upravlja preko MES (upravljanje radnim nalogom u proizvodnji) modula. Interoperabilnost metroloških informacija (po horizontali, a posebno po vertikali) je stub izgradnje sajber fizičkog modela u proizvodnoj metrologiji [4]. Za poslovno-proizvodne i inženjerske informacije, za model Industrije 4.0 se primenjuje model RAMI 4.0 za horizontalno-vertikalnu informacionu integraciju. Ovaj koncept se primenjuje i za digitalnu metrologiju, preko PC DMIS modela, kao metrološkog interface. Jedan pregled istorijskog razvoja proizvodne metrologije je prikazan u [5]. Od početka 20. veka, do danas identifikovano je sedam etapa razvoja metroloških sistema u proizvodnoj metrologiji: dužine (granična merila, pomična merila i mikrometri), optički metrološki sistemi (merni mikroskopi), pneumatski i hidraulični merni sistemi, električni merni sistemi, digitalni merni sistemi, CMM i CMM kao CPS. GDT model standarda [6], predstavlja prilog 3D modeliranju delova sa aspekta tolerancija. Njegovom primenom se dobijaju nominalni oblici i dimenzije 3D metroloških modela, koji služe kao baza za inspekciju istih na CMM kao CPS, koristeći DT (digitalne blizance). Rezolucija i ponovljivost merenja su najvažnije katakteristike savremenih metroloških sistema iz oblasti proizvodne metrologije [7]. Ovi parametri se danas iskazuju tačnošću za red veličine, koja je manja od tolerancija čija ispekcija se vrši, što znači, ako su tolerancije za inspekciju reda veličine mikrometra, onda rezolucija metrološkog sistema treba da bude deseti deo mikrometra. Primenom novih standarda i modela za ispitivanje CMM vrši se provera ovih parametara. Jedan detaljan pregled razvoja i primene metroloških sistema u oblasti proizvodne metrologije je prikazan u [8]. Radi eliminisanja grešaka merenja, ili svođenja njihovih vrednosti na najmanju moguću meru, potrebno je, po definisanoj proceduri i međunarodnom standardu, stalno ispitivati tačnost CMM. U referenci [9] je izvršena analiza i primena kroz eksperimente više modela ove namene, tako je da je dobijen virtuelni model mape grešaka ispitivane CMM. On se zatim koristi za programiranje iste, vršeci automatsku korekciju putanju mernog senzora, a prema mapi grešaka u radnom prostoru ove CMM. Pametna metrologija je obavezni deo pametne proizvodnje [10]. Ovaj koncept je moguće razvijati kao deo modela Industrije 4.0, uz podršku AI i ML. Senzori 4.0 je nova paradigma proizvodne metrologije [11]. Radi se o pametnim sensorima, kao elementima modela Industrije 4.0, koji su vođeni podacima. Ceo lanac prenosa metrološkog signala (informacije) se realizuje u nekoliko koraka: (i) preprocesing podataka, (ii) izdvajanje karakteristika, (iii) izbor relevantnih karakteristika, (iv) klasifikacija, i (v) ocena. Osnovna karakteristika modela Metrologija 4.0 u primeni je: brzina merenja, tačnost merenja, ponovljivost merenja i fleksibilnost merenja. Nivoi komunikacije u ovom modelu se realizuju preko interface za CAD/CAI geometrijske i metrološke informacije [12], a najpoznatiji od njih je PC DMIS. Industrija 4.0, zasnovana na novim konceptima pametnih fabrika, gde su mašine povezane u mreže, vrši se izvođenje operacija u realnom vremenu, uzimajući kao polaznu tačku dobijene ulazne podatke, a oni se online analiziraju [13]. To isto važi i za metrološke procese, gde su CMM kao CPS osnova celog ovog koncepta. Napredna proizvodna metrologija u kontekstu Industrije 4.0 je detaljno izložena u [14]. Prikazan je naš


istraživački model CPM³ (Cyber Physical Manufacturing Metrology Model), koji predstavlja integraciju fizičkog i virtuelnog modela proizvodne metrologija. Najpoznatiji nacionalni metrološki instituti, koji imaju i departmane za proizvodnu metrologiju su: NIST (SAD), NPL (GB) i PTB (Nemačka) [15]. Inteligentni model za planiranje inspekcije na CMM za prizmatične delove je prikazan u [16]. Ovaj model koristi AI za definisanje ovog plana. Proizvodna metrologija, kao deo koncepta virtuelnog kvaliteta 4.0 je prikazana u [17]. Koristi se virtuelna platforma, pomoću koje se online prate dimenzione karakteristike kvaliteta i definiše kontrolna karta u modelu pametne proizvodnje. Posebno važan aspekt razvoja i primene pametne proizvodne metrologije je inspekcija krivih linija i površina [18]. Ovaj rad razmatra problem optimizacije broja mernih tačaka na krivim površinama, čija inspekcija se vrši na CMM, koristeći četiri metoda AI. Model pametne proizvodnje sa integracijom CMM, se izlaže u [19]. Okvir za ovu integraciju je MES model. Primena 3D skenera za praćenje dimenzija i oblika delova koji se dobijaju izvlačenjem iz lima u digitalnoj proizvodnji je prikazana u [20]. Istraživane su potrebne karakteristike skenera (tačnost), za zadovoljenje zahteva kvaliteta procesa obrade plastičnom deformacijom. Pametna proizvodnja zahteva nove metode i tehnike proizvodne metrologije [21]. Iz ovih razloga je pokrenut Evropski projekat, koji se bavi istraživanjima naprednih metroloških metoda i sistema sa primenom u pametnoj proizvodnji. Ključne tehnologije koja će biti obuhvaćene ovim istraživanjima su: mikro i nanoelektronika, nanotehnologija, napredni materijali, industrijska biotehnologija i fotonika. Ove tehnologije će se koristiti da se razviju novi metrološki sistemi za pametnu proizvodnju sa aspekta: digitalizacije, merne nesigurnosti, optimizacije procesa, razvoja senzora, kontrole i praćenja procesa i aditivne proizvodnje. U [22] su istraživani aspekti digitalizacije u proizvodne metrologije, kao: digitalna transformacija metrološke usluge, primena modela BDA u proizvodnoj metrologiji (IIoT), horizontalna/vertikalna integracija u proizvodnoj metrologiji (RAMI model) i virtuelni metrološki bliznaci (CPM³). Merenje u procesu za Industriju 4.0 je koncept vođen podacima, gde se sensorima online prikupljaju podaci, a BDA analizama analizira proces, toliko duboko, kao nikada ranije [23]. Sastavani deo ovog koncepta je AI i ML, što sve zajedno čini pametnu metrologiju. Model online merenja u procesu koji je opremljen sensorima za praćenje habanja alata [24], je prilog primeni Industrije 4.0 u obradnom procesu. Aspekti cloud i MES modela viruelne metrologije se razmatraju u [25]. Oba prilaza su deo modela Industrije 4.0, a njihova primena zavisi od veličine proizvodne organizacije. Za SME je bolje cloud rešenje. Rad [26] prikazuje razvoj matematičkog modela za integraciju koordinatnih sistema obrade (CAM model) i inspekcije na CMM (CAI model). Ovom integracijom se postiže veća tačnost obrade.




Završavajući ovu analizu, možemo da definišemo sledeće zaključke: (i) pametna metrologija je sastavni deo pametne proizvodnje, što znači da istraživanja u oblasti primene modela Industrije 4.0 u proizvodnoj metrologiji, postaju izuzetno važna, i (ii) analiza drugih radova iz ove oblasti, pokazuje nam da je naš model CPM³, prihvaćen kao jedan od originalnih modela u pametnoj proizvodnoj metrologiji.

3. PROGRAMI OBRAZOVANJA INŽENJERA PROIZVODNOG MAŠINSTVA I UDŽBENIČKA LITERATURA

Zvanično obrazovanje mašinskih inženjera proizvodnog smera (tadašnji naziv je bio – industrijski smer), je počeo 1. oktobra 1949. godine. Detaljan pregled razvoja programa obrazovanja za Proizvodnu metrologiju na Katedri za Proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Beogradu, od tada do danas je prikazan u tabeli 2.

Tabela 2. Pregled razvoja obrazovanja inženjera za Proizvodnu metrologiju na Mašinskom fakultetu u Beogradu

Period	Nastavnik	Predmet / Fond
1949. – 1958. god.		Prof. dr Pavle Stanković <u>Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina</u> (6+4, VI,VII i VIII semestar – po 6 časova predavanja i vežbi) Merenja u svakom semestru

1959. – 1966. god.		Prof. dr Vladimir Šolaja <u>Pomoćni pribori i merenja</u> (4+2, VII i VIII semestar – po 6 časova predavanja i vežbi) Merenja u svakom semestru)
1967. – 1989. god.		Prof. dr Joko Stanić <u>Merenja i kvalitet obrade</u> (4+2, VII i VIII semestar – po 12 časova predavanja i vežbi) Merenja u svakom semestru). (1967. – 1976. god.) <u>Tehnološki merni sistemi</u> (2+2, VII i VIII semestar), (1977. – 1989. god.)
1990. – 2018. god.		Prof. dr Vidosav D. Majstorović <u>Tehnološki merni sistemi</u> (2+2, VII i VIII semestar), (1990. – 2006. god.) <u>Proizvodne tehnologije i metrologija</u> (2+2, VI semstar), (2007. – 2018.) (OAS - obavezni) <u>Numerički upravljanje merne mašine</u> (2+2, VII semstar), (2007. – 2018.) (MAS - izborni) <u>Digitalni merni sistemi</u> (2+2, VIII semstar), (2007. – 2018.) (MAS - izborni) <u>CAI modeli</u> (2+2, II semstar), (2007. – 2018.) (DAS - izborni)
2019. -		Prof. dr Slavenko Stojadinović <u>Proizvodne tehnologije i metrologija</u> (2+2, VI semstar), (2019. -) (OAS - obavezni) <u>Numerički upravljanje merne mašine</u> (2+2, VII semstar), (2019. -) (MAS - izborni) <u>Digitalni merni sistemi</u> (2+2, VIII semstar), (2019. -) (MAS - izborni) <u>CAI modeli</u> (2+2, II semstar), (2019. -) (DAS - izborni)

Dakle, u periodu od 75. godina, Proizvodnu metrologiju su predavali i razvijali je kao naučno-stručnu disciplinu petorica profesora. Svako od njih je u svom periodu dao svoj lični doprinos njenom razvoju, koji je nemerljiv. Tako na primer, tokom celog perioda, ovaj predmet je bio pokriven udžbeničkom literaturom, tabela 3.

Tabela 3. Pregled udžbenika iz oblasti Proizvodne metrologije

Autori	Naziv udžbenika	Izdavač
Prof. dr Pavle Stanković	Merenje i kontrola	Naučna knjiga, Beograd, 1952.
Prof. dr Joko Stanić	Tehnološki merni sistemi	Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
Prof. dr Vidosav Majstorović	Koncept totalnog kvaliteta - novi prilozi za tehnološke sisteme, Monografija	Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
Prof. dr Vidosav D. Majstorović, prof. dr Janko Hodolić	Numerički upravljane merne mašine	Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
Prof. dr Slavenko Stojadinović, prof. dr Vidosav D. Majstorović	An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts - Monograph	Springer Nature, Germany, 2019.

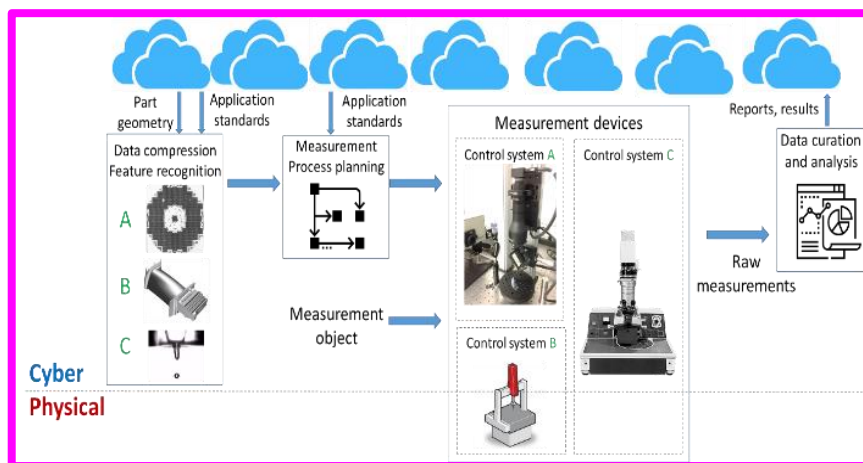
4. NAUČNA ISTRAŽIVANJA, PUBLIKACIJE I KONFERENCIJE LABORATORIJE ZA PROIZVODNU METROLOGIJU I KVALITET

Svih ovih 75. godina Proizvodne metrologije na Katedri za proizvodno mašinstvo, istraživanja (razvojna i primenjena) su bila obavezni deo Projekata Laboratorije, pa je tako i danas. Sa druge strane, prema preciznoj evidenciji, koju je autor vodio, odbranjeno je 285 diplomskih i master radova, 6 magistarskih i 4 doktorska rada iz ove oblasti, samo kod autora ovog rada, u periodu od 1986. – 2018. god. Objavljeno je 93 rada na domaćim i međunarodnim Konferencijama i časopisima (vidi Prilog 1). Za potrebe privrede urađeno je više od 100 Projekata, posebno iz oblasti CMM programiranja i merenja, najviše u periodu 1987. – 1998. god. Laboratorija je učestvovala na devet međunarodnih Projekata (dva su bila TEMPUS – 1991.god., i 2003. god.,

po jedan sa: Slovenijom, Danskom, Nemačkom, Italijom i Poljskom, i dva sa Austrijom. U daljem tekstu se navodi samo nekoliko najznačajnijih referenci:

1. **Majstorović V.**, Bojanić P., Milačić V., CAD-CAI Integration with Special Focus on Complex Surfaces, *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1 (1992), pp. 535-538. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61262-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61262-1).
2. Dragan Djurdjanović, Yibo Jiao, **Vidosav Majstorović**, Multistage manufacturing process control robust to inaccurate knowledge about process noise, *CIRP Annals*, Volume 66, Issue 1, 2017, Pages 437-440, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.012>.
3. **Vidosav Majstorovic**, Slavenko Stojadinovic, Zivana Jakovljevic, Srdjan Zivkovic, Dragan Djurdjanovic, Julija Kostic, Nemanja Gligorijevic, Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM³) – Big Data Analytics Issue, *Procedia CIRP*, Volume 72, 2018, Pages 503-508, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.091>.
4. Djurdjanovic, Dragan & Haq, Asad & Magnanini, Maria Chiara & **Vidosav, Majstorovic**. (2019). Robust model-based control of multistage manufacturing processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, <https://doi.10.1016/j.cirp.2019.03.014>.
5. **Majstorovic, V.D.**, Durakbasa, N., Takaya, Y., Stojadinovic, S. (2019). Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model. In: Majstorovic, V., Durakbasa, N. (eds) *Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue*. IMEKO TC 14 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18177-2_1.
6. Ramin Sabbagh, Srdjan Živković, **Vidosav Majstorovic**, Dragan Djurdjanovic, Organization of big metrology data within the Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM³), *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6, Decembar 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.009>.
7. Slavenko M. Stojadinovic, **Vidosav Majstorovic**, Adam Gąska, Śladek Jerzy Śladek, Numan Durakbasa. Development of a Coordinate Measuring Machine - Based Inspection Planning System for Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8411. <https://doi.org/10.3390/app11188411>.

Referenca [1], predstavlja jedno od prvih istraživanja u svetu, gde je prikazan razvijeni model za definisanje metroloških primitiva za krive površine. On je važan i zbog toga što je na taj način izvršena geometrijsko-metrološka integracija informacija za CMM programiranje. Isti pristup je korišćen i 2014. god., kada je zvanično inagurisan STEP AP 242 model. Sledeća referenca [2] je prikazala rezultate istraživanja na upravljanju tačnosti obradnih procesa, kada imamo nedovoljne i nepotpune informacije o njima. Za rešenje ovog problema, razvijen je i primenjen model dubokog učenja, koji je pokazao dobre rezultate. Dalje produbljenje ovih istraživanja za koncept Industrije 4.0, je prikazano u [4]. Naš orginalni model (CPM³) za Proizvodnu metrologiju u konceptu Industrije 4.0 je detaljno izložen u referencama [3,5, 6, 7]. On se u stručnim krugovima smatra za jedan od modela u ovoj oblasti, koji je do danas (avgust 2024.god.) citiran 106 puta. Šema ovog modela - CPM³, je prikazana na slici 1 (data je njegova orginalna verzija).

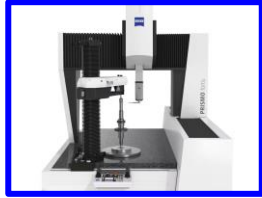


Slika 1. Sajber fizički model Proizvodne metrologije (CPM³)

Sušтина ovog modela je da je virtuelni deo razvijen za cloud koncept proizvodnje, uključujući i metrologiju, a obuhvata: 3D geometrijsko-metrološko modeliranje zasnovano na metrološkim primitivima [1], inteligentno planiranje inspekcije [4] i primenu DT za online simulaciju i inspekciju na realnoj CMM. Izlaz iz sistema su metrološki izveštaji, koji su dobijeni pomoću različitih BDA analiza. Ovaj koncept je primenjen u više fabrika u industriji Srbije, koje uvode u primenu elemente Industrije 4.0, posebno u oblasti Proizvodne metrologije.

Laboratorija za Metrologiju je osnovana 1959. godine, tabela 4.

Tabela 4. Pregled razvoja Laboratorije iz oblasti Proizvodne metrologije

Naziv Laboratorije	Osnovna oprema
<p style="text-align: center;">Laboratorija za Metrologiju</p> <p>Rukovodioci:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Prof. dr Vladimir Šolaja (1959. – 1966.god.) 2. Prof. dr Joko Stanić (1967. – 1985.god.) 	<p>Laboratorija je bila opremljena, u tadašnje vreme savremenim alatnim mikroskopima, profil projektorima i uređajima za merenje hrapavosti.</p>
<p style="text-align: center;">Laboratorija za Proizvodnu metrologiju i TQM (https://cent.mas.bg.ac.rs/)</p> <p>Rukovodioci:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Prof. dr Vidosav Majstorović (1986. – 2018.god.) 2. Prof. dr Slavenko Stojadinović (2018. –) 	<p style="text-align: center;">Demo Centar KOMEG – MF, Bgd (1987. – 1998.god.)</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Laboratorija je bila opremljena sa Opton (Zeiss) CMM – 1200 x 800 x 450. Današnji pandam je Zeiss Prismo TS (na slici)</p>

Prvu Laboratoriju za Metrologiju je u Zavodu za Mašine alatke formirao prof. dr Vladimir Šolaja, 1959. godine, kao istraživačku jedinicu za primenjenu metrologiju, koja je radila u okviru Instituta IAMA (Institut Mašinskog fakulteta za alate i mašine alatke). Ona je istovremeno korišćena za obrazovanje studenata, kroz njihov laboratorijski rad. Nivo tačnosti alatnih mikroskopa koje je Laboratorija koristila je bio 10 mikrometara. Laboratorija za proizvodnu metrologiju i menadžment totalnim kvalitetom (TQM) je otvorena 4. aprila 1987. godine, povodom proslave 125 godina Univerziteta u Beogradu. Istovremeno je u okviru nje uspostavljen i zajednički Demo centar: KOMEG, Zapadna Nemačka – Mašinski fakultet, Beograd. Ona je bila jedna od sedam laboratorija Instituta za proizvodno mašinstvo i CIM, a raspolagala je sa sledećom opremom: (i) metrološkim sistemima prethodnih generacija (univerzalni alatni mikroskop, uređaj za merenje hrapavosti i drugi), (ii) Numerički upravljanoj mernom mašinom (NUMM) UMC-850 sa odgovarajućom softverskom podrškom, i (iii) četiri PC stanica za off-line programiranje NUMM i geometrijsko modeliranje i razvoj softvera za sistem menadžmenta kvalitetom. Softver sa kojim je Laboratorija raspolagala je obuhvatio: UMESS (inspekcija tolerancija dužina, uglova i položaja), KUM (inspekcija krivih linija i površina), GON (inspekcija cilindričnih zupčanika sa pravim i kosim zubima), RAM (inspekcija zupčanika sa zavojskim zubima), NOM (inspekcija bregastih osovin), SAM (statističke analize i sinteze), MFT (off-line programiranje MM). Tada je korišćen licencirani Pro/Engineer softver, a posebno njegov CMM modul. Takođe je korišćen i softver SQC (Statistical Quality Control), VP-Expert (shell za ekspertne sisteme), kao i sopstveno razvijeni softver za: SPC, Tagučići metod, geometrijsko modeliranje krivih linija i površina i softver za bazu znanja za ekspertni sistem za inspekciju, zatim softver za samoocenjivanje po TQM-VM modelu za poslovnu izvrsnost, softver za ocenjivanje organizacija prema evropskom TQM modelu za mala i srednja preduzeća, softver za ocenjivanje sposobnosti procesa i ekspertni sistem za inteligentno planiranje inspekcije. Sistema za inteligentno planiranje inspekcije ima sledeće module (EXINS): (i) procesor neutralnog formata podataka za inspekciju, čiji ulaz predstavlja CAD dokument mernog predmeta, projektovan u CATIA ili ProE programu i koji ima zadatak da generiše STEP fajl na osnovu unetog CAD fajla (ovaj modul je deo standardnih CAD/CAM paketa), (ii) baza znanja koja sadrži podatke o različitim mernim predmetima i načinima njihovog dekomponovanja na metrološke primitive, (iii) mehanizam za zaključivanje, koji ima ulogu da u strukturi STEP fajla prepozna metrološke primitive koji se mogu upariti sa odgovarajućim metrološkim primitivima iz baze znanja, da izvrši njihovu dekompoziciju na geometrijske primitive, da prepozna poziciju i orijentaciju

dela i da definiše logičan konceptijski plan inspekcije analiziranog mernog predmeta na odgovarajućoj NUMM, (iv) modul za učenje, koji korišćenjem ANN (veštačke neuronske mreže) vrši akviziciju novog znanja i formiranje novih pravila na osnovu prethodnih eksperimentalnih rezultata, (v) modul za objašnjenje linije zaključivanja, koji na zahtev korisnika opisuje proces zaključivanja i (vi) procesor neutralnog formata za on-line programiranje NUMM, koji generiše program inspekcije na NUMM u neutralnom formatu (DMIS, NDF, VDA), kao ulaz u upravljačku jedinicu NUMM. Moduli (ii), (iii) i (iv) čine inteligentni ekspertni sistem za inspekciju (IESI). Laboratorija je od 1987. godine održavala i svoje Konferencije, tabela 5.

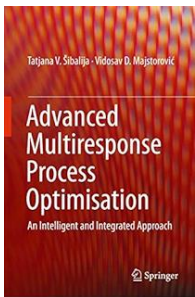

Tabela 5. Pregled Konferencija Laboratorije za Proizvodnu metrologiju i TQM


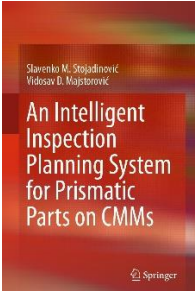
Naziv Konferencije	Osnovne činjenice
International Conference “CMM – Coordinate measuring machines”	Organizovana 1987, 1988, 1990 i 1991. godine. Organizatori: KOMEK, West Germany i Mašinski fakultet, Beograd. Ukupno publikovano 84 rada, po pola iz Jugoslavije i Zapadne Nemačke. Bilo prisutno 296. učesnika iz Jugoslavije i Zapadne Nemačke.
IFIP TC 5, WG 5.3 International Working Conference „Computer Integrated Quality System in CIM systems“	Organizovana 1989. godine. Organizatori: KOMEK, West Germany i Mašinski fakultet, Beograd. Zbornik radova je izdao Elsevier, Nort Holland Publishing - ISBN-10 : 0444885625. 361 strana, 48 radova. Na Konferenciji je bilo 136 učesnika iz SAD, Engleske, Izraela, Francuske, Austrije, Zapadne i Istočne Nemačke, Mađarske, Grčke, Japana i Jugoslavije.
International Working Conference „Total Quality Management - Advanced and Intelligent Approaches“	Organizovana od 2001. do 2017. godine, svake druge godine, ukupno IX Konferencija, na engleskom jeziku. Konferencija Laboratorije. Podržana od strane CIRP, Paris, Francuska, svaka Konferencija. Izdato 9 Zbornika radova sa oko 2400 strana. Publikovano ukupno 345 radova (oko 60% iz inostranstva). Na Konferencijama je bilo prisutno oko 2100 učesnika (oko 40% iz inostranstva).
JUPITER Konferencija – Simpozijum „Menadžment kvalitetom“	Održava se svake dve godine, 2022. godine održan 23. Simpozijum. Topic – Inteligentna metrologija.

Iz tabele 5 se može zaključiti da Laboratorija izuzetnu pažnju poklanja međunarodnim komunikacijama i saradnji, što pokazuje i spektar Konferencija koje su održane. One su u prethodnom periodu najviše doprinele uključivanju mlađih kolega u međunarodnu saradnju u oblasti Proizvodne metrologije.

Pored navedenih Konferencija, Laboratorija je bila domaćin još dve posebne Konferencije i izdala dve međunarodne Monografije, kod Springer-a, Nemačka, najpoznatijeg svetskog izdavača tehničke literature, tabela 6.

Tabela 6. Pregled Međunarodnih Konferencija / Monografija Laboratorija za Proizvodnu metrologiju i TQM

Naziv Konferencije / Monografija	Osnovne činjenice
	Advanced Multiresponse Process Optimisation: An Intelligent and Integrated Approach, 1st ed. 2016 Edition, by Tatjana V. Šibalija, Vidosav D. Majstorović, Monograph. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-19255-0 .
	Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies: NEWTECH 2017, Editors: V. Majstorovic, Z. Jakovljevic. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-56430-2 .

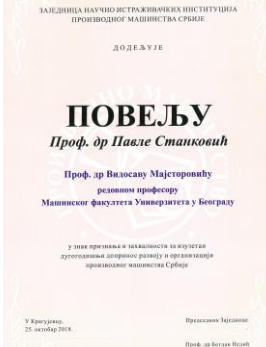
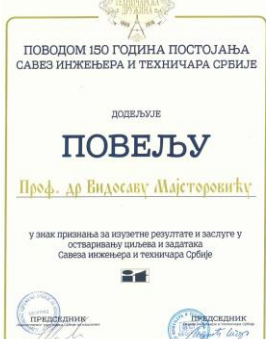


	<p>Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, IMEKO TC 14 2019, Editors: V. Majstorovic, N. Durakbasa. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-18177-2.</p>
	<p>An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs, Authors: Slavenko M. Stojadinović, Vidosav D. Majstorović, Monograph. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-12807-4.</p>

Monografija Advanced Multiresponse Process Optimisation: An Intelligent and Integrated Approach, sadrži sveobuhvatni model za optimizaciju kompleksnih industrijskih procesa sa više izlaznih karakteristika, koji je projektovan na osnovu tehnika veštačke inteligencije. Ovaj integrisani i inteligentni model je generičke prirode, odnosno, njegova primena nije uslovljena specifičnom prirodom industrijskog procesa koji se optimizuje, a namenjen je pretežno za kompleksne, napredne procese čiji analitički model nije poznat. Laboratorija je bila domaćin The 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies: NEWTECH 2017. Bilo je 116 učesnika iz 12 zemalja Evrope, sa 36 radova. Prethodne četiri Konferencije su održane u TU Galati (Rumunija), KTH Stockholm (Švedska), TU Brno (Češka) i TU Wroclaw (Poljska). Laboratorija je takođe bila i domaćin The 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, IMEKO TC 14 2019. Naime IMEKO organizacija i njen TC 14 (<https://www.imeko.org/index.php/tc14-homepage>) su nam poverili domaćinstvo ove prestižne Konferencije. Na naš predlog, glavna tema je bila Proizvodna metrologija u kontekstu Industrije 4.0. Na Konferenciji je bilo prisutno 86 učesnika iz 24 zemlje Evrope, Azije i Severne Amerike. Izloženo je ukupno 29 radova. Najzad, Monografija „An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs“, sadrži istraživanja o inteligentnom sistemu za planiranje inspekcije prizmatičnih delova na CMM. Istraživanja se sprovedena kroz razvoj četiri osnovna elementa ovog sistema: inženjerska ontologija, model planiranja inspekcije prizmatičnih delova na CMM, model optimizacije putanje mernog senzora, zasnovan na koloniji mrava i model planiranja konfiguracije mernog senzora korišćenjem genetskog algoritma. Razvijeni model planiranja inspekcije na CMM ima sledeće module: definisanja metrološkog primitiva, strategije izbora mernih tačaka, analize pristupačnosti mernog senzora mernom predmetu i automatizovanog generisanja putanje mernog senzora, sa proverom kolizije.

5. NAGRADE I ČLANSTVA U MEĐUNARODNIM NAUČNIM I STRUČNIM ORGANIZACIJAMA

Prethodne informacije pokazuju obim, značaj i aktuelnost tema istraživanja Laboratorije u poslednjih nekoliko decenija. Sve je to ostvareno predanim radom njenih članova i jasnim istraživačkim planovima i ciljevima, koji su uvek bili usmereni ka unapređenju obrazovanja inženjera i industrijske primene izvršenih istraživanja. Kao posledica ovakog prilaza, dobijena su i odgovarajuća priznanja, tabela 7.

Tabela 7. Priznanja članovima Laboratorije za Proizvodnu metrologiju i TQM





Naziv priznanja	Karakteristike
	<p>Povelja i plaketa prof. dr Pavle Stanković je dodeljena prof. dr Vidosavu D. Majstoroviću na XXXVII Savetovanju proizvodnog mašinstva Srbije, Kragujevac, 2018. god.</p>
	<p>Povelja SITS, povodom 150. god. njegovog postojanja je dodeljena prof. dr Vidosavu D. Majstoroviću za lični doprinos razvoju ove organizacije, Beograd, 2018. god.</p>
	<p>Nagrada za PRIRODNE I TEHNIČKE NAUKE grada Beograda za 2019. god. Prof. dr Slavenko Stojadinović, prof. dr Vidosav D. Majstorović</p>
	<p>Pismo o izboru prof. dr Vidosava D. Majstorovića za Profesora po pozivu na Cracow University of Techonlogy – Faculty of Mechanical Engineering, Cracow, 2019. god.</p>

Povelja i plaketa *Prof. dr Pavle Stanković*, dodeljuje se poznatim i priznatim naučnim i stručnim radnicima za izuzetan doprinos razvoju proizvodnog mašinstva Srbije. Ona se dodeljuje na Savetovanju Proizvodnog mašinstva Srbije, koje se održava svake dve godine. Prof. dr Vidosavu D. Majstoroviću je dodeljena 2018. god. Savez inženjera i tehničara Srbije je 2018. god., slavio 150. godina postojanja i uspešnog rada. Tim povodom je prof. dr V. Majstorović nagrađen Poveljom za lični doprinos razvoju SITS. Nagrada za nauku grada Beograda je druga po rangu nagrada za nauku u našoj zemlji. Ona je članovima naše Laboratorije dodeljena 2019. godine. Mašinski fakultet iz Krakova, Poljska je 2019. god. je izabrao prof. dr Vidosava D. Majstorovića, za Profesora po pozivu.

To je rezultat dugogodišnje saradnje sa prof. dr J. Sladek-om i prof. dr A. Gaska-om iz Laboratorije za metrologiju. Takođe, ovde se posebno navodi, da je prof. dr V. Majstorović 2001. godine takođe izabran za Profesora po pozivu na Vienna University of Technology, Department for Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology Vienna, kod prof. dr Herbert-a Osanne i prof. dr Numan-a Durakbase, sa kojima je takođe ostvarena dugogodišnja saradnja.

Članstva i aktivan rad u međunarodnim naučno-stručnim organizacijama, su sledeći aspekt angažovanja istraživača Laboratorije na međunarodnoj naučnoj sceni. Iz tih razloga se u prethodnom periodu poklanjala posebna pažnja ovim aktivnostima, tabela 8.

Tabela 8. Članstvo u međunarodnim organizacijama članova Laboratorije za Proizvodnu metrologiju i TQM

Organizacija	Članstvo
 The International Academy for Production Engineering www.cirp.net	Prof. dr Vidosav D. Majstorović, Fellow Member, 1995. god.
 International Measurement Confederation www.imeko.org	TC14 - Measurement of Geometrical Quantities 1. Prof. dr Vidosav D. Majstorović, 1996. god. 2. Prof. dr Slavenko Stojadinović, 2019. god.
 The International Federation for Information Processing www.ifip.org	IFIP Working Group 5.7, Advances in Production Management Systems (APMS) Prof. dr Vidosav D. Majstorović, 2004. god.
 The International Federation of Automatic Control www.ifac-control.org	TC 5.1. Manufacturing Plant Control TC 5.2. Management and Control in Manufacturing and Logistics Prof. dr Vidosav D. Majstorović, 2006. god.

CIRP je naznačajnija međunarodna Akademija za proizvodno inženjerstvo, osnovana 1951. god., sa sedištem u Parizu. Njegovo članstvo se zaslužuje vrhunskim naučnim rezultatima, jer se primenjuju vrlo visoki kriterijumima za izbora njegovih članova, a posebno redovih (Fellow). Broj redovnih članova je ograničen, a sada ih ima 156. IMEKO je federacija nacionalnih organizacija za metrologiju, osnovan 1958. godine, a radi preko svojih Tehničkih komiteta (TC), koji čine pojedine oblasti metrologije, a imah ih ukupno 25. Naš TC 14 je za Metrologiju geometrijskih veličina, je osnovan 1980. godine. Kriterijumi za izbor svojih članova IMEKO takođe zasniva na ostvarenim naučnim rezultatima kandidata iz metrologije (TC u koji se bira). IFIP je međunarodna federacija za obradu informacija, osnovana 1959. godine, koga podržavaju nacionalne organizacije. On svoje naučno-stručne aktivnosti realizuje preko TC kojih ima 13, sa 132 Radne grupe (WG). Naš TC je broj 5 – Primena informacionih tehnologija, a WG 5.7 – Napredni proizvodni menadžment. IFAC je međunarodna organizacija za automatsko upravljanje, osnovana 1956. god. I njega čine nacionalne organizacije, a rad je organizovan preko 9 koordinacionih komiteta (CC) i ukupno 39 TC (tehničkih komiteta). Naš CC je 5 – Sajber fizička proizvodnja, a TC su: TC 5.1 Upravljanje proizvodnjom u pogonu, i TC 5.2 – Uptavljanje proizvodnjom i logistikom. I na kraju, IFIP i IFAC takođe svoje članove biraju prema ostvarenim naučnim rezultatima kandidata.

Laboratorija za metrologiju i TQM je među retkima, da njeni članovi imaju članstvo u najuglednijim naučno-stručnim organizacijama u svetu.

5. ŠTA JE BUDUĆNOST PROIZVODNE METROLOGIJE

Sve činjenice navedene u tački 2, pokazuju da je budućnost Proizvodne metrologije u potpunoj korelaciji sa razvojem modela pametne proizvodnje, a to znači puna primena modela Industrije 4.0 u Proizvodnoj

metrologiji. U takvom sledu događaja, gde će uloga AI i ML biti velika i značajna, što znači da će Proizvodna metrologija biti deo [14]: (i) digitalne proizvodnje, koja će biti zasnovana na AI i ML, gde će kreirati digitalne verzije fizičkih proizvoda, omogućavajući virtuelnu izradu prototipa, simulaciju, merenje i inspekciju, pre realne proizvodnje, (ii) projektovanja za proizvodnju, uključujući i metrologiju, gde će AI i ML pomoći da se stvore proizvodi pogodni za proizvodnju, koji će zadovoljiti sve zahteve kupca (posebno kvalitet), ekologije uz štednju resursa, (iii) optimizacije procesa proizvodnje i inspekcije, AI i ML će analizirati proizvodne podatke kako bi se optimizirali proizvodni i metrološki procesi, smanjujući potrošnju energije, otpad i troškove, (iv) inteligentnog planiranje proizvodnje i inspekcije, posebno na CMM, podržano AI i ML, će optimizirati proizvodne resurse, na osnovu predviđanja potražnje, ograničenja lanca snabdevanja i proizvodnih kapaciteta, (v) automatizacije, gde će kolaborativni roboti, koristeći AI algoritme za optimizaciju zadataka montaže, zavarivanja i inspekcije. Koboti sa AI će povećavati produktivnost i smanjivati troškove rada, (vi) proširene stvarnosti (AR) i digitalni blizanci (DT), podržani AI će se koristiti za simulaciju procesa, mašina i sistema, uključujući i metrologiju, a radi njihovog održavanja i obuke, (vii) kontrole i obezbeđenja kvaliteta, AI će se koristiti za analizu podataka o kvalitetu proizvoda u realnom vremenu, otkrivanje nedostataka i grešaka, uz omogućavanje brzih korektivnih akcija za poboljšanje kvaliteta proizvoda, (viii) analitike velikih podataka, uključujući i podatke o metrologiji, podržana sa AI će analizirati iste (BDA), kako bi se identifikovali trendovi, obrasci ponašanja i korelacije, omogućavajući donošenje odluka na osnovu toga.

6. ZAKLJUČAK

Proizvodna metrologija je izuzetno važna oblast inženjerstva, jer ona čini suštinu svakog inženjerskog proizvoda, ili je kvalitetan ili ne, metrologija to utvrđuje. U današnjem trenutku, njen pravac razvoja je jasan – pametna metrologija.

Ovaj rad sa najvećim poštovanjem, zahvalnošću i uvažavanjem posvećujem prvoj trojici izuzetnih Profesora Proizvodne metrologije na Katedri za Proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Beogradu, a to su: prof. dr Pavle Stanković, prof. dr Vladimir Šolaja i prof. dr Joko Stanić. Njihove ideje, posvećenost poslu a pre svega kolegijalnost prema mlađim kolegama su bile njihove najvažnije osobine, koje sam ja u svom radu uvek imao u vidu.

7. ZAHVALNICA

Autor želi da izrazi posebnu zahvalnost jednom broju kolega, koji su posebno doprineli stvaranju vrhunskih naučnih rezultata Laboratorije u poslednje dve decenije: prof. dr Numan Durakbasa, prof. dr Dragan Đurđanović, prof. dr Slavenko Stojadinović, prof. dr Tatjana Šibalija i dr Srđan Živković.

8. LITERATURA

- [1]. Kaarls, R. *Metrology, essential to trade, industry and society*. Accred Qual Assur 12, 435–437 (2007). 10.1007/s00769-007-0301-6.
- [2]. Weckenmann, Albert & Krämer, Philipp & Hoffmann, Jörg. (2007). *Manufacturing Metrology - State of the Art and Prospects*. 9th International Symposium on Measurement and Quality Control (9th ISMQC), November 21 – 24, 2007, IIT Madras, pp. 1-8.
- [3]. Franceschini, Fiorenzo & Galetto, Maurizio & Maisano, Domenico & Mastrogiacomo, Luca & Pralio, Barbara. (2011). *Distributed Large-Scale Dimensional Metrology: New Insights*. Springer-Verlag London Limited 2011. 10.1007/978-0-85729-543-9.
- [4]. Zhao, Yaoyao & Brown, R. & Kramer, Thomas & Xu, Xun. (2011). *Information Modeling for Interoperable Dimensional Metrology*. Springer-Verlag London Limited 2011. 10.1007/978-1-4471-2167-1.
- [5]. Weckenmann, A., Philipp Krämer and Goekhan Akkasoglu. "Metrology–base for scientific cognition and technical production." AIP Conf. Proc. 1431, 283 (2012); 10.1063/1.4707576.
- [6]. Weckenmann, Albert & Hartmann, W., (2013). *Function-oriented Measurements - The Path from Macro to Micro and Nano Range*. Procedia Engineering. 63. 861-872. 10.1016/j.proeng.2013.08. 173.
- [7]. Hartmann, Wito & Weckenmann, Albert. (2013). *Function-Oriented Dimensional Metrology - More than Determining Size and Shape*. Proceedings Sensor 2013. 285-290. 10.5162/sensor2013/B6.1.
- [8]. N.V. Raghavendra, L. Krishnamurthy, *Engineering Metrology and Measurements*, Oxford University Press 2013.
- [9]. Sladek, Jerzy. (2016). *Coordinate Metrology - Accuracy of Systems and Measurements*. Springer-Verlag London Limited 2016. 10.1007/978-3-662-48465-4.
- [10]. Eric Tell, Alexander Ökvist, *Smart Manufacturing and Metrology - How can metrology enable smart manufacturing?* Bachelor Thesis in Product Realization and Industrial Engineering. 2017. [citirano 2024, Avgust 25]. Raspoloživo na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1292563/fulltext01.pdf>.

- [11]. Andreas Schütze, Nikolai Helwig, and Tizian Schneider, *Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0*, J. Sens. Syst., 7, 359–371, 2017, 10.5194/jsss-7-359-2018.
- [12]. Dietrich Imkamp, Jürgen Berthold, Michael Heizmann, Karin Knie, Eberhard Manske, Martin Peterek, Robert Schmitt, Jochen Seidler, and Klaus-Dieter Sommer, *Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the “Industry 4.0” concept*, J. Sens. Syst., 5, 325–335, 2017, 10.5194/jsss-5-325-2017.
- [13]. Ferreira, Fernando & Guerra, H.. (2018). *The coordinate measuring machines, essential tools for quality control of dimensional and geometrical specifications of technical components, in the context of the industry 4.0*. Journal of Physics: Conference Series. 1044. 012065. 10.1088/1742-6596/1044/1/012065.
- [14]. Vidosav, Majstorovic & Durakbasa, Numan & Takaya, Yasuhiro & Stojadinovic, Slavenko. (2019). *Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model*. In book: Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue, (pp.1-11). 10.1007/978-3-030-18177-2_1.
- [15]. Fanton, Jean-Pierre. (2019). *A brief history of metrology: Past, present, and future*. International Journal of Metrology and Quality Engineering. 10. 5 (2019), 10.1051/ijmqe/2019005.
- [16]. Stojadinovic, Slavenko & Vidosav, Majstorovic. (2019). *An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs*. Springer Nature Switzerland AG 2019. 10.1007/978-3-030-12807-4.
- [17]. Štefan Bodi, *Virtual Quality Management in the Era of Industry 4.0*, PhD Thesis, (2020). 10.13140/RG.2.2.34973.26084.
- [18]. Fountas, N.A. & Vaxevanidis, Nikolaos. (2020). *Intelligent 3D tool path planning for optimized 3-axis sculptured surface CNC machining and inspection through digitized data evaluation and swarm-based evolutionary algorithms*. Measurement. 158. 107678. 10.1016/j.measurement.2020.107678.
- [19]. Castro-Martin, A.P.; Ahuett-Garza, H.; Guamán-Lozada, D.; Márquez-Alderete, M.F.; Urbina Coronado, P.D.; Orta Castañón, P.A.; Kurfess, T.R.; González de Castilla, E. *Connectivity as a Design Feature for Industry 4.0 Production Equipment: Application for the Development of an In-Line Metrology System*. Appl. Sci. 2021, 11, 1312. 10.3390/app11031312.
- [20]. Hinz, L.; Metzner, S.; Müller, P.; Schulte, R.; Besserer, H.-B.; Wackenrohr, S.; Sauer, C.; Kästner, M.; Hausotte, T.; Hübner, S.; Nürnberger, F.; Schleich, B.; Behrens, B.-A.; Wartzack, S.; Merklein, M.; Reithmeier, E. *Fringe Projection Profilometry in Production Metrology: A Multi-Scale Comparison in Sheet-Bulk Metal Forming*. Sensors 2021, 21, 2389. 10.3390/s21072389.
- [21]. Przyklenk, Anita & Balsamo, Alessandro & O’Connor, Daniel & Evans, Alexander & Yandayan, Tanfer & Akgoz, Sibel & Flys, Olena & Phillips, Dishi & Zelený, Vít & Czułek, Dariusz & Meli, Felix & Ragusa, Carlo & Bosse, Harald. (2021). *New European Metrology Network for Advanced Manufacturing*. Measurement Science and Technology. 32. 10.1088/1361-6501/ac0d25.
- [22]. Barbosa, C.R.H.; Sousa, M.C.; Almeida, M.F.L.; Calili, R.F. *Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda*. Sensors 2022, 22, 6114. doi.org/10.3390/s22166114.
- [23]. Rubel, Robiul Islam & Ali, Md & Akram, Md Washim. (2022). *Role of in-process metrology in Industry 4.0 smart manufacturing*. Academic Journal of Manufacturing Engineering. 20. [citirano 2024, Avgust 25]. Raspoloživo na: https://www.ajme.ro/PDF_AJME_2022_2/L2.pdf.
- [24]. Kankar, P.K., Moona, G. & Desai, K.A. *Measurement and Metrology in Advanced Manufacturing Processes*. MAPAN 37, 703–705 (2022). 10.1007/s12647-022-00606-w.
- [25]. Dreyfus, Paul-Arthur & Psarommatis, Foivos & May, Gökan & Kiritsis, Dimitris. (2021). *Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework*. International Journal of Production Research. 60. 10.1080/00207543.2021.1976433.
- [26]. Serban, Petru & Stanasel, Iulian & Peti, Ferencz. (2023). *Mathematics Connection Between CMM and CNC Parameter Setup*. Sciéndo. 20. 2023. 10.2478/amset-2023-0011.

Prilog 1. Reference autora u oblasti Proizvodne metrologije za period 1989. – 2021. god.

1989.

- [1] *Majstorović V., Milačić V., Stanić J., An Approach to the Inspection Expert System Building*, Proceedings of The First International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instrument, 1989, pp. 148 – 156. Wuhan, China.
- [2] *Majstorović V., Milačić V., Stanić J., Development of An Expert System for Inspection*, Proceedings of IFIP WG 5.3 Working Conference on Computer Integrated Quality System in CIM Systems, 1989, pp. 12-18, Belgrade, Yugoslavia.

1990.

- [3] *Majstorović V., Stanić J., Metrological Integration for CAI Model*, Proceedings of International Symposium "Automatization and Measurement Technique", 1990, pp. 84-90, Vienna, Austria.
- [4] *Majstorović, Vidosav, Rakić, M., Stanić, J. Inspekcija i merenje krivih linija i površina, U: Zbornik radova. [S. l.: Jupiter system], 1990, 1990, str. 205-212. [COBISS.SR- ID 513699491].*
- [5]. *Majstorović, Vidosav, Rakić, M., Stanić, J. Povoljnost merenja NUMM-a na bazi mernih predmeta, U: Zbornik radova. [S. l.: Jupiter system], 1990, 1990, str. 213-219. [COBISS.SR-ID 513699747].*

1991.

- [6] *Majstorović V., Stanić J., Milačić V., Knowledge Base Model in an Expert System for Inspection*, The First CIRP Workshop "Learning in IMS", Proceedings, 1991, pp. 264-270, Budapest, Hungary.
- [7] Stanić, Joko, *Majstorović, Vidosav, Merni sistemi u proizvodnoj metrologiji, Časopis Kval. stand., 1991, 19, 2-3, str. 11-25. [COBISS.SR-ID 28500994].*

- [8] *Majstorović, Vidosav D., Milivojević, Milovan, Stanić, Joko. Razvoj CIQ - modela za tehnološke fabrike, Tehnika (Beogr.), 1991, 46, 3-4, str. 199-204. [COBISS.SR-ID 8331535].*
- [9] *Majstorović, Vidosav, Milivojević, Milovan, Stanić, Joko. Razvoj CiQ modela, Tehnika (Beogr.), 1991, god. 46, br. 3/4, str. 199-204. [COBISS.SR-ID 14966796].*
- 1992.**
- [10] *Bojanić P., Majstorović V., Milačić V., CAD-CAI Integration with Special Focus on Complex Surfaces, Annals of the CIRP, Vol. 41/1 (1992), pp. 535-538.*
- [11] *Majstorović V., Balendra, R., Expert System for Inspection Planning, Eight International Conference on Manufacturing Research, Proceedings, 1992, pp. 157-162, Birmingham, UK.*
- 1993.**
- [12] *Majstorović, V., Milačić, V., Uncertainty of Coordinate Measuring Machine, ASPE Annual Meeting, Proceedings, 1993, pp. 120-128, Seattle-Washington, USA.*
- [13] *Majstorović, V., Milačić, V., Rakić, M., Intelligent Inspection in CIM Environment, International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Proceedings, 1993, pp. 214-220, Wuhan, China.*
- [14] *Majstorović, Vidosav, Rakić, Milutin, Stanić, Joko. Geometrijsko modeliranje pomoću NUMM, U: Teška mašingradnja : Zbornik radova. knj. 3, Proizvodnja. Kraljevo: Mašinski fakultet, 1993, str. 482-487. [COBISS.SR-ID 514101667].*
- 1994.**
- [15] *Majstorović, Vidosav D., Kokotović, Slobodan, CAD-CAI integracija za složene krive linije, Tehnika (Beograd), 1994, 49, 3-4, str. M5-8M. [COBISS.SR-ID 13374991].*
- 1995.**
- [16] *Majstorović, Vidosav D.. Koncept totalnog kvaliteta : novi prilozii za tehnološke sisteme = Total quality concept : advanced approach to manufacturing systems, (Inteligentni tehnološki sistemi, Serija monografskih radova, knj. 6, vol. 6). Beograd: Mašinski fakultet, 1995. 200 str., graf. prikazi. ISBN 86-7083-263-1. [COBISS.SR-ID 93603079].*
- [17] *Majstorović, V., Stojković, S., Tumbas, Z., Intelligent CAD/CAI Interface, Second International Workshop on Learning in Intelligent Manufacturing Systems, Proceedings, pp. 84-88, 1995, Budapest, Hungary.*
- [18] *Majstorović, V., Tumbas, Z., Inspection Features in Intelligent CAI Model, Second International Workshop on Learning in Intelligent Manufacturing Systems, Proceedings, pp. 210-214, 1995, Budapest, Hungary.*
- [19] *Majstorović, V., Bojanić, P., Milačić, V., Expert System for Planning on Coordinate Measuring Machine, The First World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Proceedings, 1995, pp. 909-919, San Yuan, Puerto Rico.*
- 1996.**
- [20] *Rakić, Milutin, Stanić, Joko, Majstorović, Vidosav, Formiranje mernog senzora NUMM pomoću ekspertnog sistema za inspekciju, U: Kalajdžić, Milisav. Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet: JUPITER asocijacija, 1996, 1996, str. 5.31-5.36. [COBISS.SR-ID 513383331].*
- [21] *Rakić, Milutin, Majstorović, Vidosav. Izbor karakteristika NUMM pomoću ekspertnog sistema za inspekciju, U: Јовановић, Томислав (ур.). Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet, 1996, str. 525-527. [COBISS.SR-ID 513944483].*
- [22] *Majstorović, Vidosav. Virtualni kvalitet = Virtual quality. Menadž. total. kval., 1996, 24, 3-4, str. 87-96. [COBISS.SR-ID 53790210].*
- [23] *Majstorović, V., Rakić, M., Metrological Features of Expert System for Inspection of Curves, International Conference "Flexible Automatization", Proceedings, 1996, pp. 180-186, Taipei, Taiwan.*
- 1997.**
- [24] *Bojović, Božica, Majstorović, Vidosav, Primena veštačke inteligencije kod QFD metode, U: Milačić, Vladimir, Kalajdžić, Milisav. Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet: JUPITER asocijacija, 1997, 1997, str. 527-532. [COBISS.SR-ID 513362595].*
- [25] *Majstorović, Vidosav D., Bojanić, Pavao. Informaciona integracija za kvalitet, U: Majstorović, Vidosav (ur.). Menadžment totalnim kvalitetom: Radovi saopšteni na 24. godišnjoj konferenciji JUSK-a, 28-30. maj 1997. Beograd: Jugoslovensko udruženje za standardizaciju i kvalitet (JUSK), 1997, 1997, str. 169-175. [COBISS.SR-ID 81841154].*
- [26] *Majstorović, Vidosav D. Menadžment totalnim kvalitetom i reinženjerstvo tehnoloških sistema, U: Savetovanje Razvoj i realizacija nacionalne strategije unapređenja kvaliteta : Kopaonik, 18-21. mart 1997. Beograd: JUSK, 1997, 1997, str. 71-78. [COBISS.SR-ID 14511631].*
- [27] *Majstorović, V., Rakić, M., Expert System for Inspection Planning on CMM, The Second Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Proceedings, 1997, pp. 145-148, Budapest, Hungary.*
- [28] *Živković, S., Majstorović, V., Kalajdžić, M., Developed CAI System for Complex Parts, Proceedings, The Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Proceedings, 1997, pp. 425-429, Budapest, Hungary.*
- [29] *Bojanić, P., Majstorović, V., Vraneš, S., Intelligent Environment for Product and Process Design, Proceedings of 29th CIRP Manufacturing Systems Conference, pp. 145-148, 1997, Osaka, Japan.*
- 1998.**
- [30] *Majstorović, Vidosav, Hodolić, Janko. Numerički upravljane merne mašine, (Edicija NUMA FTS), [1. izd.]. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 1998. 183 str., ilustr. ISBN 86-499-0091-7. [COBISS.SR-ID 141586695].*
- [31] *Majstorović, V., Bojanić, P., Domazetović, S., Recognition of Product Features as a Basic for the Building of Intelligent Concurrent Design Systems, International Journal "Production Engineering and Computers", 1998, No.2, Vol. 2, pp. 23-27, Belgrade, Yugoslavia.*
- [32] *Majstorović, V., Virtual Quality in Agile Manufacturing Systems, 4th International Seminar "Intelligent Manufacturing Systems - Theory and Practice", Proceedings, 1998, pp. 27-31, Belgrade, Yugoslavia.*
- [33] *Majstorović, V., Hodolić, J., Stević, M., Model for CMM Testing by LMS, American Society for Precision Engineering, Proceedings of Annual Meeting, pp. 318-324, St. Louis, USA.*
- 1999.**
- [34] *Rakić, Milutin, Majstorović, Vidosav. Učenje u ekspertnom sistemu za inspekciju, U: Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet: JUPITER asocijacija, 1999, 1999, str. 5.49-5.54. [COBISS.SR-ID 513394339].*
- [35] *Bojanić, P., Majstorović, V., Vraneš, S., Intelligent Environment for Product and Process Design, pp. 78 –84, International Journal "CIRP of Manufacturing Systems", Vol. 29, No. 1, 1999, ISSN 1581 – 5048, Ljubljana, Slovenia.*
- [36] *Živković, Srdan, Majstorović, Vidosav. Inspekcija složenih prostornih oblika u agilnim tehnološkim sistemima U: Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet: JUPITER asocijacija, 1999, 1999, str. 5.17-5.22. [COBISS.SR-ID 513385123].*

2001.

[37] Rakić, Milutin, Stanić, Joko, *Majstorović, Vidosav*. Statistički metod sinteze korelacionih grešaka obradnih procesa V: Zbornik radova. Beograd: Mašinski fakultet univerziteta, 2001, 2001, str. 5.9-5.12. [COBISS.SR-ID 513345699]

2003.

[38] *Majstorović, V.*, Inspection Planning on CMM Based Expert System, Proceedings of 36th CIRP International Conference on Manufacturing Systems, pp. 48 – 56, 2003, Saarbrucken, Germany.

[39] *Majstorović, Vidosav D., Nešić, Nenad*. Razvoj modela ekspertnog sistema za inspekciju, Q kvalitet, 2003, vol. 13, br. 9/10, str. 80-84. [COBISS.SR-ID 162960140].

2004.

[40] *Majstorović, Vidosav D.* Digitalna fabrika i digitalni kvalitet, Menadž. total. kval., 2004, vol. 32, br. 3/4, str. 86-90. [COBISS.SR-ID 164419596].

[41] Gligorić, Srđan J., *Majstorović, Vidosav D.* Istraživanja za razvoj CAI modela, Model. Menadž. total. kval., 2004, vol. 32, br. 3/4, str. 112-117. [COBISS.SR-ID 164420876].

2009.

[42] *Majstorović, Vidosav D., Erčević, Bojan, Erčević, Marko, Zukan, Igor*, Digitalna fabrika i CAI model. Menadž. total. kval. izvr., 2009, vol. 37, br. 3/4, str. 107-111, slike. [COBISS.SR-ID 174328076].

2011.

[43] Stojadinovic S., *Majstorovic V.*, 2011, Metrological primitives in production metrology – ontological approach, 34th International Conference on Production Engineering, 29.-30. September, Nis, Serbia, 167-170, ISBN 978-86-6055-019-6.

[44] Tatjana V. Sibalija & Sanja Z. Petronic & *Vidosav D. Majstorovic* & Radica Prokic-Cvetkovic & Andjelka Milosavljevic, Multi-response design of Nd:YAG laser drilling of Ni-based superalloy sheets using Taguchi's quality loss function, multivariate statistical methods and artificial intelligence, Int J Adv Manuf Technol (2011) 54:537–552, 10.1007/s00170-010-2945-3.

[45] *Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović*, Digital Engineering – Current Challenges and Opportunities, Proceedings of XV International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'11), 34-40, Novi Sad, Serbia, September 14. – 16. 2011. University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Industrial Engineering and Management, Novi Sad, Yugoslavia.

[46] *Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović*, Serbian Contribution for High Performance and High Aided Value Manufacturing – An Industrial Application, Special session related to ManuFuture Village Umbrella Initiative called “South East Europe Contributions for the New Industries European Innovation Partnership”, Manufuture 2011 Conference, Wroclaw 24 – 25, October, Poland.

[47] Tatjana Šibalija, *Vidosav Majstorović*, Mirko Soković, Taguchi-Based and Intelligent Optimisation of a Multi-Response Process Using Historical Data, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57(2011)4, 357-365, 0.5545/sv-jme.2010.061.

[48] Stojadinović, S., *Majstorović, V.*, Engineering ontology – state of the art and future development, Proceedings of the 6th International Working Conference “Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches”, 53-58, Belgrade, Serbia, 6th – 10th June 2011, UDC: 111.1; 658.7; 005; 339.178.3, 347.717; 621.821.3. ISBN 978-86-7083-727-0.

2012.

[49] Stojadinovic, S., *Majstorovic, V.*, Towards the Development of Future-Based Ontology for Inspection Planning on CMM, Journal of Machine Engineering, Vol. 12, No. 1, Proceedings, 89–98, 2012.

[50] *Majstorović, V.*, Towards a Digital Factory – Research in the World and our Country, Introduction paper, Proceedings of 5th International Conference of Industrial Engineering, pp. 13 – 16, Belgrade, 2012, ISBN 978-86-7083-4, COBISS SR-ID 191329292. <http://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=1451-41171203161M>

[51] *Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović*, Bojan Erčević, M.Sc, Marko Erčević, M.Sc, Igor Zukan M.Sc, CAI Model for Digital Manufacturing – Our Approach, Introduction paper, International Conference "KODIP - 2012", Proceedings, pp. 24-28, Budva, Montenegro, 19.06.2013,

[52] Sibalija, T., *Majstorovic, V.*, An integrated simulated annealing-based method for robust multiresponse process optimisation (Article), The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, April 2012, Volume 59, Issue 9-12, pp 1227-1244, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-011-3572-3>.

[53] Sibalija, T., *Majstorovic, V.*, An integrated approach to optimise parameter design of multi-response processes based on Taguchi method and artificial intelligence (Article), Journal of Intelligent Manufacturing, October 2012, Volume 23, Issue 5, pp 1511-1528, <http://link.springer.com/article/10.10072Fs10845-010-0451-y>.

[54] *Majstorović, V.*, Sibalija, T. (2012) Knowledge-based system for Taguchi's robust design model, Proceedings of the 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises – MITIP 2012, pp. 486-498, October 2012, Budapest, Hungary.

[55] *Majstorovic, V.*, Hybrid Knowledge-based Process Designer Model - PIP_12 – WMF 2012 - Scientific Forum and Proposers' Day, World Manufacturing Forum, 2012, Stuttgart, Germany.

[56] *Majstorovic, V.*, Intelligent system for engineering optimization based on Taguchi model, SIG Meeting of European project “Virtual Factory Framework” (VFF) FP7, Budapest, April 2012., Proceedings, pp. 24-30, Budapest, Hungary.

2013.

[56] *Majstorovic Vidosav D, Trajanovic Miroslav D, Vitkovic Nikola, Stojkovic Milos S*, Reverse engineering of human bones by using method of anatomical features, CIRP Annals - Manufacturing Technology, (2013), vol. 62 br. 1, str. 167-170. 10.1016/j.cirp.2013.03.081.

[57] *Vidosav D. Majstorovic*, Tatjana Sibalija, Quality Improvement Using Taguchi's Model: – A Case Study from Serbia, Scientific Journal of RTU: Economics and Business, Vol. 24, 2013, pp. 94-98. ISSN 14077337, 10.7250/eb.2013.011.

[58] Slavenko M. Stojadinović, *Prof. Dr. Vidosav D. Majstorović*, Inspection Planning for Prismatic Parts on CMM Based on Ontology Knowledge Base, Production Engineering Department, Laboratory for Quality Management and Production Metrology, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia; The 7th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", 3rd – 7th June, 2013, Belgrade, Serbia. Session 4 – Young PhD researchers, Proceedings 005.6 (082), ISBN 978-86-7083-791-1, COBISS.SR 198576396, pp:71-76, 2013.

[59] Tatjana V. Šibalija, *Vidosav D. Majstorović*, Bojan M. Erčević, Marko M. Erčević, PROCESS Planning for Prismatic Parts in Digital Manufacturing, Introduction paper, Faculty of Engineering International Management, European University, Belgrade, Serbia; 2 Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia; 3 IVA 28 d.o.o, Novi Beograd, Serbia. The 7th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", 3rd – 7th June, 2013,

- Belgrade, Serbia. Session 21 - Closing Plenary Session - QM, TQM & IMS - New Dimensions, Proceedings 005.6 (082), ISBN 978-86-7083-791-1, COBISS.SR 198576396, pp:589-590, 2013.
- [60] *Majstorovic V., Stojadinovic D.*: Research and development of knowledge base for inspection planning prismatic parts on CMM – (ID 256) 11th IMEKO TC14 International Symposium on Measurement and Quality Control – ISMQC, 2013, September 11-13, 2013, Cracow-Kielce, Poland, Session W1.1. Coordinate Measuring Machines I, Proceedings, pp. 46 – 52. [10.21014/ACTA_IMEKO.V4I2.205](https://doi.org/10.21014/ACTA_IMEKO.V4I2.205).
- [61] *Majstorovic V., Zivkovic S.*: Developed computer aided inspection method for free-form surfaces applied on aeronautical lift and control surfaces – (ID 262), 11th IMEKO TC14 International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, September 11-13, 2013, Cracow-Kielce, Poland, Miscellaneous applications of metrology, Proceedings, pp. 142 – 148. [10.21014/ACTA_IMEKO.V4I2.216](https://doi.org/10.21014/ACTA_IMEKO.V4I2.216).
- [62] *Vidosav Majstorović, Bojan Erčević, Marko Erčević, Igor Zukan*, CAI Model and Digital Factory, International Journal - Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 8, Issue 1, pp.25-28, 2013, ISSN 2067-9238, Romania, Bucharest.
- [63] *Majstorovic V, Sibalija T, Ercevic B, Ercevic M.* CAPP model for prismatic parts in digital manufacturing. In George L. Kovács and Detlef Kochan (Eds.): IFIP Advances in Information and Communication Technology, Digital Product and Process Development Systems, Springer; 2013, pp. 190-204. [10.1007/978-3-642-41329-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41329-2).
- [64] *Majstorovic, V.*, Manufacturing Innovation and Horizon 2020 – Developing and implement ‘new manufacturing’, Introduction Plenary Presentation, 22nd International Conference on Manufacturing Systems - ICMaS 2013, 14th -15th November, Bucharest, Romania. (M 31-3). Proceedings, pp. 12-18.
- [65] *Vidosav D. Majstorovic*, Education of Production Engineers for Digital Manufacturing, 35th International Conference on Production Engineering, 25. - 28. September 2013, Kraljevo, Serbia, University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering Kraljevo, Proceedings. ISBN 978-86-82631-69-9, COBISS.SR-ID 204080908, pp. 349 – 352, Kraljevo, Serbia.
- [66] *Vidosav D. Majstorovic*, Manufacturing and Horizon 2020 - What are important for Serbia ? Plenary presentation - Review paper, 35th International Conference on Production Engineering, 25. - 28. September 2013, Kraljevo, Serbia, University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering Kraljevo, Proceedings. ISBN 978-86-82631-69-9, COBISS.SR-ID 204080908, pp. 35 – 40, Kraljevo, Serbia.
- [67] *Vidosav Majstorović*, Closing the loop from design to production – one example from Serbia - W1.2 Supply Chains for Customised Products, Manufature 2013 Conference, 6-8 October 2013, Proceedings, Vilnius, *Lithuania*.
2014.
- [68] *Vidosav Majstorovic*, Tatjana Sibalija, Marko Ercevic, Bojan Ercevic, CAI Model for Prismatic Parts in Digital Manufacturing, Procedia CIRP, Volume 25, 2014, Pages 27-32, 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 – “Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution 10.1016/j.procir.2014.10.006.
- [69] Tatjana V. Sibalija, Sanja Z. Petronic, *Vidosav D. Majstorovic*, Andjelka Milosavljevic, Modelling and optimisation of laser shock peening using an integrated simulated annealing-based method, Int J Adv Manuf Technol (2014) 73:1141–1158; 10.1007/s00170-014-5917-1, ISSN: 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online).
- [70] *Vidosav D. Majstorović*, Jelena Mačuzić, Tatjana V. Sibalija, Bojan Ercevic, Marko Ercevic, „Cyber-Physical Manufacturing Systems“; Introduction paper for Session: Information, Management And Communication Systems, XVI International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'14), October 15. – 17. 2014., Proceedings, pp. 113 – 118. Novi Sad, Serbia.
- [71] *Vidosav D. Majstorović*, Jelena Mačuzić, Tatjana V. Šibalija; „Cyber-Physical Manufacturing Systems – Advanced Toward New Industrial Paradigm“; Introduction Opening Plenary Presentation, Proceedings, pp: 8-11, 23rd International Conference on Manufacturing Systems ICMAS 2014, 13th Nov 2014 – 14th Nov 2014, Machines and Production Systems Department, University “Politehnica of Bucharest”, Bucharest, Romania.
- [72] *Vidosav D. Majstorović*, Manufacturing and Horizon 2020 - Factory of the Future Researches in Serbia, World Manufacturing Forum 2014, “Integrated modelling, simulation and information management system”, Proceedings, pp 264-270, 30 June 2014, Milano, Italy.
- [73] *Vidosav D. Majstorović*, Digital manufacturing model in SMEs – Serbian’s approach, Manufuture Conference 2014 - Leading Enabling Technologies for Societal Challenges, Track: Future of industry - New Industrial networks based on cross cutting technologies, Proceedings, pp 226 – 232, Bologna - 29th September – 1st October 2014.
- [74] Stojadinovic, S., Majstorovic, V., Developing engineering ontology for domain coordinate metrology, FME Transactions, pp. 249-255, Vol. 42, No.3, 2014, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, ISSN: 1451-2092 (štampano izdanje), ISSN: 2406-128X (online), UDC:621, 10.5937/fmet1403249S.
- 2015.**
- [75] Stojadinovic S, *Majstorovic V*, Durakbasa NA (2015) Feature—based path planning for inspection prismatic parts on CMM, XXI IMEKO world congress “Measurement in Research and Industry”, In: Proceedings, ISBN 978-80-01-05793-3, pp 1551–1556, Prague, Czech Republic, August 30th–September 4th, 2015, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Measurement.
- [76] *Majstorovic, V.*, et al.: Cyber-physical manufacturing systems – manufacturing metrology aspects. Proc. Manuf. Syst. 10(1), 9–14 (2015). ISSN 2067-9238.
- 2016.**
- [77] Slavenko M. Stojadinovic, *Vidosav D. Majstorovic*, Numan M. Durakbasa, Tatjana V. Sibalija, Towards an intelligent approach for CMM inspection planning of prismatic parts, Measurement, Volume 92, 2016, Pages 326-339, 10.1016/j.measurement.2016.06.037.
- [78] Stojadinovic S, *Majstorovic V*, Durakbasa N, Sibalija T (2016) Ants colony optimization of the measuring path of prismatic parts on a CMM. Metrol Meas Syst 23(1):119–132. [10.1515/mms-2016-0011](https://doi.org/10.1515/mms-2016-0011)(ISSN0860-8292)
- [79] Šibalija, T., Živković, S., Fountas, N., *Majstorović, V.*, Mačuzić, J., Vaxevanidis, N.: Virtual optimization of CAI process parameters for the sculptured surface inspection. Procedia CIRP 57, 574–579 (2016). [10.1016/j.procir.2016.11.099](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.099).
- 2017.**
- [80] Fountas, N.A., Živković, S., Benhadj-Djilali, R., Stergiou, C.I., *Majstorovic, V.D.*, Vaxevanidis, N.M. (2017). Intelligent Dual Curve-Driven Tool Path Optimization and Virtual CMM Inspection for Sculptured Surface CNC Machining. In: *Majstorovic, V., Jakovljevic, Z.* (eds) Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. NEWTECH 2017. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 10.1007/978-3-319-56430-2_25.

- [81] Stojadinovic, S.M., *Majstorovic, V.*, Durakbasa, N.M. (2017). An Advanced CAI Model for Inspection Planning on CMM. In: *Majstorovic, V., Jakovljevic, Z.* (eds) Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. NEWTECH 2017. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 10.1007/978-3-319-56430-2_5.
- [82] *Majstorović, V.*, Stojadinović, S., Živković, S., Djurdjanović, D., Jakovljević, Ž., Gligorijević, N.: Cyber-physical manufacturing metrology model (CPM3) for sculptured surfaces – turbine blade application. In: The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems (2017). [10.1016/j.procir.2017.03.093](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.093). Procedia CIRP, 63:658–663.
- [83] Dragan Djurdjanović, Yibo Jiao, *Vidosav Majstorović*, Multistage manufacturing process control robust to inaccurate knowledge about process noise, CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, 2017, Pages 437–440, ISSN 0007-8506, [10.1016/j.cirp.2017.04.012](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.012).
2018.
- [84] *Majstorovic, V.D.*, Stojadinovic, S.M., Durakbasa, N.M.: An in - process measurement inspection planning model for prismatic parts. In: Proceedings of the 13th International scientific conference MMA 2018 - Flexible Technologies, Novi Sad, Serbia, pp. 103–106 (2018).
- [85] Živković, S., Čerče, L., Kostić, J., *Majstorović, V.*, Kramar, D.: Reverse engineering of turbine blades kaplan’s type for small hydroelectric power station. Procedia CIRP 75, 379–384 (2018). [10.1016/j.procir.2018.04.037](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.037).
- [86] *Majstorovic, V.*, et al.: Cyber-physical manufacturing metrology model (CPM³) – big data analytics issue. Proc. CIRP 72, 503–508 (2018). [10.1016/j.procir.2018.03](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03).
- [87] *Majstorović, V.D.*, et al.: Cyber-physical manufacturing in context of industry 4.0 program. In: Proceedings of 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing, pp. 227–238. Springer, Heidelberg (2018). [10.1007/978-3-3-319-89563-5](https://doi.org/10.1007/978-3-3-319-89563-5).
2019.
- [88] *Majstorovic, V.D.*, Durakbasa, N., Takaya, Y., Stojadinovic, S. (2019). Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model. In: *Majstorovic, V., Durakbasa, N.* (eds) Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue. IMEKOTC14 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 10.1007/978-3-030-18177-2_1.
- [89] Djurdjanovic, Dragan & Haq, Asad & Magnanini, Maria Chiara & *Vidosav, Majstorovic.* (2019). Robust model-based control of multistage manufacturing processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [10.1016/j.cirp.2019.03.014](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.03.014).
2020.
- [90] *Majstorovic, D.V.*; Stojadinovic, S. Cyber Physical Manufacturing Metrology, NEWTECH 2020, IOP Conf. 2020 Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020.
2021.
- [91] Ramin Sabbagh, Srdjan Živković, *Vidosav Majstorovic*, Dragan Djurdjanovic, Organization of big metrology data within the Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM³), CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 6, Decembar 2021. [10.1016/j.cirpj.2021.10.009](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.009).
- [92] Slavenko M. Stojadinovic, *Vidosav Majstorovic*, Adam Gaška, Sladek Jerzy Sladek, Numan Durakbasa. Development of a Coordinate Measuring Machine—Based Inspection Planning System for Industry 4.0. Applied Sciences. 2021; 11(18):8411. [10.3390/app11188411](https://doi.org/10.3390/app11188411).
- [93] Stojadinovic, S.M.; *Majstorovic, V.D.*; Durakbasa, N.M. Toward a cyber-physical manufacturing metrology model for industry 4.0. Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. 2021, 35, 20–36.

Majstorović, V.

THE 75TH YEAR OF MANUFACTURING METROLOGY AT THE FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN BELGRADE

Abstract: *Manufacturing metrology is the science of measurement in manufacturing engineering and has always been important to the disciplines of engineering and especially manufacturing engineering. Metrology is divided into scientific, legal and applied, which also applies to manufacturing metrology. The paper itself refers to applied manufacturing metrology from the point of view of its development as an engineering discipline at the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, at the Department of Manufacturing Engineering. Therefore, this paper represents a historical retrospective of its development at this Faculty, and the paper itself has several parts: (i) an overview of the development of manufacturing metrology in the world, (ii) its development at the Manufacturing Metrology, over a period of 75 years, with several aspects: engineering education, research and industrial applications. Finally, the general view of the author on the future development of this discipline is presented.*

Key words: *Manufacturing metrology, Education of engineers, Research, Development.*

Радовановић, С., Стојадиновић, С.¹**ПРОЈЕКТОВАЊЕ, ОБРАДА И ИНСПЕКЦИЈА ГЕОМЕТРИЈСКИХ
КАРАКТЕРИСТИКА КВАЛИТЕТА КУЋИШТА РУЧНОГ САТА²***Резиме*

Овај рад истражује везу часовничарске индустрије са производним машинством и производном метрологијом. Представљен је процес пројектовања ручног сата са свим његовим стандардним и недстандардним компонентама, као и брза израда његовог прототипа методом стереолитографије. Описана је машинска обрада кућишта сата на машини алатки, укључујући одређивање облика и димензија припремка, избор алата и режима обраде. Урађена је и симулација путање мерног пипка за визуелну инспекцију, верификација мерне путање и провера колизије у софтверу „PTC Creo Parametric 8.0“, што је омогућило генерисање и DMIS фајла или улазне датотеке за реалну мерну машину. Резултат рада је пројектован нови ручни сат, машински обрађено кућиште сата и спроведена симулација геометријских карактеристика квалитета кућишта.

Кључне речи: Ручни сат, пројектовање, инспекција, симулација

1. УВОД

Људи су одувек мерили време ради планирања и организовања активности, што је било кључно за функционисање друштва. Према [1] и [6] древне цивилизације као што су Египат, Грчка и Рим користиле су сунчане часовнике, који су показивали време током дана користећи сенку Сунца. Поред сунчаних часовника, водени сатови или клепсидре су такође били популарни. Они су функционисали тако што је вода текла из једне посуде у другу, а проток воде омогућавао је мерење различитих временских интервала.

У осмом веку појавили су се пешчани сатови, који су били корисни за мерење краћих временских периода. У средњем веку, развојем технологије, појавили су се механички сатови, чији су сложени механизми користили зупчанике и тегове за прецизно мерење времена. Пендулумни сатови, са својим клатнима која су се љуљала у стабилном ритму, додатно су побољшали тачност мерења времена.

Током шеснаестог века, цепни сатови постали су веома популарни. Ношени у цеповима прслука и одеће, ови сатови били су веома практични и корисни. Почетком двадесетог века, појавили су се ручни сатови који су углавном коришћени од стране официра ради лакше синхронизације војних вежби.

Даљи развој технологије довео је до појаве различитих типова сатова: механичких, аутоматских, кварцних, кинетичких, соларних и дигиталних. Ови сатови омогућили су прецизно мерење времена, што је побољшало организацију, планирање и синхронизацију активности, значајно утичући на квалитет живота и ефикасност у различитим аспектима свакодневице.

Циљ истраживања рада [9] јесте да савремени сатови представљају спој традиционалне ручне израде и модерне технологије. Овакви сатови често комбинују класичне елементе, као што су механички покретачи и висококвалитетни материјали, са напредним технолошким решењима. Интеграција иновација као што су хибридни механизми и паметне функције омогућавају не само прецизно мерење времена, већ и побољшану функционалност. Ови сатови су дизајнирани да задовоље савремене стандарде естетике и перформанси, комбинујући стару школу са савременим достигнућима у области инжењеринга.

¹ Слободан Радовановић, маг. инж. маш., Развојни центар ADS d.o.o., (slobodanradovanovic313@gmail.com), др Славенко Стојадиновић, ван. проф., Универзитет у Београду, Машински факултет, (sstojadinovic@mas.bg.ac.rs)

² Овај рад настао је као резултат истраживања спроведеног током израде Мастер рада под насловом: „Пројектовање, обрада и инспекција геометријских карактеристика квалитета кућишта ручног сата“.

Савремена технологија израде кућишта ручних сатова обухвата комбинацију традиционалних метода и иновација које унапређују естетику и функционалност производа. На овом пољу, значајна је техника брзе израде прототипа која омогућава брзу производњу и евалуацију прототипова, што доприноси прецизности и оптимизацији дизајна. Ова метода омогућава дизајнерима да ефикасно тестирају и усаврше естетске и функционалне аспекте кућишта, задржавајући притом класичне елементе дизајна. Резултат рада је пројектован нови ручни сат са машински обрађеним кућиштем, уз брз развој прототипа и извршену симулацију мерења геометријских карактеристика квалитета кућишта.

2. ПРОЦЕС ПРОЈЕКТОВАЊА РУЧНОГ САТА

Процес пројектовања започет је избором механизма. Након разматрања различитих типова механизма (кварцни, механички и аутоматски) и њихових карактеристика као и произвођача изабран је аутоматски механизам швајцарске компаније Ета, модел ЕТА 2824-2. Овај механизам [2],[7] омогућава аутоматско и мануелно навијање који има резерву снаге од 38-40 сати и садржи 25 рубина који смањују трење и омогућавају несметано кретање зупчаника механизма ручног сата.

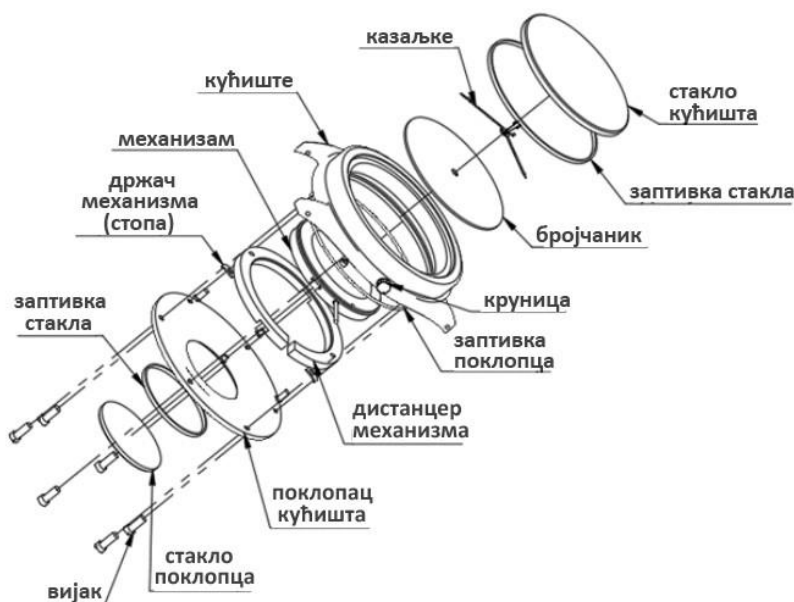
Након што је одабран механизам, на основу кога су добијене почетне димензије, процес пројектовања наставља се одабиром главних карактеристика квалитета кућишта ручног сата и то:

- димензије стакла,
- димензије заптивке стакла као и толеранција налегања између кућишта сата, заптивке стакла и самог стакла,
- начин везивања механизма за дистанцер, као и дистанцер за кућиште сата,
- начин везивања поклопца кућишта сата за кућиште сата,
- толеранција налегања крунице сата ради остваривања водоотпорности самог сата,
- унутрашње толеранције мера,
- избор заптивке за одржавање водоотпорности сата између поклопца сата и кућишта сата,
- димензије бројчаника,
- висина механизма сата са постављеним казаљкама како не би дошло до контакта врха секундне казаљке са унутрашњом површином стакла сата,
- избор ширине наруквице и димензије одговарајуће иглице (штифта) који ће држати наруквицу везану за кућиште сата,
- технологија обраде.

Даље, процес пројектовања фокусиран је на добијање модела дистанцера. Улога дистанцера јесте да попуни „празан“ простор између унутрашњег пречника кућишта ручног сата и спољашњег пречника механизма, чиме омогућава везивање механизма за дистанцер, а затим дистанцера за кућиште сата. За ове елементе у споју, толеранције налегања подлежу неизвесном налегању и прописане су на техничком цртежу. Механизам се за дистанцер везује помоћу стандардних вијака, док се дистанцер за кућиште везује помоћу стопице и вијка. Унутар кућишта пројектован је жљеб чија је улога да се стопица која држи механизам убаци и на тај начин обезбеди фиксан положај овог подклопа. Стопица је деформабилни елемент који се пријања за унутрашњи жљеб кућишта ручног сата помоћу вијака, чиме се отклањају степени слободе овог елемента у току ношења.

Следећи корак јесте усвајање стандардних компонената као што су круница ручног сата, заптивка поклопца, заптивка стакла, стакло, бројчаник и казаљке.

Последњи корак пројектовања сата јесте пројектовање поклопца кућишта за који је усвојена идеја да садржи стакло заједно са одговарајућом заптивком стакла како би механизам био видљив без отварања поклопца. Заптивање поклопца за кућиште врши се вијцима, чиме би се омогућило да сат има већу водоотпорност. Приликом пројектовања поклопца, потребно је да ротор самог механизма има довољно простора за ротационо кретање у току рада (ротор се окреће помоћу покрета руке) и на тај начин би обезбеђује несметан рад самог механизма.



2.1 - Експлодирани поглед ручног сата са свим компонентама

На слици 2.1 налази се експлодирани поглед са свим неопходним компонентама сата. Процес технологије монтаже је мануелан и започиње се тако што се на механизам постави бројчаник. Бројчаник се на механизам поставља помоћу пинова који се постављају у отворе за пинове на механизму. На овај начин регулисано је правилно позиционирање бројчаника у односу на механизам, односно да се број дванаест на бројчанику налази у горњем положају. Након што се постави бројчаник потребно је поставити сатну, минутну и секунду казалку тако да њихов врх показује дванаест сати. На кућишту сата поставља се заптивка стакла, а затим се помоћу пресе утискује стакло унутар кућишта сата тако да се добије фиксна целина. Након стакла, у кућиште сата утискује се туба за круницу. Дистанцер се везује вијцима за механизам, а затим се он заједно са механизмом поставља унутар кућишта где се помоћу стопице фиксира за кућиште самог сата. Следећи корак јесте стављање крунице сата и заптивке поклопца која се пре постављања подмазује силиконом због боље водоотпорности. Што се поклопца тиче, неопходно је поставити заптивку стакла заједно са одговарајућим стаклом на идентичан начин како је већ било речи код кућишта сата. Овако формирана два подклопа се помоћу шест вијака везују и представљају готов производ.

3. БРЗА ИЗРАДА ПРОТОТИПА (RAPID PROTOTYPING)

Након што је процес пројектовања завршен, циљ је био да се добије физички модел помоћу стереолитографије која је један од најпрецизнијих техника 3D штампе. Према раду [8] уз помоћ ове технологије, могуће је одштампати веома мале и ситне делове као и детаље. За градивни материјал ове технологије користи се фотополимер. То је материјал који мења своју структуру под дејством ултраљубичастиг зрачења, односно тада материјал прелази из течног у чврсто стање. 3D штампач који је коришћен јесте „*phrozen sonic mighty 4K*“ (слика 3.1) [11] и он се састоји од посуде у коју се сипа фотополимер и покретне платформе која се креће по вертикалној Z оси. Почетак рада започиње тако што се покретна платформа спусти до крајњег доњег положаја и где се под дејством ултраљубичастиг зрачења очвршћава први слој а затим се платформа подиже за висину слоја. Посупак се понавља све до последњег слоја и након што је штампање завршено, неопходно је уклонити одштампани модел са платформе. Уклоњени модели постављају се у посуду друге машине која има улогу да очисти вишак фотополимера (смоле). Након прања следи сушење модела а затим „печење“ у трећој машини под дејством ултраљубичастиг зрачења који доводи до формирања крајњег модела.

Модел који се штампају морају се конвертовати у STL формат, који представља модел помоћу троуглова и нормала на површину. За генерисање G кода користи се софтвер Chitobox, који омогућава позиционирање модела унутар радног простора 3D штампача. Након припреме за 3D штампу, додаје се помоћни материјал и извршава анализа по слојевима.

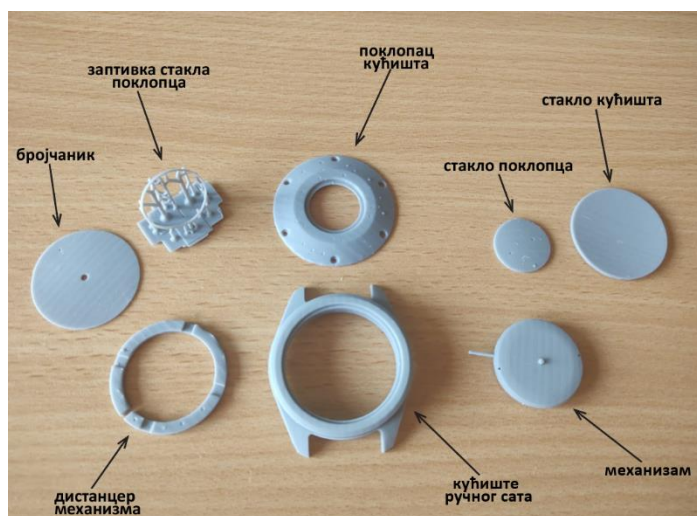
Кључни параметри који се подешавају су висина слоја, брзина враћања платформе, време формирања слоја и растојање за које се платформа подиже након формираног слоја. За 3D штампу

користи се смола Aqua Resin Gray-4K, а параметри штампања се прилагођавају препорукама произвођача. Након генерисања G кода, он се помоћу SD картице уноси у 3D штампач.

Након штампања, платформа са моделима се уклања из штампача, модели се чисте од вишка материјала, перу у изопропил алкохолу и на крају очвршћавају под ултраљубичастим зрачењем (слика 3.2).



3.1- Модели након завршеног процеса 3D штампе



3.2 - Крајњи изглед 3D модела настали стереолитографијом

4. ТЕХНОЛОГИЈА МАШИНСКЕ ОБРАДЕ КУЋИШТА РУЧНОГ САТА.

Процес технологије обраде у оквиру овог рада базира се искључиво на обради прототипа кућишта ручног сата. Сама обрада ове компоненте дуго траје јер се обрађује са мањим дубинама, корацима и брзинама резања зато што се користе глодала мањих пречника тако да обрада постаје скупља и захтева више времена. Машина која је изабрана за коначну обраду јесте петоосна CNC глодалица. Она представља најбољу солуцију из разлога што би се цело кућиште сата могло обрадити из два стезања. Машина алатка која је коришћена јесте HAAS UMC-750. Кинематика машине алатке је таква да глава машине алатке има три транслаторне осе (X, Y И Z оса), док радни сто има два ротационе осе (B и C оса). Сама машина алатка има могућност симултаног кретања оса, магацин са 40 алата и максималан број обрта по минути износи 8000. [3]

Програмирање ове CNC машине рађено је у оквиру софтвера „Fusion 360“ и то у оквиру картице „manufacturing“, али у оквиру овог рада неће бити даље дискусије о стратегији обраде.

Пре самог процеса обраде, неопходно је изабрати облик и димензије припремка као и материјал припремка који је у овом случају алуминијум због мањих сила резања као и цене коштања резних алата. За обраду коришћени су следећи алати (слика 4.1) са одговарајућим режимима обраде (табела 4.1):

- глодачка глава ф63 (слика 4.1 в),
- вретенасто глодало ф8 (слика 4.1 б),
- вретенасто глодало ф6 (слика 4.1 г),
- вретенасто глодало ослојено титанијумом ф2 (слика 4.1 ђ),
- лоптасто карбидно глодало ф5 (слика 4.1 а),
- лоптасто карбидно глодало ф2 (слика 4.1 д).



4.1 - Коришћени алати са одговарајућим носачима алата у току процеса машинске обраде

Табела 4.1 - Усвојени режими обраде.

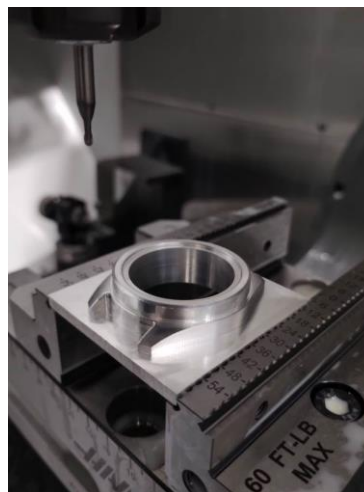
Алат	Број обрта / минути (RPM)	Брзина резања [mm/min]
Глодачка глава ф63	1000	500
Цилиндрично равно глодало ф8	6000	1350
Цилиндрично равно глодало ф6	6000	1200
Цилиндрично равно глодало ф2	8000	240
Лоптасто глодало ф2	8000	1200
Лоптасто глодало ф5	7000	400

Након што се одреди облик, димензије и материјал припремка, нулта тачка припремка, потребни алати за обраду са одговарајућим режимима обраде, избор помоћног прибора, начин и број стезања обратка и технолошки поступак, према раду [10] стваран процес обраде може да започне. У наставку могу се видети фотографије из процеса обраде.

Технологија обраде дела састоји се од два стезања. Припремак који је коришћен јесте призматичног облика димензија 55.3x53.7x14.75 mm. За стезни прибор у оквиру првог стезања коришћена је машинска стега (слика 4.2), а припремак се налазио на дубини од 3 mm унутар стеге што омогућава довољно стабилан процес обраде, док је за помоћни прибор у оквиру другог стезања коришћена стезна глава (слика 4.4). За нулту тачку припремка изабран је доњи леви угао (слика 4.2). Када је процес машинске обраде за прво стезање завршен (слика 4.3), обрадак се поставља у стезну главу чиме започиње машинска обрада везана за друго стезање. Након завршеног процеса обраде (слика 4.4), проверена је толеранција пречника на које долази стакло тако што се поставила заптивка стакла заједно са одговарајућим стаклом, где се уз помоћ мануелне пресе стакло поставља на пројектовану дубину (слика 4.5). На слици 4.6 види се изглед ручног сата након обраде и постављања одговарајућег стакла.



4.2 - Постављање припремка и налажење нулте тачке



4.3 – Завршена машинска обрада везана за прво стезање



4.4 – Завршена машинска обрада везана за друго стезање



4.5 - Убацивање стакла помоћу мануелне пресе

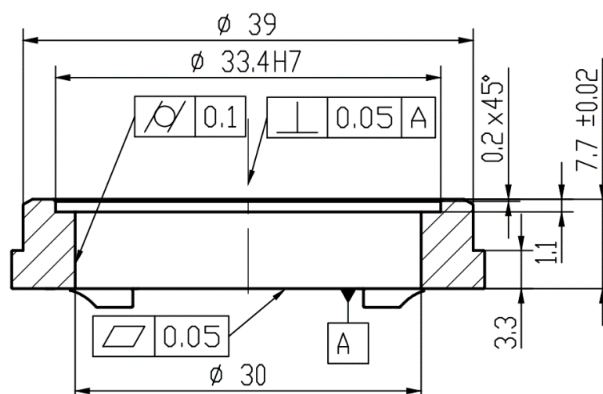


4.2 - Изглед ручног сата након обраде и постављања одговарајућег стакла

5. СИМУЛАЦИЈА ПУТАЊЕ МЕРНОГ ПИПКА ЗА ЗАДАТЕ ГЕОМЕТРИЈСКЕ ПРИМИТИВЕ

У оквиру овог поглавља приказана је симулација путање мерног пипка за геометријске (контактне) примитиве који су дефинисани одговарајућом техничком документацијом. Симулација је урађена у софтверу „PTC Creo Parametric 8.0“ у оквиру картице „manufacturing“ где је одабран модул „СММ“.

Одабрани прибор за стезање јесте мерна стега. Како су контактне силе мерења релативно мале, ова чињеница допушта коришћење мерне стега као помоћног прибора за стезање (слика 5.2). Следећи корак јесте дефинисање мерне машине и мерног пипка. Одговарајућа конфигурација мерног пипка за инспекцију геометријских примитива према [4] јесте [1 0 0 0 0], што говори да је једини правац приступа мерног пипка ка мерном објекту у правцу Z осе (посматрано у односу на мерни предмет). Ова конфигурација мерног пипка одређена је на основу техничке документације мерног предмета на основу примитива које је потребно измерити (слика 5.1). Како би се извршила инспекција над свим геометријским примитивима, потребна су два стезања.



5.1 – Толеранцијско - геометријски примитиви дефинисани техничком документацијом

У оквиру првог стезања геометријски примитиви над којима се врши инспекција јесу (слика 5.1):

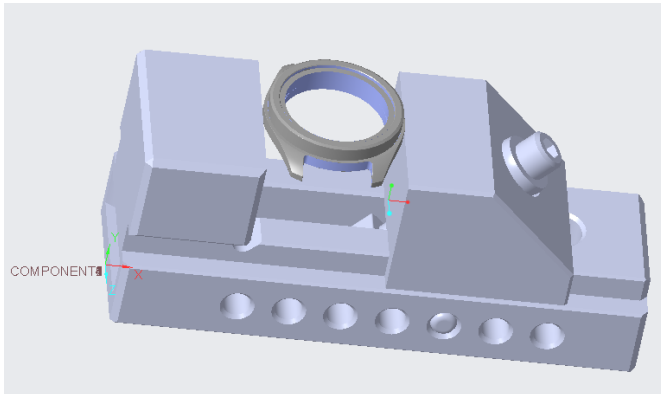
- пречник везан за стакло кућишта ручног сата,
- толеранција цилиндричности унутрашњег пречника кућишта ручног сата,
- растојање између лугова ручног сата на месту где долази наруквица (мера дефинисана техничком документацијом).

У оквиру другог стезања геометријски примитиви над којима се врши инспекција јесу:

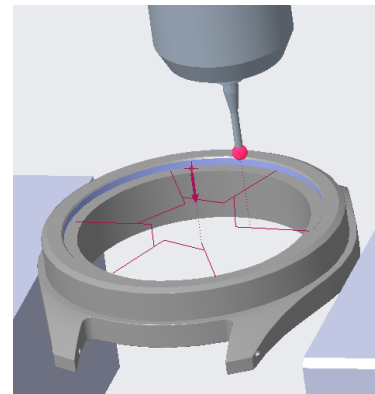
- толеранција равности површине на коју долази поклопац ручног сата,
- толеранција управности централне осе ручног сата у односу на површину А.

Минималан број потребних тачака за геометријске примитиве које се налазе на техничкој документацији јесу:

- раван – минимум 3 тачке,
- цилиндрична површ – минимум 5 тачака (препорука је два слајса по 3 тачке) према [5].

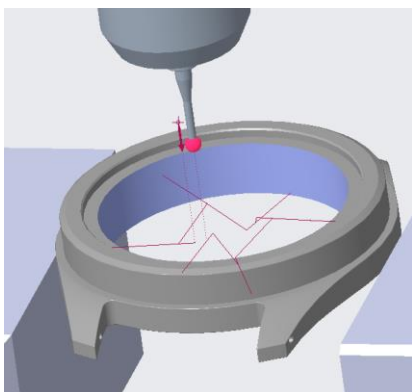


5.2 - Слика 6.5 - Мерни предмет заједно са помоћним прибором

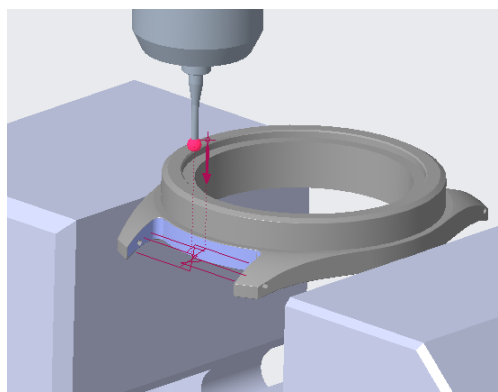


5.3 - Мерна путања добијена за геометријски примитив који је везан за стакло ручног сата

На слици 5.3 приказана је путања мерног пипка за карактеристику $\text{Ø}33.4\text{H}7$, пошто је у питању геометријски примитив који је у облику цилиндра, минималан број потребних тачака да би се обавила инспекција примитива јесте пет, а тачке су случајно генерисане по цилиндричној површи. На слици 5.4 такође се испитује геометријски примитив у облику цилиндра, а та површина представља унутрашњу површину кућишта ручног сата. Како би се испитала цилиндричност површине дефинисана техничком документацијом, минималан број потребних тачака јесте пет које су случајно генерисане.

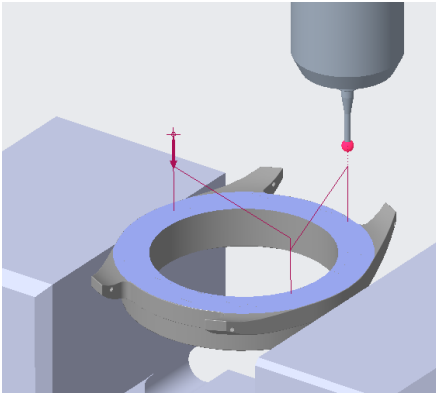


5.4 - Мерна путања добијена за геометријски примитив унутрашње цилиндричне површине

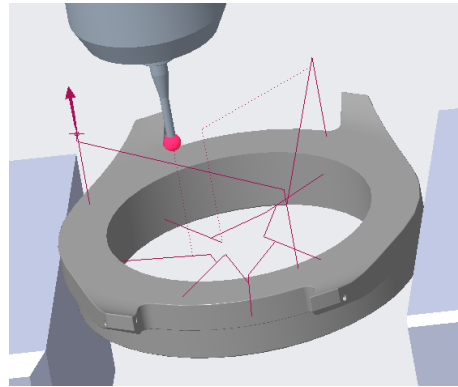


5.5 - Мерна путања добијена за дефинисање растојања између лугова ручног сата

На слици 5.5 приказана је путања мерног пипка за дужинску толеранцију између лугова ручног сата. Примитиви који дефинишу растојање између лугова ручног сата су две равни, што значи да је минимални број потребних тачака да би се извршила инспекција шест. Овај број тачака одабран је из разлога што је за раван минимални број потребних тачака три, а како је дужинска толеранција описана помоћу две равни, долази се до закључка да је минимални број потребних тачака шест. На овај начин приказана је путања мерног пипка кућишта ручног сата за прво стезање. За друго стезање се такође користи мерна стега као помоћни прибор, конфигурација мерног пипка је идентична као и у првом стезању, а део је заротиран за 180° .



5.6 - Мерна путања за дефинисање толеранције равности површине на коју долази поклопац ручног сата



5.7 - Путања кретања мерног пипка током инспекције толеранције управности у односу на базу А

На слици 5.6 приказана је путања кретања мерног пипка приликом инспекције толеранције равности површине. Како је површина која се контролише заправо раван, минимални број потребних тачака јесу три које су случајно генерисане на означеној површини. Слика 5.7 представља путању кретања мерног пипка приликом инспекције толеранције управности унутрашње цилиндричне површине у односу на базу А. Како је база А заправо раван, минимални број потребних тачака је три, док за унутрашњу цилиндричну површ минимални број потребних тачака је пет. Ове тачке су случајно генерисане, а принцип инспекције започиње додиривањем базе А у три тачке, а затим прелазак на унутрашњу цилиндричку површину.

Када је завршена симулација путање мерног пипка, потребно је генерисати DMIS фајл (dimension measuring interface standard) одабиром команде „probe path“, која представља излаз из саме симулације и улаз у реалну мерну машину као један вид програмирања саме машине (слика 5.8).

```

$$$*          Pro/DMISfile Version 8.0 - 8.0.0.0
$$$-> MFGNO / INSPEKCIJA2
$$$-> PARTNO / INSPEKCIJA2
DMISMN / 'DMIS Program'
UNITS / MM, ANGDEC
S(1)= SNSDEF / PROBE, INDEX, POL, 0.000000000, 0.000000000, $
0.000000000, 0.000000000, 1.000000000, 100.000000000, 2.000000000
$$$ *****
$$$ |          Probe Table Information
$$$ *****
$$$ Probe Probe          Register Tip Pitch Roll Comments
$$$ Pos  ID              Num Angle Angle
$$$ -----
$$$ 1     INDX_SING_TIP   1      1  0    0
$$$-> FEATNO / 295
$$$-> CSYS / 1.000000000, 0.000000000, 0.000000000, 0.000000000, $
0.000000000, 1.000000000, 0.000000000, 0.000000000, $
0.000000000, 0.000000000, 1.000000000, 0.000000000
MODE / PROG, MAN
SNSLCT / S(1)
FEDRAT / MESVEL, MPM, 300.000000000
FEDRAT / POSVEL, MPM, 300.000000000
ACL RAT / MESACL, MPMM, 300.000000000
ACL RAT / POSACL, MPMM, 300.000000000
PRCOMP / OFF
SNSSET / APPRCH, 5.000000000
SNSSET / RETRCT, 4.000000000
SNSSET / CLRSRF, 0.000000000
F(M_CY01)= FEAT / CYLNDR, INNER, CART, $
0.000000000, 0.000000000, -0.200000000, $
0.000000000, 0.000000000, -1.000000000, 33.400000000
F(BND_52)= FEAT / PLANE, CART, 0.000000000, 0.000000000, -0.200000000, $
0.000000000, 0.000000000, 1.000000000
F(BND_53)= FEAT / PLANE, CART, 0.000000000, 0.000000000, -1.100000000, $
0.000000000, 0.000000000, -1.000000000
BOUND / F(M_CY01), F(BND_52), F(BND_53)
MEAS / CYLNDR, F(M_CY01), 6
RAPID / 1.000000
GOTO / 2.4687595590, -5.1376284645, 10.000000000
RAPID / 1.000000

```

5.8 - Пример генерисаног dmis фајла

6. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада представљена је веза часовничарске индустрије са производним машинством и производном метрологијом. Приказан је један начин пројектовања ручног сата са свим потребним стандардним и нестандартним компонентама за његово правилно функционисање као и брза израда његовог прототипа ради евентуалне корекције одређених делова пре саме израде производа. Приказана је и машинска обрада кућишта ручног сата на машини алатки, где је у току процеса пројектовања технологије обраде одређен облик и димензије припремка, нулта тачка припремка, потребни алати за обраду као и одговарајући режими обраде за изабране алате, избор помоћног прибора и начин стезања. Урађена је симулација путање мерног пипка у оквиру софтвера „PTC creo parametric 8.0“, конфигурација мерног пипка као и избор помоћног прибора за стезање у циљу добијања dmis фајла који представља улазну датотеку за мерну машину. Резултат рада је пројектован нови ручни сат са машински обрађеним кућиштем, уз брз развој прототипа и извршену симулацију мерења геометријских карактеристика квалитета кућишта.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. Wilson, "The book of time," 1980.
- [2] „Caliber Corner,“ [На мрежи]. Available: <https://calibercorner.com/eta-caliber-2824-2/>. [Последњи приступ 27.07.2024].
- [3] „HAAS,“ HAAS, [На мрежи]. Available: <https://www.haas.co.uk/machines/umc-750/>. [Последњи приступ 10.8.2024].
- [4] S.Stojadinovic, V. Majstorovic, An Intelligent Inspection Planning System for Prismatic Parts on CMMs, Springer Link, 2019.
- [5] С. Стојадиновић, хендаути из Нумеричких управљених мерних машина, 2018.
- [6] A.Turner, J. Nye, J. Betts, „A general history of Horology“, 2022.
- [7] ETA SA Manufacture Horlogère Suisse, Technical Communication on ETA 2824-2, 2016. PDF file.
- [8] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, „Additive Manufacturing Technologies“, second edition 2015.
- [9] J.Sims, „The blending of technology and tradition in the watch world“, 2020.
- [10] R.King, „Handbook of High Speed Machining Technology“, 1985.
- [11] phrozen, „phrozen Sonic Mighty 4K Resin 3D printer“, [На мрежи]. Available: <https://phrozen3d.com/products/sonic-mighty-4k> [Последњи приступ 10.8.2024].

Radovanović, S., Stojadinović, S.

DESIGN, PROCESSING, AND INSPECTION OF GEOMETRIC PRIMITIVES CHARACTERISTICS OF A WRISTWATCH CASE

Abstract: This research article explores the connection between the watchmaking industry, manufacturing engineering, and metrology. It presents the process of designing a wristwatch with all its standard and non-standard components and the rapid prototyping of its model using stereolithography. The machining process of the watch case on a CNC machine is presented, including the determination of the shape and dimensions of the workpiece, tool selection, and processing parameters. A simulation of the measurement probe's path for visual inspection, measurement path verification, and collision check was performed using the "PTC Creo Parametric 8.0" software, which enabled the generation of a DMIS file or input file for an actual measurement machine. The result of the work includes the design of a new wristwatch, the machined watch case, and the simulation of the geometric primitives of the wristwatch case.

Key words: wristwatch, design, inspection, simulation



Ranisavljev, M.,¹⁾ Štrbac, B.,²⁾ Matin, I.,³⁾ Hadžistević, M.,⁴⁾ Runje, B.,⁵⁾ Horvatić Novak, A.⁶⁾

PREGLED RAZLIČITIH ARTEFAKATA KOJI SE POJAVLJUJU U KOMPJUTERSKOJ TOMOGRAFIJI

Rezime

Koordinatni merni sistemi bazirani na kompjuterskoj tomografiji, zbog svojih jedinstvenih karakteristika kao što su ne-destruktivno ispitivanje, analiza i provera karakteristika radnih predmeta unutar sklopa, dobijaju sve više na značaju. Međutim, tokom prikupljanja i obrade podataka ovom metodom, pojavljuju se određene greške. Značajne greške se ispoljavaju u vidu sistematskih i slučajnih grešaka na radiografskim snimcima, koje se nazivaju artefaktima. Artefakti uzrokuju pojavu tamnih linija, senki, prstenova i pruga. Ova pojava nastaje usled raznih fizičkih procesa i uključuju Feldkamp artefakte, otvrdnjavanje zraka, rasipanje, i šum. Feldkamp artefakti stvaraju romboidne distorzije u određenim poljima slike, dok otvrdnjavanje zraka nastaje zbog absorpcije X-zraka niskih energija, menjajući na taj način spektar snopa ka višim energijama fotona. Rasipanje nastaje usled sekundarne radijacije koja dolazi do detektora i dovodi do jakih pozadinskih signala, smanjujući kontrast radiografske slike. U ovom radu se daje pregled različitih artefakata i njihov uticaj na tačnost radnih predmeta.

Ključne reči: Kompjuterska tomografija X-zracima, Artefakti, Tačnost

1. UVOD

Strogi zahtevi za kontrolom kvaliteta nastavljaju da rastu, dok industrijski proizvodi i njihove komponente postaju sve kompleksniji. Kao odgovor na ovaj trend, inovativne tehnologije za procenu karakteristika kvaliteta proizvoda se rapidno razvijaju. Kompjuterska tomografija (CT), tehnologija sa preko trideset godina intenzivne upotrebe u medicini, se značajno razvila za različite industrijske primene. CT predstavlja treću generaciju merne tehnike koja pripada koordinatnoj metrologiji, uz koordinatne merne mašine i optičke merne sisteme. Pomoću CT-a, u relativno kratkom vremenskom periodu, moguće je doći do kompletnog 3D modela radnog predmeta koji se skenira pomoću X-zraka. Nakon prolaska kroz radni predmet, X-zraci padaju na detektor, formirajući radiografsku sliku. Mogućnost da se ispita unutrašnjost materijala čini CT značajnom ne-destruktivnom metodom (eng. *non-destructive technique* - NDT) za industrijsku primenu [1].

Uprkos svojim brojnim primenama, ova tehnologija se suočava sa problemima koji ugrožavaju proces prikupljanja podataka. Jedan od glavnih uzročnika varijacija u mernim rezultatima, jeste smanjen kvalitet podataka koji se koristi za rekonstrukciju radnog predmeta. Kvalitet radiografskih (ili projekcionih, 2D) slika koje se koriste pri rekonstrukciji, u velikom broju slučajeva, je narušen zbog pojave tzv. artefakata. Artefakti su sistematske i slučajne greške na slikama koje se ispoljavaju u vidu neželjenih tamnih pruga, prstenova i senki. Pojava artefakata na radiografskim slikama smanjuje kontrast između piksela koji predstavljaju materijal i onih koji predstavljaju drugi materijal ili pozadinu (vazduh). Pošto se 3D rekonstrukcija radnog predmeta dobija algoritmima koji obrađuju projekcione slike, uticaj nepravilnosti na slikama značajno umanjuje tačnost i preciznost rekonstruisanog modela. Greške koje mogu nastati u procesu merenja ne potiču samo od projekcionih slika već i od naknadne obrade podataka kao što je metoda određivanja ivica radnog predmeta i granica između različitih materijala [2].

¹⁾ MSc Miloš Ranisavljev, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka (mranisavljev97@uns.ac.rs),

²⁾ Vanr. prof. dr Branko Štrbac, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (strbacb@uns.ac.rs),

³⁾ Dr Ivan Matin, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka (matini@uns.ac.rs)

⁴⁾ Prof. dr Miodrag Hadžistević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (miodrags@uns.ac.rs)

⁵⁾ Prof. dr Biserka Runje, Univerzitet u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, (biserka.runje@fsb.unizg.hr),

⁶⁾ Doc. dr Amalija Horvatić Novak, univerzitet u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, (amaliya.horvatic@fsb.hr)

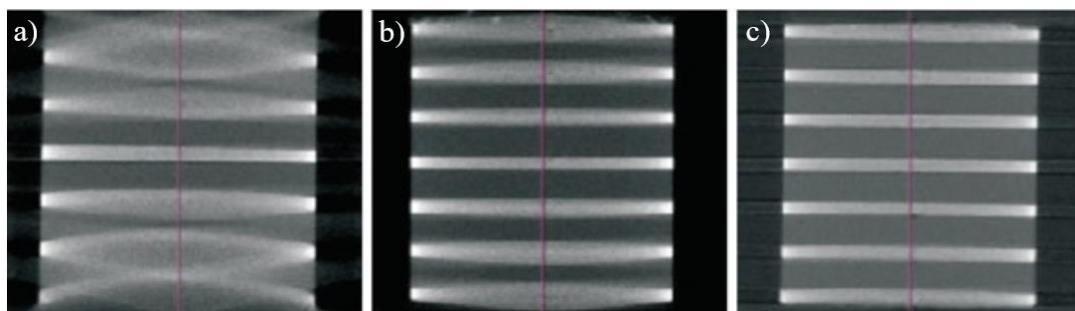
Greške koje nastaju tokom skeniranja radnog predmeta se gotovo uvek očekuju a posebno ako se skenira radni predmet koji sadrži materijale visoke gustine. Greške mogu nastati usled delovanja fizičkih procesa kao što su artefakti vezani za ugao snopa X-zraka (eng. *Cone-beam* ili *Feldkamp* artefakti), otvrdnjavanje X-zraka usled prolaska kroz radni predmet, pošto je snop zraka polihromatski (eng. *Beam hardening*), rasipanje radijacije (eng. *Scatter radiation*), greške skaliranja, greške usled temperature, rezidualne greške uzrokovane diskretizacijom voksela, gubitak oštine slike usled šuma i druge [3].

U ovom radu prikazani su i objašnjeni, jedni od najčešćih artefakata koji se sreću u dimenzionalnoj metrologiji primenom kompjuterskog tomografa. Artefakti nastali usled konusnog oblika X-zraka tj. Feldkamp artefakti, otvrdnjavanje X-zraka, rasipanje X-zraka i šum. Pojedinačnim ili kombinovanim uticajem ovih uzročnika varijacija u radiografskim slikama, značajno se smanjuje njihov kvalitet, što se odražava na tačnost rekonstrukcije 3D voksel modela i procene dimenzionalnih i geometrijskih karakteristika kvaliteta kao i povećanu mernu nesigurnost.

2. PREGLED RAZLIČITIH ARTEFAKATA

2.1 Feldkamp artefakti

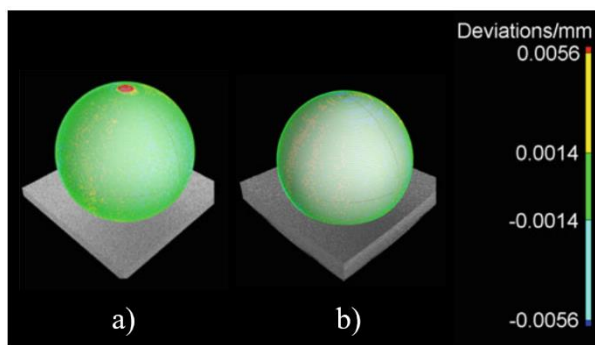
Da bi se proces nastajanja Feldkamp artefakata razumeo, neophodno je shvatiti princip nastajanja X-zraka i oblik snopa X-zraka koji nakon nastajanja prolazi kroz materijal radnog predmeta i pada na detektor. X-zraci se dobijaju iz izvora X-zraka tako što se elektronima bombarduje određena površina materijala mete, koncentrisana na površini mikrometerske veličine. Interakcijom elektrona iz snopa i materijala mete, generišu se X-zraci i toplota. Dobijeni polihromatski X-zraci, oblika konusa koji može imati različite vrednosti ugla, se usmeravaju ka radnom predmetu koji se nalazi u priboru na rotacionom stolu. Prolazeći kroz radni predmet, X-zraci slabe zbog absorpcije od strane radnog predmeta ili zbog rasipanja elektrona. Nakon prolaska kroz radni predmet, oslabljeni X-zraci padaju na detektor, što za rezultat ima formiranje radiografske slike. Da bi se izvršila pravilna rekonstrukcija i od radiografskih (2D) slika dobio 3D voksel model, rotacioni sto vrši 360° rotaciju. Algoritam prema kom se vrši rekonstrukcija radiografskih slika za konusne X-zrake je nastao zahvaljujući Feldkamp-u, Davis-u i Kress-u. Često se naziva i skraćenicom FDK metodom [1]. Zbog načina rekonstrukcije radiografskih slika ovom metodom, nastaju određene „zone senke“ duž rotacione z-ose, koje čine bilo koju rekonstrukciju 3D objekta netačnu, bez obzira na rezoluciju detektora X-zraka. Zone senki se mogu uočiti kao prazni regioni u 3D prostoru za sve radiografske slike. Ove zone stvaraju romboidalne artefakte u rekonstruisanoj zapremini objekta, koji se nazivaju Feldkamp artefakti. Feldkamp artefakti su prisutni na periferijama gore i dole (gledano po z-osi) na rekonstruisanom modelu. Ovi artefakti se mogu pojaviti i kao asimetrični ako uređaj podleže izraženijim hardverskim greškama [2]. Primer Feldkamp artefakta se može uočiti na slici 1.



Slika 1. Radiografske slike nastale upotrebom konusnog X-zraka od a) 30°, b) 11° i c) 5° [2]

Sa slike 1. se može uočiti da kako se ugao konusnog X-zraka povećava, to je kvalitet radiografskih slika niži. Takođe, sredina radiografskih slika podleže minimalnim promenama, naspram vrha i podnožja na koje ovi artefakti značajno utiču. Za konkretan radni predmet, postavljanje istog bliže detektoru, odnosno dalje od izvora X-zraka, uticaće na smanjenje Feldkamp artefakata.

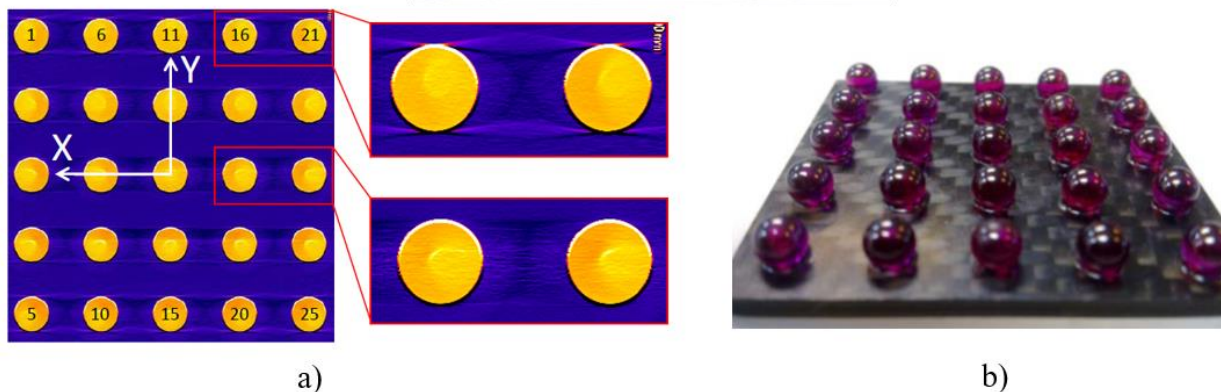
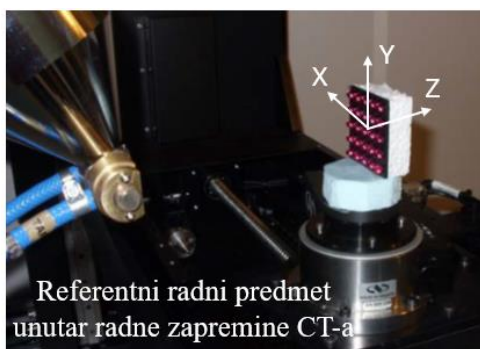
Uticaj Feldkamp artefakata na primeru sfere od rubina se može uočiti na slici 2. Skeniranje kuglice je urađeno u kontrolisanom radnom okruženju, sa nepromenjenim parametrima skeniranja. Prilikom skeniranja radnog predmeta oblika sfere, artefakti se pojavljuju na polovima kuglice, što se može uočiti na mapi devijacija u boji na slici 2. Zbog pojave artefakata, odstupanje od sferičnosti u slučaju a) i b) se značajno razlikuje.



Slika 2. Odstupanje od sferičnosti kuglice od rubina prečnika 8 mm zbog pojave Feldkamp artefakata [2]

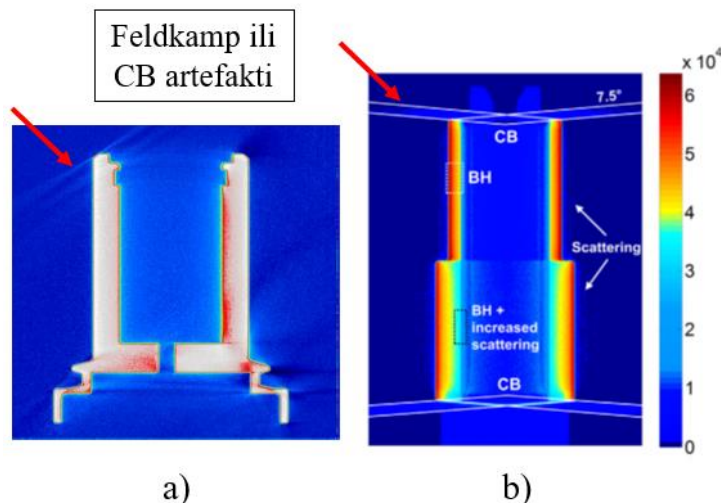
Uzrok pojave Feldkamp artefakata može biti neujednačeno zračenje kompletne merne zapremine. Ne-uniformna pokrivenost znači da će delovi merne zapremine koji se nalaze bliže detektoru biti u potpunosti prozračeni, dok delovi koji su bliže izvoru X-zraka biti minimalno ozračeni. Zbog ovih neujednačenosti, proces rekonstrukcije ne može pružiti pouzdane rezultate određenom regionu. Ovo predstavlja problem samo kod „dugačkih“ radnih predmeta, dok kod sferičnih ne postoji gubitak podataka [2].

Tokom ispitivanja grešaka koje nastaju u radnoj zapremini kompjuterskog tomografa, istraživači [1] su kvantitativno odredili veličinu greške usled pojave ovih artefakata. U istraživanju je korišćen referentni radni predmet koji se sastojao od 25 kuglica od rubina jednako raspoređenih na ploči od ugljeničnih vlakana. Prikaz referentnog radnog predmeta i postavke eksperimenta je prikazan na slici 3. Utvrđeno je da greške rastojanja centara između sfera (koje su prethodno kalibrisane pomoću koordinatne merne mašine) zavise od stepena geometrijskog uveličanja (eng. *geometrical magnification*), tj. položaj radnog predmeta u radnoj zapremini (bliže ili dalje izvoru zračenja) ima značajan uticaj na pojavu grešaka. Ovu pojavu su, između ostalih potencijalnih faktora (pomeranje fokusne tačke, greške u rotacionom stolu, itd.), pripisali Feldkamp artefaktima, kao dominantnom uzroku. Istraživači su došli do zaključka da upotrebom viših vrednosti geometrijskog uvećanja, samim tim i rezolucije, dobijaju grešku rastojanja između centara sfera u rasponu od $\pm 30 \mu\text{m}$, dok sa manjim geometrijskim uvećanjem, razlika je u rasponu od $\pm 10 \mu\text{m}$. Korišćeni ugao konusnog X-zraka iznosio je $16,2^\circ$.



Slika 3. Prikaz Feldkamp artefakata na referentnom radnom predmetu a) sa kuglicama od rubina b) [1]

Slika 4. prikazuje artefakte na radnim predmetima koji se češće sreću u industriji. Prilikom skeniranja ovakvih radnih predmeta, teži se postizanju što veće rezolucije prikupljenih podataka, tj. potrebno je pronaći vrednost geometrijskog uvećanja radnog predmeta kako bi detektor bio maksimalno iskorišćen. Usled prirode konusnog snopa X-zraka, pod a) mogu se uočiti Feldkamp artefakti na aluminijumskom radnom predmetu i b) slična pojava s tim da je na ovom radnom predmetu uočeno mnoštvo drugih artefakata koji doprinose lošijem kvalitetu rekonstruisanog modela. Pored Feldkamp artefakata (eng. *cone-beam - CB*) mogu se uočiti i artefakti povezani sa otvrdnjavanjem X-zraka (*BH*) i rasipanje elektrona (*Scattering*).

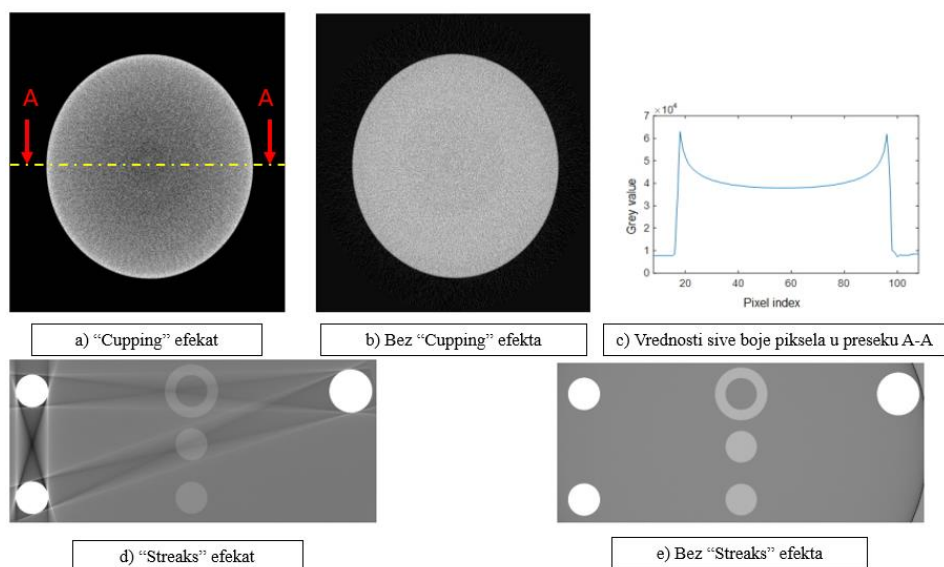


Slika 4. Prikaz Feldkamp artefakata na a) cevastom i b) stepenastom radnom predmetu [1,3]

2.2 Otvrdnjavanje X-zraka (eng. *Beam hardening artefacts*)

Predpostavka da su fotoni koji sačinjavaju X-zrake monohromatski, odnosno da poseduju istu vrednost energije je retko kad zadovoljena. Izvor X-zraka emituje snop sa energetskim spektrom koji poseduje široku raspodelu vrednosti različitih energija između nule i određenog praga koji predstavlja maksimalnu energiju primenjenu na elektrone, poznatu kao *peak energy*. Uzimajući to u obzir, mnogi fotoni će biti svrstani po svom energetskom nivou daleko ispod srednje energije, posmatrajući kompletan spektar. Fotoni ovakvih energija ne uzrokuju artefakte pošto su odmah absorbovani unutar materijala mete i prozora katodne cevi. Fotoni malih energija se gradijentno otklanjaju posle par milimetara nakon ulaska u materijal radnog predmeta usled fotoelektrične absorpcije. Stoga, spektar zračenja postaje „bogatiji“ fotonima viših energija i teže se absorbuje od stane materijala radnog predmeta. Ovo predstavlja ne-linearnu pojavu nazvanu otvrdnjavanje X-zraka [2].

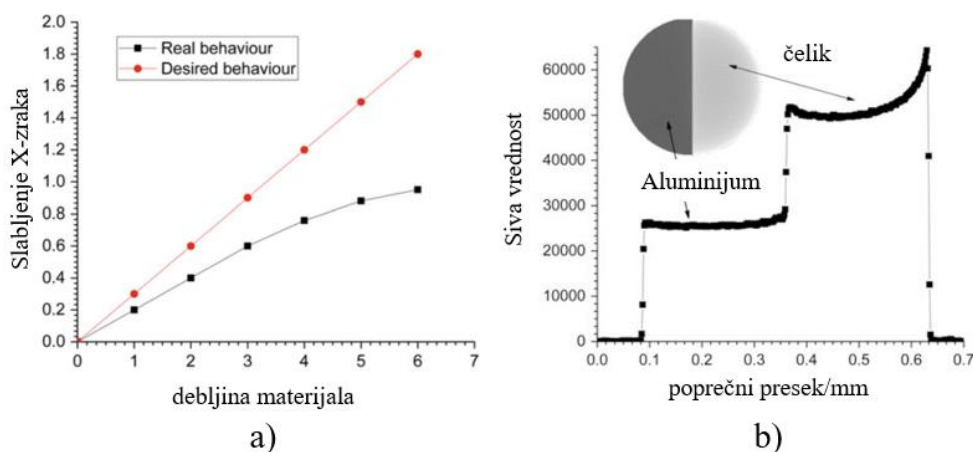
Na radiografskim slikama, otvrdnjavanje X-zraka se manifestuje kao „*Cupping*“ i „*Streaking*“ artefakti. *Cupping* artefakti stvaraju privid neravnomerne absorpcije fotona od strane materijala radnog predmeta. Naime, absorpcija fotona se smanjuje ka unutrašnjosti materijala radnog predmeta. Kao rezultat toga, intenzitet X-zraka u centru, na projekcionim slikama ili poprečnim presecima, je manji nego stvarne/očekivane vrednosti. *Streak* artefakti se mogu uočiti u skenovima radnih predmeta koji sadrže više različitih materijala ili tokom skeniranja više radnih predmeta odjednom. Kada snop X-zraka prođe kroz prvi radni predmet, u trenutku kada vrši interakciju sa drugim, spektar snopa je modifikovan. Na slici 5. su prikazane posledice otvrdnjavanja snopa X-zraka. *Cupping* efekat pod a) čini da pikseli na rubovima radnog predmeta imaju znatno veću vrednost sive boje u odnosu na piksele u sredini radnog predmeta. Slika pod c) predstavlja poprečni presek radiografskog snimka pod a) gde se jasno uočavaju razlike u pikselima. Slika 4.d) predstavlja radiografski snimak radnog predmeta sačinjenog od dve vrste materijala. Jedan materijal je značajno veće gustine nego drugi, što rezultuje pojavom tamnih linija.



Slika 5. Artefakti nastali otvrdnjavanjem X-zraka [4]

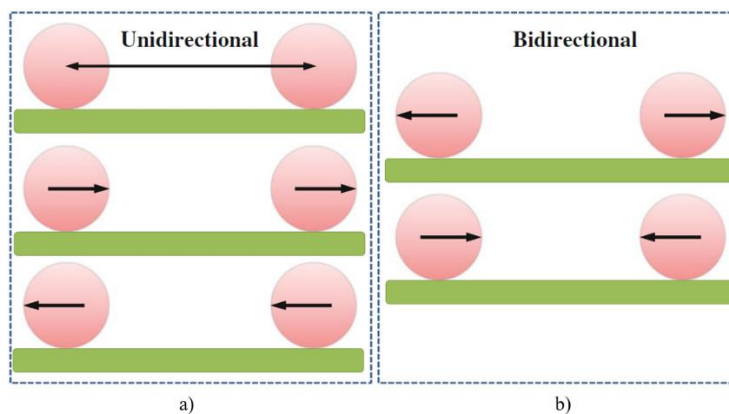
Prisustvo artefakata kao posledice otvrdnjavanja X-zraka se može uočiti i na histogramu sive boje piksela celokupnog skupa podataka kao distorzija „pikova“ samog histograma. Ovakva distorzija može da oteža proces određivanja ivice radnog predmeta, odnosno segmentacije. Ovi artefakti se pojavljuju u bilo kom radnom predmetu, s tim da intenzitet njihovog uticaja zavisi od vrste materijala (slika 6.b) i debljine zidova radnog predmeta. Sa porastom absorpcije X-zraka od strane materijala, raste i verovatnoća pojave ovih grešaka. Polimerni materijali nisu podložni pojavi otvrdnjavanja X-zraka, čak i u slučajevima većih vrednosti debljine zidova [2].

Otvrdnjavanje X-zraka utiče na dimenzionalna merenja tako što „smanjuje“ unutrašnje dimenzije a „povećava“ spoljašnje dimenzije. Ovaj dijametralno suprotni efekat se može objasniti činjenicom da otvrdnjavanje snopa modifikuje unutrašnju i spoljašnju vrednost sive boje pozadine, što utiče na kontrast i određivanje površine. Greške merenja su značajnije na spoljašnjim karakteristikama kvaliteta nego na unutrašnjim zbog toga što zavisnost slabljenja X-zraka sa debljinom zida materijala predstavlja strogu nelinearnu vezu u prvih par milimetara tokom prozračivanja (Slika 6.a).



Slika 6. a) Zavisnost slabljenja X-zraka od debljine zida materijala i b) uticaj Cupping artefakata na sferu od dva različita materijala [2]

Greška oblika radnih predmeta i dužinske mere koje se nazivaju *bidirectional* (Slika 7.b) su tipično karakteristike koje su pod uticajem otvrdnjavanja X-zraka. Smanjenjem kontrasta između piksela materijala i pozadine, otežava se definisanje ivice, samim tim i određivanje površine i naknadna dimenzionalna analiza. U ovakvim slučajevima pojava outlier-a se takođe povećava. Dimenzione karakteristike kao što su rastojanja između centara sfera (eng. *Unidirectional*), nisu pod uticajem ovih tipova artefakata [2].

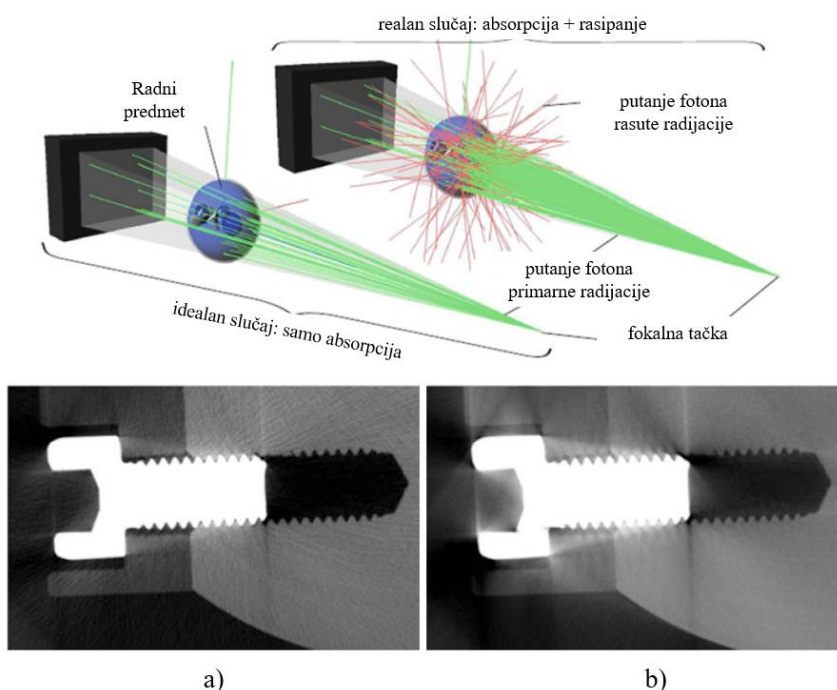


Slika 7. a) Rastojanje nezavisno od metode određivanja površine b) Rastojanje zavisno od metode određivanja površine koje je podložno greškama usled artefakata [2]

2.3 Rasipanje (eng. *Scatter artefacts*)

Većina algoritama za rekonstrukciju podataka uzima za pretpostavku da svi X-zraci putuju po pravoj liniji od izvora do detektora. U praktičnim uslovima, se dešava da zajedno sa primarnom radijacijom, sekundarna radijacija se pojavljuje kao rasipanje (eng. *scatter*) i pada na detektor (slika 8.). Rasuti fotoni su oni fotoni koji su absorbovani od strane radnog predmeta ili ostalih površina unutar radne zapremine i ponovo re-emitovani, sa istom energijom ili nižom. Rasipanje fotona potiče od interakcije sa atomima materijala koji se nalazi na putu X-zraka. U zavisnosti od mehanizma interakcije, koji je funkcija energije X-zraka, smer rasipanja može biti potpuno različit od početnog puta X-zraka ili neznatno različit. Dominantna interakcija za inženjerske materijale predstavlja *Compton* rasipanje, koje se pojavljuje pri energijama većim od 100 keV. Rasipanje koje potiče od ostalih predmeta unutar radne zapremine CT-a zavisi od veličine i ugla X-zraka. Što više zraka „promaši“ radni predmet koji se digitalizuje, to će više fotona biti rasuto od strane radne okoline.

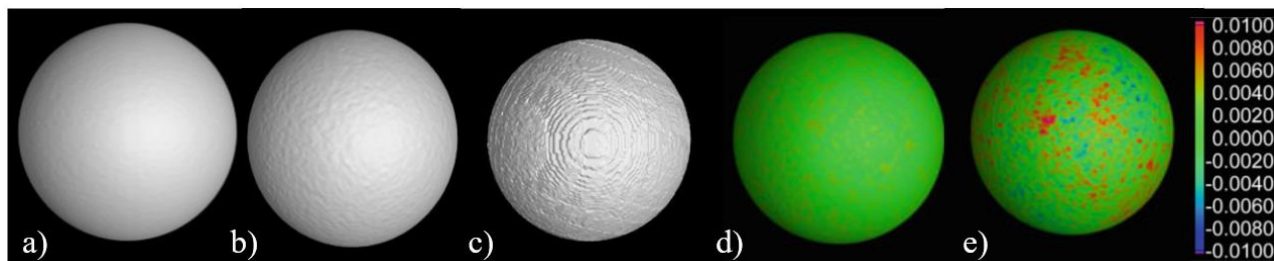
Na radiografskim slikama, pojava rasipanja se manifestuje kao jak pozadinski signal, generalni gubitak kontrasta između okoline i radnog predmeta, što je prikazano na slici 8.b) u odnosu na a). Rasipanje može da se pojavi i u vidu *Cupping* i *Streaking* artefakta ali su slabijeg intenziteta nego isti artefakti nastali otvrdnjavanjem X-zraka. Količina ukupnog rasipanja na projekcionoj slici se karakteriše kvantitativnim pokazateljem SPR (eng. *scatter-to-primary ratio*).



Slika 8. a) Radiografska slika kod koje rasipanje nije značajno b) Gubitak kontrasta slike usled sekundarne radijacije [2]

2.4 Šum (eng. *Noise artefacts*)

Šum predstavlja neželjenu varijaciju intenziteta sive vrednosti na projekcionoj slici. Postoje pet kategorija šuma: nasumičan (eng. *random*) šum, kvantni šum, elektronski šum, *round-off* šum i rekonstrukcijski šum. Nasumičan šum se javlja usled fluktuacija koje imaju približnu Gauss-ovu raspodelu. Ova vrsta šuma se ne može predvideti ili kompenzovati. Kvantni šum je povezan sa ograničenim brojem fotona u snopu X-zraka koji se koriste za kreiranje informacija o vokselu. Voksel predstavlja 3D piksel [2]. Na slici 9. prikazan je uticaj kvantnog šuma na rekonstruisani model. Modeli su dobijeni unutar simulacije a za materijal sfere nominalnog prečnika 10 mm izabran je rubin. Broj fotona po vokselu opisuje koncentraciju X-zraka na datoj površini. Broj fotona koji su korišćeni za simuliranje zapreminskog modela su a) 3×10^9 , b) 3×10^5 i c) 3×10^4 . Što je broj fotona manji, kvalitet zapreminskog modela se smanjuje, što je prikazano u slučaju pod e) gde je odstupanje od oblika sfere znatno lošije nego kod slučaja d). Skala u boji predstavlja odstupanja u mm.



Slika 9. Uticaj šuma na rekonstruisanu sferu od rubina [2]

3. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Pojava različitih artefakata na projekcionim, odnosno radiografskim slikama predstavlja uobičajenu pojavu kod većine radnih predmeta, pogotovu ako su predmeti sačinjeni od dva ili više različitih materijala visokog koeficijenta atenuacije X-zraka. Njihovo prisustvo značajno smanjuje kvalitet radiografskih slika, samim tim i kvalitet rekonstruisanog modela, pošto nakon prikupljanja slika nastupa proces rekonstrukcije 3D modela i određivanje njegove površine primenom nekog od metoda segmentacije. Uticaj na dimenzionalne karakteristike kvaliteta se ispoljava tako što algoritmi segmentacije (ISO-50, metoda lokalnog adaptivnog praga, itd.) ne mogu sa dovoljnom preciznošću odrediti ivicu radnog predmeta.

Postoje različite metode redukcije artefakata na radiografskim slikama. Pojava otvrdnjavanja X-zraka se može ublažiti tako što se na samom izvoru X-zraka, pre nego što snop dospe do radnog predmeta, postavljaju pločice od materijala kao što su bakar ili aluminijum, debljine svega nekoliko milimetara. Ove fizičke barijere prikupljaju deo spektra X-zraka, otvrdnjavajući snop pre interakcije sa radnim predmetom. Drugi način je upotreba dualnog izvora X-zraka, različitih energija, koji pružaju dva različita seta podataka koje je moguće kombinovati i tako redukovati pojavu artefakata [5]. Redukciju Feldkamp artefakata, kako je ranije napomenuto, moguće je izvršiti smanjenjem ugla snopa X-zraka i optimizacijom orijentacije radnog predmeta u radnoj zapremini CT-a.

Jedna od glavnih prednosti CT-a je količina podataka koja se prikupi tokom skeniranja radnog predmeta. Te podatke je pogodno iskoristiti pri proveru geometrijskih tolerancija i grešaka oblika. Međutim, procena oblika na ovim podacima je komplikovanija nego procena dimenzionalnih karakteristika. Ovo se može objasniti činjenicom da je oblik geometrijskog primitiva osetljiviji na uticaj šumova u podacima, dok su dimenzionalne karakteristike kao što su prečnici, zbog metoda proračuna supstitutivne geometrije, manje podložni ekstremnim odstupanjima pojedinačnih tačaka u odnosu na ukupan skup (eng. *outlier*). Moguće je koristiti i određene filtere, kao što je *low-pass* filter za poboljšanje rezultata i tačniju procenu grešaka oblika ali je potrebno voditi računa o uticaju ovog i drugih filtera na strukturnu rezoluciju za potrebe dimenzionalnog merenja [6].

Prevazilaženjem prepreka kao što su artefakti, kompleksan merni sistem kao što je CT se bliži postizanju sledljivosti i može postati potpuno priznati merni sistem. Razumevanje uticajnih faktora i procena njihovog delovanja uz razumevanje nastanka artefakata predstavlja imperativ.

Uspostavljanje sledljivosti je usko povezano sa mogućnošću određivanja merne nesigurnosti. Pregled nekih od metoda procene merne nesigurnosti kod CT-a su [7]:

- GUM metod (JCGM 100:2008), ISO 14253-2: 2011,
- Empirijske metode – upotreba kalibriranih radnih predmeta ili standarda ISO 15530-3: 2011, Upotreba različitih strategija merenja u kalibraciji radnog predmeta ISO/DTS 15530-2, (Under development)
- Kompjuterske simulacije – Dodatak 1, GUM (JCGM 101:2008), VDI/VDE 2617-7: 2008-09 i ISO/TS15530-4: 2008,
- Kombinacija pomenutih metoda.

4. REFERENCE

- [1] Müller, P.: Coordinate metrology by traceable computed tomography, Technical University of Denmark, 2013.
- [2] Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (Eds.): Industrial X-ray computed tomography. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [3] Hiller, J., & Hornberger, P.: *Measurement accuracy in X-ray computed tomography metrology: Toward a systematic analysis of interference effects in tomographic imaging*. Precision Engineering, Vol 45, 2016, pp. 18-32.
- [4] Cao, W.: Development of Beam Hardening Correction Algorithms for Industrial Computed Tomography, KU Leuven, 2019.
- [5] Tan, Y., Ohtake, Y., & Suzuki, H.: *Scan angle selection and volume fusion for reducing metal artifacts by multiple X-ray CT scanning*, Precision Engineering, Vol 74, 2022, pp. 384-395.
- [6] Carmignato, S.: *Accuracy of industrial computed tomography measurements: experimental results from an international comparison*, CIRP annals, Vol 61(1), 2012, pp. 491-494.
- [7] Müller, P., Hiller, J., Dai, Y., Andreasen, J. L., Hansen, H. N., & De Chiffre, L.: *Estimation of measurement uncertainties in X-ray computed tomography metrology using the substitution method*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol 7(3), (201, pp. 222-232.

AN OVERVIEW OF DIFFERENT ARTEFACTS OCCURRING COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract: *Coordinate measurement systems based on computer tomography, due to their unique characteristics like non-destructive testing, analysis, and verification of the characteristics of workpieces within the assembly, are gaining importance. However, during the collection and processing of data using this method, certain errors appear. Significant errors are manifested in the form of systematic and random errors in radiographic images, which are called artefacts. Artefacts cause dark lines, shadows, rings, and streaks to appear. This phenomenon is caused by various physical processes and includes Feldkamp artifacts, beam hardening, scattering, and noise. Feldkamp artefacts create rhomboidal distortions in certain fields of the image, while beam hardening occurs due to the absorption of low-energy X-rays, thus changing the spectrum of the beam towards higher photon energies. Scattering occurs due to secondary radiation that reaches the detector and leads to strong background signals, reducing the contrast of the radiographic image. This paper provides an overview of various artefacts and their impact on the accuracy of workpieces.*

Key words: *X-ray Computed Tomography, Artefacts, Accuracy*



Stepanović, M., Živković, S., Malbašić, S.¹⁾

INSPEKCIJA GEOMETRIJE BAKARNIH OTKOVAKA KUMULATIVNE BOJEVE GLAVE RAKETE „MALJUTKA”²⁾

Rezime

Probojnost protivoklopnih kumulativnih glava pešadijskih raketa veoma zavisi od bojovog punjenja, naravno, ali i od geometrijske tačnosti bakarnih konusa nosioca tog punjenja. Tačnost ugla konusa kao i tačnost debljine plašta bakarnog konusa utiče na probojnost. U radu je prikazana geometrijska inspekcija bakarnih konusnih otkovaka koja je obuhvatila odnose unutrašnje i spoljne površine kao i kovanjem dobijenu tačnost debljine zidova bakarnog konusa. Sve uočene greške u geometriji bakarnih otkovaka imale su svoju refleksiju na alatu za kovanje. Nakon ovog iterativnog postupka, na testiranjima na bojovom poligonu postignuta je probojnost od 1m pancirnog čelika.

Ključne reči: Inspekcija geometrije, otkovak, kumulativna bojeva glava

1. UVOD

Pojava i razvoj oklopnih borbenih vozila rezultat je međusobne povezanosti nauke i tehnike, i uslovila je istraživanje i razvoj sredstava čiji je zadatak efikasno onesposobljavanje i uništavanje oklopnih borbenih vozila. Tehnološka oblast oklopnih sistema zaštite, vrste bojovih glava sa njihovim karakteristikama probojnosti dve su osetljive oblasti vojne tehnologije. Mnogi projektanti i proizvođači izbegavaju da daju tačne informacije o svojim oklopnim sistemima, nivoima zaštite borbenih oklopnih vozila, dok proizvođači oklopnih vozila ipak iznose informacije o karakteristikama svog oružja. [1]

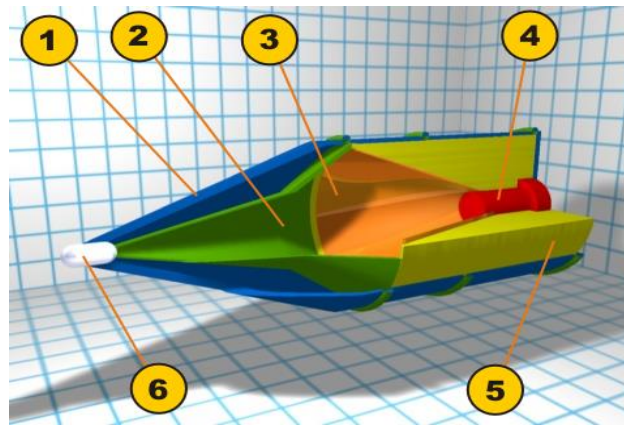
Prve generacije borbenih tenkova imali su oklopno telo i kupolu izrađenu od livenog ili zavarenog čelika različite debljine. Novije generacije borbenih tenkova imaju kompozitne, laminarne, aktivne, specijalne, sendvič oklope koji pružaju vrlo visoki stepen zaštite od dejstva kinetičkih i kumulativnih projektila. Razvoj kumulativnih projektila pratio je zahteve za probijanje oklopa borbenih vozila, prvenstveno tenkova. Sa druge strane, projektanti i proizvođači oklopnih vozila nastojali su da posade svojih vozila zaštite što je moguće bolje. Oduvek je postojala “borba” između projektanata kumulativnih projektila i konstruktora oklopnih borbenih sredstava.

Kumulativna municija (bombe i granate) namenjena je onesposobljavanju i uništavanju stacionarnih i mobilnih ciljeva, tenkova, oklopnih vozila, borbenih vozila pešadije, transportera, armiranih betonskih bunkera itd.

Eksplozivni deo sa detonatorom sastavni je deo svake rakete ili granate, i naziva se bojeva glava. Kumulativna bojeva glava zbog svojih specifičnih konstrukcijskih karakteristika predstavlja poseban oblik bojeve glave -HEAT (High-explosive anti-tank) (Slika 1). [2] Kumulativni efekat eksplozije predstavlja fokusiranje energije na površinu veću od spoljašnje površine eksplozivnog punjenja. Pravac dejstva energije zavisi od oblika eksplozivnog punjenja. Talas koji izaziva eksplozija naziva se detonacioni talas. Ako je spoljašnja površina eksplozivnog punjenja konusnog oblika, kao što je prikazano na slici 1, detonacioni talas deluje u centar šupljine (Slika1, pozicija 2). Na taj način, akumulirana energija na manjoj površini stvara jači efekat. Kada se šupljina eksplozivnog punjenja obloži slojem metala dobija se veći efekat prodiranja.

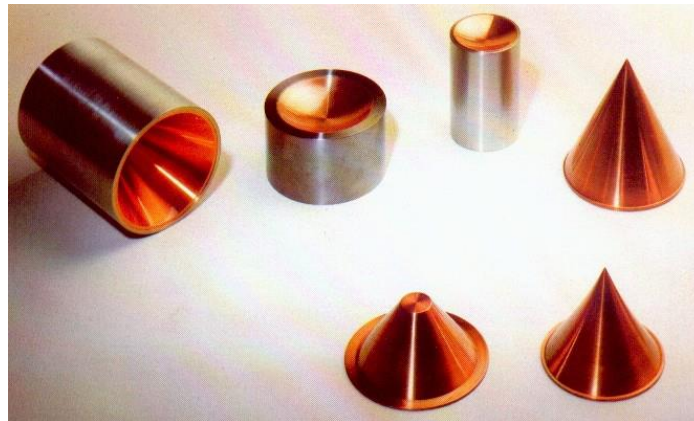
¹⁾ Miloš Stepanović, Vojnotehnički Institut Beograd (hunter.milos@gmail.com); dr Srdjan Živković, Vojnotehnički Institut Beograd (srdjan.zivkovic@mod.gov.rs); Slobodan Malbašić, Uprava za Odbrambene Tehnologije Sektora za Materijalne Resurse Ministarstva Odbrane (slobodan.malbasic@mod.gov.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koje podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije; evidencioni broj: 451-03-66/2024-03/ 200325.



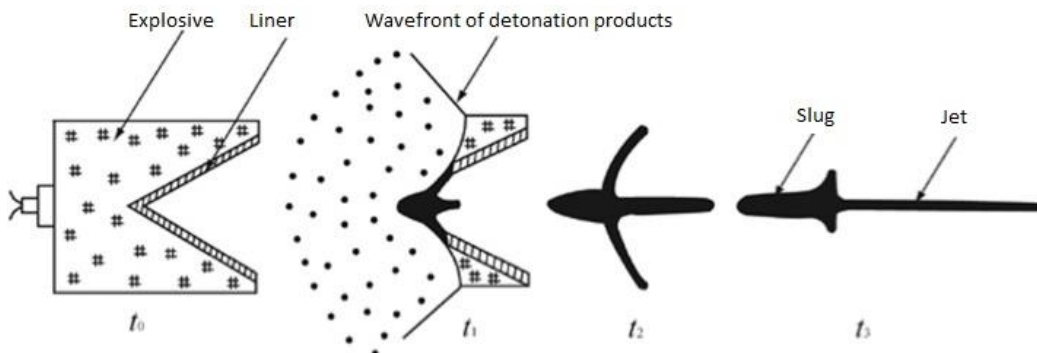
Slika 1. Bojeva glava, 1-aerodinamički omotač, 2-šupljina, 3-levkasta metalna obloga eksplozivnog punjenja, 4- detonator, 5- eksplozivno punjenje, 6- piezo električni okidač

Metalna obloga kojom se oblaže šupljina eksplozivnog punjenja naziva se kumulativni levak. Kumulativni levci mogu biti oblika konusa, polulopte, parabole, elipsoida (Slika 2). Kumulativni levci se najčešće izrađuju od bakra, a može se koristiti i neki drugi materijali sa nižom tačkom topljenja kao što su olovo i kadmijum. [3] Najčešći oblik kumulativnog levka je konusni oblik. [5]



Slika 2. Različiti oblici kumulativnih levaka [3]

Nakon inicijacije eksplozivnog punjenja, detonacioni talas se širi kroz eksplozivno punjenje i dalje udara u kumulativni levak. Pri tome, levak biva izložen velikom pritisku koji izaziva njegovo postepeno urušavanje koje se prostire duž njegove ose, od vrha levka prema osnovi. Vrednost detonacioni talasa (pritiska) znatno premašuje graničnu čvrstoću materijala levka, pri čemu se on ponaša kao tečni, nestišljivi fluid. Ovakvo urušavanje, odnosno kretanje materijala levka duž njegove ose naziva se kumulativni mlaz. (Slika 3) [4]



Slika 3. Formiranje kumulativnog mlaza

2. IZRADA KUMULATIVNIH LEVAKA

2.1 Uvod

U prvoj polovini sedamdesetih godina prošlog veka, od tadašnjeg Sovjetskog Saveza kupljena je licenca za kompletnu raketu 3M14 Maljutka [6], osim za neke delove pogonske jedinice. Ti delovi su se kontinuirano posebno nabavljali. Istovremeno, zbog cene i veka trajanja, delovi pogonske jedinice rakete su razvijani i kod nas. Osim ovih delova, razvijani su i delovi za poboljšanje ubojitosti rakete. Proizvodnja, istraživanje, razvoj i sklapanje delova Maljutke vrši se u domaćoj kompaniji "KRUŠIK" iz Valjeva u saradnji sa Vojnotehničkim institutom (VTI) Beograd [7].

2.2 Materijal levka

Jedan od najvažnijih faktora na mehanizam stvaranja kumulativnog mlaza jeste materijal od kojeg je izrađen kumulativni levak.

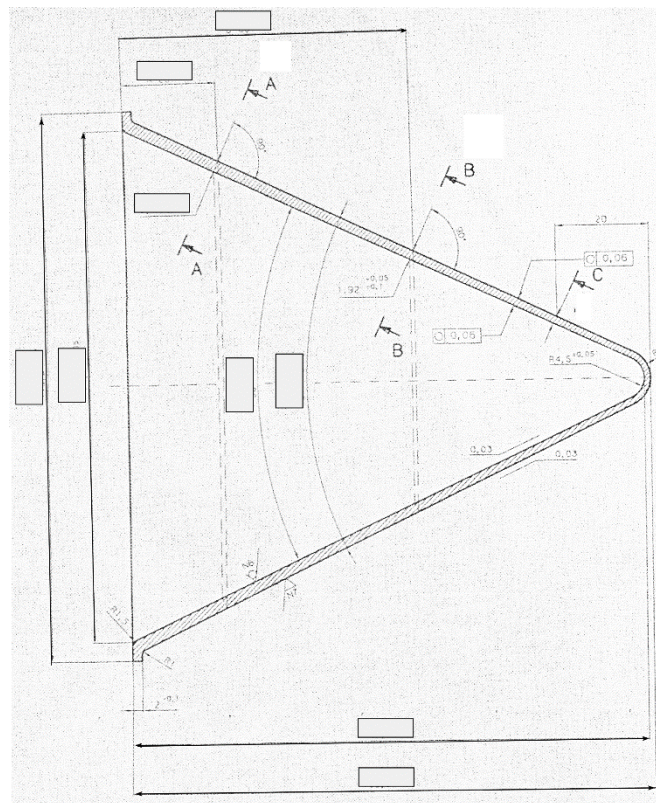
Materijal levaka koji su ispitivani u ovom radu je bakar čistoće 99,99%, određenog hemijskog sastava. Bakar u odnosu na druge materijale (olovo, kadmijum) ima veću tačku topljenja, kao i veliku gustinu, što rezultira većom probojnošću kumulativnog mlaza. Veća dinamička čvrstoća materijala obezbeđuje sposobnost materijala mlaza da se odupre velikim pritiscima i deformacijama prilikom penetracije.

Sitnozrna struktura materijala utiče na čvrstoću i tvrdoću materijala, pa je zato potrebno imati finu zrnastu strukturu materijala. Takođe, veličina i orijentacija imaju veliki uticaj na elongacioniju materijala.

2.3 Geometrija levaka

Kao i kod izbora materijala, zahtevi u pogledu geometrije levaka su strogi, a sve u cilju dobijanja što kvalitetnijeg mlaza.

Ispitivani bakarni levci su konusnog oblika sa različitom debljinom zida. Debljina zida se smanjuje od osnove prema vrhu levka, takvi levci se nazivaju inverznim. Površine levka nemoraju imati idealno obrađenu površinu, ali i nisu dozvoljeni oštri prelazi, jer mogu imati uticaj na kontinuitet mlaza.

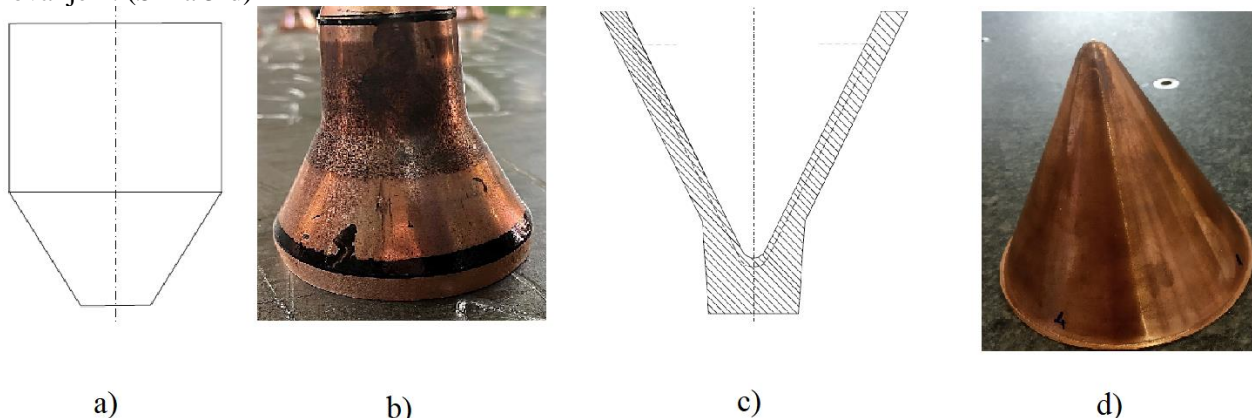


Slika 4. Radionički crtež levka

2.4 Tehnologija izrade

Postoji više operacija izrade kumulativnih levaka koji se montiraju na protivoklopne rakete Maljutka. U valjaonici bakra Sevojno izrađuju se šipke dužine 6 metra i određenog prečnika. Iz tih šipki odsecaju se

valjci određene dužine koji predstavljaju pripreme za narednu operaciju tehnologiju obrade kovanjem. U prvoj fazi kovanja dobijaju se cilindrični komadi sa vrhom oblika zarubljene kupe. (Slika 5-a). Nakon toga, sledi druga i treća faza kovanja (Slika 5-b i c). Četvrta faza kovanja, predstavlja poslednju fazu pri obradi kovanjem. (Slika 5-d)



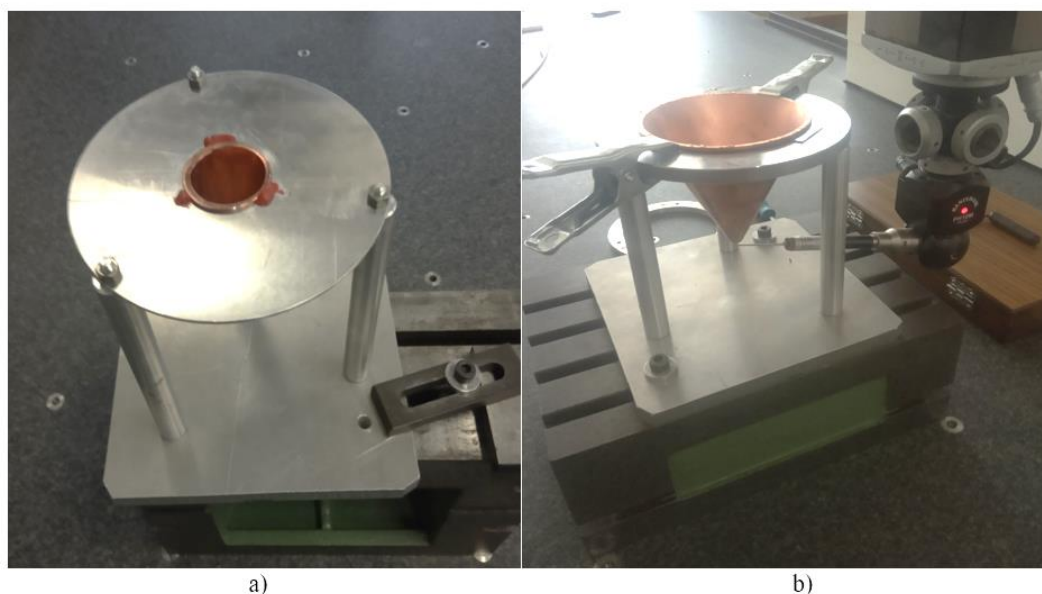
Slika 5. Faze kovanja; a) prva faza, b) druga faza, c) treća faza, d) četvrta faza

3. INSPEKCIJA GEOMETRIJE OTKOVKA

Geometrijska inspekcija otkovaka levaka izvršena je na trokoordinatnoj mernoj mašini proizvođača DEA, model EPSILON 2304. Softver kojim je podržana merna mašina je PC DMIS.

Sa tehničke dokumentacije levka (Slika 4) se uočava da je potrebno izvršiti kontrolu debljine zida levka u tri karakteristična preseka obeleženih sa 'A', 'B' i 'C', kao i ugao konusa.

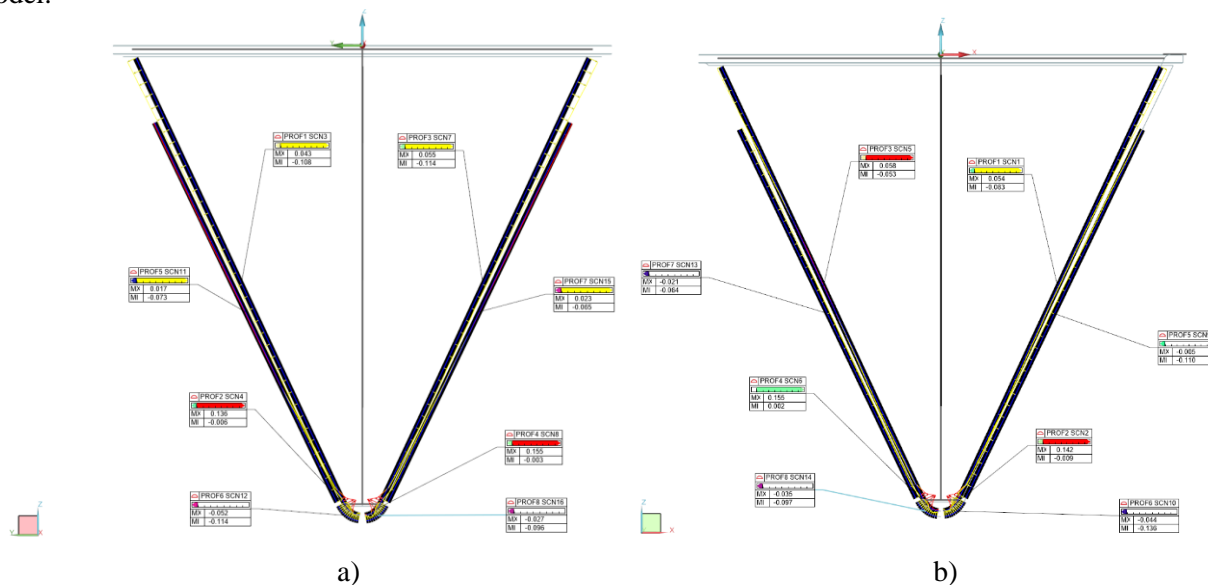
Inspekcija delova kao što su aeroprofil, tankozidi predmeti, delovi kod kojih je potrebno izmeriti poprečni pesek ili debljinu zida, zahtevaju složeniji pristup merenja nego delovi kod kojih je potrebno odrediti rastojanje, prečnik, odstupanje od položaja itd. Kumulativni levak spada u takav tip radnih delova, pa je zato bilo neophodno izvršiti inspekciju i unutrašnje, i spoljašnje strane levka. Kod ovakog merenja, poželjno je obe strane meriti u jednom stezanju dela. Obzirom na ovu činjenicu, levak je bilo potrebno stegnuti tako da se mernom alatu (pipku) omogući prilaz i sa unutrašnje i sa spoljašnje strane. Nijedan standardan stezni pribor i prizma nisu odgovarali, pa je projektovan odgovarajući stezni alat za inspekciju određenog tipa levka (Slika 6). Na slici 6 su prikazani različiti stezni pribori za različite tipove kumulativnih levaka, kao i položaj mernog alata pri inspekciji spoljašnje geometrije.



Slika 6. Pozicioniranje različitih tipova levaka pri inspekciji; a) manji tip levka, b) veći tip levka

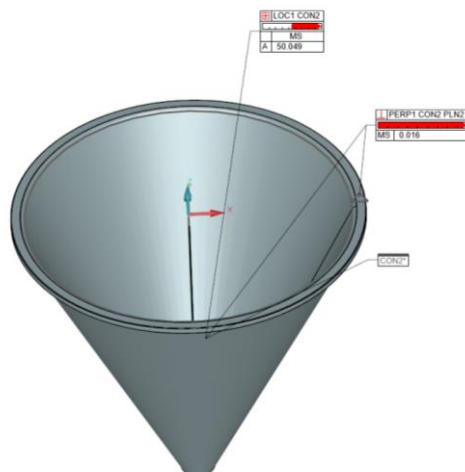
Merenje je izvršeno u dva uzdužna preseka, po 90° , duž izvodnice konusa, kao i sam vrh konusa sa unutrašnje i spoljašnje strane.

Nakon dobijanja koordinatnih podataka odgovarajućih tačaka sa obe strane merenog komada, dobijena je debljina zida, koja predstavlja rastojanje normalnog pravca između spoljašnje i unutrašnje površine u odgovarajućem poprečnom preseku. Na slici 7 prikazana su odstupanja izmerenih tačaka u odnosu na teorijski model.



Slika 7. Rezultati merenja spoljašnje i unutrašnje površine u dva uzdužna preseka; a) presek 1-1, b) presek 2-2

Pri upresovavanju kumulativnog levka u eksplozivno punjenje, potrebno je postići koaksijalnost ose levka i ose eksplozivnog punjenja. Iz tog razloga vršeno je merenje položaja ose levka u odnosu na njegovu bazu (Slika 8).



Slika 8. Vrednost ugla konusa i položaj ose levka u odnosu na njegovu bazu

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana geometrijska inspekcija bakarnih kumulativnih levaka u svrhu razvoja rakete sa povećanom probojnošću tenkovskih oklopa. Ovaj iterativni proces obuhvata modifikovanje kovačkih alata i dobijenih bakarnih otkovaka nakon čega se testira probojnost rakete na pločama od pancirnog čelika. S obzirom da se radi od pojedinačnoj seriji levaka koji su ispitivani, prvi cilj inspekcije geometrije jeste kontrola alata za kovanje kojim su bakarni konusi izrađeni. Dobijenim rezultatima inspekcije se utvrđuju odstupanja od projektovanog kovačkog alata. Drugi cilj inspekcije je dobijanje tačne geometrijske slike konusa koja će predstavljati ulazne podatke za završnu mašinsku obradu spoljašnje površine bakarnih otkovaka. Kod ovih bakarnih levaka izuzetno važnu ulogu, osim samog ugla konusa i lopatstog zaobljenja vrha igra debljina plašta. Zahtev je da varijacije debljine po celoj površini plašta budu u propisanom tolerancijskom polju.

U ovom multidisciplinarnom istraživanju i razvoju merenje i geometrijska inspekcija igraju jednu od ključnih uloga. Geometrijska inspekcija je aktivni učesnik upravljanja kvalitetom proizvodnje i proizvoda. Rezultati

dobijeni sa NUMM su ualzni parametri redizajna kovačkih alata ali i aktivni parametri završne mašinske obrade bakarnih levaka kumulativnih bojevih glava. Projektovani cilj je dostignut, postignuta je znatno veća probojnost tenkovskih oklopa od one koja je navedena u [6].

5. LITERATURA

- [1] Radić V.,: *Protivoklopna sredstva i oklopna zaštita*, Vojnotehnički glasnik, 3/98, Vojnotehnički institut VJ, Beograd, 1998, str.361-364.
- [2] Radovanović, M., Petrovski, A., Smileski. S., Jokić. Ž.: *Analysis Of The Development Of Five Generation Of Anti-Armor Missile Systems*, Scientific Technical Review, 2023, Vol.73, No.1, pp.26-37
- [3] Čatović, A.: *Bojeve glave sa kumulativnim efektom (HEAT)*, Diplomski rad, Katedra za odbrambene tehnologije, Mašinski fakultet u Sarajevu, April 2003.
- [4] XIANG,Z.X., TIAN,B.M., JIAN,G.N.: *The Damage and Failure Mechanism of the Concrete Subjected to Shaped Charge Loading*, Engineering Failure Analysis, Vol. 82, pp. 741.752, 2017.
- [5] KULSIRIKASEM,W.: *Investigation of Materials for Liners of Shaped Charge Warhead and Their Optimum Standoff Distances*, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, Krabi, 2011.
- [6] 9M14 Maljutka, S Wikipedije, slobodne enciklopedije;
https://sr.wikipedia.org/sr/9%D0%9C14_%D0%9C%D0%B0%D1%99%D1%83%D1%82%D0%BA%D0%B0, pristupano 04.09.2024.
- [7] Catalogue - Krušik Holding Corporation; on-line: <https://www.krusik.rs/images/pdf/Catalogue.pdf> , pristupano 04.09.2024

Stepanović M., Živković S., Malbašić S.

GEOMETRIC INSPECTION OF CUPREOUS FORGER CONE TANDEM HOLLOW CHARGE WARHEAD OF ROCKET "MALYUTKA"

Abstract: Penetrability of anti-tank cumulative warhead it depends very much of explosive charge, of course, it also depends on the geometric accuracy of the forger copper cone. The accuracy of the angle of the cone as well as the accuracy of the thickness of the copper cone, affects the penetrability. The paper presents the geometric inspection of forger copper cone, which included the relationships of internal and external areas as well as forging the resulting accuracy of thickness the walls of a copper cone. All observed errors in the geometry of forger copper cone had their reflexion on the forging tool. After this iterative procedure was achived penetrability thru 1m armor steel plate.

Key words: Geometric inspection, forger parts, Cumulative warhead



Šibalić, N., Milatović, V.¹⁾

MJERENJE NIVOVA OSVJETLJENJA NA RADNOM MJESTU

Rezime

U radu su date teorijske osnove metoda mjerenja osvjetljenja na radnom mjestu, opisani su mjerni instrumenti i izvršena su mjerenja u radnim prostorijama jedne institucije koja se bavi visokim obrazovanjem. Za izvođenje eksperimentalnih istraživanja i mjerenja osvjetljenja definisan je plan eksperimenta. Korišćen je informacioni mjerni sistem koji se sastoji od foto detektora i galvanometra. Izvršena je priprema istraživačkog mjesta, određene su radne prostoriji u zgradi Filozofskog fakulteta u Nikšiću (biblioteka, IT kancelarija, internet caffe, studentska služba i učionica) i mjerne pozicije po izabranim radnim mjestima. U radu je prikazana i eksperimentalna analiza i statistička obrada rezultata mjerenja.

Ključne riječi: Osvjetljenje, Lux metar, Radno mjesto

1. UVOD

Ljudski rad nameće potrebu za preciznošću, za poznavanje omjera i odnosa među svim postojećim elementima čovjekovog djelovanja. Potreba za mjerenjima je gotovo svuda oko nas i postaje sve bitnija zbog tržišnih zahtjeva koji teže kvalitetu i maksimalnoj iskoristivosti resursa. U proizvodnim procesima mjerenje preuzima vodeću ulogu u kontroli i kvaliteti industrijskih proizvoda. To znači da ono što se može izmjeriti time se može i upravljati.

Radno okruženje uveliko utiče na radne sposobnosti i zato je potrebno da stanje okoline bude što prikladnije za rad [1]. Uticaji koji mogu djelovati na smanjenje koncentracije, radne sposobnosti i zainteresovanosti radnika za obavljanje radnih zadataka su: neadekvatno osvetljenje, stalno prisutna iritirajuća buka i neodgovarajuća temperatura [2].

Skoro svi poslovi koji se obavljaju na radnom mjestu kontrolisani su vidom, preko kojeg se prima 90 % svih informacija iz radnog okruženja. Zbog toga je značaj adekvatnog osvjetljenja u uslovima izvršavanja radnih zadataka posebno bitan. Ljudskom oku najviše odgovara dnevna, difuzna svjetlost. Međutim, većina poslova se obavlja u prostorijama nedovoljnog intenziteta prirodnog svjetla i neophodna je upotreba vještačkog osvjetljenja. Stoga dizajn sistema vještačkog osvjetljenja ima veliki uticaj na rad i komfor osoblja u takvom ambijentu. Istraživanja iz osvjetljenja radnih prostorija obuhvataju mjerenja parametara koji odražavaju stanje u radnom okruženju, oblikovanje energetski pogodnih sistema za osvjetljenje i ispitivanje njihovog uticaja na udobnost i radne performanse. Istraživanja pokazuju da svjetlo ne predstavlja samo uslov za vidljivost, nego i uveliko utiče na raspoloženje.

Osnovne vrste svjetlosnih izvora su: užareni izvori (sunce i svjetiljke) i luminescentni izvori koji reflektuju svjetlost sa svoje površine. Bijela svetlost nastaje pri emisiji svjetlosti svih talasnih dužina u skoro jednakoj proporciji. Međutim, u većini slučajeva vještački izvori osvjetljenja emituju skoro cjelokupan elektromagnetni spektar sa izraženom tendencijom koncentracije energije u pojedinim djelovima tog spektra.

Osvjetljenje je količina svjetla koja iz svjetlosnog izvora pada na neku površinu. Rasvjeta na radnom mjestu može biti: prirodna, vještačka i kombinovana. Prirodna i/ili vještačka rasvjeta mora osigurati zadovoljavajuće osvjetljenje radnog mjesta od 300 lx do 500 lx.

¹⁾ Prof. dr Nikola Šibalić, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, (nikola@ucg.ac.me), mr Vasko Milatović, Univerzitet Crne Gore, (vaskom@ucg.ac.me)

2. EKSPERIMENTALNI MODEL

Eksperiment je zapravo sistem, koji se sastoji od ulaznih (nezavisnih) promjenjivih koje mogu biti kontrolisane i nekontrolisane i od izlaznih (zavisnih) promjenjivih. Cilj eksperimenta je da se adekvatnim odabirom ulaznih promjenjivih dobiju potrebne izlazne promjenjive, kako bi se ti rezultati mogli obraditi i smatrati tačnim, kao i da se pronađe uzročno-posljedična veza između ulaza i izlaza.

Eksperimentom se najčešće određuju neke željene vrijednosti faktora. Faktori su promjenjive kojima se na kontrolisan način proučava njihov uticaj na proces ili proizvod. U praksi se najčešće koristi više faktora, pa dizajn eksperimenta ima višefaktorni pristup. Karakteristike proizvoda ili procesa, koji se optimizuju, nazivaju se odzivima. Odzivi se označavaju sa y , a faktori sa x .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Model koji povezuje odzive u zavisnosti od faktora naziva se funkcijom odziva i/ili površinom (multivarijantna funkcija) odziva.

Eksperimentalna istraživanja se zasnivaju na konceptu šta ulazi i šta izlazi iz sistema, dok su dešavanja unutar sistema nepoznata. Model se gradi na principu kibernetike metode crne kutije.

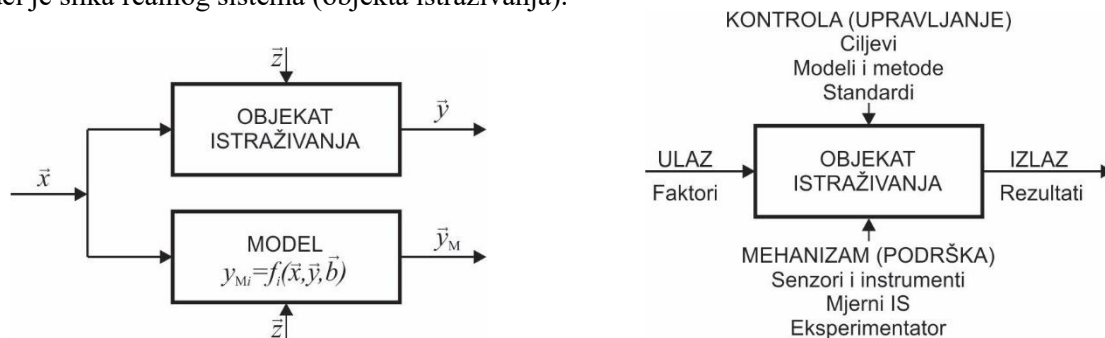
Na Slici 1a. je prikazan kibernetički model istraživanja, gdje su:

\vec{x} - vektor kontrolisanih ili upravljačkih faktora,

\vec{z} - vektor nekontrolisanih spoljnjih faktora,

\vec{y} - vektor karakteristika procesa.

Na osnovu dobijenog modela može se razmatrati realni sistem i na matematički (statistički) način se opisati, tj. model je slika realnog sistema (objekta istraživanja).



Slika 1. a) Kibernetički model objekta istraživanja [3]; b) Proces eksperimentalnog istraživanja

Modeli se dobivaju iz eksperimenata (objekta istraživanja), a struktura procesa eksperimentalnog istraživanja omogućava: ispitivanje, razumijevanje, kontrolu i poboljšanje aktivnosti procesa (Slika 1. b).

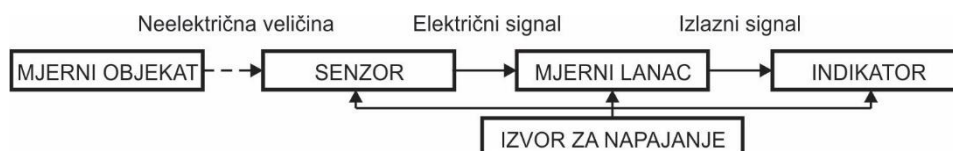
Strukturalni osnovni elementi svakog eksperimentalnog istraživanja su:

1. *Objekat (predmet) istraživanja,*
2. *Ciljevi istraživanja,*
3. *Eksperimentalni plan i eksperimentalni faktori,*
4. *Eksperimentalna tehnika (mjerni sistemi) i*
5. *Obrada eksperimentalnih podataka (statističke metode).*

2.1 Tehnike prikupljanja podataka

Za prikupljanje podataka koriste se mjerni senzori, mjerni instrumenti i mjerni informacijski sistemi. U mjernim instrumentima su sve više zastupljeni električni mjerni uređaji za mjerenje neelektričnih veličina (npr. sile, brzine, temperature, buke, svjetlosti i dr.). Pretvaranje neelektričnih veličina u električne omogućava da se jednom metodom izmjere vrlo male i brze promjene, kao i mjerenja na daljinu [4].

Blok šema tipičnog uređaja za mjerenje neelektričnih veličina električnim putem sastoji se od: senzora, mjernog lanca, indikatora za očitavanje rezultata mjerenja i napojnog izvora mjernog uređaja (Slika 2) [5].



Slika 2. Blok šema mjernog sistema

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Fotometrija se bavi mjerenjem svojstava izvora svjetlosti, svjetlosnog toka i osvijetljenja površina (Tabela 1.) Fotometrijska mjerenja koriste elektronske fotometre, prilagođena osjetljivosti ljudskog oka i obuhvata dio elektromagnetskog spektra talasne dužine od približno 380 do 780 nm.

Veličina		Mjerna jedinica	
Naziv	Oznaka	Naziv	oznaka
Svjetlosna jačina	I_s	Candela (lm/sr)	cd
Svjetlosni tok	Φ_s	Lumen (cd·sr)	lm
Osvijetljivost	L_s	Kandela po kvadratnome metru	cd/m ²
Osvjetljenje	E_s	Luks (lm/m ²)	lx

Skoro svi poslovi koji se obavljaju na radnom mjestu kontrolišu se vidom, jer se vidom prima 90% informacija iz okruženja. Zato je značaj adekvatnog osvijetljenja u uslovima izvršavanja radnih zadataka posebno bitan. Istraživanja pokazuju da osvijetljenost uveliko utiče na raspoloženje radnog osoblja.

Osvjetljenje je količina svjetla koja iz svjetlosnog izvora pada na neku površinu. Rasvjeta na radnom mjestu može biti: *prirodna, vještačka i kombinovana.*

Standardne vrijednosti osvijetljenja prema evropskim standardima EN-12462-1 [7] za radna mjesta u zatvorenom prostoru su: nivo osvijetljenja, ravnomjernost osvijetljenja, bliještanje, smjer upada svjetlosti i boja svjetlosti) čiji su nivoi osvijetljenja izraženi u luksima (lx) i prikazani su u tabeli (Tabela 2.).

Obrazovna infrastruktura	\bar{E}_m (lx)	UGRL	U_0	R_a
Učionice	500	19	0,6	80
Crne, zelene zidne i bijele table	500	19	0,7	80
Prostorije za kompjuterske vježbe (preko menija)	300	19	0,6	80
Jezičke laboratorije	300	19	0,6	80
Studentske, zajedničke prostorije i zbornice	200	22	0,4	80
Biblioteka: police za knjige	200	19	0,6	80
Biblioteka: čitaonice	500	19	0,6	80

3.1 Mjerne pozicije

Raspored mjernih pozicija je prikazan na slici (Slika 3.)




Slika 3. Mjerne pozicije za mjerenje osvijetljenja na radnim mjestima na Filozofskom fakultetu u Nikšiću

3.2 Oprema za mjerenje osvjjetljenja

Mjerenje prirodnog i vještačkog osvjjetljenja luksmetrom se zasniva na pretvaranja svjetlosti u električnu pomoću fotoelektrične ćelije (silicijumski fotoelementi). Intenzitet nastale električne struje se mjeri neposredno osjetljivim ampermetrom i proporcionalan je količini svjetlosti koja dopijeva do fotoelementa. Luksmetar se sastoji iz fotoćelije i galvanometra sa skalom za očitavanje osvjjetljenja i nalaze se u jednom kućištu.

Za mjerenje osvjjetljenja je korišćen digitalni Luks metar PCE-172 (Tabela 3). Luks metar je kompaktan i lak za rukovanje i na terenu i mjeri osvjjetljenja u lux-ima. Komponenta osjetljiva na svjetlo koja se koristi u mjeracu je vrlo stabilna, dugotrajna silikonska foto dioda, kao i filter spektralnog odziva.

Karakteristike		
Nivoi za mjerenje osvjjetljenja u rasponu od 0,01lux~0,1klux /0,01fc~0,01kfc		
Funkcija zadržavanja podataka za čuvanje mjernih vrijednosti		
Automatsko nuliranje		
Potpuno kosinusno korigovan za upadni ugao svjetlosti		
Zadovoljava skoro u potpunosti CIE karakteristiku spektralne osjetljivosti		
Specifikacija		
Displej	3-3/4 digit LCD with high speed 41 segment bargraph.	
Mjerni opseg	40,00 lux, 400,0 lux, 4000 lux, 40,00 klux i 400,0 klux /40,00 fc, 400,0 fc, 4000 fc, 40,00 kfc. (1fc=10,76lux).	
Displej prekoračenja	LCD će prikazati simbol "OL".	
Spektralni odziv	CIE Photopic. (CIE kriva odgovora ljudskog oka).	
Spektralna tačnost	CIE Vλ function f1' ≤6%	
Kosinusni odgovor	f2' ≤2%	
Preciznost	±5% rdg±10d.(<10,000Lux) ±10% rdg±10d.(>10,000Lux)	
Ponovljivost	±3%	
Brzina uzorkovanja	1,5 puta/sek analogne indikacije trakastog grafikona; 1,5 puta/sek digitalnog prikaza.	
Foto detektor	jedna silikonska foto dioda i filter spektralnog odziva.	
Izvor napajanja	Baterija od 9V	
Dimenzije foto detektora	115L×60W×20H(mm)	
Dimenzije mjerača	206L×95W×45H (mm)	
Težina	265g	


1	LCD displej: 3-3/4-cifreni displeji sa maksimalnim očitavanjem 3999 znakovi za indikaciju izmjerenih vrijednosti.	
2	Lux tipka: Na taster lux bira se mjerenje osvjjetljenosti u luksima.	
3	Fc tipka: Na fc bira se mjerenje osvjjetljenja na skali stopa kandela.	
4	RANGE tipka: Označava 40,00 lux, 400,0 lux, 4000 lux, 40,00 Klux i 400,0 Klux /40,00 fc, 400,0 fc, 4000 fc, 40,00 Kfc.	
5	REL tipka: Relativna tipka za kontrolu čitanja.	
6	MAX/MIN tipka: Kontrolna tipka za maksimalno i minimalno očitavanje.	
7	PEAK tipka: Kontrola zapisa.	
8	BACK-LIGHT tipka: Taster za kontrolu pozadinskog svjetla.	
9	HOLD tipka: Kontrolna tipka za memorisanje podataka.	
10	Power tipka: uključivanje i isključivanje mjerača osvjjetljenja.	
11	Foto detektor.	

Foto dioda sa filterima zadovoljava karakteristiku spektralne osjetljivosti Međunarodne komisije za osvjjetljenje C.I.E. (*International Commission on Illumination*) skoro u potpunosti.

Sistem za upravljanje kvalitetom PCE kalibracione laboratorije je sertifikovan prema standardu DIN EN ISO 9001:2015 i svoje instrumente testiraju i kalibrišu prije no što ih otpreme [8].

3.3 Mjerenje osvjjetljenja i akvizicija eksperimentalnih podataka

Eksperiment je sproveden na definisanim mjernim pozicijama koje koriste osoblje fakulteta i studenti. Cilj eksperimenta je bio da se utvrdi ergonomija radnog mjesta na osvjjetljenje i da se pokaže da li i koliko odstupaju od propisanih standardnih vrijednosti osvjjetljenja.

Mjesta, laboratorija i opreme za eksperimentalni rad su bila na Univerzitetu Crne Gore, Filozofskom fakultetu (biblioteka, studentska služba, IT kancelarija, Internet Caffè i učionica)

Eksperimentalno istraživanje sprovedeno je kroz sledeće faze:

- *eksperimentalni plan,*
- *prikupljanje podataka,*
- *Statistička obrada rezultata i izvođenje zaključka.*

Eksperimentalni plan

Na osnovu preliminarnih istraživanja strukturisan je eksperimentalni plan postupka kojim se registruju vrijednosti podataka zavisnih promjenljivih na osnovu ulaznih (nezavisnih) promjenljivih.

Struktura promjenljivih (nezavisne i zavisne) kao i njihove mjerne skale je određena na sledeći način:

Nezavisne promjenljive:

- Radna prostorija (*nominalna*)
- Sudionici na radnom mjestu (*nominalna*)

Zavisne promjenljive:

- Osvijetljenost Prirodna (*intervalna*)
- Osvijetljenost Prirodna i Vještačka (*intervalna*)
- Osvijetljenost Vještačka (*intervalna*)

Eksperimentalne tehnike prikupljanja podataka

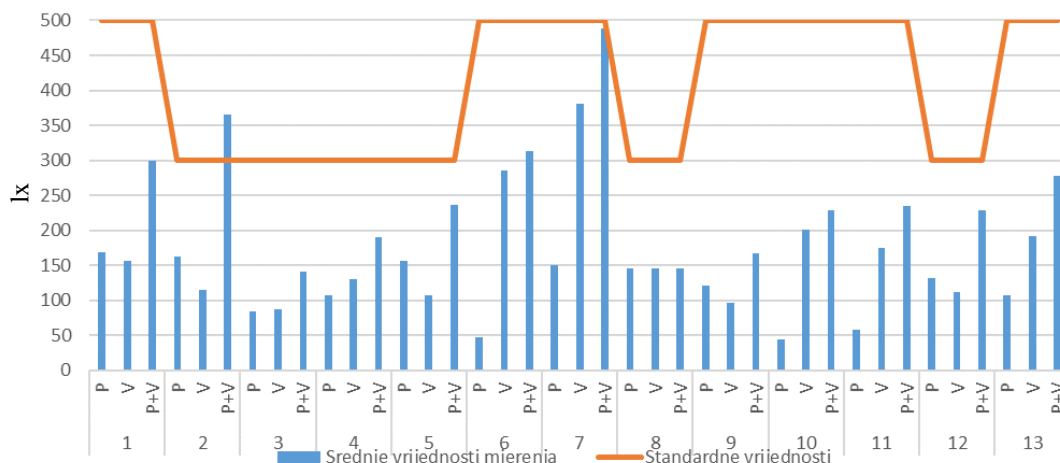
Podaci su prikupljeni na osnovu eksperimentalnog plana i prikazani su u matrici podataka.

Prikupljeni podaci u ovom istraživanju, kao i sve faze statističkog istraživanja, obrađeni su pomoću programskog Statističkog paketa SPSS verzija 23.

3.4 Statistička obrada podataka i analiza rezultata

Istraživanje razlika između izmjerenih srednjih vrijednosti i propisanih standardnih vrijednosti koristi se parametarska tehnika T-test jednog uzorka. Ovaj test se koristiti kod mjerenja na jednom uzorku i provjerava se da li prosječna vrednost neke varijable u populaciji iz koje je izvučen uzorak odgovara pretpostavljenoj (standardnoj) vrednosti.

U Tabeli 5 prikazane su srednje vrijednosti dobijene T-testom jednog uzorka, a na Slici 5, prikazan je histogram iz koga se vide da su sve srednje vrijednosti znatno ispod standardnih vrijednosti propisane evropskim standardom EN-12462-1 za osvjjetljenje.



Slika 5. Histogram odnosa srednjih vrijednosti mjerenja i standardnih vrijednosti (P - prirodno osvjjetljenje, V - vještačko osvjjetljenje, 1 - Čitaonica, 2 - Biblioteka seminar 1, 3 - Biblioteka seminar 2, 4 - Biblioteka seminar 3, 5 - Biblioteka seminar 4, 6 - Biblioteka katalogizacija, 7 - IT kancelarija, 8 - Internet caffè, 9 - Studentska služba 1, 10 - Studentska služba 2, 11 - Učionica, 12 - Ukupno za 300 lx i 13 - Ukupno za 500 lx)

Tabela 5. Pregled srednjih vrijednosti dobijene T-testom jednog uzorka					
Radna prostorija		N	Mean	Std. Dev.	Std. Error Mean
Čitaonica	Osvijetljenost P	9	168.311	210.0627	70.0209
	Osvijetljenost V	9	156.744	67.3144	22.4381
	Osvijetljenost P+V	9	299.356	199.2535	66.4178
Biblioteka seminar 1	Osvijetljenost P	7	162.629	208.2758	78.7208
	Osvijetljenost V	7	114.500	46.6647	17.6376
	Osvijetljenost P+V	7	364.900	349.8884	132.2454
Biblioteka seminar 2	Osvijetljenost P	5	83.560	111.4443	49.8394
	Osvijetljenost V	5	86.480	61.0361	27.2962
	Osvijetljenost P+V	5	140.280	115.2809	51.5552
Biblioteka seminar 3	Osvijetljenost P	4	106.600	130.4280	65.2140
	Osvijetljenost V	4	130.850	150.5472	75.2736
	Osvijetljenost P+V	4	190.250	138.9901	69.4951
Biblioteka seminar 4	Osvijetljenost P	5	156.000	200.7200	89.7647
	Osvijetljenost V	5	107.400	24.1309	10.7917
	Osvijetljenost P+V	5	235.600	258.5939	115.6467
Biblioteka katalogizacija	Osvijetljenost P	3	47.667	21.2211	12.2520
	Osvijetljenost V	3	285.000	34.5977	19.9750
	Osvijetljenost P+V	3	312.667	42.7707	24.6937
IT kancelarija	Osvijetljenost P	2	151.000	43.8406	31.0000
	Osvijetljenost V	2	381.500	98.2878	69.5000
	Osvijetljenost P+V	2	488.000	42.4264	30.0000
Internet caffe	Osvijetljenost P	3	145.067	56.5735	32.6627
	Osvijetljenost V	3	145.067	56.5735	32.6627
	Osvijetljenost P+V	3	145.067	56.5735	32.6627
Studentska služba 1	Osvijetljenost P	3	121.667	92.0290	53.1330
	Osvijetljenost V	3	96.333	40.2534	23.2403
	Osvijetljenost P+V	3	167.667	70.6847	40.8099
Studentska služba 2	Osvijetljenost P	3	43.500	57.6346	33.2754
	Osvijetljenost V	3	201.167	46.4752	26.8325
	Osvijetljenost P+V	3	229.000	33.7787	19.5021
Učionica	Osvijetljenost P	6	57.850	42.4493	17.3298
	Osvijetljenost V	6	174.817	80.8908	33.0235
	Osvijetljenost P+V	6	235.367	101.6540	41.5001
Ukupno za 300 lx	Osvijetljenost P	25	131.632	151.9774	30.3955
	Osvijetljenost V	25	111.220	69.6731	13.9346
	Osvijetljenost P+V	25	229.236	235.5763	47.1153
Ukupno za 500 lx	Osvijetljenost P	26	107.785	136.2219	26.7153
	Osvijetljenost V	26	191.158	95.2884	18.6876
	Osvijetljenost P+V	26	277.323	146.6347	28.7574

Na osnovu vrednosti T-test statistika, broja stepeni slobode (engl. *degree of freedom* - df) i dvostrane značajnosti testa, moguće je zaključiti da li postoji značajna razlika između uzoračke prosječne vrijednosti i pretpostavljene vrijednosti (300 i 500 lx). Ako je nivo značajnosti testa (vrijednost Sig ili p koja se dobija za dvostranu značajnost) manji od 0.05 ($p < 0.05$), može se zaključiti da je razlika između sredina statistički značajna.

Izlazni rezultati ukazuju da postoji značajna razlika u osvjetljenosti radnih prostorija i standardnih vrijednosti za osvjetljenje prema EN standardima koji su dati u Tabeli 2. Naime, osvjetljenje radnih prostorija je znatno ispod standardnih vrijednosti, Sig. (2-tailed) ili $p < 0.05$ (Tabela 6.), osim IT kancelarije koja je dobro osvjetljena.

T-testom jednog uzorka je otkrivena statistički značajna razlika ($p = 0.00 < 0.05$) između srednjih dobijenih vrijednosti ($n = 51$) i standardne test vrijednosti 300 i 500 lx, tako da je osvjetljenost radnih prostorija nedovoljna i znatno je ispod propisanih standardnih vrijednosti.

Tabela 6. Test Statistics (One Sample Test)

Radna prostorija		t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95 % of the Difference		Test Value
						Lower	Upper	
Čitaonica	Osvijetljenost P	-4.737	8	.001	-331.6889	-493.157	-170.220	500
	Osvijetljenost V	-15.298	8	.000	-343.2556	-394.998	-291.513	500
	Osvijetljenost P+V	-3.021	8	.017	-200.6444	-353.804	-47.485	500
Biblioteka seminar 1	Osvijetljenost P	-1.745	6	.132	-137.3714	-329.994	55.252	300
	Osvijetljenost V	-10.517	6	.000	-185.5000	-228.658	-142.342	300
	Osvijetljenost P+V	.491	6	.641	64.9000	-258.693	388.493	300
Biblioteka seminar 2	Osvijetljenost P	-4.343	4	.012	-216.4400	-354.816	-78.064	300
	Osvijetljenost V	-7.822	4	.001	-213.5200	-289.306	-137.734	300
	Osvijetljenost P+V	-3.098	4	.036	-159.7200	-302.860	-16.580	300
Biblioteka seminar 3	Osvijetljenost P	-2.966	3	.059	-193.4000	-400.940	14.140	300
	Osvijetljenost V	-2.247	3	.110	-169.1500	-408.704	70.404	300
	Osvijetljenost P+V	-1.579	3	.212	-109.7500	-330.914	111.414	300
Biblioteka seminar 4	Osvijetljenost P	-1.604	4	.184	-144.0000	-393.227	105.227	300
	Osvijetljenost V	-17.847	4	.000	-192.6000	-222.562	-162.638	300
	Osvijetljenost P+V	-.557	4	.607	-64.4000	-385.487	256.687	300
Biblioteka katalogizacija	Osvijetljenost P	-36.919	2	.001	-452.3333	-505.049	-399.617	500
	Osvijetljenost V	-10.763	2	.009	-215.0000	-300.945	-129.055	500
	Osvijetljenost P+V	-7.586	2	.017	-187.3333	-293.582	-81.085	500
IT kancelarija	Osvijetljenost P	-11.258	1	.056	-349.0000	-742.892	44.892	500
	Osvijetljenost V	-1.705	1	.338	-118.5000	-1001.581	764.581	500
	Osvijetljenost P+V	-.400	1	.758	-12.0000	-393.186	369.186	500
Internet caffe	Osvijetljenost P	-4.743	2	.042	-154.9333	-295.470	-14.397	300
	Osvijetljenost V	-4.743	2	.042	-154.9333	-295.470	-14.397	300
	Osvijetljenost P+V	-4.743	2	.042	-154.9333	-295.470	-14.397	300
Studentska služba 1	Osvijetljenost P	-7.121	2	.019	-378.3333	-606.946	-149.721	500
	Osvijetljenost V	-17.369	2	.003	-403.6667	-503.662	-303.672	500
	Osvijetljenost P+V	-8.143	2	.015	-332.3333	-507.924	-156.743	500
Studentska služba 2	Osvijetljenost P	-13.719	2	.005	-456.5000	-599.672	-313.328	500
	Osvijetljenost V	-11.137	2	.008	-298.8333	-414.284	-183.383	500
	Osvijetljenost P+V	-13.896	2	.005	-271.0000	-354.911	-187.089	500
Učionica	Osvijetljenost P	-25.514	5	.000	-442.1500	-486.698	-397.602	500
	Osvijetljenost V	-9.847	5	.000	-325.1833	-410.073	-240.294	500
	Osvijetljenost P+V	-6.377	5	.001	-264.6333	-371.313	-157.954	500
Ukupno za 300 lx	Osvijetljenost P	-5.539	24	.000	-168.3680	-231.101	-105.635	300
	Osvijetljenost V	-13.548	24	.000	-188.7800	-217.540	-160.020	
	Osvijetljenost P+V	-1.502	24	.146	-70.7640	-168.005	26.477	
Ukupno za 500 lx	Osvijetljenost P	-14.681	25	.000	-392.2154	-447.237	-337.194	500
	Osvijetljenost V	-16.527	25	.000	-308.8423	-347.330	-270.354	
	Osvijetljenost P+V	-7.743	25	.000	-222.6769	-281.904	-163.450	

4. ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno mjerenje osvjetljenja radnih prostorija u zgradi Filozofskog fakulteta u Nikšiću. Izvedena eksperimentalna istraživanja su imala cilj da se utvrdi ergonomija radnog mjesta na osvjetljenje i da se ukaže na odstupanja i koliko utvrđene vrijednosti nivoa osvjetljenja odstupaju od standardnih propisanih vrijednosti, koje su normirane od EN standardima. Dobijeni podaci su obrađeni pomoću statističkog paketa SPSS. Testiranjem je utvrđena statistički značajna razlika između dobijenih vrijednosti i standardnih za osvjetljenje radnih prostorija predmetne zgrade, što je za 43 % ispod preporočenih vrijednosti iz EN standarda.

Na osnovu dobijenih rezultata moguće je planiranja daljeg istraživanja i donošenja zaključaka u domenu ergonomije radnog mjesta kao i o uticaju spoljašnjih faktora na efikasnost radnog procesa, jer radno okruženje bitno utiče na produktivnost, zadovoljstvo i zdravlje nastavnog i nenastavnog osoblja, kao i studenata korisnika radnih prostorija.

5. LITERATURA

- [1] Sanders M. and McCormick E.: *Human factors in engineering and desing*, Singapore: McGraw - Hill, 1993.
- [2] Žunjić A.: *Praktikum za laboratorijske vežbe iz industrijske ergonomije*, Beograd: Mašinski fakultet, 2022.
- [3] Stanić J.: *Metod inženjerskog mjerenja*, Beograd: Mašinski fakultet, 1990.
- [4] Jevtić N.: *Automatska konfiguracija distribuiranih memih sistema korišćenjem elektronskih specifikacija senzora*, Beograd: Univerzitet u Beogradu, 2015.
- [5] Bašić H.: *Mjerenja u mašinstvu*, Sarajevo: Mašinski fakultet, 2008.
- [6] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, „Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje,“ 2024. [Na mreži]. Available: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/fotometrija>. [Poslednji pristup 03 02 2024].
- [7] European standards, „Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places,“ 2022. [Na mreži]. Available: <https://www.en-standard.eu/une-en-12464-1-2022-light-and-lighting-lighting-of-work-places-part-1-indoor-work-places/>. [Poslednji pristup 07 01 2024].
- [8] PCE instruments, „Manual Lux meter PCE-172,“ 2020. [Na mreži]. Available: <https://www.pce-instruments.com/english/>. [Poslednji pristup 09 01 2024].

Šibalić, N., Milatović, V.

MEASUREMENT OF LIGHTING LEVELS IN THE WORKPLACE

Abstract: *The paper provides the theoretical basis of the methods of measuring lighting in the workplace. The measuring instruments are described and the measurements were performed in the workrooms of a higher education institution. An experiment plan for the conduction of experimental research on the measurement of lighting was defined. An information-measuring system consisting of a photodetector and a galvanometer was used. The research site was prepared, workrooms in the building of the Faculty of Philosophy in Nikšić (library, IT office, internet cafe, student services office and classroom) were selected, and measurement positions for selected workplaces were adopted. The paper also presents the experimental analysis and statistical processing of the measurement results.*

Key words: *Lighting, Lux meter, Workplace*

ZAHVALNICA



Brza i efikasna
primena naučnih
znanja u industriji

LOLA INSTITUT

Grundfos prilika



top
EMPLOYER
SRBIJA
SERBIA
2024
CERTIFIED EXCELLENCE IN EMPLOYEE CONDITIONS

GRUNDFOS 

Possibility in every drop

Explore **the future.**



Grundfos je jedna od vodećih kompanija u oblasti naprednih rešenja za pumpe i tehnologiju vode, sa više od 19 000 zaposlenih u preko 60 država širom sveta. Sve što radimo se temelji na našoj fundamentalnoj želji da doprinesemo globalnoj održivosti kroz razvoj tehnologija koje poboljšavaju kvalitet života ljudi i brinu o planeti. Mi, u Grundfosu, verujemo da inovacija nije samo poslovna prilika, već i obaveza. Ono što nam je zaista ključno jeste uticaj koji imamo, a ne kratkoročni profit. Postajući deo Grundfos tima, možete da doprinesete našim ciljevima ostavljajući svoj trag, bez obzira na ulogu u kompaniji.

Za više informacija o studentskoj praksi pošaljite upit na:
grundfoscareerserbia@grundfos.com

GRUNDFOS 

Possibility in every drop

metalac
POSUDE

Kada se spoje 65 godina iskustva, savremena tehnologija i najkvalitetniji materijali dobije se posuđe koje koriste milioni domaćica širom Evrope i sveta. Metalac je jedan od najboljih proizvođača posuđa u Evropi. 70% proizvodnje emajliranog posuđa odlazi kupcima u 25 zemalja širom sveta, najviše u zemlje EU, Rusiju i Ameriku. Oko 6 miliona posuda svake godine nađe put do kupaca širom sveta.



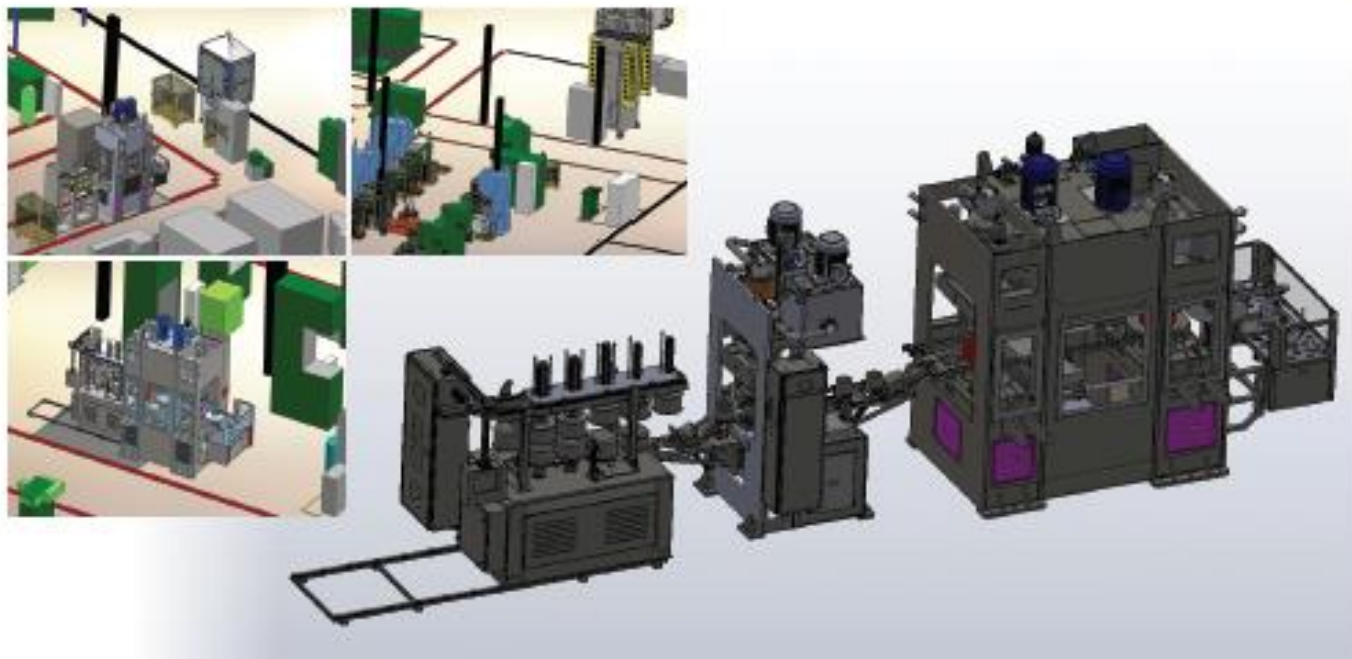
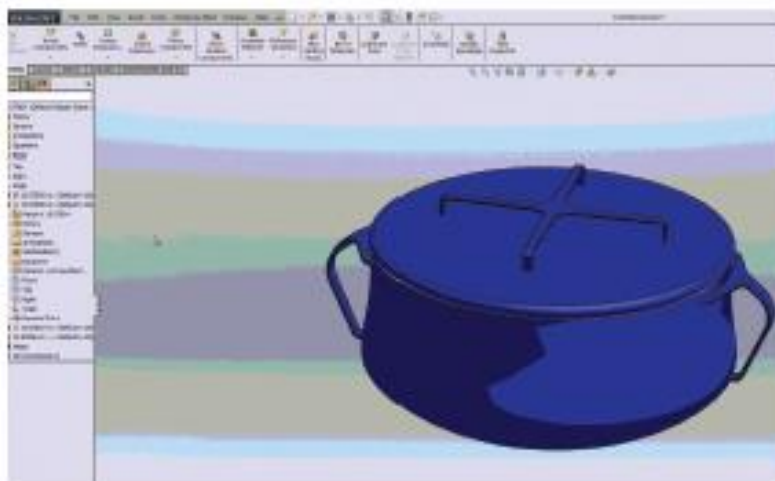
TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE

SOLID WORKS CAD/CAM

PDM

product document management system

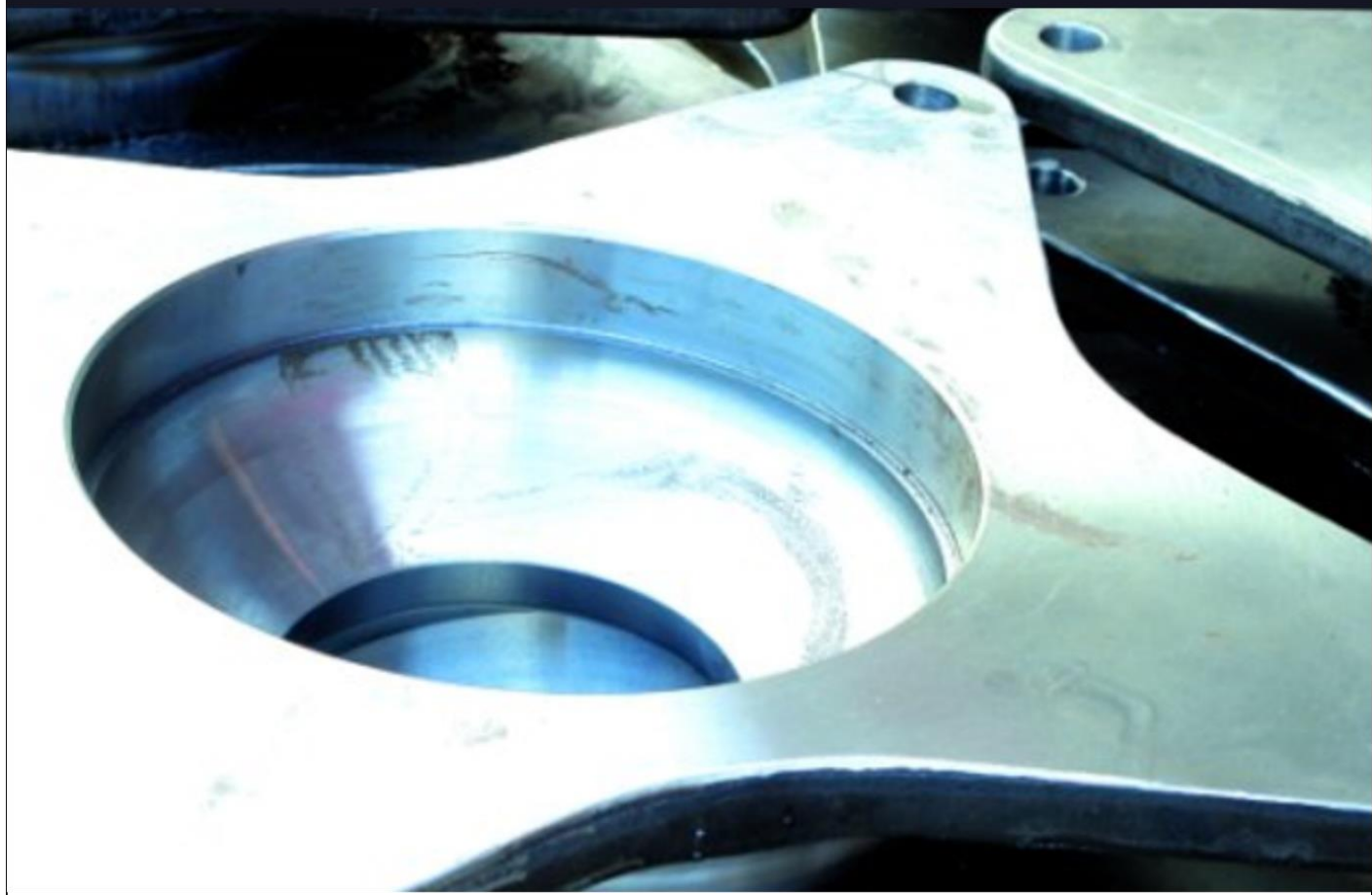
- Izrada modela proizvoda, alata mašina
- Izrada tehničke dokumentacije
- Izrada prototipa
- 3D štampanje
- Izrada simulacija
- Izrada uputstava
- Izrada CAD programa
- Uslužno skeniranje kup. komponenti





MING d.o.o. is a family-run Company established in 1991,
as the Production & Engineering Company with the
Registered Office in Belgrade..

In order to meet market requirements, Ming d.o.o.
expanded its capacity by purchasing the factory in the city
of Nis in 2006, which, thanks to its 150-year long forging
tradition, complies with long-lasting technical &
technological development of Ming Company.





Focus

We are dedicated to success, readily accepting new technologies and constantly improving our products. We have realized a well rounded manufacturing process from the design to the final product.



Employees

Today, the Company employs 190 people. We are building strong connections with our community. Our employees are our driving force, as well as our friends and family. Our tendency is to ensure excellent working and promotion conditions for them.



Clients

We export over 90% of our products, mostly to EU countries. For many years now, we have successfully exported our products to Germany, Czech Republic, Poland, Slovakia, France, China, Turkey, Russia etc.



Goal

Throughout the previous years, we have continuously expanded our product range. Since our goal is to satisfy the new demands of ever-growing market we are steadily expanding our product range.



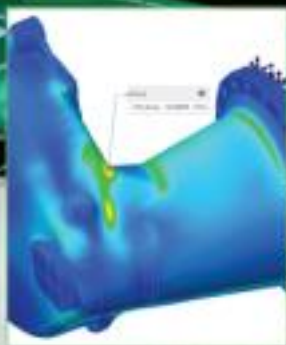


novi svet
pred vama

AI-Driven
Generative Design



Simulation-Driven
Design



Detailing & MBD



Advanced
Manufacturing



Authorized distributor
Authorized training center



CPS - CAD Professional Systems d.o.o.

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



Certified ISO 9001:2015

Simulation

Maintenance

Overhaul

training

Augmented Reality

ASD S1000D

Tool design and prototyping

CAD/CAM/CAE

IT Solutions

Production

Design



CPS CAD Professional Systems

CPS - CAD Professional Systems d.o.o.

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



AXIOM TECH

Solution
Partner

PLM

SIEMENS

Axiom Tech d.o.o. Digitalizacija proizvodnih kompanija



Kompanija Axiom Tech je vodeći provajder CAx/PLM tehnologija i strateški partner Siemens Digital Industries Software

CAD:

- NX
- Solid Edge

CAE:

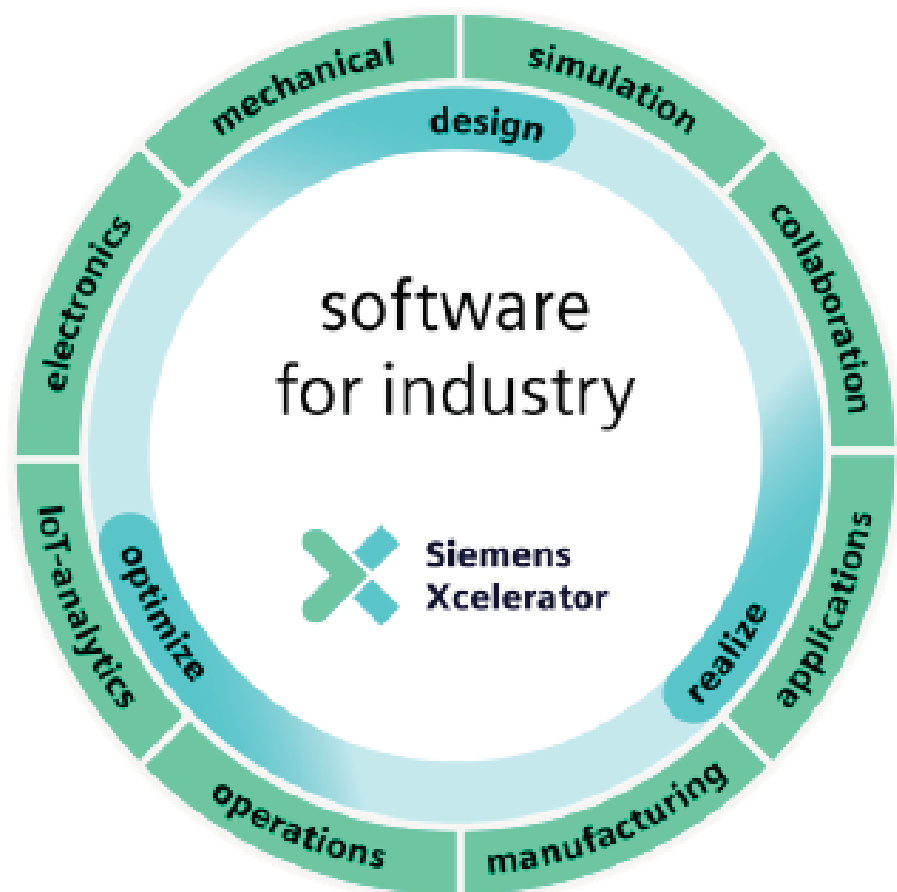
- Simcenter
- FloEFD
- Star-CCM+

CAM:

- NX
- SIEMENS MC

PLM, ALM:

- Teamcenter
- Polarion
- Plant Simulation
- Process Simulate





AXIOM TECH

Solution
Partner

P.L.M

SIEMENS

Axiom Tech d.o.o. Digitalizacija proizvodnih kompanija

CGTECH
VERICUT®

Ovlašćeni partner i distributer kompanije CGTech Ltd.
Među 3 najbolja Evropska partnera dugi niz godina

Moldex3D
M O L D I N G I N N O V A T I O N

Ovlašćeni partner i distributer kompanije Moldex 3D
Specijalni i vodeći softver softver za CAE analize za industrije koje se
bave izradom alata i proizvoda u proizvodnji brizganja plastike.

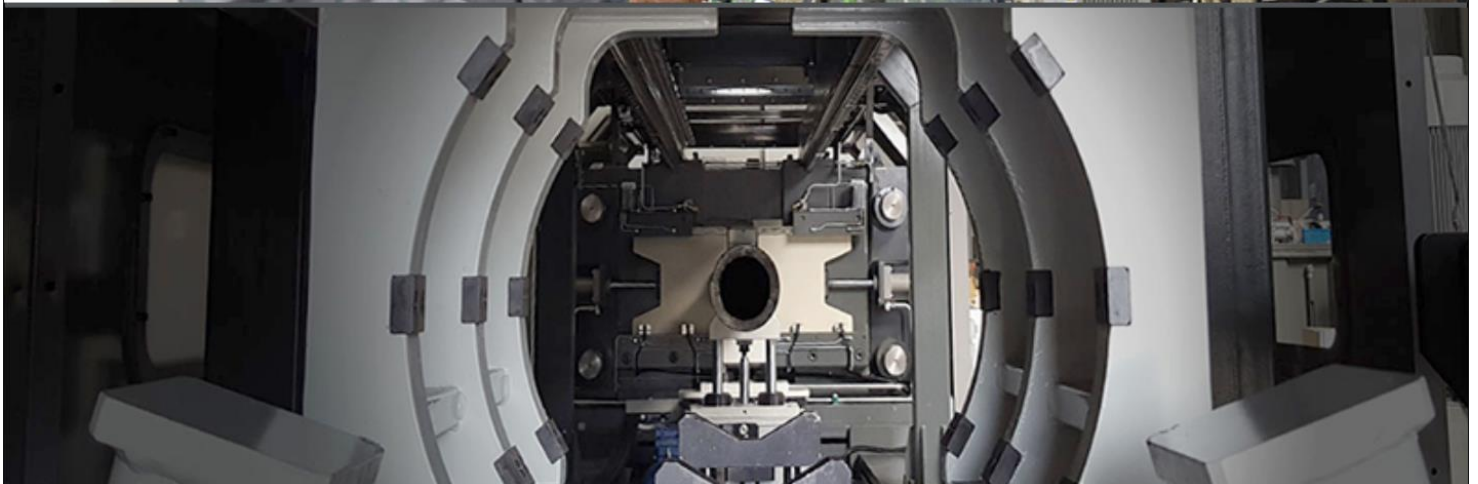
SERVOTEH

Servotech je porodično preduzeće, osnovano 2002. godine. Sedište kompanije se nalazi u Beogradu - u naselju Dobanovci. Danas, nakon više od 20 godina rada i kontinuiranog razvoja, naši stručnjaci za mašinstvo i elektrotehniku, projektuju, proizvode i lansiraju na tržište različite sisteme automatizacije: alate, mašine, proizvodne linije i čitave pogone namenjene različitim industrijama.

Inženjerski biro za razvoj rešenja i CAD dizajn, kao i za razvoj celokupnog PLC i CNC softvera, zajedno sa proizvodnim pogonom, predstavlja našu prednost i omogućuje nam konkurentno prisustvo na tržištu. Od osnivanja kompanije, opredeljenje Servoteha je da se bavi razvojem i proizvodnjom tehnološki naprednih mašina i proizvodnih linija u skladu sa zahtevima kupca, tako da je svaki naš projekat jedinstven u pogledu rešenja i primenjene tehnologije.

Iza ovako širokog proizvodnog portfolija naše kompanije stoji:

Dugogodišnji rad i iskustvo u oblasti automatizacije proizvodnje Kvalifikovani i iskusni im stručnjaka specijalizovanih za različite oblasti Sopstveni moderni i dobro organizovani proizvodni kapaciteti Stalno unapređivanje i budno praćenje najnovijih svetskih trendova u oblasti industrije. Partnerstvo sa svetskim liderima u industrijskoj automatizaciji (Siemens, Robert Bosch, ABB, SKF, Emerson) doprinosi uspešnom praćenju najsavremenijih tehnoloških rešenja i čini lakšom primenu njihovih proizvoda i rešenja u naše sopstvene projekte.



Prednosti Servoteha

ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ

Mi u Servotehu verujemo da su stalna poboljšavanja u tehnologiji i svakodnevnim radnim procesima ključni elementi koji će osigurati da naši klijenti mogu da se razvijaju i napreduju bez obzira na tržišne uslove.

PROJEKTOVANJE I INŽENJERING

Kod nas inženjering igra najvažniju ulogu u razvoju kompanije. Svojom posvećenošću kvalitetu i stalnim poboljšanjima uvek tražimo načine da unapredimo postojeće proizvode ili da osmislimo nove kako bismo zadovoljili potrebe klijenata.

KONTROLA KVALITETA

Spremni smo da našim klijentima pružimo najviši kvalitet proizvoda i usluga u svakom trenutku. Naš sistem upravljanja kvalitetom u skladu sa zahtevima standard ISO 9001 je potvrđen kod vodećeg sertifikacionog tela u oblasti industrije, TUV Rheinland.

PROIZVODNJA I MONTAŽA

Poseđujemo modernu CNC mašinsku radionicu opremljenu visoko-preciznim mašinama, opremom za površinsku zaštitu, halu za montažu, i naravno stručan inženjerski tim za svaki sektor.

FLEKSIBILNA PROIZVODNJA

Od svog osnivanja Servoteh je fokusiran na rešavanje i realizaciju specijalnih mašina po zahtevu kupca. To opredeljenje definisalo je naš dalji put u pogledu organizacije proizvodnje i opremanja proizvodnih kapaciteta kako bi bili u stanju da brzo odgovorimo na sve zahteve aktuelnog projekta.

ATESTIRANI MATERIJALI

Svi materijali koje koristimo u proizvodnji su visokog kvaliteta i atestirani su od strane proizvođača. Sve neophodne ateste arhiviramo ili dostavljamo krajnjem korisniku uz proizvod.

PRAĆENJE PROJEKATA

Naši timovi stručnjaka posvećeno nadgledaju svaki korak u procesu razvoja projekta, počevši od dizajniranja i proizvodnje, preko testiranja do implementacije rešenja.

STALAN TRENING ZAPOSLENIH

Razvoj i napredak jedne kompanije počiva na njenim zaposlenima. Nastojimo da našem osoblju obezbedimo sve uslove u kojim aće oni moći da dosegnu svoje profesionalne ciljeve kako bi zajedničkim snagama ostvarili i strateški cilj kompanije.



Hahn+Kolb u Srbiji

Hahn+Kolb doo je osnovan tokom 2004. godine kao ćerka firme Hahn+Kolb Werkzeuge GmbH iz Nemačke. Firma osnivač u Nemačkoj postoji od 1898. godine, a od 1995. godine je član grupe Würth zajedno sa preko 400 firmi širom sveta. Grupa Hahn+Kolb ima preko 870 zaposlenih širom sveta.

Mnogima u Srbiji Hahn+Kolb je bio poznat kao brend u prethodnom veku, pre svega po specijalnim mašinama, automatima, ali i alatima koji su se sretali po našim poznatim fabrikama.

Danas HAHN+KOLB grupi pripadaju ćerke kompanije u Austriji, Francuskoj, Poljskoj, Mađarskoj, Srbiji, Rumuniji, Holandiji, Turskoj, Kini, Indiji, Meksiku. Planiraju se i dalje fuzije i osnivanja. Svojim brojnim saradnjama, HAHN+KOLB može da obezbedi skoro potpunu pokrivenost Evrope po snabdevenosti alatima.

Proizvodi iz našeg programa (rezni alati, stezni i merni alati, uređaji za ispitivanje, oprema za radionice, ručni alati, alatne mašine...) su rađeni u skladu sa DIN i ISO standardima. Hahn+Kolb Werkzeuge je sertifikovan prema DIN EN ISO 9001:2015, DIN EN ISO 14001:2015, DIN EN ISO 45001:2018, VDA 6.2:2017.

Naš asortiman:

Rezni alati

Stezni alati

Merni alati i pribori

Oprema za ispitivanje

Ručni alati

Oprema za radionice

Brusni alati

Elektro i pneumatski alati

Mašine

ATORN[®]

ORION[®]



Naši brendovi su premium ATORN, za korisnike sa najvišim zahtevima i ORION, brend za visokozahtevani kvalitet. Pored naših brendova u ponudi je i veliki broj drugih poznatih proizvođača.



Naši tehnički obrazovani predstavnici prodaje su kompetentni da pomognu kupcima u rešavanju problema iz sektora proizvodnje, kontrole i održavanja. Na ovaj način HAHN+KOLB je prepoznat kao pouzdan partner koji obećava stabilan budući razvoj i dugoročni poslovni uspeh.

Hahn+Kolb doo danas saraduje sa preko 2000 kompanija u Srbiji. Kao reference možemo navesti bukvalno sve firme koje posluju na teritoriji Srbije, kako strane, tako i domaće.

Krajem 2007. godine firma je prvi put objavila prodajni katalog na srpskom jeziku. Sa preko 1.400 strana, ovo izdanje predstavljalo je veliku podršku našoj prodaji. Nakon više izdanja u godinama koje su usledile, danas je našim kupcima dostupan i online katalog i internet prodavnica sa preko 100.000 proizvoda. Naš katalog je sada već postao referenca pri izboru mogih standardnih i vanstandardnih alata, pribora i mašina jer navodi mnoge mere, karakteristike i standarde. Svake godine HAHN+KOLB Srbija ide korak napred, od unapređenja brzine isporuke formiranjem lagera u Srbiji, do postavljanja konsignacionih lagera (SELECT) ili drugih usluga kupcima.

Od 2011. godine u okviru firme radi metrološka laboratorija koja je akreditovana za etaloniranje merila dužine i etaloniranje moment ključeva. Firma ovim potvrđuje svoju kompetenciju, kroz inovacije koje nije jednostavno kopirati.

Uz naš osnovni program, zastupnici smo za prostor Srbije i za programe još nekih proizvođača mašina i alata, kao što su ALZMETALL, EMCO, IMET, BOEHLERIT, BIG KAISER...

Pretpostavljamo da mnogi od Vas koji ovo čitate već saradujete sa nama ili koristite naše alate i usluge. Pozdrav svima, uz slogan naše firme LET'S WORK TOGETHER.



LET'S WORK TOGETHER.

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 / 37. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala [i] 31. simpozijum CAD/CAM [i] 40. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 46. simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala [i] 24. simpozijum Menadžment kvalitetom [sve u okviru]] 44. Jupiter konferencija, Beograd, oktobar 2024. godine ; organizator Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2024 (Beograd : Planeta print). - 1 USB fleš memorija ; 1 x 2 x 5 cm

Sistemska zahteva: Nisu navedeni. - Nasl. sa nasl. strane dokumenta. - Tiraž 100. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-6060-204-8

1. Јупитер конференција (44 ; 2024 ; Београд) 2. Симпозијум СИМ у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала (37 ; 2024 ; Београд) 3. Симпозијум CAD/CAM (31 ; 2024 ; Београд) 4. Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (40 ; 2024 ; Београд) 5. Симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала (46 ; 2024 ; Београд) 6. Симпозијум Менаџмент квалитетом (24 ; 2024 ; Београд)

a) СИМ системи -- Зборници b) CAD/CAM системи -- Зборници v) Машине алатке -- Нумеричко управљање -- Зборници g) Роботи -- Зборници d) Флексибилни технолошки системи -- Зборници đ) Металоперађивачка индустрија -- Управљање -- Зборници e) Управљање квалитетом -- Зборници

COBISS.SR-ID 154354441

ISBN 978-86-6060-204-8



9 788660 602048