43. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNIK RADOVA
PROCEEDINGS

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, oktobar 2022.

43. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

36. simpozijum
CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

30. simpozijum
CAD/CAM

39. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

45. simpozijum
UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA

23. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Beograd, oktobar 2022. godine

43. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNIK 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. 27/2022 od 19.09.2022.

Tehnički urednici:

Prof. dr Bojan Babić
Prof. dr Saša Živanović
Prof. dr Mihajlo Popović

Beograd, oktobar 2022.

Tiraž: 100 primeraka
Štampa: **Planeta print**,
11000 Beograd, Igora Vasiljeva 33r, tel.: 011 650 6564

ISBN 978-86-6060-137-9

43. JUPITER KONFERENCIJA

PROGRAMSKI I NAUČNI ODBOR

Predsednik:
Prof. dr Ljubodrag Tanović, Mašinski fakultet Beograd

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

ORGANIZACIONI ODBOR

Predsednik:
Prof. dr Bojan Babić, Mašinski fakultet Beograd
Sekretar:
Prof. dr Saša Živanović, Mašinski fakultet Beograd
Članovi:
Prof. dr Nikola Slavković, MF Beograd • Prof. dr Goran Mladenović, MF Beograd • Prof. dr Slavenko Stojadinović, MF Beograd • Prof. dr Mihajlo Popović, MF Beograd • Prof. dr Milica Petrović, MF Beograd • Doc. dr Branko Kokotović, MF Beograd • Doc. dr Miloš Pjević, MF Beograd • Asist. Dušan Nedeljković, MF Beograd • Asist. Nikola Vorkapić, MF Beograd • Asist. Lazar Matijašević, MF Beograd • Asist. Aleksandar Jokić, MF Beograd

ZAHVALNICA

Organizacioni odbor **43. 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:

Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

Vlade Republike Srbije

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

INMOLD PLAST d.o.o.

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

FMP KONZORCIJUM d.o.o

https://www.fmp.co.rs/

Istraživačko razvojni institut LOLA d.o.o.

https://www.li.rs/

PREDGOVOR

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

Ubrzani tehnološki razvoj i digitalna transformacija industrije dovode do značajnih promena na tržištu rada. Industrija 4.0, u kojoj autonomni kibernetsko-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.

Ove godine obeležavamo i 50 godina od formiranja Katedre za proizvodno mašinstvo. Visokoškolska nastava iz oblasti proizvodnog mašinstva u Srbiji započela je na Tehničkom fakultetu Velike škole pre 128 godina. Velika škola je prerasla u Univerzitet u Beogradu u okviru kojeg je kasnije osnovan Mašinski fakultet. Katedre na Mašinskom fakultetu su formirane 1948. godine. Tada se nastava iz proizvodnog mašinstva odvijala pod okriljem Katedre za osnove mašinstva. 1956. godine osnovana je Katedra za industrijsku proizvodnju, a šef Katedre je bio prof. Pavle Stanković, jedan od utemeljivača proizvodnog mašinstva. Tokom sledeće reorganizacije na Mašinskom fakultetu 1960. godine formirana je Katedra za tehnologiju, a opet je kao šef Katedre imenovan prof. Pavle Stanković. Nakon donošenja određenih zakona 1972. godine i uspostavljanja nove organizacije Fakulteta osnovana je Katedra za proizvodno mašinstvo, a prvi šef Katedre bio je prof. Vladimir Šolaja.

Ministarstvo prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, FMP Konzorcijum, Lola institut i Inmold Plast su pomogli organizovanje ove konferencije kao podršku naporima za unapređenje obrazovanja i nauke u oblasti proizvodnog mašinstva.

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

Dobro došli na XLIII JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 4. oktobar 2022.

Prof. dr Bojan Babić

Izaberite simpozijum JUPITER Konferencije

UVODNI RADOVI

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

CAD/CAM

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA
PRODUCTION CONTROL IN METALWORKING INDUSTRY

MENADŽMENT KVALITETOM
QUALITY

==========

Spisak svih radova na JUPITER Konferenciji
po prezimenu prvog autora

Бабић, Б.
50 ГОДИНА КАТЕДРЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ UR.17

Baralić, J., Nedić, B.
SPECIFIČNA ENERGIJA OBRADE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM 3.101

Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B., Tešić, S., Ćulum, M.
PROJEKTOVANJE I VERIFIKACIJA GRUPNOG TEHNOLOŠKOG POSTUPKA ZA OPERACIJU STRUGANJA 1.1

Dimić, Z., Pavlović D., Živanović, S., Furtula, M., Đurković, M.
DINAMIČKI REKONFIGURABILNI UPRAVLJAČKI SISTEM SA PROMENLJIVIM TOKOM IZVRŠAVANJA KINEMATIČKOG ALGORITMA 3.112

Dučić, N., Dragović, G., Jovičić, A.
MODELOVANJE I SIMULACIJA UPRAVLJANJA POMOĆNIM KRETANJIMA KOD CNC SISTEMA UPOTREBOM SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB/SIMULINK 3.61

Erwinski, K., Karasek, G., Zivanovic, S., Dimic, Z., Slavkovic, N.
REAL-TIME CONTROL OF A KEOPS-DELTA PARALLEL KINEMATICS MACHINE USING LINUXCNC AND ETHERCAT 3.47

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.
SAJBER BEZBEDNOST U KONTINUALNIM SISTEMIMA UPRAVLJANJA – PREGLED REZULTATA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0 ..... 1.7

Jevtić, I., Popović, M., Mladenović, G., Pjević, M., Milošević, M., Milovanović, A.
GENERATIVNI DIZAJN I PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U OKRUŽENJU CREO PARAMETRIC 2.35

Jovanović, R. J.
PROJEKTOVANJE PROIZVODNOG CIKLUSA SLOŽENOG PROIZVODA PRIMENOM TEHNIKA MREŽNOG PLANIRANJA 4.17

Jovanović, R., Bugarić, U., Vesović, M., Perišić, N.
FAZI UPRAVLJANJE ZAHVATNOG MEHANIZMA I NELINEARNE TEHNIKE UPRAVLJANJA MOTORA JEDNOSMERNE STRUJE - PREGLED REZULTATA ISTRAŽIVANJA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0 ..... 3.26

Karabegović, I., Husak, E., Karabegović, E., Mahmić, M.,
ULOGA ROBOTSKE TEHNOLOGIJE I UTICAJ INDUSTRIJE 4.0 U FUNDAMETALNOJ TRANSPORMACIJI POSLOVNIH MODELA I PROCESA 4.1

Knežev, M., Živković, A. Štrbac, B., Hadžistević, M., Mlađenović, C., Marinković, D.
OPTIMIZACIJA KOLIČINE PROTOKA RASHLADNOG SREDSTVA ZA HLAĐENJE KUĆIŠTA MOTOR-VRETENA 3.89

Matin, I., Štrbac, B., Hadžistević, M., Ranisavljev, M.
THE PLASTIC PRODUCT DEVELOPMENT USING CAD/CAE ADVANCED TOOLS 2.14

Miljković, Z., Babić, B., Petrović, M., Jokić, A., Miljković, K., Jevtić, Đ., Đokić, L.
INTELIGENTNO STEREO-VIZUELNO UPRAVLJANJE MOBILNIH ROBOTA I OPTIMALNO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA - PREGLED REZULTATA ISTRAŽIVANJA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0 ..... 3.13

Milovanović, N., Đuričić, V., Stojadinović, S.
ANALIZA DOKUMENTOVANIH INFORMACIJA INTEGRISANOG MENADŽMENT SISTEMA HOLDING KORPORACIJE „KRUŠIK" A.D. 5.1

Milutinović, M., Živanović, S., Vasilić, G., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z.
STRATEGIJA 3+2 OSNE OBRADE NA NOVOJ BRUSILICI ZA IZRADU PROFILNIH KOTURASTIH GLODALA 3.95

Paprocki, M., Erwinski, K., Zivanovic, S.
CNC MACHINE LABORATORY STAND WITH H-BOT PARALLEL KINEMATICS USING THE ETHERCAT BUS 3.39

Putnik, G.
SCHOOL OF ENGINEERING VS PSEUDO-ENGINEERING IN POST-MODERNIST TIME: IN THE OCCASION OF 50 YEARS OF CATEDRA OF PRODUCTION ENGINEERING IN BELGRADE..... UR.1

Ranđelović S., Stamenković S., Kostić N.
FEM SIMULACIJA PROCESA DUBOKOG ZVLAČENJA CILINDRIČNIH ELEMENATA 2.8

Rodić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B., Aleksić, A.
ANALIZA PROIZVODNOSTI KOD ELEKTROEROZIVNE OBRADE U DIELEKTRIKUMU SA POMEŠANIM PRAHOM 3.67

Spasojević B., Popović, M., Pjević M., Mladenović, G., Puzović, R
SIMULACIJA PROCESA KOVANJA PRIMENOM NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA 2.39

Srećković, M., Janićijević, M., Jevtić, S., Ratković Kovačević, N., Malović, M.
KVANTNI GENERATORI U TEORIJI I PRAKSI 2022..... 4.10

Stojanović, J., Pjević, M., Popović, M., Mladenović, G.
STATE OF THE ART IN THE FIELD OF FORCE PREDICTION IN BALL END MILLING FORCE PREDICTION IN BALL END MILLING 2.27

Tabaković, S., Zeljković, M., Grujić, J.
SAVREMENE TEHNIKE I TEHNOLOGIJE RAZVOJA PROIZVODA U MEDICINSKOJ ENDOPROTETICI UR.30

Tešić, S., Zeljković, M., Tabaković, S., Čiča, Đ., Borojević, S., Sredanović, B.
EKSPERIMENTALNA ANALIZA I OPTIMIZACIJA TVRDOĆE OBRAĐENE POVRŠINE U KRIOGENIM I MQL USLOVIMA GLODANJA LOPTASTIM GLODALOM LEGURE TITANIJUMA Ti-6Al-4V 3.73

Trajkov, A., Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G
ANALIZA PROIZVODNOSTI DELOVA VEĆIH GABARITA PRIMENOM ADITIVNIH TEHNOLOGIJA I TEHNOLOGIJA SPAJANJA 2.45

Vasić, M., Blagojević, M., Nestorović, G.
VISOKOPRECIZNI REDUKTORI ZA INDUSTRIJSKE ROBOTE 3.55

Vasilić, G., Živanović, S., Milutinović, M., Dimić, Z.
KINEMATIKA KOMPLEKSNE VIŠEOSNE I VIŠEVRETENE MAŠINE ALATKE NAMENjENE ZA PROCES OBRADE GLODANjEM 3.79

Vorkapić, N., Maletić, J., Nešovanović, Lj., Živanović, S., Pjević, M.
EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA SA EKSPERIMETIMA OBIMNOG GLODANJA 3.106

Živanović, S., Tanović, Lj., Puzović, R., Kokotović, B., Slavković, N., Popović, M., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N., Dimić, Z., Rakić, A., Manasijević, S.
REVITALIZACIJA HORIZONTALNE BUŠILICE GLODALICE LOLA HBG 80 UPRAVLJANJEM OTVORENE ARHITEKTURE NA LINUXCNC PLATFORMI 3.1

Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N.
KONFIGURISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ALATKI U STEP-NC OKRUŽENJU NA PRIMERU ADITIVNIH TEHNOLOGIJA 2.20

Živković, S., Malbašić, S., Grubić, A.
AM POTENCIJAL PROJEKTOVANjE za ADITIVNU PROIZVODNjU 2.1

SPISAK AUTORA
LIST OF AUTHORS

ALEKSIĆ, A.
BABIĆ, B.,
BARALIĆ, J.
BLAGOJEVIĆ, M.
BOROJEVIĆ, S.
BUGARIĆ, U.
ČIČA, Đ.
ĆULUM, M.
DIMIĆ, Z.
ĐOKIĆ, L.
DRAGOVIĆ, G.
DUČIĆ, N.
ĐURIČIĆ, V.
ĐURKOVIĆ, M.
ERWINSKI, K.
FURTULA, M.
GOSTIMIROVIĆ, M.
GRUBIĆ, A.
GRUJIĆ, J.
HADŽISTEVIĆ, M.
HUSAK, E.
JAKOVLJEVIĆ, Ž.
JANIĆIJEVIĆ, M.
JEVTIĆ, Đ.
JEVTIĆ, I.
JEVTIĆ, S.
JOKIĆ, A.
JOVANOVIĆ, R. J.
JOVANOVIĆ, R.
JOVIČIĆ, A.
KARABEGOVIĆ, E.
KARABEGOVIĆ, I.
KARASEK, G.
KNEŽEV, M.
KOKOTOVIĆ, B.
KOSTIĆ, N.
MAHMIĆ, M.
MALBAŠIĆ, S.
MALETIĆ, J.
MALOVIĆ, M.
MANASIJEVIĆ, S.
MARINKOVIĆ, D.
MATIN, I.
MILJKOVIĆ, K.
MILJKOVIĆ, Z.
MILOŠEVIĆ, M.
MILOVANOVIĆ N.
MILOVANOVIĆ, A.
MILUTINOVIĆ, M.
MLAĐENOVIĆ, C.
MLADENOVIĆ, G.
NEDELJKOVIĆ, D.
NEDIĆ, B.
NEŠOVANOVIĆ, LJ.
NESTOROVIĆ, G.
PAPROCKI, M.
PAVLOVIĆ, D.
PERIŠIĆ, N.
PETROVIĆ, M.
PJEVIĆ M.
POPOVIĆ, M.
PUTNIK, G.
PUZOVIĆ, R.
RAKIĆ, A.
RANĐELOVIĆ, S.
RANISAVLJEV, M.
RATKOVIĆ KOVAČEVIĆ, N.
RODIĆ, D.
SAVKOVIĆ, B.
SEKULIĆ, M.
SLAVKOVIC, N.
SPASOJEVIĆ B.
SREĆKOVIĆ, M.
SREDANOVIĆ, B.
STAMENKOVIĆ S.
STOJADINOVIĆ S.
STOJANOVIĆ, J.
ŠTRBAC, B.
TABAKOVIĆ, S.
TEŠIĆ, S.
TRAJKOV, A.
VASIĆ, M.
VASILIĆ, G.
VESOVIĆ, M.
VORKAPIĆ, N.
ZELJKOVIĆ, M.
ŽIVANOVIĆ, S.
ŽIVKOVIĆ, A.
ŽIVKOVIĆ, S.

43. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNIK RADOVA
PROCEEDINGS

UVODNI RADOVI

Beograd, oktobar 2022.

UVODNI RADOVI
INTRODUCTORY PAPERS

Putnik, G.
SCHOOL OF ENGINEERING VS PSEUDO-ENGINEERING IN POST-MODERNIST TIME: IN THE OCCASION OF 50 YEARS OF CATEDRA OF PRODUCTION ENGINEERING IN BELGRADE.....UR.1
Бабић, Б.
50 ГОДИНА КАТЕДРЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ UR.17
Tabaković, S., Zeljković, M., Grujić, J.
SAVREMENE TEHNIKE I TEHNOLOGIJE RAZVOJA PROIZVODA U MEDICINSKOJ ENDOPROTETICI UR.30

← NAZAD

Goran D. Putnik [1)]

SCHOOL OF ENGINEERING VS PSEUDO-ENGINEERING IN POST-MODERNIST TIME: IN THE OCCASION OF 50 YEARS OF CATHEDRA OF PRODUCTION ENGINEERING IN BELGRADE

Abstract

The objective of this paper is to distinguish of the value of teaching engineering at the Cathedra of Production Engineering in Belgrade, on the occasion, the jubilee, of 50 years of formal establishment of the Cathedra. After the introduction, the second chapter presents a short overview of the post-modernism and how the post-modernism is applied in education, together with an example, in response to the question how the post-modernism influenced the education model. The third chapter will present some differences between the "true" engineering vs. pseudo-engineering through the lenses of the engineering definitions and features. The fourth chapter is dedicated to distinguishing the teaching model of production engineering at the Cathedra for Production Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Belgrade as an example of teaching "true" engineering, and in this sense representing the true engineering school, which is in fact the main hypothesis of this paper.

Keywords: *engineering, pseudo-engineering, post-modernism, school of engineering, cathedra of production engineering in belgrade*

1. INTRODUCTION

The objective of this paper is to distinguish of the value of teaching engineering at the Cathedra of Production Engineering in Belgrade, on the occasion, the jubilee, of 50 years of formal establishment of the Cathedra.

Actually, in the last period, teaching of engineering has been the object of several transformations because of a number of reasons, primarily from the conceptual reasons, i.e. from the phenomenological, or philosophical (phenomenology and philosophy of education), reasons, but also from the economic paradigms reasons that heavily influenced the educational model.

Concerning the teaching of engineering, in the case of this paper, teaching of manufacturing or of the production engineering is of the concern, we are witnessing evolution of the teaching models from, conditionally, "classical" models to nowadays models that are quite different. While the "classical" model could be characterized as the "modernist", the nowadays model could be characterized as the "post-modernist",

This evolution is possible to follow as well through analysing the definitions of what is the engineering, i.e. of what is consisted of the concept of, and consequently the term, engineering. Following the previous characterization of the engineering teaching models, we would say the same for the definitions of the engineering. That is, it could be evaluated that the definition of the engineering has an evolution from the "modernist´s" to "post-modernist´s" definitions.

However, the uncritical application of post-modernism principles makes the definition and determinants (content) of engineering, and consequently the teaching of engineering, more and more diluted, relativized, and lost in favour of management, as stated in [1], [2]. To this situation contributes as well, by a large part, the actual, in Europe, dominant neo-liberal policy that destroys the national industries in less developed countries or countries without a critical size of economy, human and/or other resources, capable of designing their own products and processes, which (such industries) does not need true engineers, but managers of procurement,

[1)] Prof. dr Goran D. Putnik, Universidade do Minho, Scghool of Engineering, Department of Production and Systems Engineering, (putnikgd@dps.uminho.pt)

transport (distribution, logistics) and production.

However, we believe there are at least two reasons why we need to keep the "classical", "modernist", definition and teaching of engineering. These are:

1) If we are at the school/faculty of engineering, then we should teach dominantly, or even exclusively, engineering, without any "surrendering" to management. Students, graduating at the school/faculty of engineering obtain the degree of "engineer", but if the teaching does not refer dominantly to engineering disciplines, and especially in its rigorous formulation, metaphorically to the "hard" engineering disciplines, and/or knowledge, or in other words, if the engineering students are prepared for management (of production) instead for design of systems and processes, then such "engineering" could be called "pseudo-engineering". This "scenario" is obviously inadequate, considering that an engineering school/faculty is expected to, or should, educate true engineers.

2) We need (engineering) designs, i.e. we need new products, processes and problems solutions, without which the very large majority could not even imagine our lives. In other words, if we in schools/faculties of engineering do not educate students for being engineers but to be mainly managers, from which schools/faculties will come students that will be capable to design new products, processes and to solve problems ? Or, alternatively, we do not need any more education of "hard" engineering disciplines, and/or knowledge. (Unfortunately (unfortunately by our opinion) there are some serious hypothesis on this, that virtually we may not need any more education of "hard" engineering disciplines, and/or knowledge.) Our position is that this is a serious mistake in thinking on engineering, and that the engineering schools/faculties should teach dominantly so-called "hard" engineering disciplines, and/or knowledge.

But, somebody may ask, 1) what does it mean "hard" engineering disciplines, and/or knowledge, as different than usual nowadays understanding of the engineering concept, and definition, and 2) how the post-modern, and the neo-liberal policy, affect the understanding of the engineering concept, and definition ? And finally, what Cathedra for Production Engineering has with this questions ?

Some answers to these questions will be presented in the following chapters as follows: the second chapter presents a short overview of the post-modernism and how the post-modernism is applied in education, together with an example, in response to the question how the post-modernism influenced the education model. The third chapter will present some differences between the "true" engineering vs. pseudo-engineering through the lenses of the engineering definitions and features. The fourth chapter is dedicated to distinguishing the teaching model of production engineering at the Cathedra for Production Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Belgrade as an example of teaching "true" engineering, and in this sense representing the true engineering school, which is in fact the main hypothesis of this paper. The paper, as usually, finishes with conclusions and references.

2. POST-MODERN

2.1 Post-modern as the philosophical movement in the late 20th century

Post-modernism is the philosophical movement in the late 20th century, "born" as the reaction to the modernism,

> "characterized by broad skepticism, subjectivism, or relativism; a general suspicion of reason; and an acute sensitivity to the role of ideology in asserting and maintaining political and economic power … Postmodernists deny that there are aspects of reality that are objective; that there are statements about reality that are objectively true or false; that it is possible to have knowledge of such statements (objective knowledge); that it is possible for human beings to know some things with certainty; and that there ar could relativize everye objective, or absolute, moral values. Reality, knowledge, and value are constructed by discourses; hence they can vary with them. This means that the discourse of modern science, when considered apart from the evidential standards internal to it, has no greater purchase on the truth than do alternative perspectives" [3].

In effect, one of the main characteristic is "relativity". It means that you could relativize everything. Everything is true, or everything is false. So, what is in effect depends on the power of the discourse owner.

Virtually the main work that rigorously proving this in the area of semiotic analysis is the famous work (book) "Of Grammatology", by Jacques Derrida in 1967 [4], by which the concept of "*deconstruction*" was introduced. The concept of deconstruction originated the whole movement of *deconstructivism* influencing a number of areas other the philosophy, such as art, architecture, literature, music. (Although Jacques Derrida is considered as a major figure of post-modern philosophy he was rejecting labelling of his work as post-structuralist, or post-modernist.)

The first use of the term "post-modern" was by Jean-François Lyotard in his work "The Postmodern

Condition: A Report on Knowledge" in 1979 [5]. In the chapter "Appendix: Answering the Question: What Is Postmodernism" he wrote:

> "What, then, is the postmodern? … It is undoubtedly a part of the modern. All that has been received, if only yesterday (*modo*, *modo*, Petronius used to say); must be suspected. … The postmodern would be that which, in the modern, puts forward the unpresentable in presentation itself; that which denies itself … A postmodern artist or writer is in the position of a philosopher: the texts he writes, the work he produces are not in principle governed by preestablished rules, and they cannot be judged according to a determining judgement, by applying familiar categories to the text or to the work. Those rules and categories are what the work of art itself is looking for. The artist and the writer , then, are working without rules in order to formulate the rules of *what will have been done*. … Post modern would have to be understood according to the paradox of the future (*post*) anterior (*modo*)."

He also characterized "Postmodern Science as the Search for Instabilities".

It is also necessary to say that the post-modern developed in many directions generating many unprecedented concepts, e.g. post-truth, post-democracy, post-humanism, post-reality, and we could add, post-*X* (where "*X*" means "everything", i.e. everything could be developed in the mode of "post-", including, science, technology, and in our case, engineering, and in particular the manufacturing/production engineering …)

E.g. "post-truth", by Oxford Learner's Dictionaries is defined as "relating to circumstances in which people respond more to feelings and beliefs than to facts; [use] In this era of post-truth politics, it's easy to cherry-pick data and reach any conclusion you like" [6] (see also [7]). In 2016, the Oxford English Dictionary declared 'post-truth' was its 'Word of the Year'.

"Post-humanism" means the direction of "medical, or bio-technological, interventions substituting and upgrading our organs, by biological or nob-biological means, that includes e.g. uploading software in the brains, creating cyborgs, but also transcending it doing 'even better by eliminating the human body entirely and uploading minds, creating a whole-brain emulation in software. Such an upload can live in a virtual reality or be embodied in a robot capable of walking, flying, swimming, space-faring or anything else allowed by the laws of physics, unencumbered by such everyday concerns as death or limited cognitive resources' [8]. This direction are called *transhumanism*, and *posthumanism*, where *transhumanism* is an intermediate phase towards the *posthumanism*" [9].

By some authors, the "post-humanism" is related to Industry 4.0 as one of its ultimate goal, leading to a new totalitarianism.

So, is post-modern positive or negative? There is a great many critiques of the post-modern, clearly denoting it as "negative".

The critiques goes to both directions: rejecting the post-modern at all as a nonsense, and to the opposite direction such as defining the post-post-modern(ism).

Our position is that it is not negative by itself, it is positive!, at least as it represent a positive result in taught potentials and rules, i.e. representing the positive intellectual result, and as well at least providing us with the instruments for uncovering manipulations and impositions, conditioning, by the power, and, very important, freeing us for unbounded creativity. In this sense it could be considered as *a condition for sustainabililty*.

2.2 Post-modern in education

Of course, education couldn't "escape" the post-modern.

There is a great volume of literature on post-modern education. We will here just refer to two sources [10, 11] that we think represent well the fundamental aspects, or nature, of the post-modern education. For Serbian readers, [11] presents a comprehensive review of the post-modern context for education in Serbian.

Wright, A. in [10] presented a detailed analysis of the post-modern view on education. He wrote:

> "It is clear, from a post-modern perspective at least, that curriculum construction and selection, when carried out with reference to the various academic disciplines, can no longer claim justification on the grounds that the resulting pedagogy provides students with access to objective knowledge about themselves and the world they inhabit. On the contrary, knowledge based programmes of learning constitute nothing more than a series of artificial constructions of reality, construction whose legitimacy rests entirely on the prior decision of those responsible for selecting from a relativistic pool of conventional knowledge. Since knowledge is socially constructed its place in the curriculum is not due to its inherent truth, but to the arbitrary authority of those with the power to make decisions as to what should count as knowledge for our children. Hence, despite the outward appearance of freedom, modern knowledge-based education is viewed by its post-modern critics as at best benignly paternalistic, at worst authoritarian and dictatorial."

What are the consequence for practise of this view ? E.g. in [10] is further written: "For the post-modern educator the suggestion that children possess an essential nature which education has a responsibility to cultivate and nurture constitutes yet another modern meta-narrative ripe for deconstruction.",

and, inevitable related to the liberal politics, i.e. to the neo-liberal politics today: "Schooling becomes a means of preserving social harmony in a pluralistic society through the regulation, surveillance and policing of children's adherence to the non-negotiable dogmas of liberalism. Intolerance of those who break the rules - … - engenders a political correctness that demands worship at the altar of liberalism, and subjects those who choose not to do so to corrective form of education. The freedom esposed by liberal education is no more than the freedom to be liberal, and the principle of tolerance is extended only to those willing to adopt liberal norms and values." (ibid.)

One of the consequences of the post-modern approach, that, we believe, virtually all teacher have already experienced, is that

> "University teachers committed to the ideals of post-modernity find themselves – in some institutions at least – relatively free to construct courses on the basis of the perceived needs and interests of potential students, rather than on the basis of the integrity of their specialist subject disciplines. The resulting synergy between post-modern ideology and the market forces of consumer capitalism establishes an economy in which universities may be tempted to 'transform themselves, or allow, themselves to be transformed, into either instrumental agencies for training potential employees in transferable skills or environments for the exploration of alternative lifestyles for virtual sociocultural realities' (Filmer 1997: 57) … In our post-modern world 'graduates have to be more "flexible" in their attitudes towards work and more "adaptive" in their behaviour in the labour market' (Brown and Scase 1997: 86). Since the complexity and fluidity of the job market demand a high degree of flexibility, students should attend university with the basic aim of establishing a portfolio of transferable skills. Universities must seek to create 'charismatic' rather than 'bureaucratic' personalities … In doing so, it is important to recognise that such images do not directly represent the world, but are simply constructs that flow from a variety of discursive practices." (ibid.).

Obviously, there is a question, what is positive/negative in the post-modern view on education? similarly as questioned for the post-modern in general referred above. Besides the exclusive positions, i.e. full acceptance and adherence to the post-modern education paradigm, and total rejection, there is "hybrid" approach that combines elements from both modernist and post-modernist paradigm.

For example, Aronowitz S. and Giroux H. A. in their book "*Postmodern education: Politics, culture, and social criticism*" [12] promoted the so-called "Border Pedagogy" as a form of critical education rejecting "a straight choice between modern or post-modern approaches to education, electing instead to develop a rich notion of critical education by drawing on the best insights of both traditions" [10].

2.3 Social Network based Edication (SNE): An example of pedagogical methodology with post-modern features

The author of this paper, together with his collaborators, has developed an original pedagogical model named *Social Network based Education* (SNE). SNE is the model that incorporate a number f post-modern features.

SNE is not based on the use of social networks, as the name suggests, although social network tools could be used in its implementation.

SNE behaves as a social network, making possible use of the social network theory and analysis. I.e. the organization of the education process follows the social network-based students' interactions processes [13], where "students and teachers are seen as participants that form a network, in which the network structure, communication, learning process and behaviour exhibit features of a social network" [14]. SNE development and implementation is inspired by emergent disciplines such as: chaos and complexity management [15], complex networks [16], and semiotics [17].

SNE has been applied in engineering education, for effective learning of the Industry 4.0 skills [18]. SNE was originally developed with characteristics that belongs to the Education 3.0, and it could be called as a "manifesto" of Education 3.0 [19].

Concerning the post-modern features of SNE, one of the most important is a high degree of *freedom to choose*. The students are allowed to establish freely their own ties among themselves and with teachers, meaning that they can choose *what*, *how* and *when* to learn and work, as well *with whom* they collaborate [20].

Another important features are *co-creation of learning materials* [21] and *experiential learning* [20],

independently of the particular Curricula Unit's program.

Concerning the experiential learning, in [10] it is referred as: "To be a citizen of post-modernity is to learn to experience the world in new and different ways by engaging with, and immersing oneself in, its cultural images … Experiential learning, due to its celebration of diversity and respect for unique and ever-changing identities of individual students, provides an appropriate means of achieving this end.".

It is necessary to say that SNE is not applied as a pure post-modern education model. In fact, the teachers impose a number of rules not to allow totally free choices. E.g. the teacher define the tasks types, in order to assure the quality of the tasks in the context of "true" engineering – see below what does it mean "true" engineering tasks (problems). Thus, SNE is a kind of hybrid methodology, with similar "philosophy" as the "border pedagogy" referred above.

3. ENGINEERING VS, PSEUDO-ENGINEERING

This chapter is based on the discussion presented in [1] and [2].

3.1 A review of Engineering definitions, and Design

An analysis of the Engineering and Design definitions could start from the etymology of the terms.

Concerning the term "engineering", it is related to "genius" and "engine", both with the origin from Latin *inganno* (deceive), *ingenium* (a man of genius, a genius). Also, in Old French *engin* (skill, wit, cleverness, also a trick, deceit, stratagem). The terms "engineer" and "engineering" are generated using the suffixes *-er* (person who) and *-ing* (work done by, the function of). Used firstly for military purposes, with the renaissance "nonmilitary engineers were called civilian engineers, which later became shortened to civil engineers" [22].

Concerning the Design, "In the English language, the word "design" is both a noun and a verb, a situation that is particularly characteristic of that language. As a noun, it can mean, a "purpose," "plan," "intention," "goal," "malicious intent," "plot," "form," or "fundamental structure." … The word is derived from the Latin word "*signum*" ["*sign*" in English and "*Zeichen*" in German]. "*Signum*" and "*Zeichen*" have the same ancient root. So, etymologically, "design" means to "draw a sign"" [23]. By [24]: "Etymologically, the verb "design" is derived from the prefix *de* and the Latin verb *signare*, which means to mark, mark out, or sign. The prefix *de* is used not in the derogatory sense of opposition or reversal, but in the constructive sense of derivation, deduction, or inference."

The word "design" as a verb implies an action, and as a noun it implies the sign. "Design is simultaneously the action (preceding) and the sign (consequential)" [1].

Concerning the relation of Engineering and Design, by "perennial" definitions of engineering, design is part of engineering. Two examples are selected, one as early as from 1928, and the second one from nowadays:

> (1928) "The field of engineering is divided into several branches, among which are architectural, civil, and electrical engineering. In addition, each of these is characterized by a variety of functions which may be classed as design, manufacturing, construction, sales, operation, administration, and research" [25].
> (2021) "Industrial engineering is the field of engineering concerned with the design, analysis, and operation of systems that range from a single piece of equipment to large businesses" [22].
> (A few more definitions from literature are presented in [1].)

It is interesting the definition of engineering promoted by The Johns Hopkins University, stated that it is: invention, measurement and estimation, approximation, modeling and simulation, communication, politics, finance, and art [26] (cited in [1] as well), omiting to refer explicitly to the design. It could be concluded that the design is implicitly there, because in the same text responding to the question "how do you learn engineering?" it is written: "By doing. By solving problems that involve more than one technical component and have no "text-book" solutions" [26], which considered a description of design.

In these definitions it is obvious that the design is considered as a part of engineering and that engineering includes other concepts/functions/processes, besides design, such as "manufacturing", "sales", "operation", "administration", "maintenance", "management", "marketing", "support", "installation", etc. By our opinion, this is a kind of falsification of the true nature of engineering. "The referred concepts/functions/processes are not engineering, but Design of these concepts/functions/processes is engineering." [1].

Other definitions of engineering focusing on design as essential characteristics of engineering could be found, although very rarely. E.g.:

"Basically, "engineering" means "creative design," if the term is used in its broadest sense" [27].

That is, "Design is about creativity, subjectivity, communication, prescriptive, context, rationality, imagination, novelty, innovation, coherence, nexus, conceptual, ambiguity, ideas, genesis, emergence, function, natural, dialogue, creation, art, poetry, distinction, incorporeal, conception, reflectivity, invention, plan, modeling, an argument, intuition, system, cultural option, order, unity, synthesis, construction, rhetorical, persuasive, exploration, opportunity, abduction, solution, representation" [1].

3.2 Engineering as a sign making (*poiesis*, *ποίησις*) (1)

The study of sign is called semiotics, or semiology. Semiotics, for many is unknown, and for many is unrelated to engineering and related only to linguistics. However, the relationship of a sign with engineering and design is not only from the etymology of the term "de-sign" and the "de-sign" relationship with engineering but also form the definition of a sign independently of engineering and design. One of two founders of semiotics, Peirce defined the sign in [28] as: "A sign, or representamen, is something which stands to somebody for something in some respect or capacity". In [1] it is stated that although this definition is abstract, it clearly shows that any human artefact is a sign. In this sense, if there is a creative action, there is a sign.

Considering the semiotic framework shown in Figure 1, which is structured on six levels, the understanding of engineering is usually only in the three lower layers, "where the physical properties of the sign are determined, organized, structured, and used" [1]. The "upper layers in the semiotic framework are concerned with the use of signs, how signs function in communicating meanings and intentions, and what the social consequences are of the use of signs." [29].

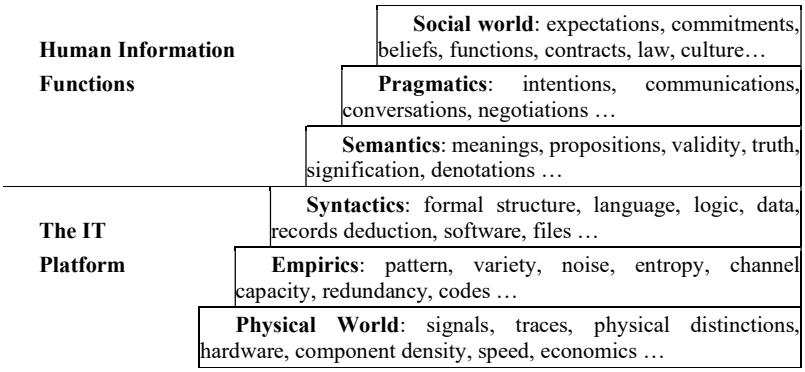


Figure 1. *The semiotic framework [29] (after [1]).*

To achieve creative action, i.e. to achieve creative design, designers must be creators, makers, inventors of signs, ποιετές (poets, makers), [30].Consequently, without Design there is no engineering, but, the Engineering must be Design.

Concerning the education of engineering, considering that engineering faces more and more increasingly complex problems, its learning should not only focus on analysis but on expanding knowledge of the fundamental sciences to facilitate creative design. The engineering education must consider the different needs of the human being who will interpret it, and this adaptation process requires a good Design [1].

(Long time ago, already in 1935, these needs were recognised, by [31] "engineering is a living thing".)

Engineering schools must encourage students "to undertake, in their thesis work, the solution of engineering problems that require creative Design. [...] that it truly be education for innovation" [32]. Design is the key to engineering education [1].

It could be said: Design is synthesis (of the sign), and Design is sign and sign creation. Engineering is Design.

3.3 Engineering as inverse problems solving

One of the first fundamental lessons that the author of this paper has received **50 year ago!**, as the student of the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, was that the **"true" engineering problems are "inverse", or "indirect, problems**.

What are "inverse", or "indirect" problems?

The following text, in the box below, with description of what are these problems is totally compiled from [2]:

After [2], with minor adaptations:

Inverse problems arise whenever one searches for causes of observed effects [2]

"We call two problems inverses of one another if the formulation of each involves all or part of the solution of the other. Often, for historical reasons, one of the two problems has been studied extensively for some time, while the other is newer and not so well understood. In such cases, the former is called the direct problem, while the latter is called the inverse problem." [33].

It means that one of these two classes of problems is called *forward* problems and another *inverse* problems. These are described as follows:

A model means the parametrization of an object. The physics of the object determines which data corresponds to a given model m. "The problem of computing the model response (synthetic "data") given a model is called the *forward problem*. The corresponding data reside in a mathematical space that is called *data space*. In many applications, one records the data, and the goal is to find the corresponding model. The task is called the *inverse problem*" [34].

It is formulated as follows:

By the simplest description, "forward" ("direct") problem could be described as inference, or computation, or prediction, of data d from model m, while "inverse" ("indirect") problem would be inference, or synthesis, of the model m parameters from data d, Figure 2. (after [35]).

In reality, the inverse problem is more difficult to resolve for a number of reasons. The more realistic scheme is given in Figure 3. [36]. E.g., the observed (measured) data are subject to noise, Figure 2. Also, "different values of the model parameters may be consistent with the data, (…), and discovering the values of the model parameters may require the exploration of a huge parameter space" [37].

Due to the difficulties referred, in reality, we infer only an estimated model $\hat{m}$, that includes uncertainty, creating a new "appraisal" problem. In other words:

Inversion = Estimation + Appraisal

The "noise" in observable data, plus the "appraisal" problem, could be also related to the synthesis problem types I, II, and III by K. Ueda. Ueda formulated the synthesis problem types I, II, and III by the degree of incompleteness of information, i.e. the problem of type I is a problem with complete description, type II is the problem with incomplete environment description, and type III is the problem with incomplete environment description and incomplete specification. While the type I problem does not implies necessarily the "appraisal" problem, types II and III imply it.

The "synthesis" problem is just a synonym for the "inverse" problem.

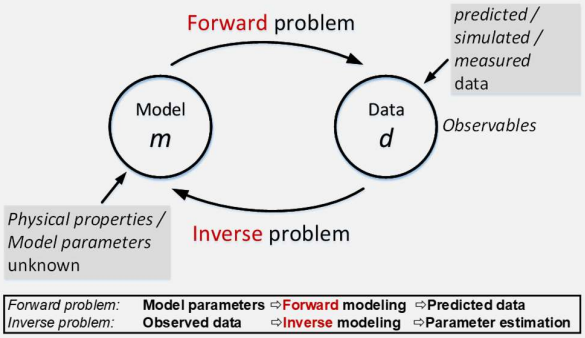


Figure. 2. *Forward , or direct, problem and inverse, or, indirect, problem (after [35])*

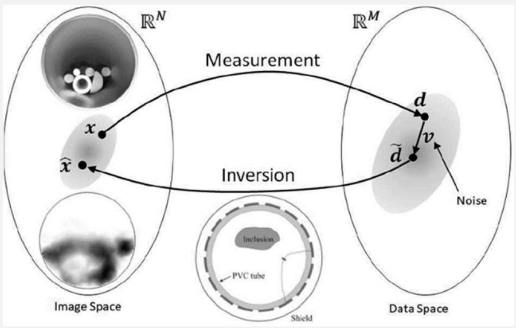


Figure 3. *Forward , or direct, problem and inverse, or, indirect, problem [36]*

Concerning the inverse problem sign in the context of mechanical/manufacturing engineering, introducing the formal notations, the inverse problem could be formalized as follows:

If the *forward* problem is formulated as:

$$\text{model } \{\text{model parameters } m, \text{ sources } s\} \rightarrow \text{data } d$$
$$d = A_s(m)$$

where A_s is the *forward problem operator* depending on a source *s*,

then, the *inverse* problem is formulated as:

$$\{\text{data } d, \text{ sources } s\} \rightarrow \text{model } \{\text{model parameters } m\}$$
$$m = A_s^{-1}(d)$$

or

$$\{\text{data } d\} \rightarrow \text{model } \{\text{model parameters } m, \text{ sources } s\}$$
$$m = A^{-1}(d)$$

where A_s^{-1} and $A^{-1}$are *inverse problem operators* depending on a source *s* [38].

The above algebraic notation is instantiated in various forms depending of the engineering area (we are here concerned more with engineering than with other areas) and the problem considered. It is important to refer that the learning form examples is also considered as one of the approaches to inverse problems solution, especially considering the coming applications of Artificial Intelligence (AI).

For formulation in logic, see e.g. [39]:

"In general, forward problems go from source to sink, while inverse problems go from sink to source. When a field has been logically ordered, the forward/inverse distinction can be restated as follows.

Forward: Given assumptions A, find their logical consequences T: (?T) ("A ⇒ T" ∈ Logic)

Inverse: Find the premises (hypotheses and definitions) that entail the given theorem: (?A)("A ⇒ T" ∈ Logic)".

Two of the inverse problems that virtually each one engineering student worldwide is taught already at the first year of studies, are matrix inversion and differentiation.

Using the "differentiation" symbols, the two types of problems could be described as follows:

The "forward" problem is formulated as follows:

If the object (product, system) model *F(x)* is given (known), then the function of its characteristic *f(x)* is "derived" from *F(x)*, in notation:

$$F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} = f(x)$$

This is co-called "*analysis*".

The "inverse" problem is formulated as follows:

If we have a given characteristic *f(x)*, what is the "model" *F(x)* that satisfies the required property ?, i.e. for given characteristic *f(x)*, the "primitive" "model" ("primitive function") *F(x)* "calculation" is formulated as:

$$F(x) = \int f(x)dx + C$$

This is co-called "*synthesis*"[2]. In fact, that "C" is implying the "appraisal problem".

[2] The symbol "∫" for integral is the stylized "S" of "sum", following the definition of the integral. Curiously, this "∫", i.e. "S", is also the first letter, and the symbol, of the term "synthesis".

It is said that the first (or at least one of the first) inverse problem, in the modern science, was solved by I. Newton who solved the problem in dynamics of mechanical systems of "discovering forces making planets move in accordance with Kepler's laws". Of course, it was after discovery of the connection between integration and differentiation, by I. Newton and G. Leibniz at the end of the 17th century. However, the inverse problems were known much earlier, already in ancient Greece, although without the (mathematical) instruments of the modern science. E.g. Plato's "cave" is the famous allegory on possibility to conclude about reality based on images (shadows on the wall of the cave). Another famous example is Eratosthenes's calculation of the Earth's circumference about 2,5 centuries BC based on measurements of the angles of the shadows by the sun on a vertical rod in two cities along the same meridian.

For mechanical and manufacturing engineers two typical tasks and the two types of problems associated could be formulated as follows:

Example 1 – product:

Forward problem:

1.1. Let a straight beam *B*, of length *l*. with the specified cross-section dimensions and material, is given. Calculate the deflection *y* of the beam loaded by the transverse force *F*, Figure 4.

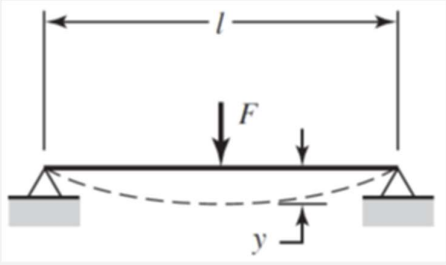


Figure 4. Deflection *y* of a straight beam B, of length *l*, loaded by the transverse force *F* [40].

The solution of this problem is typically an ***analysis*** problem, whose solution is obtained by ***derivation***, i.e. ***differentiation***. Symbolically (not rigorously by the theory of mechanics), to find the deflection *y* of the beam, we have to differentiate the beam model *B*:

$$B'(y) = \frac{dB(y)}{dy} = f(y)$$

This is an "***easy***" problem.

Inverse problem:

1.2. Find the cross-section dimensions of the beam *B*, of length *l*. loaded by the transverse force *F*, under the condition the deflection will be not >1 mm

The solution of this problem is a typical ***synthesis***, i.e. ***integration***, problem, whose solution is obtained by finding the primitive function (integral) of the deflection function *f(y)*. Symbolically (not rigorously by the theory of mechanics):

$$B(y) = \int f(y)dy + C$$

This is a "**difficult**" problem.

As illustrative examples of applications and meaning of the "inverse" problem solution design of "beams" of bridges could be taken. In the past times, e.g. medieval and earlier, when the humanity still didn't have the mathematical tools, bridges were built empirically, in fact by the method "trial and error". An example of this type of "engineering" is given on the Figure 5.a, which could be easily evaluated as over dimensioned ("to be safe") (despite there are impressive examples of pre-modern science bridges designs). The example of the bridge on Figure 5.b, is surely only possible by the capacity to resolve the "inverse" mechanical problems. It is obvious that no "trial and error" strategy is even not thinkable.

a) *b)*

Figure 5. *Examples of designs without and with "inverse" problem solution capability: a) The Roman bridge over the Pedroches stream in Cordoba, Spain (https://followinghadrianphotography.com/2017/04/02/roman-bridges/); b) a modern bridge: Cable-Stayed type of bridge. Millau, France (https://blog.enerpac.com/7-types-of-bridges-every-engineer-should-know-about/)*

Example 2 – Manufacturing System (MS):

Forward problem:

2.1. Let a manufacturing system model *MS* is given. Find which is the throughput time *x* for the given set of jobs.

The solution of this problem is typical an *analysis* problem as well, whose solution is obtained by *derivation*, i.e. *differentiation*. Symbolically (not rigorously by the theory of mechanics), to find the throughput time *x* of the given model *MS*, we have to differentiate the beam model *MS*:

$$MS'(y) = \frac{dMS(x)}{dx} = f(x)$$

This is an "*easy*" problem.

Inverse problem:

2.2. Find the manufacturing system model *MS*, to satisfy the required throughput time *x* for the for the given set of jobs.

The solution of this problem is a typical *synthesis*, i.e. *integration*, problem, whose solution is obtained by finding the primitive function (integral) of the throughput time function *f(x)*. Symbolically (not rigorously by the theory of mechanics):

$$MS(x) = \int f(x)dx \ + C$$

This is a "difficult" problem.

3.4 Hopotheses on Engineering and Design relationship: Engineering is Design and only Design

There could be different hypothesis on relationship between the Engineering and Design, Figure 6. However, based on the presented in the previous section, two hypotheses are virtually the most relevant in the context of our discussion. These are: 1) Design is Engineering (i.e. Design is a part of Engineering, implying Engineering includes other disciplines, or scientific/technical areas, as well), and 2) Engineering is a part of Design (i.e. the entire Engineering is "Design and only Design", there is no engineering if not design, and implying there are areas of Design that are not Engineering, e.g. styling, artistic design.)

Based on the discussion in previous sections, it is easy to conclude on the truth value on the two relevant hypotheses:

1) Design is a part of Engineering
   i.e.
   $\{\text{Design}\} \subset \{\text{Engineering}\} \rightarrow \text{F}$ (FALSE)

2) Engineering is a part of Design
i.e.
{Design} ⊃ {Engineering} → T (TRUE)

The consequence is that the "**true engineering**" is that that perform design exclusively.

On contrary, the engineering that perform activities/processes/functions without design could be called "**pseudo-engineering**".

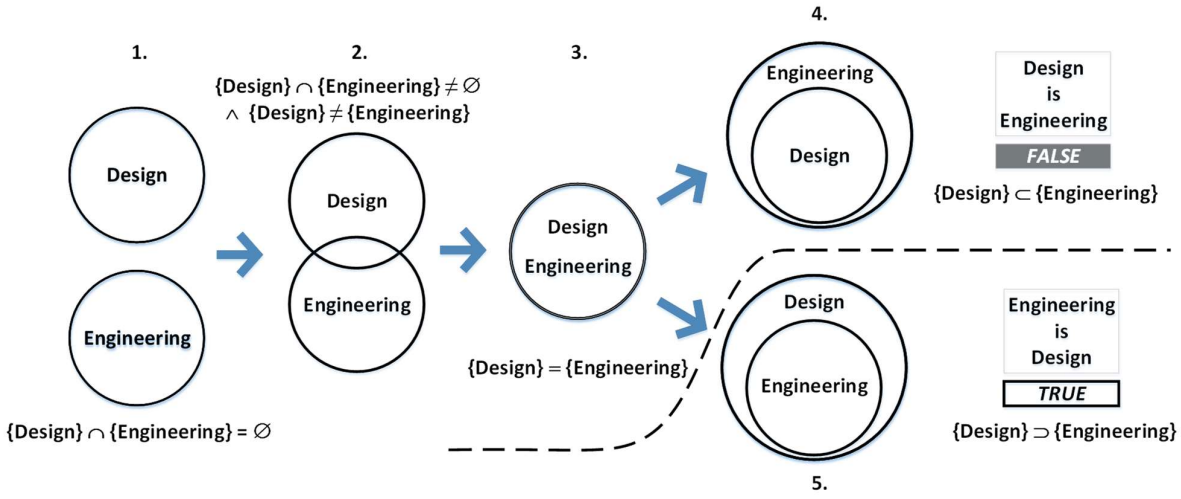


Figure 6. *Design and Engineering relationship hypothesis [1]*

3.5 Engineering vs. Pseudo-Engineering

In [39] a list of 31 pairs of examples of forward and inverse problems (concepts/functions/ processes) is presented, some of them belonging, or related to, engineering and design, and some of them belonging, or related, to non-engineering.

Table 1. presents a selection of 12 entries from [39 15] which are more related to mechanical engineering and manufacturing/production (systems and organizations) engineering.

Table 1. Examples of forward and inverse problems [39] (a selection) (after [2])

Forward	***Inverse***
Accounting	Planning
Analysis	Synthesis
Auscultation	Diagnosis
Delivering	Ordering
Description	Design
Discovery	Invention
Executing a plan	Planning
Following a rule	Devising a rule
Prediction	Explanation
Reading	Writing
Taking orders	Issuing orders
Using	Organizing

Inverse problems are present in virtually all other areas than mathematics and physics, such as medicine, tomography, biology, astronomy, economy, business, sociology, etc. It is interesting that we found their reference in human sciences as well, e.g. "social engineering" is probably the most known, but also "story engineering" (i.e. engineering of writing literature texts). Of course, we are interesting here in mechanical and manufacturing/production engineering.

As concerning the concepts/functions/processes referred as constituents of engineering, by the engineering

definitions above (and referred in [1]), other than design, we consider that these are not engineering by themselves, but *Design* of these concepts/functions/processes *is* engineering, Table 2.

Table 2. Concepts/functions/processes in the context of engineering (after [2])

PSEUDO-ENGINEERING	***ENGINEERING***
Analysis, application	***Design, Synthesis***
Forward problem	***Inverse problem***
manufacturing	Design of manufacturing
sales	Design of sales (models)
operation	Design of operation
administration	Design of administration (models)
maintenance	Design of maintenance
management	Design of management (models)
marketing	Design of marketing (models)
support	Design of support (models)
installation	Design of installation
control	Design of control
...	…

Concerning the statement that the *forward* problems do not represent the "true" engineering, yes, the "true" engineering also needs them, i.e. the "true" engineering also needs analysis, control, installation, etc., but as lateral and auxiliary problems, "within the overall forth and back, "zig-zag", of processes to resolve the true engineering and design problems" [2].

(Similarly as "when you paint you have to wash the brushes necessarily, but washing the brushes does not mean painting" [2]).

As further said in [2], "The association of the words Design and engineering with synthesis denotes the final achievement of results in creative processes. Creativity is synthesis, while analysis is the root of scientific knowledge. Integration, essential to finding a solution to a problem, does not preclude a mandatory prior analysis of the problem. Like engineering, the Design process also depends on logical and rational analysis [41]. Therefore, Design is also a science." However, analysis that is fundamental to science does not fulfil the purpose of engineering and design. In that sense, engineering schools skilfully train for computation, which is indisputably helpful, but they don't tell us how to create a solution. Like the Design, engineering is a synthesis. Perhaps because it's hard to teach synthesis, "engineering schools often don't emphasize it enough" [42]."

It is interesting that usually, by many researchers even in academy, and, to be honest, by some schools of epistemology, there is a difference between the concepts "science" and "engineering", denoting that "engineering" is not science but only application. This position emanates from the cited references. However, we strongly disagree with this position. Our position is that engineering is also science, considering that the typical engineering task is resolving the *inverse* problems and when follows scientific methodology. That is, we should talk about the *engineering sciences* and *natural sciences*. While the *analysis* is virtually fundamental to *natural* sciences, as cited above, the *synthesis* is fundamental for *engineering* sciences.

3.6 Engineering as a sign making (*poiesis*, *ποίησις*) (2)

By [2], and as stated above in this paper, "the designer is an enabler, and, therefore, design creates a sign. Engineering, as belonging to Design, must create a sign as well. In other words, the signs to be created by engineering have forms of a drawing, formula or a formal text (program). Design, as the "super"-concept in relation to engineering, could imply responsibility or not, therefore the design drawing, formula or a formal text (program), could imply responsibility or not (in the cases) when design is not engineering.

However, when we refer to the domain of Design that is Engineering, then Design implies responsibility. That is, Engineering implies responsibility. That is, the engineering sign, that is, engineering drawing, formula or a formal text (program), implies responsibility.

4. PRODUCTION ENGINEERING TEACHING AT THE CATHEDRA OD PRODUCTION ENGINEERING IN BELGRADE THROUGH THE LENSES OF THE CRITERIA FOR "TRUE" ENGINEERING VS PSEUDO-ENGINEERING

The previous two chapters' purpose was to provide the basis for evaluation of the teaching model applied at the Cathedra of Production Engineering in Belgrade.

Obviously, based on the previous discussion and position, the main criteria is how the Cathedra is teaching and training students in Design, obviously in Design of Manufacturing/Production (systems and organizations) Engineering.

The evaluation methodology consists of identifying how many of the technical subjects have implemented teaching the (manufacturing/production) engineering based on design, in the context of the above discussion, and evaluating if it is the dominant model or not, in terms of teaching the "true" engineering or pseudo-engineering.

The methodology could be implemented through a quantitative evaluation (in this case counting). However, considering the nature of this paper and the occasion on which it is presented, the methodology will apply a kind of a "case study", i.e. a kind of descriptive approach.

This, the adoption of the descriptive approach, is because the author of this paper believes that his testimony is well informed due to the history of his professional trajectory.

The author of this paper was one of the students of the course on Production Engineering provided and led by the Cathedra of Production Engineering in Belgrade in 70's. After the graduation, the author started to work in industry as a designer of tools and fixtures. However, at that time an "explosion" of computerization, combined with attractiveness for research, made that after about three years, the author of this paper moved to academia, concretely to the Cathedra of Production Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade, starting on the position of teaching assistant. After finishing the Master of Science and Doctoral studies he was invited to the position of Assistent Professor at the Universidade do Minho in Portugal, where he moved from the beginning of 1993. where he continued the carrier until now, at the moment being at the position of Full Professor, in the department of Industrial Engineering all the time working in the area of manufacturing/production engineering (although industrial engineering implies other areas as well). It means that the author of this paper has direct experience, about 20 years long, from teaching engineering model applied at the Faculty of Mechanical Engineering and at the Cathedra of Production Engineering, including experience both as the student and as a teacher, and after that period, it is now 30 years of teaching experience of Industrial Engineering at the Universidade do Minho, Portugal, participating in numerous designs (constructions) and implementations of curricula plans and programmes, and their benchmarking with a number of courses worldwide.

Concerning the engineering teaching model at the Faculty of Mechanical Engineering, and in particular teaching manufacturing/production engineering at the Cathedra of Production Engineering, which is our main theme, it could be described as a traditional model totally "marked" by, or totally "focused" on Design.

Design was the main criteria of the students' success. To be capable to design devices, machines, processes and systems. The training on design was perpetuated along the all five years of the course in virtually all technical (engineering) subject, nowadays the terms used for subjects is "curricula unit").

The design focused teaching has started already from the first year, at one of the first technical (engineering) subjects on the first year: the subject of "Technical Drawing" (or "Engineering Graphics" ?). The task was design of a device implying the solution of an "inverse" problem, the simple one but of the "inverse" nature, and development of the associated specification through rigorous technical drawings.

This design based teaching model continued successively in a consistent way for all subsequent technical subjects in the upcoming semesters and years. In parallel, the accompanying, so called "theoretical", subjects of mathematics and mechanics, were instrumental with the objective to prepare the students for resolving the "inverse" problems, which were virtually the "pick" of all "theoretical" subjects.

On the later years, fourth and fifth, when the specialized subjects were taught, on the course of Manufacturing/Production engineering, the design tasks were virtually the main task for the students in the majority of the subjects. I would like to refer specifically to the subjects of "Tools and fixtures" and "Machine tools". By my opinion, the highest level, or in other words, the "top", or "pick", of the students' all years training was the task of designing a Machining centre.

(We will not discuss now the work methodology that had to be applied, which is surely an important issue and the subject of another paper, especially in the context of todays "innovative" pedagogical methodologies

under development and implementations by some groups in Europe, which were applied at the Cathedra of Production Engineering already in 70's and 80's).

All design tasks required a solution of an inverse problem (for given requirements that the design should satisfy) and a rigorous assembly and component technical drawings – all the elements of the above specified features of the "true" engineering.

It is interesting that the terms used at the time for design and designer were "*construction*" ("*konstrukcija*" in serb.) and "*constructor*" ("*konstruktor*" in serb.). In fact, socially, on of the most prestigious jobs and the attributes to the workers was "*konstrukcija*" and to be a("*konstruktor*" (of machines, tools, etc.).

In the context of the above discussion, it could be said that Faculty of Mechanical Engineering, and in particular the Cathedra of Production Engineering, in Belgrade, were the "strongholds" of "classical", pre-post-modern engineering, (it could be said of "modern" instead of "pre- post-modern" engineering, but the syntagm of "pre- post-modern" was used to stress the difference from the actual post-modern paradigm of engineering teaching).

In that terms, I would like to distinguish of the value of teaching "true" engineering at the Cathedra of Production Engineering in Belgrade, on the occasion, the jubilee, of 50 years of formal establishment of the Cathedra.

5. CONCLUSIONS

It is the fact that Design is not taught adequately in engineering schools. Virtually the main factor to this situation is uncritical adoption of post-modernism (in education). The consequences are that there is less and less "true" engineering education, and consequently less and less engineers capable to respond to the nowadays requirements for advanced products and production.

The challenge is to resist to uncritical adherence to post-modern and (neo-)liberal policies, despite their values and attractiveness, especially taken into account the freedom of choice (in many dimensions) by both teachers and students as one of the main features of the post-modern education. It is not the question to resist to innovations in education philosophy and technology, but the question is simply to assure development and teaching of the rigorous knowledge on engineering science without which modern and complex devices (machine tools, robots, tools, etc.) and systems are simply not possible to design, produce and exploit. Otherwise we could not talk about engineering but about something quite different. This approach could be acceptable, but then, who will design?

In this paper we presented the view on what are the features of the "true" engineering education that should be preserved independently of application of other particular post-modern pedagogical technology models, such as e.g. collaborative, blended, industry mentoring, Learning Factory, non-compulsory, etc., implying that probably the model to be applied is a kind of hybrid model, as referred above.

In other words, it is necessary to continue with the "traditional" elements of rigorous science and rigorous criteria for evaluation of learning achievements.

Engineering and Design imply responsibility, and both teachers and students have to assume it.

Finally, the paper's hypothesis is that the teaching modes at the Faculty of Mechanical Engineering, and in particular at the Cathedra of Production Engineering, in Belgrade, traditionally represent the "stronghold" of teaching "true" engineering, which is demonstrated descriptively, by the case study methodology comparing with the criteria for "true" engineering exposed above.

Based on the discussion presented, it is not difficult to infer what would be the final conclusion. Or the final message, especially to the younger generations of teachers and students:

The tradition must continue.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia within the R&D Units Project Scope: UIDB/00319/2020

6. REFERENCES

[1] Putnik, G. D., Putnik, Z., Pinheiro, P., & Alves, C. (2022). *Engineering is Design and only Design-Part I: The value of making a distinctive sign*. Procedia CIRP, 109, 678-683.

[2] Putnik, G. D., Putnik, Z., Pinheiro, P., & Alves, C. (2022). *Engineering is Design and only Design-Part II: Exploration through the inverse problem*. Procedia CIRP, 109, 684-689.

[3] Duignan, Brian (2009 - 2020) *Postmodernism*. (https://www.britannica.com/topic/postmodernism-philosophy). Britannica.com. Retrieved Sep 2022

[4] Derrida, Jacques (1997). *Of Grammatology*. The Johns Hopkins University Press. Baltimore.

[5] Lyotard, J.-F. (1979). *The Postmodern Condition: A Report on Knowledge*. Minneapolis:University of Minnesota Press

[6] Oxford Learner's Dictionaries (n.d.) *Post-truth*. https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/post-truth

[7] Putnik G. (2019) *Networked Production and Organizations: Driving and enabling production and organizations for future society in the 21st century*. Keynote lecture. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019

[8] Tegmark M. (2017) *Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence*. Alfred A. Knopf

[9] Putnik, G. D., Shah, V., Putnik, Z., & Ferreira, L. (2020). *Machine Learning in Cyber-Physical Systems and manufacturing singularity–it does not mean total automation, human is still in the centre: Part I– Manufacturing singularity and an intelligent machine architecture*. Journal of Machine Engineering, Vol. 20, No. 4, 161–184

[10] Wright, A. (2003). *Religion, education and post-modernity*. Routledge.

[11] Gojkov, G. (2006). *Didaktika i postmoderna*. VŠV, Vršac. (in Serbian)

[12] Aronowitz, S., Giroux, H. A. (1991). *Postmodern education: Politics, culture, and social criticism*. University Of Minnesota Press, Minneapolis • London.

[13] Putnik GD, Costa E, Alves C, Castro H, Varela MLR, Shah V. (2016) *Analysing the correlation between social network analysis measures and performance of students in social network-based engineering education*. International Journal of Technology and Design Education 2016; 26:3 p.413-437.

[14] Putnik GD, Alves C, Carvalho C, Sousa S, Varela MLR., Shah V, Castro H. (2015) *Social network-based education and learning factory as emergent forms of education and training: an application for quality managemen*t. Center for Quality 2015; p. 641-646.

[15] van Eijnatten FM, Putnik GD, Sluga A. (2007) *Chaordic systems thinking for novelty in contemporary manufacturing*. CIRP Annals-Manufacturing Technology 2007; 56:1 p.447-450.

[16] Estrada E. (2011) *The structure of complex networks: theory and applications*. Oxford University Press; 2011.

[17] Putnik GD, Putnik Z. (2010) *A semiotic framework for manufacturing systems integration– Part I: Generative integration mode*l. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 2010; 23:8-9 p.691-709.

[18] Putnik GD, Alves C. (2022) *Social Network-based Education and Education 3.0: Application for education on Design and teaching of Industry 4.0 concepts*. Procedia CIRP 2022; 109 p.659-665.

[19] Putnik G, Carvalho C, Alves C. (2015) *Education 3.0 and Social Network-Based Education: An Implementation Framework and Experiment at the University of Minho for Education and Training in Quality Management*. Center for Quality 2015; p.675-680.

[20] Alves C, Putnik, GD. (2019) *Experiential Learning of CAD Systems Interoperability in Social Network-based Education*. Procedia CIRP; 2019, 84 p.209-214.

[21] Putnik GD, Alves C. (2019) *Learning material co-creation infrastructure in Social Network-based Education: An implementation model*. Procedia CIRP 2019, 84 p.215-218.

[22] Kosky PG, Balmer R, Keat W, Wise G. (2021) *Exploring engineering: an introduction to engineering and design*. 5th ed. London: Academic Press; 2021.

[23] Flusser V, Cullars J. (1995) *On the word design: An etymological essay*. Design Issues 1995;11(3):50–3

[24] Terzidis K. (2007) *The etymology of design: Pre-Socratic perspective*. Design Issues 2007;23(4):69–78.

[25] Sackett R L. (2007) *The engineer: his work and his education*. Boston: Ginn and Company; 1928.

[26] The Johns Hopkins University. *What is Engineering?* Imagine… 1999, 1999:3.

[27] Rathe AW, Gryna FM. (1969) *Applying Industrial Engineering to Management Problems*. New York: American Management Association; 1969.

[28] Peirce CS. (1955) *Logic as Semiotic: the theory of signs*. In: Buchler J, editor. Philosophical Writings of Peirce. New York: Dover Publications; 1955, p. 98–119.

[29] Liu K. (2000) *Semiotics in information systems engineering*. Cambridge: Cambridge University Press; 2000.
[30] Fischer HR. (2001) *Abductive reasoning as a way of worldmaking*. Foundations of science 2001;6(4):361–83.
[31] Society for the Promotion of Engineering Education. (1935) *Mechanical engineering*. The Journal of Engineering Education 1935, 1935:369–75.
[32] Simone DV de. (1968) *Education for innovation*. Oxford: Pergamon Press; 1968.
[33] Keller JB. (1976) *Inverse Problems*. The American Mathematical Monthly 1976;83(2):107–18.
[34] Scales JA, Snieder R. (2000) *The anatomy of inverse problems*. Geophysics 2000;65(6):1708–10.
[35] Dietrich M. The linear case. Barcelonnette; 2015
[36] Neumayer M, Suppan T, Bretterklieber T. (2019) *Statistical solution of inverse problems using a state reduction*. COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering 2019;38(5):1521–32.
[37] Tarantola A. (n.a.) *Inverse problem*. From MathWorld–A Wolfram Web Resource, created by Eric W. Weisstein. Available from: <https://mathworld.wolfram.com/InverseProblem.html>
[38] Zhdanov MS. (2002) *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Amsterdam: Elsevier; 2002.
[39] Bunge M. (2019) *Inverse Problems*. Foundations of science 2019;24(3):483–525.
[40] Budynas RG, Nisbett JK. (2011) *Shigley's mechanical engineering design*. 9th ed. New York: McGraw-Hill; 2011.
[41] Eggleston J. (1992) *Teaching design and technology*. Buckingham: Open University Press; 1992.
[42] Luecke F. (1994) *What is Engineering?* Optics and Photonics News 1994;5(11):22–7

Путник, Горан Д.

ШКОЛА ИНЖЕЊЕРСТВА НАСПРАМ ПСЕУДО-ИНЖЕЊЕРСТВА У ПОСТ-МОДЕРНОМ ВРЕМЕНУ: ПОВОДОМ 50-ТО ГОДИШЊИЦЕ КАТЕДРЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО У БЕОГРАДУ

Reyime: *Циљ овог рада је да се истакне вредност наставе машинства на Катедри за Производно Машинство у Београду поводом јубилеја 50 година од формалног оснивања Катедре у Београду. После увода, у другом поглављу је дат кратак преглед постмодернизма и како се постмодернизам примењује у образовању, заједно са примером, као одговор на питање како је постмодернизам утицао на модел образовања. Треће поглавље ће представити неке разлике између „правог“ инжењерства и псеудо-инжењерства кроз преглед инжењерских дефиниција и карактеристика. Четврто поглавље посвећено је истицању наставног модела производног машинства на Катедри за Производно Машинство Машинског Факултета Универзитета у Београду као пример наставе „правог” инжењерства, и у том смислу представљајући истинску школу инжењерства, што је заправо и главна теза овог рада.*

Ključne reči: *инжењерство, псеудоинжењерство, постмодернизам, техничка школа, катедра производног машинства у Београду*

Бабић, Б.[1)]

50 ГОДИНА КАТЕДРЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Резиме

Катедра за производно машинство студентима пружа квалитетно образовање и обучава будуће инжењере да одговоре на потребе индустрије. Катедра је успоставила везе са индустријом, организацијама за истраживање и развој и академским институцијама широм света.

Катедра себе види као носиоца имплементације нових технологија и техника у области производног машинства и образује студенте да буду технолошки и менаџерски обучени да одговоре на изазове отвореног тржишта у садашњој ери. Образовна мисија Катедре је да пружи широку базу за студенте који се припремају за технолошку и лидерску каријеру у области производње.

Кључне речи: Производно машинство, Високо образовање, Научно-истраживачка делатност.

1. ИСТОРИЈА ИНЖЕЊЕРСТВА И ПРОИЗВОДНОГ МАШИНСТВА У СРБИЈИ

Корени српске техничке цивилизације почињу још у доба Немањића. Зачеци инжењерства су у рударско-металуршким подухватима (Ново брдо), грађењу величанствених сакралних објеката средњевековне српске државе, изради текстила, ковању новца и оружја. Међутим, вишевековна турска окупација српских земаља зауставила је, поред осталог, настављање развоја инжењерства у Србији. Стога се може прихватити чињеница да долазак првих инжењера – странаца у Србију, као државних службеника („правителствени инџинири“), инж. Франца Јанкеа и инж. Франца барон Кордона, 1834/35. године, представља почетке инжењерства у обновљеном кнежевству Србији.[1]

Слика 1. Проф. инж. Тодор-Тоша Селесковић (1856-1901)
родоначелник производног машинства у Србији

[1)] проф. др Бојан Бабић, Универзитет у Београду, Машински факултет (bbabic@mas.bg.ac.rs),

Производно машинство има дугу историју у нашем високошколском образовању, која се протеже кроз три столећа. Трагајући за својим стручним коренима, претходне генерације наставника и сарадника Машинског факултета Универзитета у Београду, делатне у области производног машинства дошле су до чињенице да је родоначелник производног машинства у Србији инж. Тодор Селесковић, први српски конструктор алатних машина, машински инжењер по образовању, а политехник по тадашњој традицији и образовању. Иако у тадашњем предмету Механичка технологија централно место нису заузимала средства рада (машине алатке, алати и прибори) и технологија метало-прераде (процеси резања и деформисања), претходна делатност инж. Селесковића говори у прилог прихватању овог неуморног прегаоца као првог производног инжењера у Србији.[1] Тодор Тоша Селесковић, чији је отац био Чех, а мати Немица, одрастао је у Београду. „Желим да будем један од учесника у стасавању Србије и у њеним настојањима да се приближи Европи. Мој ујак је на мене трошио српски новац, и ја хоћу Србији да служим!“ [2].

Други по реду заслужан као утемељивач производног машинству у Србији је инж. Аћим Стевовић. Родио се у Котроману, Мокра Гора, Ужички округ, гимназију је учио у Ужицу и завршио у Београду. Као питомац Министарства грађевина отишао је на Техничку високу школу у Карлсруе, после три године студија на Техничком факултету у Београду. После дипломирања 1894. године, провео је три године на стручном усавршавању у фабрикама у Немачкој и Француској. Затим ради као инжењер Железничке радионице у Нишу, где је увео новине у одржавање локомотива и механизацију рада. Пројектовао је хидроелектричне централе на Ђетини и Нишави, а 1906. године изабран је за професора Техничког факултета Универзитета у Београду, где је предавао енциклопедију машинства, машине алатке и грађевинске машине, а после Првог светског рата – парне машине. Аутор је неколико патената и написа у стручним часописима. Иако је његова главна пажња била посвећена парним машинама и електро енергетици, важна је његова улога у увођењу алатних машина у високошколско образовање у Београду.

Слика 2. Проф. инж. Аћим С. Стевовић (1866-1957.),
други професор производног машинства у Србији

Александар И. Косицки је писац првог уџбеника из производног машинства. Инж. Александар И. Косицки (1880 – 1954), рођен је у Великије Луки (Псковска губернија) у царској Русији. Дипломирао је на Техничком институту у Петрограду 1909. године, потом је до 1919. године био асистент на Варшавском Политехничком институту и доцент Политехничког института у Кијеву. По доласку у Краљевину Срба, Хрвата и Словенаца био је ангажован као контрактуални наставник на Техничком факултету Универзитета у Београду, а од 1923. године предавао је алатне машине, поред мотора с унутрашњим сагоревањем, парних котлова и гасо-генератора. Организовао је лабораторијски рад за студенте и за истраживање из процеса сагоревања и термичких постројења, а такође је увео и лабораторијске вежбе из машина алатки. Написао је неколико уџбеника, међу њима и за машине алатке. Сарађивао је са привредом у области термичких постројења, а објавио је и већи број научних и стручних радова.

Слика 4. Проф. инж Александар Косицки (1880 - 1954), писац првог уџбеника из производног машинства.

Упркос чињеници што је главна пажња проф. Косицког била посвећена другим областима инжењерства, његова улога у одржавању и даљем развоју наставе из производног машинства је значајна, укључујући и израду првог универзитетског уџбеника из производног машинства.

Слика 3. Први универзитетски уџбеник из производног машинства у Србији.

Слика 5. Проф. др Павле П. Станковић (1909-1969.), четврти професор производног машинства у Србији, и декан Машинског факултета 1963-1965

Проф. Т. Ф. Селесковић је увео идеје производног машинства (алатних машина, алата и технологије машинске обраде) у круг студија технике, а професори А. С. Стевовић и А. И. Косицки су ово место ближе одредили, иницирајући тако једну традицију [1]. Сматра се да је проф. др Павле П. Станковић био иноватор високошколске наставне и научне делатности производног машинства. Др инж. Павле П. Станковић (1909 - 1969) рођен је у Бечу, основну школу завршио је у Хамбургу, матурирао је у Београду, а 1932. године завршио је студије на Техничком факултету београдског Универзитета. Године 1933. запослио се као инжењер у Фабрици аероплана и хидроавиона "Змај " у Земуну, на конструкцији, прорачуну и изради нових типова авиона, а године 1938. постављен је за хонорарног асистента за статику и конструкцију летелица на Техничком факултету Универзитета у Београду. Године 1947. унапређен је у доцента за предмет Машине алатке и од тада, докторирави 1953. године и напредујући 1957. године до редовног професора, довео је дотадашњи једносеместрални предмет до једног од најперспективнијих усмерења на Машинском факултету Универзитета у Београду, са бројним, стално унапређиваним курсевима и обимним научноистраживачким програмима. Проф. Станковић је плодан писац многих универзитетских уџбеника за области производног машинства које је развијао, а такође и аутор већег броја научних радова. У научном опусу посебно се истичу остварења у изради зупчаника пластичним деформисањем и у развоју универзалног модела оптимизације искоришћења свих могућности алатних машина за обраду резањем.

За разлику од својих претходника, проф. П. Станковић се целим својим стручним бићем посветио производном машинству, што је у току двадесет-петогодишњег интензивног рада довело до тога да је у моменту његове смрти, 1969. године, производно машинство у Београду било на нивоу истакнутих светских универзитета.

2. НАСТАВА ИЗ ПРОИЗВОДНОГ МАШИНСТВА НА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ – МАШИНСКОМ ФАКУЛТЕТУ

У фебруару 1905 је објављен Закон о Универзитету у Београду у који прераста Велика школа. У јулу се бира инж. Аћим Стевовић за првог наставника за предмет Машине алатљике. Почетак Првог светског рата је прекинуо рад Универзитета, а предмет „Машине алатке" се поново предавао студентима у периоду од 1922. до 1941. године. Предмет „Машине алатке" је постојао и школске 1945/46. године у VIII семестру. Уведен је нови предмет „Машине алатке и индустријска производња машина" у VII семестру, који су студенти слушали од школске 1948/49. године на Машинском факултету који је 1948 године формиран као засебан факултет. Одлуком Савета Машинског факултета формиране су 12. фебруара 1948. године катедре, а област предмета „Машине алатке" је

била унутар Катедре за основе машинства, чији шеф је био проф. Душан Витас. Поновним припајањем Машинског факултета Универзитету у Београду 1954. године, долази до делимичног проширења програма предмета „Машине алатке". Школске 1956/57. године у II семестру уведен је предмет "Радионичко упознавање" са тежиштем наставе у лабораторијским вежбама на упознавању основних операција обраде метала и конструкције машина алатки. Истовремено је за студенте IX семестра на опште-машинском одсеку уведен предмет „Пројектовање машина алатки", у оквиру кога је постојао обавезан пројекат подсклопова машина алатки са свим потребним прорачунима. Све до 1956. године се настава на Машинском факултету изводила само на једном предмету из области производног машинства "Машине алатке " чији се обим и садржај повремено мењао. Катедра за индустријску производњу је формирана 1956. године нова, која је обухватала област производног машинства и област научне организације рада, а шеф катедре је био проф. др Павле Станковић.

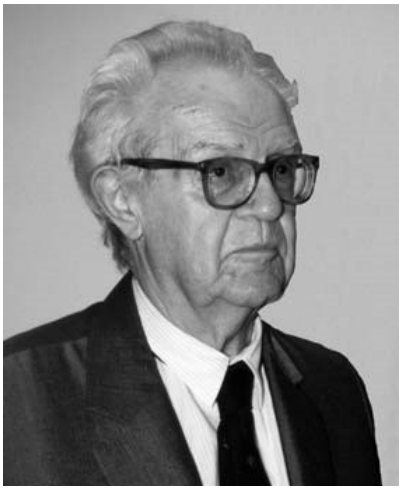
Наставним планом и програмом студија из 1957. и 1959. године уведено је десет усмерења, међу којима и Индустријско-производни смер. У наставни програм уведен је предмет „Машинска обрада " који се предавао у V и VI семестру као обавезан предмет за све смерове. За студенте Индустријско-производног смера уведени су предмети у VII и VIII семестру „Машине алатке" и „Машинска обрада II". Наставу из предмета у области производног машинства је изводио само проф. др Павле Станковић све до 1958. године, када је асистент инж. Владимир Шолаја изабран за доцента и почео да изводи наставу на предмету "Машинска обрада II".

Школске 1960/61 уведен је степенасти систем студија, при чему се изводила настава од I до IV семестра у оквиру I степена, а од V до VIII семестра у оквиру II степена. Први степен је имао десет смерова као и у претходном наставном плану и програму. Студенти припремно-производног смера на I степену су слушали предмете производног машинства: „Машинска обрада" у III и IV семестру, „Технолошки прибори и провера" и „Технолошки системи" у IV семестру. На II степену студија је постојао посебан одсек за производњу, на коме се изводила настава из два предмета: „Машине алатке и опрема " у VI, VII и VIII семестру и „Машинска обрада II " у VII и VIII семестру. Наставу из предмета производног машинства „Машине алатке ", Машинска обрада и Машинска обрада II" изводила су два наставника, проф. др Павле Станковић и доцент инж. Владимир Шолаја све до 1960. године, када је за доцента изабран и инж. Светислав Зарић за предмет „Машинска обрада". У то време, 1960. године Статутом Машинског факултета реорганизоване су катедре, па је формирана Катедра за технологију, која је поред производног машинства обухватала и област технологије машинских материјала. Шеф Катедре за технологију био је проф. др Павле Станковић.

Школске 1966/67. године, након укидања степенастих студија, уведен је наставни план и програм додипломских студија у трајању од девет семестара са дванаест изборних група. Предмет „Машинска обрада" је био заједнички за све групе и слушао се у V и VI семестру. Група за производњу је имала још пет предмета из области производног машинства. Предмети „Алати и прибори" и „Машине алатке" су се слушали у VII, VIII и IX семестру, док се настава из предмета „Мерење и квалитет обраде", „Технологија машиноградње" и „Аутоматизована производња" изводила у VII и VIII семестру. У то време, 1966. године, наставу на предметима производног машинства изводили су: редовни професор др Павле Станковић, ванредни професори инж. Владимир Шолаја и инж. Светислав Зарић, и предавач Владимир Милачић, док су стални асистенти били производни инжењери Коста Јовановић, Јоко Станић, Миленко Јовичић, Љиљана Димитријевић-Марковић, Драгомир Николић и Драгиша Мандић. У извођењу наставе учествовало је још неколико хонорарних асистената.

После изненадне смрти проф. др Павла Станковића 1969. године, за шефа Катедре за технологију је изабран проф. др Владимир Шолаја, који је тада био у звању редовног професора. Наставни кадар за предмете производног машинства на Катедри је у међувремену ојачао. Предавач Владимир Милачић је изабран за доцента 1967., а наредне 1968. године је докторирао код проф. др Павла Станковића и 1970. године изабран за ванредног професора. Асистент Јоко Станић завршио последипломске студије и магистрирао 1966. године и као магистар техничких наука изабран је за доцента 1968. године. Асистент Миленко Јовичић је такође магистрирао 1966. године и као магистар изабран за доцента 1970. године.

Професор Шолаја је заједно са проф. др Владимиром Милачићем организовао 1971. године последипломске студије производног машинства на Машинском факултету коју су похађали асистенти треће генерације: Жарко Спасић, Корнел Еман, Павао Бојанић, Мирослав Пилиповић и други.



Слика 6. Проф. др Владимир Шолаја (1920 - 1998) оснивач и први шеф Катедре за производно машинство 1972 - 1985

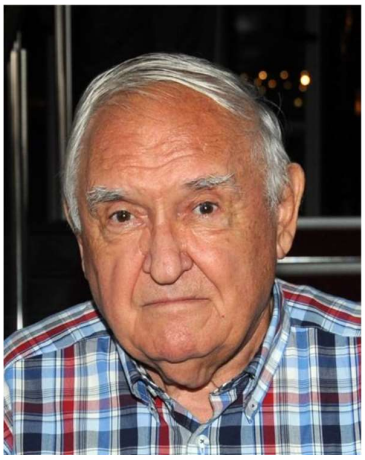
Након ступања на снагу Закона о удруженом раду, који се односио и на организовање рада на факултетима, спроведена је 1972. године реорганизација рада на Машинског факултету, формирани су ООУР-и (основне организације удруженог рада) и тада је формиран ЈУР 1.01 за производно машинство и примену компјутера, а за руководиоца је именован проф. др Владимир Милачић. Поред тога, 1972. године је формирана Катедра за производно машинство. Све до тада област производног машинстава је у саставу са другим научним дисциплинама у оквиру других катедри, па се може констатовати да је проф. др Владимир Шолаја оснивач и први шеф Катедре за производно машинство. Као шеф Катедре за производно машинство у периоду од 1972. до 1985. године, имао је значајан утицај на иновирање наставних планова и програма из области производног машинства.

Слика 7. Проф. др Јоко Станић (1930 – 2021), шеф Катедре за производно машинство 1985 - 1986

Након одласка професора Шолаје у пензију 1985. године, на место шефа Катедре за производно машинство изабран је проф. др Јоко Станић. Ту функцију обављао је свега годину дана. Као редовни професор др Јоко Станић предавао је више предмета из области производног машинства на основним и последипломским студијама, како на Машинском факултету у Београду тако и у одељењима Факултета у Ужицу и Ваљеву. Десет година је предавао на Машинском факултету у Титограду и дао значајан допринос стасавању тог факултета.

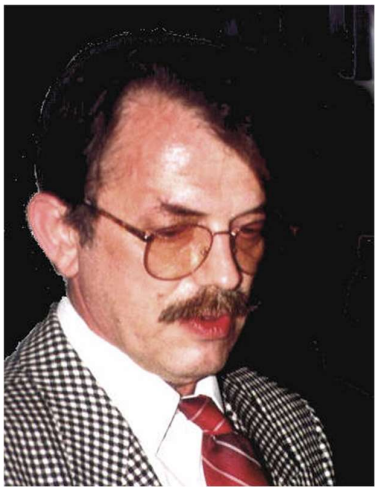
Професор Станић је написао више од 40 универзитетских уџбеника из којих су училе генерације машинских инжењера. Руководио је бројним научно истраживачким пројектима. Резултати тих истраживања објављени су у преко 200 научних и стручних радова у земљи и иностранству.

У току свог 35-то годишњег рада на Машинском факултету у Београду активно је учествовао и у органима управљања Факултета и Универзитета: био је продекан за наставу Машинског факултета, старешина Одељења у Ваљеву, члан Савета Факултета, председник Извршног одбора Савета Машинског факултета, шеф Катедре за производно машинство, председник Одбора за издавачку делатност.



Слика 8. Проф. др Владимир Милачић (1934 – 2018), шеф Катедре за производно машинство 1986 - 1991.

Руковођење Катедром је 1986. године преузео проф. др Владимир Милачић, који је веома заслужан за увођење компјутерских технологија у машинско инжењерство уопште, а посебно у производно машинство. Производно машинство представља врло комплексно подручје и обухвата производне технике које се односе на средства за производњу (машине алатке, алати, прибори и остала средства), затим производне технологије које се односе на процесе обраде и израде делова. Проф. Владимир Милачић је допринео увођењу трећег сегмента савременог производног машинства, производне кибернетике. Био је национални пионир и предводник у развоју и применама компјутерски подржаних технологија. Поставио је и изводио научноистраживачке програме и развој нових програма за индустрију у домену нових технологија, као што су NC-технологије, флексибилни технолошки системи, CAD/CAM/CAE технологије, индустријски роботи, интелигентни системи за монтажу, нова генерација обрадних система и др. Проф. Милачић је осмислио и започео изградњу Центра за нове технологије (ЦеНТ) 1986. године. Као гостујући професор и као професор по позиву боравио је на неколико америчких универзитета.



Слика 9. Проф. др Милисав Калајџић, шеф Катедре за производно машинство 1991-2001

Након одласка професора Милачића у САД, на место вршиоца дужности шефа Катедре изабран је проф. др Милисав Калајџић, да би 1991. године био изабран за шефа Катедре. Проф. Милисав Калајџић је дао изузетан допринос завршетку изградње ЦеНТ-а и његовом опремању и набавци

хоризонталног обрадног центра HMC 500, као и CNC струга PH – 42. Посебан научни допринос проф. Калајџића се огледа у развоју и примени метода коначних елемената, што је посебно исказано у монографији Метод коначних елемената, као и развијеним софтверским решењима, која су у датом тренутку представљала изузетан допринос у светским оквирима.

Слика 10. Проф. др Павао Бојанић, шеф Катедре за производно машинство 2001-2003

Проф. др Павао Бојанић је био шеф Катедре је у периоду 2001. – 2003. Професор Бојанић је пре свега био оријентисан ка примени компјутерских технологија у производном машинству. При иновирању наставних планова и програма према болоњском процесу увео је у наставни програм предмете: CAD/CAM системи и Производни информациони системи.

У периоду 2003 – 2012 шеф Катедре је био проф. др Љубодраг Тановић. Научно-истраживачка активност проф. Тановића и допринос Катедри и Машинском факултету реализована је преко низа изведених научно-истраживачких пројеката, где је учествовао као члан или руководилац истраживачких тимова. Већ радови из осамдесетих година дају елементе за улаз у простор обрадних

Слика 11. Проф. др Љубодраг Тановић, шеф Катедре за производно машинство, 2003 - 2012.

процеса, да би се у каснијим радовима остварили значајни резултати у овом правцу који коначно резултирају у пројектовању нових алата на бази синтетичког дијаманта и кубног бор-нитрида. Проф. Тановић је у два наврата био продекан, продекан за финансије (1996-2000) и продекан за наставу (2015-2021). Поред наведених обављао је и друге значајне функције.

Значајнија промена наставних планова и програма из области производног машинства спроведена је након доношења Закона о високом образовању 2005. године. Данашњи програми наставе на сва три нивоа студија (основним, мастер и докторским студијама) усклађени су са програмима светских универзитета. Према најновијем наставном плану и програму на Катедри за производно машинство изводи се настава из следећих предмета:

- Основне академске студије
  - Компјутерска графика
  - Компјутерска симулација и вештачка интелигенција
  - Технологија машинске обраде
  - Производне технологије и метрологија
  - CAD/CAM системи
  - Машине алатке
  - Алати и прибори
  - Технологија бродоградње
  - Технологија машиноградње (ИТМ)
- Мастер академске студије
  - Аутоматизација производње
  - Индустријски роботи
  - Алати за обликовање лима
  - Нумерички управљане мерне машине
  - Пројектовање обрадних система
  - Рачунарски интегрисани системи и технологије
  - Методе одлучивања
  - Производни информациони системи
  - Адитивне производне технологије
  - Мехатронски системи
  - Компјутерска симулација у аутоматизацији производње
  - Машине алатке и роботи нове генерације
  - Нове технологије
  - Менаџмент квалитетом
  - Интелигентни технолошки системи
  - Машине алатке М
  - Технологија монтаже
  - Компјутерско управљање и надзор у аутоматизацији производње
  - Микро обрада и карактеризација
  - Стручна пракса М – ПРО
- Докторске студије
  - Аквизиција и обрада експерименталних података
  - CAD/CAM системи и интеграција пројектовања производа и технологија
  - Аналитичке методе у инжењерском пројектовању
  - Биолошки инспирисани алгоритми оптимизације
  - Интелигентна аутоматизација
  - Аутономни системи и машинско учење
  - Теорија резања
  - Технике инжењерства квалитета
  - Дигитална обрада нестационарних сигнала
  - Интелигентни индустријски роботи
  - Испитивање и оптимизација обрадног система
  - Моделирање и симулација система индустријских робота
  - Планирање и управљање производњом
  - Системи вештачких неуронских мрежа
  - CAI модели
  - Анализа перформанси технолошких система
  - Когнитивна роботика
  - Мехатронски системи и адаптроника
  - Теорија и симулација процеса обраде

- Мастер академске студије Индустрија 4.0
    - Увод у производне системе
    - Роботика и вештачка интелигенција
    - Машинско учење интелигентних роботских система
    - Кибернетско физички системи
    - Дигитални мерни системи
    - Индустријски интерет ствари и сајбер безбедност
    - Терминирање технолошких система и процеса
    - Флексибилни и реконфигурабилни технолошки системи

Слика 12. Наставници и сарадници Катедре за производно машинство 2018. године.

Кадровску структуру Катедре за производно машинство данас чини 6 редовних професора, 6 ванредних професора, 2 доцента, 3 асистента и један технички сарадник.

Редовни професори:
Др Бојан Бабић (шеф Катедре од 2012 године), Др Петар Петровић, Др Зоран Миљковић,
Др Радован Пузовић, Др Саша Живановић, Др Живана Јаковљевић

Ванредни професори:
Др Божица Бојовић, Др Никола Славковић, Др Горан Младеновић, Др Михајло Поповић,
Др Славенко Стојадиновић, Др Милица Петровић

Доценти:
Др Бранко Кокотовић, Др Милош Пјевић

Асистенти:
Душан Недељковић, Никола Воркапић, Лазар Матијашевић, Александар Јокић

Технички сарадник:
Бура Радован, оператер CNC машина.

3. НАУЧНО-ИСТРАЖИВАЧКА ДЕЛАТНОСТ КАТЕДРЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Научно-истраживачки рад у оквиру Катедре за производно машинство и Центра за нове технологије се одвија у сарадњи са бројним партнерима из индустрије уз финансијску подршку Министарства просвете, науке и технолошког развоја, а организован је у оквиру девет специјализованих истраживачких лабораторија.

Лабораторија за структурну анализу и испитивање машинских система (CAE)

Лабораторија има вишедеценијско искуство и бави се проблематиком експерименталне идентификације понашања машинских система. Применом метода коначних елемената врши се идентификација статике. динамике и температурских појава код машинских система. Истраживачки

програм обухвата симулацију процеса обраде пластичном деформацијом, системска испитивања машина алатки / других обрадних система, нумеричку и експерименталну оптимизацију носећих структура машина алатки, рачунску / експерименталну модалну анализу. У оквиру лабораторије се конципирају и развијају компоненте лабораторијске опреме за- испитивање машинских система и пројектују машински систем методама симултаног инжењерства.

Лабораторија за аутоматизацију производних процеса (AUTOMATION)

Програм истраживања орјентисан је савременим концептима аутоматизације (нумерички управљане машине алатке и CNC управљачке јединице, управљање индустријским манипулаторима и роботима, програмабилни контролери и други рачунари у управљању аутоматизованим системима) и стварању основа за програмабилну и флексибилну аутоматизацију и флексибилне фабрике будућности. Предмет истраживања су дистрибуирани системи управљања, комуникационе мреже у аутоматизацији, аутономни управљачки системи, системи за надзор и дијагностику, као и системи управљања отворене архитектуре.

Лабораторија за информациоме технологије и управљање производњом (CIM)

У оквиру истраживачког програма ове лабораторије се изводи моделирање и информациона интеграција предузећа индустрије прераде метала, развијају технолошке базе података и базе знања за аутоматизовано пројектовње технолошких процеса. развијају и пројектују системи за управљање производњом, модели за управљање производним ресурсима и системи за складиштење и анализу података. Пројектују се технолошки процеси и развијају CAPP системи, врши се интеграција CAD/ CAM/CAPP система, моделирање и симулација технолошких система. Такође се развијају алати за пројектовање технолошких система и мулти-агентски технолошки системи.

Лабораторија за CAD/CAM

Лабораторија се бави развојем специјализованих CAD/CAM система за одређене класе инжењерских производа, имплементацијом софтверске и хардверске подршке у области пројектовања производа и пројектовања за производњу. Истражују се модели интерне презентације радних предмета, модели технолошког препознавања и креирају специјалистички програми иновације знања производних инжењера из области CAD/CAM система. Осим тога, лабораторија има истраживачки програм брзе израде прототипова производа сложене конфигурације и истраживања реверзибилног инжењерства.

Лабораторија за флексибилне технолошке системе, обрадне процесе и алате (FTS)

Истраживачки програми ове лабораторије обухватају агилне технолошке системе, пројектовање флексибилних технолошких система, синтезу интелигентних технолошких система, фракталне фабрике, холархије и телетехнологије. Осим тога, истражују се високо-продуктивне и неконвенционалне методе обраде, методе завршне обраде које дају високу тачност и висок квалитет обрађене површине. У лабораторији се одвијају истраживања у области технолошких база података, управљања технолошким системима и производним линијама у индустрији прераде метала, истраживање и развој алата за обраду резањем и алата за обраду пластичним деформисањем, алата за ливење и алата за обраду врло тврдих и композитних материјала.

Лабораторија за индустријску роботику и вештачку интелигенцију (ROBOTICS)

У овој лабораторији се пројектују индустријски роботи, енд-ефектори и елементи периферне опреме. Развијају се управљачки системи за роботе и роботске апликације у индустрији, сензорски системи, интелигентни роботски системи и роботи са паралелном кинематиком. Истраживачки програм лабораторије обухвата и програмирање робота, испитивање функционалних карактеристика роботских систем, калибрацију робота, као и роботизацију технолошких процеса у индустрији прераде метала.

Лабораторија за производну метрологију и квалитет (CAQ)

Истраживачки програм ове лабораторије обухвата пројектовање за квалитет, интелигентно интегрисано пројектовање за квалитет, менаџмент квалитетом, интегрисане менаџмент системе, развој софтвера за QM, флексибилну аутоматизацију у производној метрологији, експертне системе за инспекцију и развој CAI модела за сложене површине. Лабораторија се бави дигиталним квалитетом дигиталном производњом, онтолошким моделима за метрологију, квалитетом у

фабрикама будућности, нумерички управљаним мерним машинама и 3D моделирањем у разним областима машинства.

Лабораторија за обрадне системе

У овој лабораторији се истражују носеће структуре, механизми, погони, преносници, управљање и програмирање машина алатки, концепције и методе конфигурисања обрадних система, виртуелии обрадни системи и испитивање машина алатки и других обрадних система у индустрији прераде метала. Развијају се нове концепције машина алатки, реконфигурабилних машина алатки, машина алатки за обраду великим брзинама резања, машина за процесе додавања материјала, машина са паралелном и хибридном кинематиком, машина алатки за вишеосну обраду, мезо и микромашина и машина алатки високе тачности. Истражују се и ресурси за развој машина алатки и обрадних система, управљачки системи машина алатки отворене архитектуре, системи објектног програмирања машина алатки, комплексне машине алатке, опрема машина алатки и других обрадних система.

Лабораторија за кибернетику и мехатронске систем (CMSysLab)

Мултидисциплинарна истраживачко-едукативна јединица Катедре за производно машинство, фокусирана на кибернетске и мехатронске аспекте производних технологија и производних система. Теоретска истраживања: општа теорија система; теорија аутомата и вештачких језика; апроксимативно закључивање и фази-динамичке формалне структуре; аутопоеза, емергентна и когнитивна својства система; математичко препознавање облика. Примењена истраживања: когнитивне функције технолошког система; оптички сензори, системи вештачког гледања и визуелна повратна спрега; сензори силе и повратна спрега по сили; физичка и когнитивна интеракција човека и технолошког система – колаборативни рад и хибридни системи; индустријски хуманоиди; интегрисани микрорачунарски системи; микроелектромеханички системи; дигитални системи управљања (CNC, PLC, SCADA технологија); технологија монтаже; пројектовање обрадних система.

Бројна учешћа чланова Катедре за производно машинство на међународним научним конференцијама и стручним скуповима, студијски боравци и израда докторских да Катедра оствари успешну сарадњу са великим бројем познатих универзитета у свету. Професори производног машинстава Машинског факултета у Београду су уважени чланови најзначајнијих међународних научно-стручних организација и тако доприносе међународном угледу наше науке и образовног система у области производног машинства. Наставници и сарадници који су држали наставу из производног машинства поред немерљивог доприноса развоју науке у области производног машинства, дали су и значајан допринос развоју Машинског факултета кроз учешће у бројним комисијама и обављање одговорних руководећих функција.

4. ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ

Респективан кадровски потенцијал, расположива опрема и научно-истраживачки програми Катедре за производно машинство представљају врло моћан ослонац развоја домаће машиноградње. Обезбеђујући врхунске стручњаке за потребе машинске индустрије, са једне стране, и нудећи индустрији могућност заједничког учешћа у научно-истраживачким подухватима, које често подржава и републичко Министарство за просвету, науку и технолошки развој, Катедра даје свој допринос укупном развоју друштва. Међународне везе са другим Универзитетима, непрекидно учешће на међународним скуповима су дале могућност непосредног праћења промена у области производног машинства и директног утицаја на успостављање савремених истраживачких праваца.

Од успостављања наставе из области производног машинства на Машинском факултету у Београду до данашњих дана значајан број наставника и сарадника је учествовао у настави из предмета производног машинства. Детаљније биографије наставног особља могу се наћи у зборницима [5] и [6] које је приредио професор Миленко Јовичић, као и у зборнику биографија који је у припреми и надовезује се на наведене зборнике.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] Шолаја, В.: *Сто година производног машинства у високом школству Србије – сећање на прва четири професора*, Посебно издање у оквиру 25. Саветовање производног машинства Југославије, Београд, 1994.

[2] Историја науке: Тодор Селесковић, https://www.rts.rs/page/tv/sr/story/255/rts-3/3601265/istorija-nauke-todor-seleskovic.html, август 2019.
[3] http://cent.mas.bg.ac.rs/istorijat/istorijat.htm
[4] Калајџић, М., Лукић, Љ.: *Сећање на нашег професора Шолају,* ЛОЛА институт, Београд, 2020.
[5] Јовичић, М. (уредник): *Наставно особље Катедре за производно машинство од 1948. до 1973. године,* Машински факултет, Београд, 2017.
[6] Јовичић, М. (уредник): *Зборник биографија наставног особља – прва књига (1948. до 1973. године),* Машински факултет, Београд, 2017.

Бабић, Б.

50 YEARS OF THE DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING OF THE FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING FACULTY THE UNIVERSITY OF BELGRADE

Abstract: *The Department of Manufacturing Engineering provides students with quality education and trains future engineers to meet the needs of industry. The chair has established links with industry, research and development organizations and academic institutions worldwide.*

The department sees itself as the bearer of the implementation of new technologies and techniques in the field of production engineering and educates students to be technologically and managerially trained to respond to the challenges of the open market in the current era. The Department's educational mission is to provide a broad base for students preparing for technological and leadership careers in manufacturing.

Key words: *Production engineering, Higher education, Scientific research activity.*

Tabaković, S., Zeljković, M., Grujić, J. [1]

SAVREMENE TEHNIKE I TEHNOLOGIJE RAZVOJA PROIZVODA U MEDICINSKOJ ENDOPROTETICI[2]

Rezime

Industrija endoproteza (implantata) za potrebe humane medicine predstavlja jednu od najbrže rastućih grana savremenog proizvodnog sektora. Ova oblast sa stanovišta razvoja proizvoda nameće značajne izazove vezane za metodologiju definisanja koncepcionih rešenja, primenu biokompatibilnih materijala, postupke izrade, veličinu serije proizvoda itd. Na intenzivan razvoj ortopedske hirurgije, poslednjih godina, je značajan uticaj imalo uvođenje savremenih tehnika i tehnologija u aktivnost projektovanja i izrade endoproteza. U radu se prezentuju problemi i savremena rešenja vezana za projektovanje i izradu endoproteza (implantata) u medicinskoj endoprotetici. Nakon kratkog istorijskog prikaza razvoja implantata ukazuje se na potrebe istraživanja u ovoj oblasti. Pored toga izvršena je sistematizacija endoproteza prema različitim kriterijumima, što predstavlja osnovu za razvoj. Posebna podpoglavnja ovoga rada su posvećena problemima projektovanja i izrade, kao i primeni savremenih inženjerskih alata u unapređenju kvaliteta života pacijenata. Pre završnih razmatranja i pravaca istraživanja u ovoj oblasti, prikazuju se određena konstrukciona rešenja nekih inostranih i domaćih proizvođača.

***Ključne reči**: projektovanje proizvoda, izrada endoproteza, biomedicinsko inženjerstvo, medicinska endoprotetika*

1. UVODNA RAZMATRANJA

Značajno povećanje životnog veka populacije u poslednjih stotinu godina je stvorilo potrebu za razvojem čitavog niza proizvoda namenjenih povećanju kvaliteta života stanovništva sa izmenjenom starosnom strukturom. To je jednim delom uticalo i na potrebu za razvojem proizvodnih oblasti koje podrazumevaju sintezu medicinskih i inženjerskih znanja i veština. Rezultat toga je čitav niz novih naučno-istraživačkih područja koji se mogu objediniti pod zajedničkim nazivom biomedicinsko inženjerstvo. Tu spadaju savremena rešenja medicinskih dijagnostičkih uređaja, nove generacije instrumenata, razvoj i proizvodnja proteza i implantata prilagođenih pacijentima, nova rešenja uređaja za efikasniju rehabilitaciju i mnoge druge. O značaju istraživanja u biomedicini govori stvaranje, novih grana industrije koje po finansijskom obrtu prevazilaze neke od tradicionalnih proizvođačkih grana industrije.

Jedno od područja biomedicinskog inženjerstva kod koga je razvoj direktno povezan sa intenzivnim razvojem proizvođačke industrije predstavlja medicinska protetika. Ilustraciju značaja ove oblasti u svetu predstavlja podatak da je globalna vrednost tržišta endoproteza u humanoj medicini 2019. godine bila za 10 milijardi dolara veća od tržišta mašina alatki uz značajno veću brzinu rasta.

Prvim koracima razvoja u području medicinske protetike se smatraju pokušaji lekara u drevnom Egiptu da nedostajuće delove udova zamene veštačkim, izrađenim kombinacijom kosti i drveta [7]. Izrada savremenih implantata počinje sredinom XX veka, kada su se usavršavanjem operativnih tehnika, materijala i tehnoloških postupaka izrade stekli uslovi za njihovu uspešnu ugradnju u organizam pacijenta [2]. U savremenim uslovima implantati se najčešće koriste u ortopedskoj (veštački zglobovi i fiksatori kostiju) (Slika 1a), kardiovaskularnoj (stentovi i veštački ventili) i oralnoj hirurgiji (Slika 1b) iako se koriste i u drugim granama medicine (rekonstruktivnoj, neurohirurgiji, ...).

[1] prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, tabak@uns.ac.rs, prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, milany@uns.ac.rs, Fakultet tehničkih nauka, dr Jovan Grujić, Grujić i Grujić d.o.o

[2] Rad predstavlja prezentuje deo istraživanja sprovedenih na projektu: „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN", podržanom od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije

a) b)

Slika 1. *Proteza lakta i implant zuba*

U poslednjih 80 godina od pojave prvih ortopedskih implantata se od pojedinačnih operativnih zahvata sprovedenih na pacijentima sa specifičnim oboljenjima došlo do imponzatnog broja od oko milion operativnih zahvata zamene zgloba kuka godišnje samo u SAD [8]. Ovako intenzivan razvoj oblasti su obezbedila istraživanja sprovedena u oblasti biokompatibilnih materijala [3], dijagnostičkih snimanja i obrade snimaka, usavršavanja postupaka projektovanja proizvoda uz odgovarajuće simulacije i inženjerske analize kao i obrade materijala.

Prethodno ukazuje na potrebu da se pri razvoju i proizvodnji ove grupe proizvoda mora integrisati čitav niz tehnika i tehnologija kao što su biološki računarski dizajn (BIOCAD- razvoj računarskih modela na bazi snimanja savremenom medicinskom opremom MRI, CT, …); računarom potpomognuto projektovanje (CAD), računarom potpomognut inženjering (inženjerske simulacije i analize) (CAE), računarom potpomognuta proizvodnja (CAM); brza izrada prototipa (RP) [19]. Ovo zahteva vrlo blisku saradnju između inženjerskih i medicinskih struka, što je realizovano u okviru velikog broja inostranih instituta i fakulteta [15].

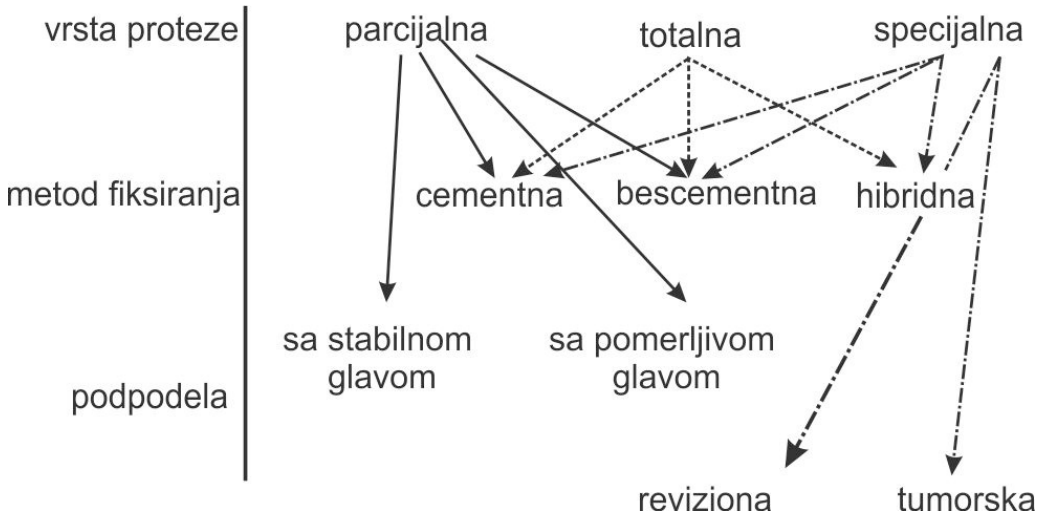
I u našoj zemlji se na tehničkim fakultetima (Mašinski fakultet Niš [28], [14], [34], Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac [25], Fakultet tehničkih nauka Novi Sad [32], [29], [30], Mašinski fakultet Beograd [27], [36]) a najčešće u saradnji sa lokalnim medicinskim fakultetima i klinikama duži niz godina sa zapaženim rezultatima sprovode istraživanja u oblasti biokompatibilnih materijala, definisanja opštih parametarskih računarskih modela kostiju, projektovanja i izrade različitih tipova endoproteza i sl.

Poslednjih godina se značajna istraživanja sprovode na području razvoja implantata prilagođenih pacijentu u cilju eliminisanja potencijalnih negativnih pojava koje ovaj zahvat može da ima. To je omogućeno razvojem dijagnostičke opreme postupaka projektovanja i izrade proizvoda. Upravo u ovoj oblasti su najviše prisutne tehnologije BIOCAD, CAD, CAE, CAM kao i aditivne tehnologije izrade proizvoda.

U radu se sa inženjerskog stanovišta opisuju problemi prisutni u projektovanju i izrade implantata za potrebe ortopedske protetike, tendencije njihovog razvoja kao i iskustva koje su istraživači u našoj zemlji kao i sami autori sakupili u toku rada na projektima iz ove oblasti u poslednjih desetak godina.

2. KATEGORIZACIJA ENDOPROTEZA

Osnovni cilj primene endoproteza u ortopedskoj hirurgiji je vraćanje pokretljivosti i funkcije dela lokomotornog sistema koji je oštećen različitim oboljenjima ili prelomima. U kliničkoj praksi se oštećenja najčešće javljaju na elementima zglobnog sistema i to na zglobovima kuka, lakta i ramena. O učestalosti ovih oboljenja u svetu govori činjenica da se operativni zahvat zamene zgloba kuka u proseku realizuje na 1% ukupnog stanovništva [20]. Sa stanovišta inženjera podela endoproteza zglobova može se ostvariti prema više kriterijuma (Slika 2).



Slika 2. *Podela endoproteza [12]*

Osnovna podela endoproteza obuhvata njihovu konstruktivnu strukturu odnosno broj elemenata zgloba koji zamenjuju kao i namenu. Prema ovoj podeli endoproteze se dele na parcijale (zamenjuju deo zgloba), totalne (sadrže sve elemente zgloba: čašicu, sam zglob i elemente veze za odgovarajuće kosti) kao i specijalne proteze. Na slici 3. su dati primeri delimične, totalne i specijalne endoproteze zgloba kuka

Slika 3. *Primeri parcijalne, totalne i specijalne endoproteze kuka*

Prema metodi fiksiranja elemenata zgloba u kost pacijenta endoproteze se dele na cementne, bescementne i hibridne (endoproteze kod kojih se jedan deo vezuje za kost cementnom a drugi bescementnom metodom).

Ova podela odnosno primena ili odsustvo odgovarajućih koštanih cementa za vezivanje endoproteze u kost pacijenta značajno utiče na konstuktivne i tehnološke karakteristike proteze. Tu se pre svega misli na dimenzije proteze (kod cementnih se konstrukcijom predviđa debljina cementnog sloja) kao i završnu obradu tela endoproteze. To je izraženo kod bescementnih proteza gde se odgovarajućim konstruktivnim elementima povećava kontaktna površina između kosti pacijenta i endoproteze. Na slici 4 su prikazane kontaktne površine cementne i bescementne endoproteze ramena kompanije 3d Orho.

Slika 4. *Kontaktne površine bescementne i cementne proteze ramena kompanije „3d Orho“*

Sa stanovišta složenosti razvoja proteza, primene savremenih tehnika i tehnologija najvažnija podela je na primarne i proteze prilagođene pacijentu. Proteze projektovane prema merama pacijenta (custom made) su se do nedavno koristile za potrebe revizije primarne operacije kao i kod sanacije posledica oboljenja koja izazivaju značajnije promene na elementima koštanog sistema. Ipak razvojem dijagnostičkih uređaja, softvera za projektovanje proteza kao i mašina alatki omogućen je razvoj i izrada endoproteza u veoma kratkom roku pa se ovaj tip proteza se sve češće pominje kao primarni za potrebe sanacije oštećenja na zglobovima čoveka. Primena endoproteza prilagođenih pacijentu istovremeno omogućava uklanjanje urođenih i deformiteta koji se dosadašnjim postupcima nisu mogli sanirati.

3. PROBLEMI PRI RAZVOJU ENDOPROTEZA

Biomedicinsko inženjerstvo, naročito oblast implantata u ortopediji se sa stanovišta projektovanja i izrade proizvoda sreće sa brojnim izazovima. Tu spadaju:

- Potreba za što boljim definisanjem informacija neophodnih za koncipiranje endoproteze
- Karakteristike i obrada biokompatibilnih materijala,
- Primena specijalizovanih računarskih simulacija i analiza
- Optimizaciju procesa obrade u skladu sa medicinskim zahtevima i sl.

Svi pomenuti izazovi podrazumevaju značajna naučna istraživanja kao i primenu najsavremenijih inženjerskih alata.

Polaznu osnovu za razvoj savremenih proteza, naročito onih projektovanih i izrađenih prema morfološkim karakteristikama pacijenata predstavlja definisanje što je moguće većeg broja morfoloških karakteristika obolelog dela skeletnog sistema. Time se dobija bolja rekonstrukcija obolele regije pa su i posledice ugradnje veštačkog elementa manje i očekivani rezultati bolji [9]. Kao osnovni alat u prikupljanju ovih podataka se koriste alati za obradu dijagnostičkih snimaka dobijenih različitim tomografskim metodama (CT skener i magnetna rezonanca), odnosno zapisa u specijalizovanom Dicom formatu. Grupa programskih sistema koji su namenjeni za ovakve aktivnosti je kompatibilna sa softverima za projektovanje proizvoda i omogućava rekonstrukciju koštanog i okolnog tkiva što je osnova za koncipiranje endoproteze, simulaciju operativnog zahvata i analizu funkcionisanja skeletnog sistema posle operativnog zahvata.

Ključni uticaj na mehaničke karakteristike i vek implanta ima izbor materijala. U biomedicinskom inženjerstvu jedno od najvažnijih svojstava materijala predstavlja biokompatibilnost, odnosno sposobnost za primenu u ljudskom organizmu bez izazivanja štetnih lokalnih ili sistematskih odgovora u telu. Za potrebe implantata se koriste različite legure metalnih materijala, keramika kao i više vrsta polimernih materijala [22].

Metalni materijali koji se najčešće koriste u ortopediji su:

- Legure čelika – hrom nikl čelik (316 LVM, AISI) ISO 5832/I DIN 17443
- Legure kobalta - CoCrMo pogodne za livenje ISO 5832/IV i CoNiCrMo pogodne za kovanje ISO 5832/VI
- Legure titanijuma - Ti6Al4V ISO 5832/III

Biokompatibilni medicinski nerđajući čelik 316L (316L SS) se već dugo koristi u medicinskim implantatima. Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i niske cene, on je najčešće korišćen za popravku i zamenu tvrdih tkiva u ljudskom telu, posebno u acetabularnoj čaši, koja zauzima polovinu proizvoda veštačkog zgloba kuka [12].

Vrlo često se koriste komercijalno čist titanijum i legure titanijuma (Ti-6Al-4V). Ovi materijali se mogu koristiti u raznim implantatima, uključujući zglobove, kičmu, traume kostiju, itd. Joungov modul elastičnosti titanijuma i njegovih legura (oko 110 GPa) daleko prevazilazi vrednosti prisutne kod prirodne kosti (od 15–30 GPa).

Tantal ima karakteristike tvrdoće, žilavosti, hemijske otpornosti i dobre kompatibilnosti sa ljudskim kostima, a takođe spada u biokompatibilne materijale. Najčešća primena za implantate je porozni tantal (takođe poznat kao Trabekularni metal). Trabekularni metal ima strukturu otvorenih ćelija sa odličnom biokompatibilnošću, visokom poroznošću i malim modulom elastičnosti, koji je sličan trabekularnoj kosti. Stoga se klinički primenjuje za ortopedski implantat.

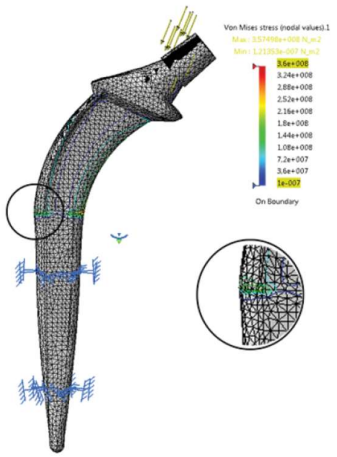
Legure metala sa biokompatibilnim svojstvima imaju ključnu ulogu u elementima endoproteza koji imaju noseći karakter. U novije vreme su se pored standardnih biokompatibilnih metalnih materijala koji se koriste za izradu proteza pojavili i biorazgradivi materijali bazirani na magnezijumskim legurama koji imaju potencijalno značajnu primenu u proizvodnji vijaka jer je jon magnezijuma četvrti najveći katjon u ljudskom telu, a uglavnom postoji u koštanom tkivu i učestvuje u metabolizmu. Na slici 5 su prikazani biorazgradivi vijci od magnezijumske legure MAGNEZIX.

Slika 5. *Biorazgradivi metalni vijci*

Važnu karakteristiku proizvoda u biomedicinskom inženjerstvu predstavlja potreba da finalni proizvod bude biokompatibilan a ne samo sirovina od koje je napravljen. To podrazumeva optimizaciju tehnološkog procesa izrade implantata u skladu sa parametrima održivosti biokompatibilnosti, bez promene strukture i osobina materijala usled obrade.

Endoproteze zglobova predstavljaju sklopove koji sa stanovišta mehaničkih karakteristika trebaju da ispune strogo definisane zadatke, pre svega da podnesu mehanička opterećenja koja se javljaju na zglobovima u toku kretanja kao i da zadovolje sve eksploatacione kriterijume u dužem vremenskom periodu. U slučaju primarnih endoproteza zgloba kuka planirani vek je dvadeset godina. Sa druge strane, eksperimentalna istraživanja veoma teško simuliraju sve eksploatacione uslove. Razlozi za to su kompleksan proces eksperimentalnog oponašanja uslova u organizmu i kompleksna struktura kostiju koja se značajno razlikuje od pola, starosti i oboljenja. Zbog toga su računarske simulacije ponašanja endoproteza od ključnog značaja za usavršavanje oblika i dimenzija endoprteza.

U predhodnim fazama razvoja ove oblasti računarske analize su obuhvatale statičko i dinamičko ponašanje elemenata endoproteza kroz simulirane uslove koje zahteva eksperimentalna verifikacija projektovanog rešenja [4]. Na slici 6 se vidi primer analize dinamičkog ponašanja endoproteze [29].



Slika 6. *Analiza dinamičkog ponašanja endoproteze*

Razvoj programskih sistema za realizaciju inženjerskih analiza kao i proširenje zahteva istraživanja u ovoj oblasti su stvorili uslove za značajno unapređenje analiza koje se realizuju prilikom projektovanja endoproteza. U primere ovakvih analiza spada simulacija opterećenja proteza u sklopu sa kosti uz simulaciju višeslojne strukture kostiju, kao i analize ponašanja endoproteza u različitim fazama koraka u delimičnom ili celokupnom skeletu. Pored toga kompletna primena rekonstruisane kosti pacijenta u pojedinim fazama razvoja endoproteze omogućava i simulaciju ugradnje.

Kao što je već rečeno značajan izazov u procesu razvoja endoproteza predstavlja izbor odgovarajućeg postupka izrade koji pored uobičajenih kriterijuma proizvodnosti, kvaliteta obradeobezbeđuje i zadržavanje osobine biokompatibilnosti materijala. To je naročito značajno imajući u vidu da su materijali koji se koriste za izradu endoproteza veoma često teško obradivi. Zbog toga se za izradu pripremaka (kod endoproteza rađenih po meri pacijenta) koriste obrade rezanja bez izdvajanja dodatne toplote (obrada vodenim mlazom), alati za obradu rezanjem optimizovani za obradu kobaltnih i titanijumskih legura i sl. Poslednjih godina se značajna istraživanja sprovode u cilju utvrđivanja pogodnosti primene aditivnih tehnologija u procesu izrade pojedinih elemenata endoproteze [6], [16] (Slika 7).

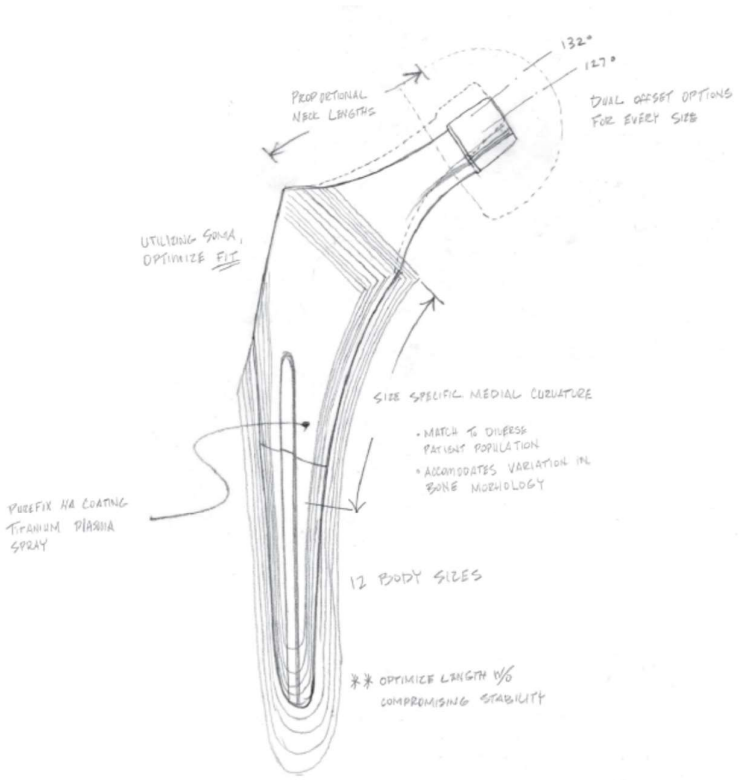
Slika 7. *Deo endoproteze dobijen aditivnim tehnologijama [16]*

4. KONCIPIRANJE, PROJEKTOVANJE I KONSTRUISANJE

Proces projektovanja i izrade endoproteza se realizuje u skladu sa veličinom serije proizvoda. U ovoj oblasti se može smatrati da je proizvodnja u vidu serije za primarne endoproteze zgloba ili pojedinačna za endoproteze rađene prema merama pacijenta.

U prvom slučaju se kao ulazne informacije neophodne za koncipiranje endoproteza pored već pomenutih uzimaju statistički podaci o geometrijskim merama kostiju koje obrazuju zglob. Pri tome se zbog velikog broja morfoloških parametara a samim tim i broja varijanti bira ograničen broj parametara. Na primeru

endoproteze zgloba kuka kompanije Stryker se može videti da je telo endoproteze projektovano i izrađeno parametarski u ukupno 11 dimenzionih veličina (dužina varira od 85 do 240mm) i dve vrednosti ugla vrata. Na slici 8 je prikazan primer iz kataloga Styker



Part number	Size	Neck angle
6720-0027	0	132°
6720-0127	1	
6720-0230	2	
6720-0330	3	
6720-0435	4	
6720-0535	5	
6720-0635	6	
6720-0737	7	
6720-0837	8	
6720-0937	9	
6720-1040	10	
6720-1140	11	

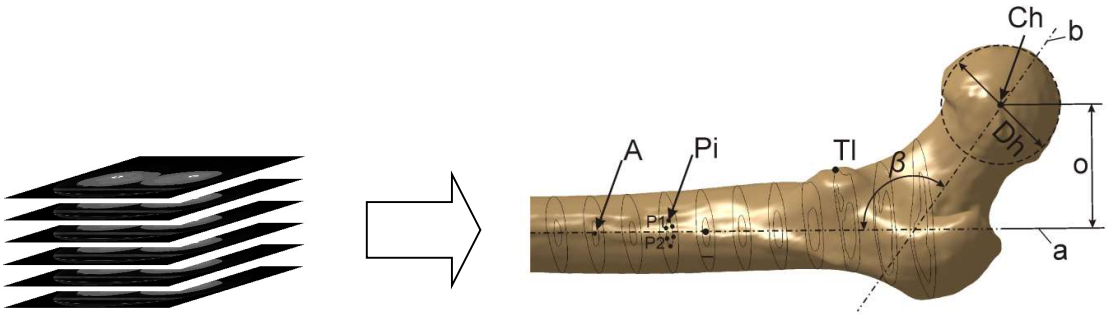
6721-0027	0	127°
6721-0127	1	
6721-0230	2	
6721-0330	3	
6721-0435	4	
6721-0535	5	
6721-0635	6	
6721-0737	7	
6721-0837	8	
6721-0937	9	
6721-1040	10	
6721-1140	11	

Slika 8. *Pregled osnovnih parametara primarne proteze zgloba kuka*

Preostali geometrijski parametri tela endoproteze se definišu prema statističkim vrednostima što značajno pojednostavljuje proces razvoja. Ipak ovako izabrane komponente zahtevaju duži proces ugradnje (zbog potrebe prilagođavanja kostiju samom implantatu) i mogući su određeni biomehanički nedostaci skeletnog sistema sa ugrađenim veštačkim zglobom. Tu spadaju manja pokretljivost zgloba u odnosu na prirodni, različita dužina nogu i sl. Simulacije ponašanja veštačkog zgloba u eksploataciji obuhvataju analize primenom metoda konačnih elemenata za vrednosti ekstremnih opterećenja, i za granične vrednosti dimenzija.

Drugi pristup, projektovanje i izrada endoproteze prema merama pacijenta podrazumeva viši nivo individualizacije i upotrebu značajno većeg broja parametara morfologije pacijenta prilikom koncipiranja proteze. Zbog prednosti koje ovako projektovane i izrađene proteze imaju u toku realizacije operativnog zahvata, procesu oporavka pacijenta i manjim brojem komplikacija projektovanje prema merama pacijenta se koristi u slučajevima revizionih, tumorskih i u određenim uslovima primarnih proteza. Razvoj ovakvih endoproteza predstavlja složen inženjerski zadatak koji podrazumeva primenu većeg broja softverskih rešenja koji omogućuju ispunjenje svih postavljenih ciljeva.

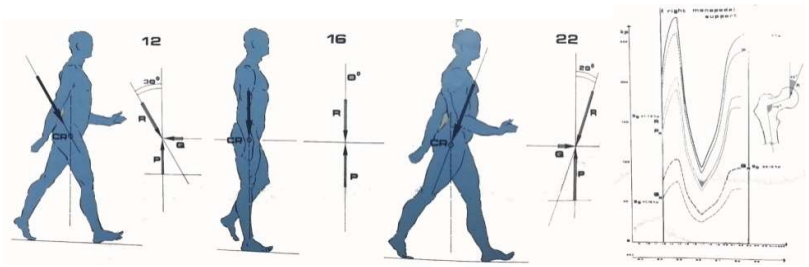
Osnovu za definisanje koncepcionog rešenja čine zahtevi ortopedskog hirurga i morfološke karakteristike obolele kosti. Prvu grupu zahteva čine tip endoproteze, metod ugradnje (vezivanje sa kosti) i operativna procedura. Prema tome se vrši izbor morfoloških parametara koji se koriste za definisanje geometrije endoproteze i dalje projektovanje. Osnovu za rekonstrukciju kosti predstavlja prostorni model obolelog zgloba ili dela skeletnog sistema i na osnovu njega definisan veći broj parametara morfologije kosti (između 10 i 20). Kao rezultat višegodišnjih istraživanja razvijen je niz programskih sistema čiji je zadatak da na osnovu tomografskih snimaka (CT ili MRI) obezbede odgovarajući prostorni model obolele kosti [30], [35]. Na slici 9 je prikazan postupak rekonstrukcije kosti femura.



Slika 9. *Rekonstrukcija kosti femura*

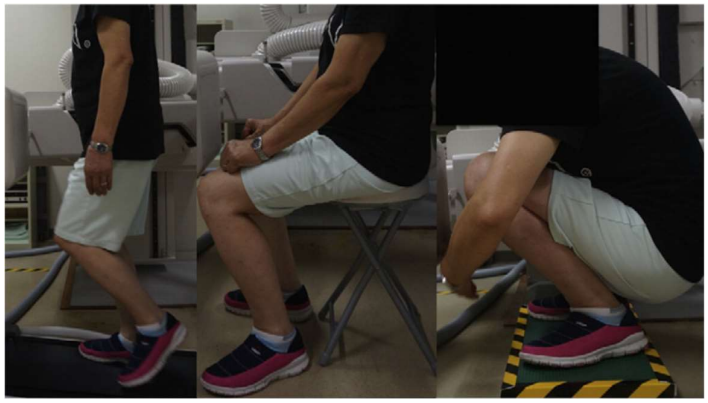
Postupak formiranja modela kostiju na osnovu snimaka je zasnovan na više faza obrade dijagnostičkih snimaka. Tu se pre svega misli na segmentaciju pojedinih slika u snimku u cilju izolovanja koštanog materijala, formiranje karakterističnih tačaka koji opisuju granice koštanog tkiva, definisanje oblaka tačaka kompletnog snimka i na kraju formiranje modela kosti. Poslednjih godina se pojavio čitav niz biomedicinskih CAD (Computer Aided Design) programskih sistema za rekonstrukciju koštanog tkiva u cilju daljeg razvoja implantata u biomedicinskom inženjerstvu [24], [35], [23]

Drugu fazu predstavlja projektovanje endoproteze koji se realizuje primenom CAD programskih sistema. U cilju povećanja efikasnosti modelovanje se najčešće sprovodi na bazi prethodno definisanih parametarskih modela ili opšteg modela koji parametrizacijom obuhvata više tipova elemenata endoproteza [31]. Elementi veštačkog zgloba, kako telo endoproteze tako i kontaktni elementi zgloba spadaju u grupu proizvoda izloženih stalnim, promenljivim, opterećenjima koji treba da obezbede pokretljivost zgloba u prirodnim granicama, i da zadrže otpornost na habanje uz odgovarajuću krutost. To je naročito izraženo kod zgloba kuka koji treba da prenese težinu gornjeg dela tela pri promenljivom opterećenju koje nastaje u hodu. Biomehanička istraživanja posmatraju korak pri uspravanom hodu čoveka u 18 faza u toku kojih je zglob kuka opterećen promenljivim silama koje dostižu intenzitet do tri puta veći od težine tela (Slika 10).



Slika 10. *Uspravan hod čoveka [1]*

Stalno izlaganje promenljivim opterećenjima uzrokuje naprezanja koja stvaraju mogućnost pojave zamora materijala što predstavlja jedan od kriterijuma koji se uzimaju u obzir prilikom dimenzionisanja i izbora materijala endoproteza [9]. Isto tako sam zglob, koji je u slučaju kuka sferni je prilikom svakodnevnih aktivnosti često izložen opterećenjima u graničnim položajima (Slika 11) što značajno utiče na postupak projektovanja [37].



Slika 11. *Kritični pokreti za položaj elemenata endoproteze [13]*

Kao rezultat složenih biomehaničkih opterećenja i činjenice da je veoma teško u eksperimentalnim uslovima simulirati dugotrajne dinamičke procese, razvoj endoproteza je u velikoj meri uslovljen primenom softvera za simulaciju statičkih, kinematskih i dinamičkih procesa [5, 18, 26].

5. IZRADA ENDOPROTEZA

Endoproteze humanih zglobova predstavljaju sklop više elemenata koji imaju različite zadatke. Njihov zajednički cilj je da obezbede krutost i pokretljivost skeletnog sistema na mestu obolelog zgloba uz malu masu, visoku čvrstoću, otpornost na habanje i biokompatibilnost. Da bi ti ciljevi bili ispunjeni elementi endoproteza se izrađuju od različitih materijala uz primenu različitih tehnoloških postupaka.

Sa stanovišta operacija obrade postupci izrade elemenata endoproteza se mogu podeliti na konvencionalne i nekonvencionalne. U zavisnosti od veličine serije pripremci za izradu elemenata endoproteza se izrađuju [21]:

- Rezanjem iz pločastih ili šipkastih materijala (za pojedinačnu izradu endoproteza po meri pacijenta)
- Preciznim livenjem (za primarne proteze ili veće serije)
- Kovanjem u zaštitnoj atmosferi (za serijske endoproteze ili tipske polufabrikate)

Obrada površina od značaja za funkcionisanje veštačkih zglobova (konusne površine za vezu elemenata proteze, sferne površine zgloba i sl.) se najčešće realizuju mašinskom obradom rezanjem, primenom numerički upravljanih mašina alatki (Slika 12.) uz završnu obradu na specijalizovanim mašinama za brušenje kontaktnih površina zglobova [11]. Kako je već rečeno materijali za izradu tela endoproteza spadaju u grupu teško obradivih. Kao primer se navode izrazi za postojanost alata i hrapavost obrađene površine pri obradi glodanjem materijala 316LVM i Ti6Al4V (Tabela 1.) [33]:

Tabela 1. Postojanost alata pri obradi biokompatibilnih materijala

Materijal	Postojanost alata	Hrapavost obrađene površine
316LVM	$T = 233.5 – 1.816*v$	$R_a = 0.093 + 2.707*s$
Ti6Al4V	$T = 71.99 -0.1930*a -142.2*v -1.44*s$	$R_a = 0.413 -0.001851*a +1.997*v +0.0321*s$

Slika 12. *Izrada tela endoproteze*

Drugu grupu tehnoloških postupaka koji se u novije vreme pominju kao dopuna tradicionalnim postupcima ili u pojedinim slučajevima kao alternativan metod obrade materijala su nekonvencionalni postupci obrade.

Kao najjednostavniji i sa stanovišta termičkih naprezanja materijala najpogodniji postupak rezanja pripremaka za izradu implantata iz pločastog materijala već duži niz godina se koristi obrada metala vodenim mlazom (Slika 13).

Osnovna prednost primene ovog postupka je činjenica da se prilikom isecanja konture pripremka u zonu obrade ne unosi dodatna toplota u materijal čija struktura zbog održanja osobine biokompatibilnosti ne bi trebala da bude menjana.

Razvoj aditivnih tehnologija omogućava značajno unapređenje procesa preciznog livenja [10, 17] omogućujući izradu školjkastih kalupa čiji oblik odgovara individualizovanim endoprotezama, slika 14.

Slika 13. *Obrada pločastog materijala vodenim mlazom*

Slika 14. *Izrada školjkastih modela za različite endoproteze aditivnom metodom*

Slika 15. *Telo endoproteze sa rešetkastom strukturom*

U nove tehnološke postupke koji se smatraju pravcem usavršavanja individualizovane proizvodnje endoproteza se ubrajaju aditivne tehnologije. Njihovom primenom je moguće izraditi različite proizvode koje nije moguće dobiti konvencionalnim proizvodnim metodama. Na slici 15 je prikazano telo endoproteze sa rešetkastom strukturom izrađenom aditivnom tehnologijom.

6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA

Intenzivan razvoj tehnologija projektovanja i izrade implantata poslednjih decenija je omogućio uz smanjenje broja komplikacija nakon operacije i dugački vek eksploatacije endoproteza. Unapređenje kvaliteta života pacijenata koji je time postignut je osnovni razlog za značajno povećanje broja oboljenja koja se saniraju njihovom ugradnjom.

Poslednjih godina se značajna naučna istraživanja sprovode u cilju brzog razvoja i izrade endoproteza prilagođenih pacijentu. To podrazumeva dalja usavršavanja u više oblasti:

- automatizacija rekonstrukcije elemenata koštanog sistema na osnovu dijagnostičkih snimaka,
- usavršavanje geometrija endoproteza,
- automatizacija projektovanja ,
- unapređenje karakteristika materijala,
- usavršavanje metoda izrade endoproteza.

Razvoj dijagnostičkih uređaja baziranih na tomografskim metodama predstavlja jedanu od oblasti sa najintenzivnijim usavršavanjem u medicini. Istovremeno, može se uočiti pojava BIOCAD programskih sistema čiji je zadatak objedinjavanje metoda obrade slike na osnovu snimaka i rekonstrukcija koštanog i drugog tkiva kao osnova za razvoj specijalizovanih endoproteza.

Upotreba namenskih CAD programskih sistema omogućava značajno povećanje broja ulaznih parametara u proces projektovanja proizvoda. To omogućuje primenu metoda generativnog projektovanja koji uključuju zakonitosti formiranja površina na osnovu teorije biomimetike (oponašanja prirodnih procesa formiranja kostiju) i ograničenja koja postavljaju metode njihove izrade. Istovremeno detaljnijom razradom geometrijskih i drugih parametara i formiranjem kriterijuma za definisanje oblika i dimenzija endoproteza stvaraju se osnove za automatizaciju dela procesa projektovanja.

Pored projektantskih veliki značaj na unapređenje čitave oblasti biomedicine ima razvoj proizvodnih tehnologija koje obezbeđuju izradu endoproteza. Poslednjih godina se može uočiti tendencija razvoja numerički upravljanih mašina sa kontinualnom višeosnom obradom čije su eksploatacione karakteristike prilagođene obradi biokompatibilnih materijala, razvoj metoda za izradu metalnih proizvoda aditivnim tehnologijama kao i hibridnih metoda.

7. LITERATURA

[1] Bombelli, R.: *Osteoarthritis of the Hip: Classification and Pathogenesis : the Role of Osteotomy as a Consequent Therapy*. 1983: Springer-Verlag.

[2] Callaghan, J.J., Rosenberg, A.G.,Rubash, H.E.: *The Adult Hip*. 2007: Lippincott Williams & Wilkins.

[3] Cohn, M.R., Unnanuntana, A., Pannu, T.J., Warner, S.J.,Lane, J.M., *7.16 Materials in Fracture Fixation ☆*, in *Comprehensive Biomaterials II*, P. Ducheyne, Editor. 2017, Elsevier: Oxford. pp. 278-297.

[4] Colic, K., et al.: *Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Hip Implants,* Procedia Engineering, 2016. **149**: pp. 229-235.

[5] Colic, K., et al.: *Finite Element Modeling of Hip Implant Static Loading,* Procedia Engineering, 2016. **149**: pp. 257-262.

[6] Depboylu, F.N., et al.: *Titanium based bone implants production using laser powder bed fusion technology,* Journal of Materials Research and Technology, 2022. **17**: pp. 1408-1426.

[7] Draycott, J.: *Prostheses in Antiquity*. 2018: Taylor & Francis.

[8] Etkin, C.D.,Springer, B.D.: *The American Joint Replacement Registry-the first 5 years,* Arthroplast Today, 2017. **3**(2): pp. 67-69.

[9] Fischer, M.C.M., et al.: *Patient-specific musculoskeletal modeling of the hip joint for preoperative planning of total hip arthroplasty: A validation study based on in vivo measurements,* PLoS One, 2018. **13**(4): pp. e0195376.

[10] Ghosh, S.,Abanteriba, S.: *Status of surface modification techniques for artificial hip implants,* Science and Technology of Advanced Materials, 2016. **17**(1): pp. 715-735.

[11] Ghosh, S.,Abanteriba, S.: *Status of surface modification techniques for artificial hip implants,* Sci Technol Adv Mater, 2016. **17**(1): pp. 715-735.

[12] Grujić, J.: *TUMORSKA MODULARNA ENDOPROTEZA ZGLOBA KUKA*, 2018, Univerzitet u Novom Sadu: Novi Sad.

[13] Hara, D., et al.: *Dynamic hip kinematics in patients with hip osteoarthritis during weight-bearing activities,* Clin Biomech (Bristol, Avon), 2016. **32**: pp. 150-6.

[14] Husain, K.N., et al.: *Procedure for creating personalized geometrical models of the human mandible and corresponding implants,* Tehnicki Vjesnik, 2019. **26**(4): pp. 1044-1051.

[15] Kang, H., Long, J.P., Urbiel Goldner, G.D., Goldstein, S.A.,Hollister, S.J.: *A paradigm for the development and evaluation of novel implant topologies for bone fixation: implant design and fabrication,* J Biomech, 2012. **45**(13): pp. 2241-7.

[16] Kourra, N., et al.: *Computed tomography metrological examination of additive manufactured acetabular hip prosthesis cups,* Additive Manufacturing, 2018. **22**: pp. 146-152.

[17] Kumar, P., Ahuja, I.S.,Singh, R.: *Experimental investigations on hardness of the biomedical implants prepared by hybrid investment casting,* Journal of Manufacturing Processes, 2016. **21**: pp. 160-171.

[18] Leng, J., et al.: *Dynamic virtual simulation of the occurrence and severity of edge loading in hip replacements associated with variation in the rotational and translational surgical position,* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2017. **231**(4): pp. 299-306.

[19] López Gualdrón, C.I., Bravo Ibarra, E.R., Murillo Bohórquez, A.P.,Garnica Bohórquez, I.: *Present and future for technologies to develop patient-specific medical devices: a systematic review approach,* Med Devices (Auckl), 2019. **12**: pp. 253-273.

[20] Maradit Kremers, H., et al.: *Prevalence of Total Hip and Knee Replacement in the United States,* J Bone Joint Surg Am, 2015. **97**(17): pp. 1386-97.

[21] McTighe, T., Brazil, D.,Bruce, W., *Metallic Alloys in Total Hip Arthroplasty*. 2015. pp. 14-1 to 14.

[22] Moghadasi, K., et al.: *A review on biomedical implant materials and the effect of friction stir based techniques on their mechanical and tribological properties,* Journal of Materials Research and Technology, 2022. **17**: pp. 1054-1121.

[23] Noritomi, P.Y., et al.: *Virtual Modeling of a Female Pelvic Floor and Hypothesis for Simulating Biomechanical Behavior During Natural Delivery,* Procedia CIRP, 2013. **5**: pp. 300-304.

[24] Perestrelo, P., Bártolo, P., Paranhos, M., Noritomi, P.,Silva, J.: *Cranial Biomechanical Simulation,* Procedia CIRP, 2013. **5**: pp. 305-309.

[25] Prodanović, N., et al.: *Comparative gait analysis of patients with different design of total knee arthroplasty,* Srpski Arhiv za Celokupno Lekarstvo, 2021. **149**(9-10): pp. 579-584.

[26] Ruggiero, A., Merola, M.,Affatato, S.: *Finite Element Simulations of Hard-On-Soft Hip Joint Prosthesis Accounting for Dynamic Loads Calculated from a Musculoskeletal Model during Walking,* Materials, 2018. **11**(4): pp. 574.

[27] Sedmak, A., et al.: *Fatigue life assessment of orthopedic plates made of Ti6Al4V,* Engineering Failure Analysis, 2022. **137**.
[28] Stojkovic, M., Trajanovic, M.,Vitkovic, N.: *Personalized orthopedic surgery design challenge: Human bone redesign method*, in *Procedia CIRP*, 2019. pp. 701-706.
[29] Tabaković, S., et al.: *Computer and experimental analyses of the stress state in the cement hip joint endoprosthesis body,* Vojnosanitetski Pregled, 2014. **71**(11): pp. 1034-1039.
[30] Tabakovic, S., Zeljkovic, M.,Milojevic, Z.: *Automated acquisition of proximal femur morphological characteristics,* Measurement Science Review, 2014. **14**(5): pp. 285-293.
[31] Tabakovic, S., Zeljkovic, M.,Živkovic, A.: *General Parametric Model of The Body of The Total Hip Endoprosthesis*, 2014. pp.
[32] Tabaković, S., Živković, A., Grujić, J., Zeljković, M.: *Using CAD/CAE software systems in the design process of modular, revision total hip endoprosthesis,* Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2011. **9**(2): pp. 97-102.
[33] Tešić, S.B., Zeljković, M. V., & Čiča, Đ. Đ.: *Optimizacija i ispitivanje uticaja parametara rezanja na hrapavost obrađene površine pri glodanju biokompatibilne legure - Ti6Al4V,* Tehnika, 2019. **74**(5): pp. 677-682.
[34] Trajanović, M.,Canciglieri Junior, O.: *Foreword to the thematic issue: Biomedical engineering,* Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 2018. **16**(3): pp. i-ii.
[35] Vergés, E., Ayala, D., Grau, S.,Tost, D.: *3D reconstruction and quantification of porous structures,* Computers & Graphics, 2008. **32**(4): pp. 438-444.
[36] Vucetic, F., et al.: *Numerical simulation of fatigue crack paths in orthopedic plates*, in *Procedia Structural Integrity*, 2021. pp. 808-814.
[37] Wang, J., Siddicky, S.F., Dohm, M.P., Barnes, C.L.,Mannen, E.M.: *Kinematic and Kinetic Changes after Total Hip Arthroplasty during Sit-To-Stand Transfers: Systematic Review,* Arthroplasty Today, 2021. **7**: pp. 148-156.

Tabaković, S., Zeljković, M., Grujić, J.

MODERN TECHNIQUES AND TECHNOLOGIES OF PRODUCT DEVELOPMENT IN MEDICAL ENDOPROTHETICS¶

Abstract: *The industry of implants for human medicine represents one of the fastest-growing branches of the modern production sector. From the point of view of product development, this area imposes significant challenges related to defining conceptual solutions, applying biocompatible materials, manufacturing procedures, the size of the product series, etc.In recent years, the intensive development of orthopedic surgery has been significantly influenced by the introduction of modern techniques and technologies in the activity of designing and manufacturing implants. The paper presents problems and modern solutions related to the design and manufacture of implants in medical prosthetics. After a brief historical presentation of the development of implants, the need for research in this area is pointed out. In addition, prostheses were systematized according to different criteria, representing the basis for development. Special sub-chapters of this paper are devoted to the problems of design and construction, as well as the application of modern engineering tools in improving the quality of life of patients. Before the final considerations and directions of research in this area, specific construction solutions of some foreign and domestic manufacturers are presented.*

Key words: *biomedical engineering, medical endoprosthetics, product development*

43. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

36. simpozijum

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2022.

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

CIM IN THE STRATEGY OF TEHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF METALWORKING INDUSTRY

Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B., Tešić, S., Ćulum, M.
PROJEKTOVANJE I VERIFIKACIJA GRUPNOG TEHNOLOŠKOG POSTUPKA ZA OPERACIJU STRUGANJA 1.1

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.
SAJBER BEZBEDNOST U KONTINUALNIM SISTEMIMA UPRAVLJANJA – PREGLED REZULTATA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0 ..... 1.7

← NAZAD

Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B., Tešić, S., Ćulum, M. [1)]

PROJEKTOVANJE I VERIFIKACIJA GRUPNOG TEHNOLOŠKOG POSTUPKA ZA OPERACIJU STRUGANJA

Rezime

U okviru ovog rada predstavljena je metodologija projektovanja i verifikacije grupnih tehnoloških postupaka. Metodologa se sastoji od analize grupe radnih predmeta, konstruktivno-tehnološke klasifikacije, projektovanja kompleksnog dijela, projektovanja grupnog tehnološkog postupka, detaljne razrade grupne operacije struganja i verifikacije iste na konkretnom primjeru iz posmatrane grupe dijelova. Ova metodologija je tehnološki zahtjevna i kompleksna, međutim ostvaruje izuzetne rezutate pri tehnološkoj pripremi proizvodnje, racionalizaciji zahvata, tipizaciji i pozitivno utiče na ekonomske efekte tehnoloških procesa.

Ključne reči: grupni tehnološki postupak, kompleksni dio, grupna operacija struganjem

1. UVOD

Projektovanje tehnoloških procesa predstavlja aktivnost iznalaženja najekonomičnijeg načina izrade (montaže) proizvoda uz zadovoljenje svih crtežom definisanih zahtjeva [1]. Postoji nekoliko vrsta tehnoloških procesa, a najvažniji su tehnološki procesi izrade dijelova i tehnološki procesi montaže proizvoda. Razlikuju se i tehnološki procesi za pojedinačne dijelove, tipski tehnološki procesi i grupni tehnološki procesi [2].

Projektovanje pojedinačnih tehnoloških procesa se vrši za svaki dio, proizvod ili sklop posebno. Nalazi svoju primjenu u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Velika mana ovog tipa tehnološkog procesa jeste veliki utrošak vremena za pojedinačno projektovanje za svaki dio posebno, time se rad projektanta učestalo ponavlja.

Postavka i metodi tipizacije tehnoloških procesa zasnovani su na klasifikaciji dijelova, pri čemu hijerarhija počinje sa klasama, pa preko potklasa i grupa završava sa tipovima. Tipovi su skupovi dijelova slični po konstruktivnim osobinama i u datim proizvodnim uslovima koriste zajednički tehnološki proces, prolazeći pri tome istovrsne operacije. Rasprostranjena je u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji.

Grupni tehnološki procesi se zasnivaju na izdvajanju tehnološke grupe kojoj pripadaju svi dijelovi koji se mogu obrađivati na jednoj mašini sa istim priborima i alatima [3]. Važno je napomenuti da geometrijska sličnost dijelova nije preduslov pripadnosti jednoj grupi.

2. GRUPNA TEHNOLOGIJA

2.1 Pojam grupne tehnologije

Grupna tehnologije predstavlja širi i savremeniji pristup od ranije pomenutog klasičnog pristupa projektovanju tehnoloških procesa i tipske unifikacije tehnoloških procesa. Osnovni elementi grupisanja i klasifikacije dijelova su potrebne mašine i oprema za obradu. Projektovanje grupnih tehnoloških procesa se bazira na raznim mogućnostima grupisanja dijelova:

- po konstruktivno-tehnološkoj sličnosti,
- po dominantnim vrstama obrade, jedinstvenoj tehnološkoj pripremi i zajedničkom podešavanju mašine i
- po njihovim osnovnim elementarnim površinama, pri čemu je omogućeno kombinovanje elementarnih zahvata i dobijanje tehnološkog procesa za svaki od dijelova.

[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), doc.dr Branislav Sredanović, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (branislav.sredanovic@mf.unibl.org), ma Saša Tešić, Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, (sasa.tesic@mf.unibl.org), Milan Ćulum, (milan.culum@student.mf.unibl.org)

2.2 Kompleksni dio

Polazna osnova projektovanja u grupnoj tehnologiji jeste izbor kompleksnog dijela. Definiše se kao stvarni ili imaginarni dio (iskustveno formiran), koji u svojoj konstrukciji sadrži sve elementarne površine spoljašnje i unutrašnje konture, te se označava kao konstruktivno-tehnološki predstavnik grupe. Osim elementarnih oblika površina, kompleksni dio mora da sadrži ostale zahtjeve vezane za tačnost izrade, koji se pojavljuju kod svih dijelova operacijske grupe. Između elementarnih površina i dijelova grupe postoji zavisnost koja se može predstaviti odgovarajućom matricom [1]:

$$L = [l_{ij}] \tag{1}$$

$$l_{ij} = \begin{cases} 1 - ako\ i - ti\ dio\ grupe\ sadrži\ j - tu\ elementarnu\ površinu \\ 0 - ako\ i - ti\ dio\ grupe\ ne\ sadrži\ j - tu\ elementarnu\ površinu \end{cases} \tag{2}$$

Kompleksni dio u matrici ima sve elemente površina dijelova grupe, pa se može prikazati odgovarajućom vrstom u matrici:

$$a = (1111111111111111...1) \tag{3}$$

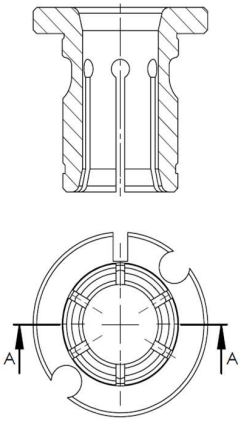
2.3 Klasifikacija i kodiranje

Postupak kojim se dijelovi svrstavaju u grupe naziva se klasifikacija. Vrši se na osnovu tehničkih pravila, tačnije klasifikatora dijelova. Postoje dva oblika sličnosti dijelova: projektni, koji je izražen geometrijskim oblikom i veličinom dijela i tehnološki, zasnovan na redoslijedu obrade. Tri osnovna tipa sistema za klasifikaciju su:

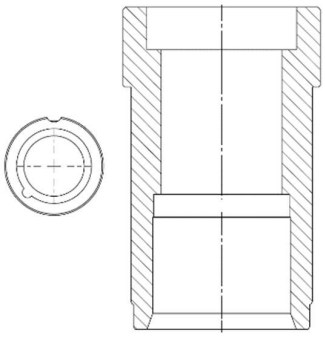
- klasifikatori sa hijerarhijskom strukturom,
- klasifikatori sa lančanom strukturom i
- klasifikatori sa hibridnom strukturom.

3. PROJEKTOVANJE GRUPNOG TEHNOLOŠKOG POSTUPKA

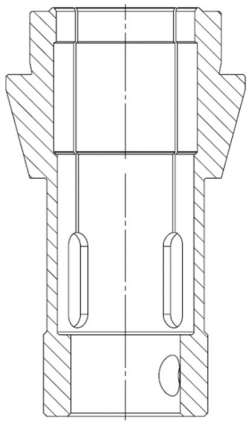
Projektovanje grupnog tehnološkog postupka u okviru ovog rada je izvršeno na grupi od pet dijelova, koji predstavljaju alate za brizganje plastike, a proizvode se i koriste u poznatom preduzeću. Za svaki od dijelova trenutno se projektuje individualni tehnološki postupak, što značajno opterećuje tehnologa, smanjuje njegovu efikasnost i dolazi do velikog gubitka vremena. Posmatrajući predmetnu grupu dijelova, može se zaključiti da ona zapravo predstavlja jednu operacionu grupu, odnosno da se ista može obrađivati i izraditi na jednoj mašini za istu vrstu obrade, pomoću jednog tehnološkog osnovnog podešavanja i većeg broja međupodešavanja mašine, sa nepromijenjenim priborom i alatima. Radni predmeti koji pripadaju pomenutoj operacionoj grupi sa svojim konstruktivno-tehnološkim klasifikacionim brojevima su prikazani na slikama 1 do 5. Konstruktivno-tehnološka klasifikacija izvršena je primjenom klasifikacionog sistema Instituta za alatne mašine IAMA Beograd [4].



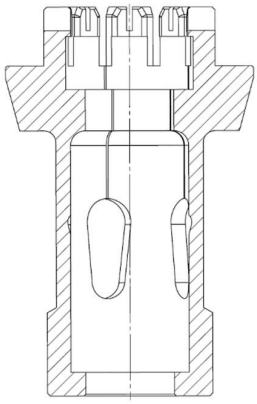
Slika 1. *Dio 1 -102.4530.0*



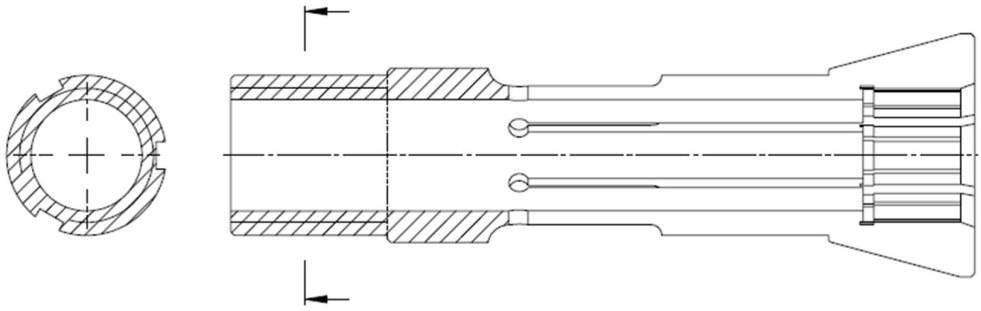
Slika 2. *Dio 2 - 112.2601.0*



Slika 3. *Dio 3 - 102.4632.0*

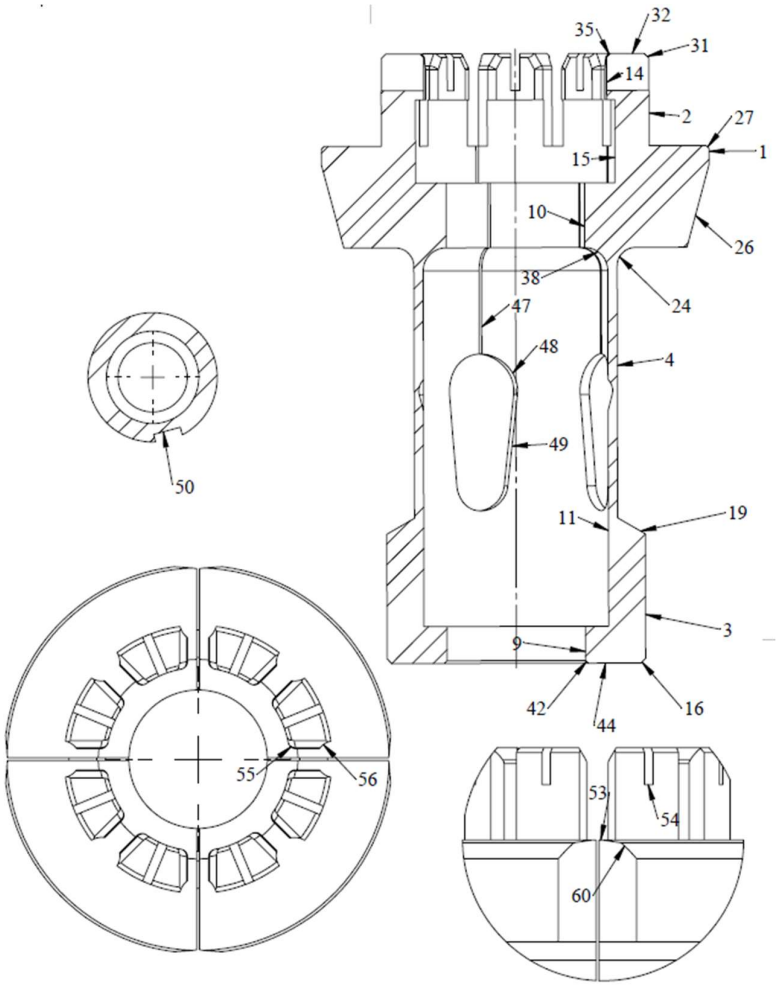


Slika 4. *Dio 4 - 112. 4650.0*



Slika 5. *Dio 5 - 102.4650.0*

Nakon što je identifikovana i klasifikovana operaciona grupa, dat je plan kodova za svaki radni predmet. Plan kodova je prvi korak pri konstruisanju kompleksnog dijela. Zbog ograničenja prostora u radu, plan kodova je prikazan na slici 6 za dio 4.

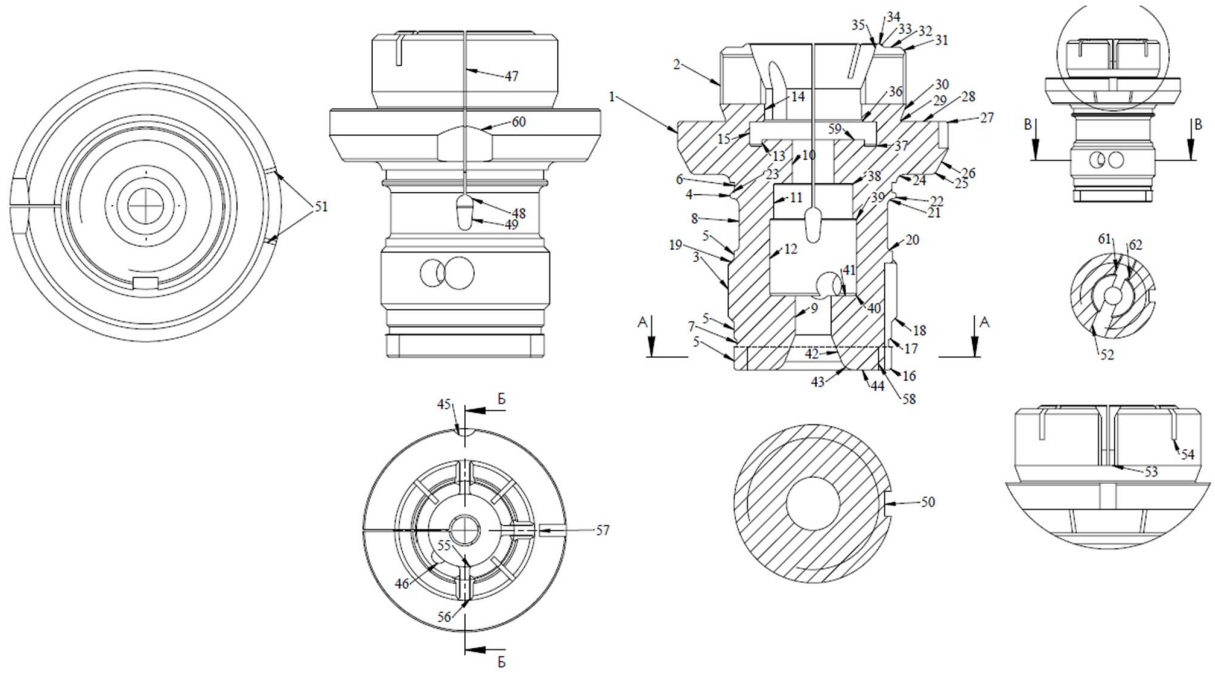


Slika 6. *Plan kodova za dio 4*

Pri izradi plana kodova za operacionu grupu radnih predmeta, kao i za kompleksni dio, identifikovane su ukupno 62 elementarne površine, koje su obilježene sa odgovarajućim oznakama – kodovima. Matrica međuzavisnosti između dijelova grupe i kompleksnog dijela, u pogledu postojanja elementarnih površina, je takođe prikazana u skraćenom obliku u vidu Tabele1.

Tabela 1. Matrica zavisnosti između dijelova grupe						
DIO / **E.P.**	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*KOMPLEKSNI DIO*
1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	0	1
3	1	1	1	1	0	1
4	0	1	1	1	1	1
5	1	1	0	0	1	1
6	0	0	0	0	1	1
7	0	0	0	0	1	1
…	…	…	…	…	…	…
58	0	1	0	0	0	1
59	0	1	0	0	0	1
60	0	0	0	1	0	1
61	0	0	1	0	0	1
62	0	0	1	0	0	1

Plan kodova elementarnih površina treba da posluži kao osnova za projektovanje kompleksnog dijela. Kompleksni dio za posmatranu operacionu grupu projektovan je tako da sadrži sve elementarne površine svih dijelova iz operacione grupe. Ovaj kompleksni dio je imaginarnog tipa. Kompleksni dio zajedno sa planom kodova je prikazan na slici 7.



Slika 7. *Kompleksni dio sa planom kodova*

Nakon projektovanja kompleksnog dijela izvršeno je projektovanje opšteg tipskog tehnološkog postupka. Za operacije struganjem, kao dominantne operacije potrebne za izradu posmatrane operacione grupe, projektovan je grupni tehnološki postupak. Izrada kompleksnog dijela, a samim tim i operacione grupe, moguće je izvršiti u dva stezanja pri operaciji struganja. Prema tome, grupni tehnološki postupak projektovan je za dvije operacije, 20 i 30. Mašina koja se pri tom koristi je strug sa gonjenim alatima Max Mueller, MDW 20 M x 3000. U tabeli 2 prikazan je segment grupnog tehnološkog postupka za operaciju 20. Ovaj postupak se sastoji od 19 zahvata. Za operaciju 30 na strugu, grupni tehnološki postupak se sastoji od 24 zahvata. Svi podaci o parametrima obrade su usvojeni na osnovu preporuka iz [5].

Tabela 2. Sadržaj grupnog tehnološkog postupka za operaciju 20							
Br.	*NAZIV ZAHVATA*	Kod alata	*PARAMETRI OBRADE*				
			v m/ min	n o/ min	δ mm /i	s mm/ o	L mm
1.	Grubo poprečno poravnanje ϕD_p sa L_p $\left[L+R+2\delta_p\left(\delta_{b_p}+\delta_{f_p}+\delta_{g_p}\right)+b \right]$ na $L+R+2\delta_{b_p}+2\delta_{f_p}+\delta_{g_p}+b$	$T01$	190	420	b	0,3	ϕD_p
2.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa $\phi D_p\left(\phi D_1+\delta_b+\delta_f+\delta_g\right)$ na $\phi D_3+\delta_b+\delta_f$ na dužini $L+\delta_{b_p}+\delta_{f_p}-L_{16}$	$T02$	215	415	δ_g	0,25	$L+\delta_{b_p}+\delta_{f_p}-L_{16}$
3.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa $\phi D_3+\delta_b+\delta_f$ na $\phi D_4+\delta_b+\delta_f$ na dužini $L_2+\delta_{b_p}+\delta_{f_p}-L_{16}-L_3$ uz izradu zaobljenja $R_3(24)$	$T02$	215	410	δ_g	0.3	$L_2+\delta_{b_p}+\delta_{f_p}-L_{16}-L_3$
...	….	...	...	...	...	...	….
19.	Izrada navoja Md_4 x p	$T14$	35	350	-	p	-

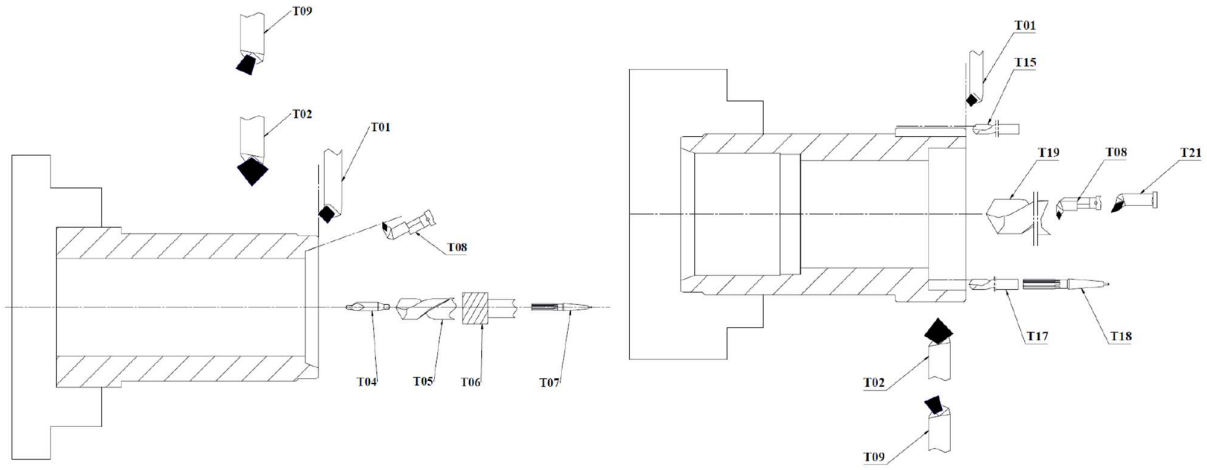
4. VERIFIKACIJA GRUPNOG TEHNOLOŠKOG POSTUPKA

Verifikacija grupnog tehnološkog postupka izvršena je na dijelu 2 koji pripada definisanoj operacionoj grupi. Projektovanje tehnološkog postupka izrade za konkretni dio predstavlja relativno jednostavan zadatak, jer je potrebno samo izvršiti korekciju grupnog tehnološkog postupka za kompleksni dio. Korekcija se odnosi na izdvajanje odgovarajućih zahvata iz grupnog tehnološkog postupka prema matrici zavisnosti prikazanoj u tabeli 1 i uvrštavanju konkretnih vrijednosti umjesto opštih oznaka. Prikaz tehnološkog postupka za dio 2 dat je u skraćenom obliku u tabeli 3. Tehnološki postupak za dio 2 za grupnu operaciju 20 sastoji se od 7 zahvata, a za operaciju 30 od 12 zahvata. Nakon korekcije grupnog tehnološkog postupka izvršeno je projektovanje plana obrade za konkretni dio 2.

Tabela 3. Sadržaj tehnološkog postupka za dio 2 za operaciju 20								
Br.	*NAZIV ZAHVATA*	Kod alata	*PARAMETRI OBRADE*					Glavno vrijeme (min)
			v m/min	n o/ min	δ mm /i	s mm/o	L mm	
1.	Grubo poprečno poravnanje Ø42 sa dužine 66 na 64,5 mm	T01	190	420	1,5	0.3	42	0,72
2.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa Ø42 na Ø35,7 na dužini 46,8 mm	T02	215	415	3	0.25	46,8	1,2
3.	Prethodna obrada spoljašnjim uzdužnim struganjem sa Ø35,7 na Ø34,7 dužini 6 mm	T02	215	415	3	0.3	62	0,1
…	….	…	…	…	…	…	…	…
7.	Izrada unutrašnjeg konusa sa Ø23,92 pod uglom 20° na dužini 4,3 mm	T08	190	410	3	0,15	4,3	0,07

Plan obrade koji je projektovan na osnovu razvijenog tehnološkog postupka za dio 2 i za operacije 20 i 30 je

prikazan na slici 7.



a) za operaciju 20 *b) za operaciju 30*

Slika 7. *Plan obrade za dio 2*

5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada prikazana je metodologija za projektovanje i verifikaciju grupnog tehnološkog procesa za operaciju struganja. Za izabranu operacionu grupu izvršena je konstruktivno-tehnološka klasifikacija, određen je plan kodova i projektovan je imaginarni kompleksni dio. Na osnovu kompleksnog dijela izvršeno je projektovanje tipskog tehnološkog postupka, a zatim su detaljno razvijeni tehnološki postupci za grupne operacije struganja. Verifikacija grupnog tehnološkog postupka izvršena je na dijelu 2 iz date operacione grupe.

Prikazana metodologija rezultuje sa značajnim uštedama vremena koje se odnosi na tehnološku pripremu proizvodnje, odnosno preciznije za projektovanje tehnološkog postupka izrade. Pored vremena, tehnološki postupci za slične dijelove su unificirani, koristi se ista tehnološka oprema, alati i pribori, što dovodi do racionalizacije zahvata i značajnih ekonomskih efekata u procesu proizvodnje.

6. LITERATURA

[1] Jovišević, V.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Mašinski fakultet Banjaluka, 2005.
[2] Babić, B.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Mašinski fakultet Beograd, 2006.
[3] Todić, V. *Projektovanje tehnoloških procesa*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
[4] Urošević, S.M.: *Tipska i grupna tehnologija u metalnoj industriji – priručnik IAMA*, br.1, Beograd, 1967.
[5] Kalajdžić, M., Tanović, Lj., Babić, B., Glavonjić, M., Miljković, Z., Puzović,R., Kokotović,B. Popović,M., Živanović, S., Tošić, D., Vasić, I.: *Tehnologija obrade rezanem – priručnik*, Mašinski fakultet Beograd, 2012.

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

DESIGN AND VERIFICATION OF GROUP PROCESS PLAN FOR TURNING OPERATIONS

Abstract: *This paper presents the methodology of designing and verifying group process plan. The methodology consists of analysis of a group of workpieces, constructive-technological classification, design of a complex part, design of a group process plan, detail design of process plan for group turning operations. The verification was done on a concrete example from the observed group of parts. This methodology is technologically demanding and complex, however, it achieves exceptional results in the technological preparation of production, rationalization of operations and economical effects of process planning.*
Key words: *group process planning, complex part, group turning operation*

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.[1)]

SAJBER BEZBEDNOST U KONTINUALNIM SISTEMIMA UPRAVLJANJA – PREGLED REZULTATA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0[2)]

Rezime

U okviru ovog rada navode se rezultati istraživanja sprovedenih u okviru projekta MISSION4.0 pod nazivom Optimizacioni algoritmi za upravljanje i terminiranje kibernetsko fizičkih sistema u okviru Industrije 4.0 zasnovani na dubokom mašinskom učenju i inteligenciji roja, finansiranog od strane Fonda za nauku Republike Srbije u periodu od 2020-2022. godine. Prikazani rezultati odnose se na oblast sajber bezbednosti u kontinualnim sistemima upravljanja što predstavlja jedan od radnih paketa projekta MISSION4.0. U skladu sa tim, pravci istraživanja odnosili su se na razvoj algoritama za detekciju napada u industrijskim sistemima upravljanja sa centralizovanom i distribuiranom arhitekturom, kao i na primenu otvorene platforme za komunikaciju, u cilju bezbedne razmene podataka između uređaja različitih proizvođača. Pored toga, dobijeni rezultati i njihova integracija u predavanja i laboratorijske vežbe poslužili su kao osnova za edukaciju inženjera u oblastima kibernetsko fizičkih sistema, industrijskog interneta stvari i sajber bezbednosti.

Ključne reči: sajber bezbednost, detekcija napada, OPC-UA, edukacija inženjera

1. UVOD

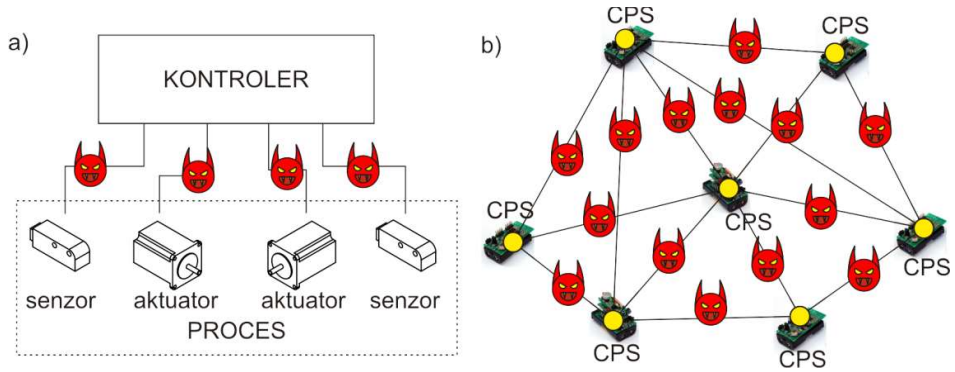
Projekat MISSION4.0 pod nazivom Optimizacioni algoritmi za upravljanje i terminiranje kibernetsko fizičkih sistema u okviru Industrije 4.0 zasnovani na dubokom mašinskom učenju i inteligenciji roja (engl. *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0*) jedan je od dvanaest projekata finansiranih u periodu 2020-2022. godina od strane Fonda za nauku Republike Srbije u okviru Programa za razvoj projekata iz oblasti veštačke inteligencije [1]. Istraživanja u okviru ovog projekta vođena su potrebama proizvodnih kompanija da implementiraju proizvodnu paradigmu pod nazivom Industrija 4.0 čiji je osnovni cilj proizvodnja proizvoda prema zahtevima kupaca. Industrija 4.0 zasnovana je na sveobuhvatnoj digitalizaciji proizvodnih procesa i prikupljanju velike količine podataka iz pogona kako bi se na osnovu njih izvršilo prilagođavanje proizvodnje različitim vrstama proizvoda u skladu sa zahtevima tržišta. Tehničko-tehnološki faktor koji omogućava implementaciju ove paradigme predstavljaju kibernetsko fizički sistemi – CPS (engl. *Cyber-Physical Systems*) i na njima zasnovan industrijski internet stvari – IIoT (engl. *Industrial Internet of Things*) [2]. Zahvaljujući primeni CPS-a u proizvodnim pogonima moguće je ostvariti adaptabilnost proizvodnih sistema kroz njihovu fizičku i funkcionalnu rekonfiguraciju. Sa jedne strane, CPS omogućavaju prikupljanje podataka koji mogu poslužiti za funkcionalno rekonfigurisanje proizvodnih sistema kroz adaptivno planiranje i terminiranje proizvodnje, a s druge strane,oni se u okviru proizvodnih pogona konfigurišu kao sistemi sistema (engl. *Systems of Systems*) gde se CPS manje kompleksnosti (npr. pametni senzori i aktuatori) integrišu u kompleksnije CPS (npr. mašine) sve do nivoa celokupnog kibernetsko fizičkog proizvodnog sistema – CPPS (engl. *Cyber-Physical Production Systems*); ovakav modularan dizajn CPS omogućava brzo i jednostavno fizičko rekonfigurisanje CPPS i njihovih elemenata. Raspoloživost velike količine podataka i modularnost proizvodnih resursa zahteva potpuno nove pristupe upravljanju proizvodnim sistemima i resursima u okviru Industrije 4.0.U skladu sa navedenim, osnovni cilj projekta MISSION4.0 bio je razvoj novih algoritama za

[1)]prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs), Dušan Nedeljković, mast. inž. maš, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs)

[2)]U ovom radu, saopštava se pregled dela rezultata istraživanja ostvarenih u okviru naučnog projekta MISSION4.0, ev. broj: 6523109, koji je finansijski podržan od Fonda za nauku Republike Srbije, kao i projekta Univerziteta u Beogradu - Mašinskog fakulteta, ev. broj: 451-03-68/2022-14/200105, finansijski podržanog od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

upravljanje, terminiranje i sajber bezbednost kibernetsko fizičkih proizvodnih sistema.

Uvođenje CPS dovodi do značajnih promena u industrijskim sistemima upravljanja. Naime, uz primenu CPS, sistemi upravljanja distribuirani na pametne uređaje (npr. senzore i aktuatore) sa integrisanim lokalnim kontrolerima najčešće zasnovanim na mikrokontrolerskim platformama polako zamenjuju centralizovane sisteme upravljanja bazirane na tradicionalnoj piramidi automatizacije standardizovanoj kroz IEC 62264 [3]. Pri tom se pojedini elementi zadatka upravljanja distribuiraju na lokalne kontrolere u mreži, a celokupan zadatak upravljanja realizuje se kroz njihovu intenzivnu komunikaciju korišćenjem različitih protokola. I u okviru centralizovanih sistema upravljanja sa pojavom IIoT sve više se koriste pametni uređaji koji sa centralnim kontrolerom razmenjuju podatke takođe korišćenjem komunikacionih protokola. Još jedna od karakteristika Industrije 4.0 je da kompanije, kako bi se što više približile kupcima i što brže odgovorile na njihove potrebe, podatke o statusu proizvodnih procesa stavljaju na raspolaganje svojim kooperantima (dobavljačima, komitentima i sl.). Kao posledica, industrijski sistemi upravljanja nisu više izolovani već su u sve većoj meri povezani na globalnu mrežu, a komunikacioni linkovi u okviru njih postaju izloženi različitim vrstama kibernetskih napada (slika 1).



Slika 1. *Komunikacioni linkovi izloženi kibernetskim napadima u: a) centralizovanim sistemima upravljanja; b) distribuiranim sistemima upravljanja*

U skladu sa navedenim, jedan od radnih paketa u okviru projekta MISSION4.0 odnosio se na sajber bezbednost u kontinualnim sistemima upravljanja. U ovom radnom paketu istraživane su mogućnosti za detekciju napada i bezbedan prenos podataka u okviru centralizovanih i distribuiranih sistema upravljanja proizvodnim resursima. Sprovedena istraživanja se mogu podeliti u tri osnovne grupe: 1) razvoj algoritama za detekciju napada u industrijskim sistemima upravljanja sa centralizovanom i distribuiranom arhitekturom, 2) primena Otvorene platforme za komunikaciju – OPC-UA (engl. *Open Platform Communications – Unified Architecture*) za bezbednu razmenu podataka između uređaja različitih proizvođača, 3) Edukacija inženjera u oblastima CPS, IIoT i sajber bezbednosti. U ovom radu se daje pregled najznačajnijih rezultata projekta MISSION4.0 u navedenim oblastima, a rad je struktuiran upravo u skladu sa njima. Nakon pregleda rezultata, slede zaključne napomene sa pravcima daljih istraživanja.

2. RAZVOJ ALGORITAMA ZA DETEKCIJU NAPADA U INDUSTRIJSKIM SISTEMIMA UPRAVLJANJA

Najveći deo istraživanja u oblasti sajber bezbednosti u okviru projekta MISSION4.0 upravo se odnosio na razvoj algoritama za detekciju napada u industrijskim sistemima upravljanja – ICS (engl. *Industrial Control Systems*). Međutim, pre razvoja samih mehanizama zaštite bilo je neophodno dubinsko poznavanje sistema čija se zaštita vrši kao i specifičnih algoritama koji se koriste za upravljanje resursima u Industriji 4.0. Ovde treba imati u vidu da Industrija 4.0 predstavlja relativno nov koncept i u skladu sa tim za implemetaciju IIoT i na njima zasnovanih distribuiranih sistema u okviru ICS i dalje ne postoje širokoprihvaćene inženjerske metode kao što je to slučaj sa centralizovanim upravljanjem. Kako bi se napravila solidna osnova za razvoj sistema zaštite od kibernetskih napada, određeni napori u okviru projekta su usmerenina metode za distribuciju zadataka upravljanja na pametne uređaje [4, 5], na analizu bezbednosnih izazova u okviru distribuiranih sistema upravljanja [4, 6], kao i na razvoj inteligentnih senzorskih sistema [7], ali je u fokusu istraživanja bio razvoj sistema za detekciju napada na sisteme za kontinualno upravljanje proizvodnim resursima.

ICS po pitanju zahteva koji se postavljaju pred sisteme za detekciju napada imaju određene specifičnosti u odnosu na opšte informacione tehnologije [8]. Kod opštih informacionih tehnologija su poverljivost i integritet

podataka najznačajniji i prihvatljivo ih je obezbediti na račun brzine komunikacije, odnosno raspoloživosti podataka. Kod ICS, s druge strane, od najvećeg značaja je imati podatke na raspolaganju u realnom vremenu kako ne bi došlo do kašnjenja u ostvarivanju upravljačkih zadataka koji su najčešće vremenski ograničeni. Pored toga, u opštim informacionim tehnologijama za implementaciju sistema za zaštitu od napada na raspolaganju je hardver sa relativno visokim proračunskim sposobnostima i mrežnim napajanjem, dok kod ICS kontroleri, posebno u slučaju distribuiranog upravljanja, imaju ograničene proračunske mogućnosti, a često su i napajani baterijama i samim tim energetski ograničeni. Takođe, za razliku od opštih informacionih tehnologija kod kojih su po pravilu u upotrebi operativni sistemi, u okviru ICS najčešće se koriste namenski kreirani softveri i komunikacioni protokoli. Još jedna značajna razlika između opštih informacionih tehnologija i ICS ogleda se u posledicama koje napadi mogu izazvati. Dok su kod opštih informacionih tehnologija posledice napada najčešće ekonomske prirode, kod ICS, pored ekonomskih, posledice mogu biti katastrofalne u smislu značajnih oštećenja opreme, fatalnog uticaja na životnu sredinu i zdravlje čoveka, a u najgorim scenarijima mogu rezultovati gubitkom ljudskih života. U skladu sa navedenim, očigledno je da je u okviru ICS potrebno kreirati namenske, proračunski efikasne algoritme za detekciju napada koji su okarakterisani nultom tolerancijom.

Algoritmi za detekciju napada na kontinualne sisteme upravljanja po pravilu su zasnovani na modeliranju ponašanja sistema u normalnim uslovima (bez napada), a napadi se detektuju na osnovu razlike između modeliranih i ostvarenih vrednosti određenih signala [9]. Modeli mogu biti analitički ili zasnovani na podacima [10]. Imajući u vidu da se u proizvodnom okruženju može pronaći mnoštvo različitih procesa za koje je najčešće izuzetno komplikovano ili nemoguće kreirati analitički model, u okviru projekta MISSION4.0 korišćen je pristup zasnovan na podacima. Kao osnovna tehnika za kreiranje algoritama odabrane su duboke neuronske mreže – DNN (engl. *Deep Neural Networks*) i to:

1. Jednostavne rekurentne neuronske mreže – *Simple* RNN (engl. *Simple Recurrent Neural Networks*),
2. LSTM (engl. *Long Short-Term Memory*) rekurentne neuronske mreže,
3. GRU (engl. *Gated Recurrent Unit*) rekurentne neuronske mreže,
4. CNN (engl. *Convolutional Neural Networks*).

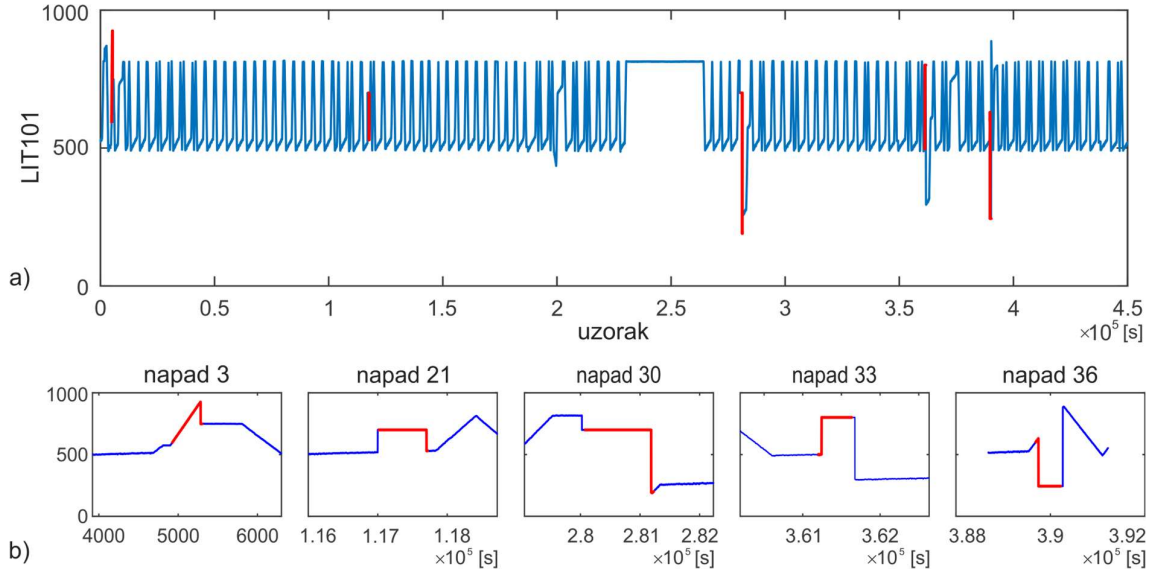
Implementacija DNN zahteva veliku količinu podataka, pa su tokom istraživanja korišćena dva skupa:

1. SWaT (engl. *Secure Water Treatment*) skup podataka i
2. Skup podataka dobijen sa elektropneumatskog sistema za pozicioniranje.

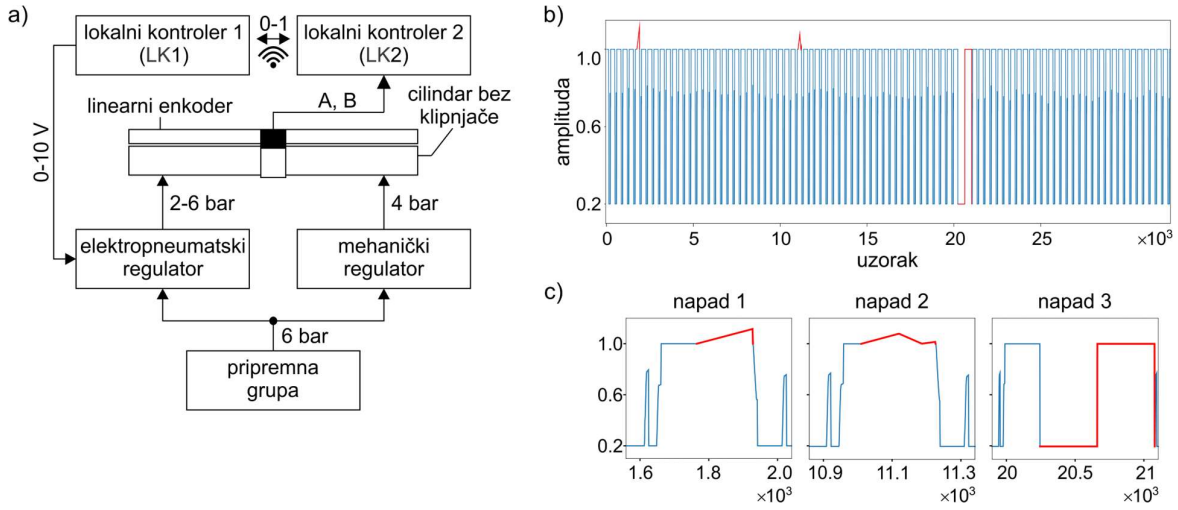
SWaT predstavlja skaliranu verziju industrijskog sistema za prečišćavanje vode kreiranu u svrhu istraživanja u oblasti sajber bezbednosti [11]. Sistem vrši filtriranje vode u šest sektora koji se upravljaju programabilnim kontrolerima i na koje je povezano ukupno 25 senzora i 26 aktuatora. Podaci koji se komuniciraju između kontrolera s jedne i senzora i aktuatora s druge strane se za čitav sistem prikupalju korišćenjem SCADA-e (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*). Akvizicija ovih podataka je vršena ukupno 11 dana od čega je tokom 7 dana sistem funkcionisao u normalnim uslovima, dok je u poslednja 4 dana lansirano ukupno 36 napada na komunikacione linkove sa različitim senzorima i aktuatorima. Na slici 2 prikazan je primer signala sa senzora nivoa vode u rezervoaru – LIT101 koji je prikupljen tokom poslednja 4 dana; delovi signala sa napadima na ovaj senzor (ukupno 5 napada) izdvojeni su i uveličani.

Pošto je, pored razvoja algoritama za detekciju napada na signale, bio cilj dokazati i njihovu primenljivost u realnim uslovima, u okviru projekta MISSION4.0 razvijena je eksperimentalna instalacija – elektropneumatski sistem za pozicioniranje čija je osnovna konfiguracija prikazana na slici 3a. Sistem se sastoji od 1) pametnog cilindra bez klipnjače upravljanog elektropneumatskim regulatorom pritiska sa jedne i mehaničkim regulatorom pritiska sa druge strane koji ima integrisan lokalni kontroler 1 (LK1) i 2) pametnog linearnog enkodera sa integrisanim lokalnim kontrolerom 2 (LK2). Oba lokalna kontrolera zasnovana su na NXP LPC1768 mikrokontroleru i kroz međusobnu komunikaciju ostvaruju zadatu trajektoriju cilindra [12]. Podaci komunicirani između lokalnih kontrolera u okviru ove instalacije prikupljeni su za različite trajektorije cilindra i javno su dostupni na *Zenodo* platformi u skladu sa FAIR (engl. *Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable*) principima [13]; deo snimljenog signala sa izdvojenim napadima prikazan je na slikama 3b i 3c.

Prilikom kreiranja sistema za detekciju napada odabran je pristup polunadgledanog obučavanja kod koga su algoritmu za kreiranje IDS na raspolaganju podaci komunicirani između senzora/aktuatora i ostalih elementa sistema upravljanja tokom normalnog rada (bez napada). Korišćenjem ovih podataka i DNN, u okviru MISSION4.0 kreirani su autoregresioni modeli signala kod kojih se trenutna vrednost komuniciranog signala $s(t)$ procenjuje na osnovu bafera njegovih prethodnih z vrednosti - $s(t-z),...,s(t-1)$ (slika 4). Napad na

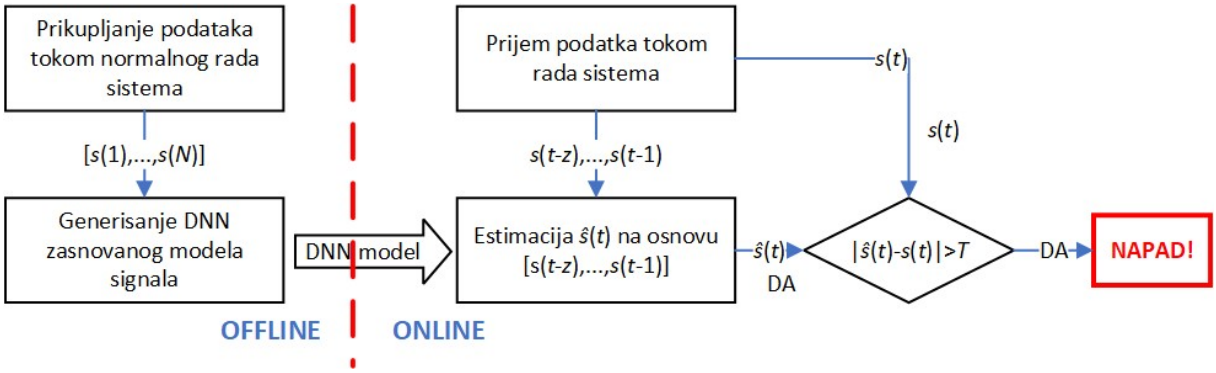


Slika 2. *LIT101 signal sa napadima: a) ceo signal; b) izdvojeni delovi signala za svaki od napada (napadi su označeni crvenom bojom)*



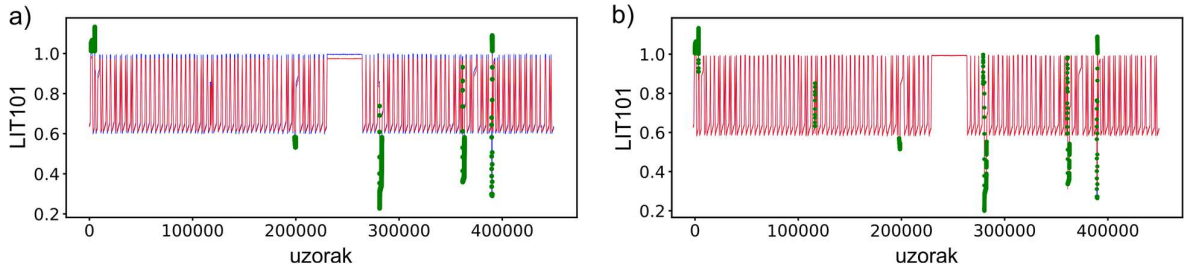
Slika 3. *Elektropneumatski sistem za pozicioniranje: a) skica sistema [12]; b)ceo signal sa napadima; c) izdvojeni delovi signala za svaki od napada (napadi su označeni crvenom bojom)*

komunikacioni link se detektuje kada razlika između primljene $s(t)$ i procenjene $\hat{s}(t)$ vrednosti signala pređe odogovarajući prag - T. Imajući u vidu da su kontrolerima u okviru distribuiranih sistema upravljanja na raspolaganju samo podaci sa pojedinih senzora/aktuatora, odlučeno je da se za detekciju napada na komunikacine linkove koristi univarijantna autoregresija komuniciranih podataka, tj. da se svaki signal modelira zasebno. Kreiranje IDS na osnovu univarijantnog modela je teže u odnosu na multivarijanti model kod koga se jednim modelom obuhvata više signala jer ne uzima u obzir korelaciju između podataka prikupljanih sa senzora i aktuatora. Međutim, IDS zasnovan na univarijantnom modelu je značajno jednostavnije implementirati jer se ne pojavljuju problemi vezani za raspoloživost određenih signala na kontroleru u okviru distriburianih sistema, različitu frekvencu odabiranja pojedinih signala i slično, već se IDS primenjuje odmah nakon prijema vrednosti komunikacionim linkom. Ovde je potrebno naglasiti da univarijantna regresija predstavlja potpuno novi pristup u odnosu na ranije sprovedena istraživanja u oblasti kreiranja IDS na osnovu podataka [14-20] koja čak ne uzimaju u obzir ni mogućnost implementacije algoritama (raspoloživost odgovarajućih signala) na nekom od uređaja u sistemu upravljanja.



Slika 4. *Osnovna arhitektura metode za generisanje IDS u okviru sistema za kontinulano upravljanje proizvodnim resursima*

Rekurentne neuronske mreže su mreže kod kojih trenutna vrednost izlaza zavisi ne samo od trenutne vrednosti ulaza već i od njegovih prethodnih vrednosti reprezentovanih u okviru skrivenih stanja RNN [21, 22] pa je opšteprihvaćen stav da RNN predstavljaju pogodnu tehniku za modeliranje kontinualnih sistema. Polazeći od navedenog, u okviru MISSION4.0 projekta prvobitno je istraživana primena RNN i to *Simple* RNN, LSTM i GRU u kreiranju IDS, a deo rezultata je prezentovan u [23]. Ipak, nastavak istraživanja je pokazao da se bolji rezultati dobijaju uz primenu CNN što je ilustrovanono slici 5 gde su prikazani rezultati primene IDS zasnovane na LSTM RNN i CNN na signalu sa LIT101 senzora iz SWaT skupa podataka. Na ovom signalu LSTM zasnovan IDS je uspeo da detektuje četiri od pet napada na LIT101 signal (napad 21 nije detektovan) i još dva napada na susedne aktuatore, dok je CNN zasnovan IDS bio uspešniji – detektovao je sve napade na LIT101 kao i dva napada na susedne aktuatore; napominje se da su *Simple* RNN i GRU RNN dale lošije rezultate od LSTM RNN.



Slika 5. *Napadi detektovani na LIT101 signalu iz SWaT skupa podataka korišćenjem IDS zasnovane na: a) LSTM RNN; b) CNN; Originalan signal normiran maksimalnom vrednošću signala bez napada prikazan je crvenom linijom, procenjene vrednosti signala plavom linijom, a odbirci na kojima je detektovan napad označeni su zelenim markerom*

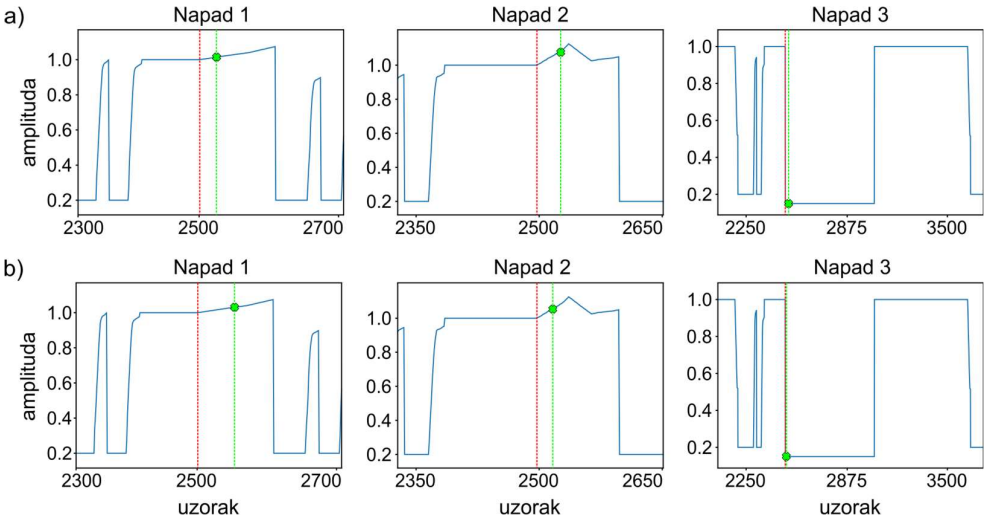
Sprovedena istraživanja su pokazala da je manuelno definisanje DNN arhitekture koja je pogodna za modeliranje signala, definisanje broja podataka z koji će se koristiti pri modeliranju, kao i određivanje praga T za detekciju napada vremenski zahtevno i podložno greškama što naročito dolazi do izražaja prilikom rekonfiguracije proizvodnih resursa kada je IDS potrebno kreirati za svaki novi signal. Iz navedenih razloga, u okviru MISSION4.0 projekta kreiran je metod za automatski izbor DNN, z i T na osnovu svojstava generalizacije različitih DNN modela i njihove sposobnosti da izbegnu prepoznavanje lažno pozitivnih rezultata što je izuzetno značajno u realnim ICS. Ovaj metod je detaljno opisan u radu [9] i zasnovan je na polumrežnoj pretrazi koja za cilj ima pronalaženje DNN sa najmanjim brojem parametara i najmanjom vrednošću z, a koja ispunjava zadate uslove. Naime, broj parametara DNN i veličina bafera z direktno su korelisani sa proračunskom kompleksnošću IDS, a samim tim i sa kašnjenjem koje IDS uzrokuje u algoritmu upravljanja koji radi u realnom vremenu. Ovo se naravno preslikava i na potrošnju energije što je značajno za energetski ograničen hardver.

Potrebno je naglasiti da automatsko definisanje arhitekture mreže i praga za detekciju predstavlja potpuno novi pristup. U prethodnim istraživanjima [17, 18, 24, 25] kreirane su jedinstvene arhitekture mreža, najčešće velike proračunske kompleksnosti, za tačno određene skupove podataka, a pragovi su podešavani ručno [25,

26] ili su zasnovani na primeni signala sa napadima [18, 24] tako da je njihova primenljivost za detekciju napada koji nisu razmatrani pri određivanju pragova upitna.

Pored toga, za razliku od ostalih istraživanja u oblasti koja se nisu bavila implementacijom i eksperimentalnom verifikacijom razvijenih IDS u realnim sistemima, u okviru MISSION4.0 razvijeni IDS su implementirani na opisanom elektropneumatskom sistemu za pozicioniranje [27]. IDS zasnovani na LSTM RNN i CNN su uspešno detektovali lansirane napade kao što je prikazano na slici 6. Iako je po prirodi uvela dodatno kašnjenje u algoritam upravljanja, implementacija IDS nije imala negativne posledice na sveukupan rad sistema.

Iz navedenih razmatranja očigledno je da implementacija DNN u razvoju IDS zahteva veliku količinu podataka dobijenih iz sistema prilikom njegovog normalnog funkcionisanja. Ukoliko se radi o ustaljenim proizvodnim procesima, prikupljanje podataka ne bi trebalo da predstavlja problem, ali u slučaju česte rekonfiguracije sistema ono može predstavljati izazov. Proširivanje podataka (engl. *Data Augmentation*) predstavlja jedan od načina za rešavanje ovog problema. U okviru MISSION4.0 projekta generativne suparničke mreže – GAN (engl. *Generative Adversarial Networks*) su uspešno primenjene za generisanje količine podataka neophodne za razvoj DNN zasnovanih IDS na osnovu relativno malog broja uzoraka na ulazu [28].



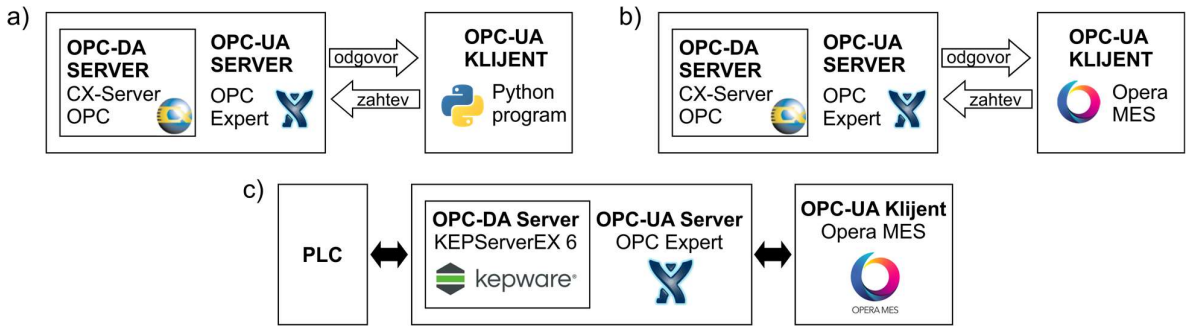
Slika 6. *Napadi detektovani na realnom elektropneumatskom sistemu za pozicioniranje korišćenjem IDS zasnovanog na: a) LSTM RNN; b) CNN; Trenutak napada je označen isprekidanom crvenom, a trenutak njegovog prepoznavanja isprekidanom zelenom linijom*

3. PRIMENA OPC-UA ZA RAZMENU PODATAKA IZMEĐU UREĐAJA U OKVIRU ICS

Jedan od ključnih problema u implementaciji IIoT predstavlja interoperabilnost opreme različitih proizvođača prilikom njenog povezivanja u jedinstven sistem. OPC-UA predstavlja namenski kreiran standard čiji je cilj da obezbedi jednostavnu, pouzdanu i sigurnu komunikaciju između različitih uređaja u okviru ICS [29]. Njega je razvila OPC fondacija koja predstavlja konzorcijum proizvođača i krajnjih korisnika opreme i softvera za industrijsku automatizaciju, a standardizovan je kroz IEC 62541. Razmena poruka u okviru OPC-UA vrši se korišćenjem jednog od dva moguća pristupa – klijent/server (engl. *Client/Server*) ili objava/pretplata (engl. *Publish/Subscribe*). OPC-UA je zasnovan na servisno orijentisanoj arhitekturi u okviru koje server stavlja na raspolaganje klijentu unapred definisan skup servisa. Interoperbilnost se ostvaruje tako što se zajedno sa podacima razmenjuje i njihov meta model koji je definisan u adresnom prostoru servera.

U okviru projekta MISSION4.0 kao osnova za izučavanje kibernetskih napada na njih izvršen je razvoj određenih sistema upravljanja u okviru kojih je komunikacija između uređaja vršena korišćenjem OPC-UA. Jedan od sistema odnosio se na integraciju inteligentnog senzora za određivanje orijentacije dela i manipulatora koji je upravljan programabilim kontrolerom – PLC-om (engl. *Programmable Logic Controller*) *Omron* CP1L-EM40DT-D. Inteligentan senzor zasnovan je na kameri *Cognex Insight* 2000-120 proširenoj kontrolerom *RaspberryPi* Model B. Zadatak upravljanja, koji se odnosio na manipulaciju dela u dva položaja u zavisnosti od njegove orijentacije, distribuiran je između PLC-a i *RaspberryPi* uređaja na sledeći način [30]. Korišćenjem namenskog algoritma zasnovanog na konvolucionim neuronskim mrežama [31] koji

implementiran u okviru programskog jezika *Python*, *RaspberryPi* određuje orijentaciju dela i šalje binarnu informaciju o njoj programabilnom kontroleru koji na odgovarajući način vrši pokretanje manipulatora. Komunikacija između inteligentnog senzora i PLC-a vrši se korišćenjem OPC-UA koji obezbeđuje interoperbilnost uređaja zasnovanih na potpuno različitim hardverskim komponentama. U ovoj konfiguraciji na strani PLC-a je podignut OPC-UA server, dok je u okviru programa za detekciju orijentacije dela realizovanom u *Python*-u uspostavljen OPC-UA klijent. Imajući u vidu da je za korišćeni PLC na raspolaganju bila softverska podrška samo za OPC-DA (engl. *Data Access*) server starije generacije, bilo je potrebno izvršiti njegovo upakivanje korišćenjem OPC-UA *wrapper*-a – u ovom slučaju upotrebljen je OPC *Expert* (slika 7a).



Slika 7. *OPC-UA klijent/server arhitektura za komunikaciju između: a) PLC-a Omron CP1L-EM40DT-D i RaspberryPi [30]; b) PLC-a Omron CPM1-10CDR-A* i *OperaMES [32]; c) PLC-a Mitsubishi iQ-F FX5UC i OperaMES [33]*

Za prikupljanje podataka iz proizvodnih pogona i lansiranje proizvodnje u skladu sa dinamički definisanim planovima koji su bili u fokusu radnog paketa Dinamičko planiranje i terminiranje kibernetsko fizičkih proizvodnih sistema (engl. *Dynamic process planning and scheduling of Cyber-Physical Production Systems*) u okviru projekta MISSION4.0, izuzetno značajnu ulogu imaju sistemi za izvršavanje proizvodnje – MES (engl. *Manufacturing Execution Systems*). Puna implementacija ovih sistema podrazumeva automatsku razmenu podataka između MES i uređaja koji funkcionišu unutar ICS koja se može ostvariti samo uz njihovu potpunu interoperabilnost. U tom kontekstu, u okviru projekta MISSION4.0 izvršene su određene razvojne aktivnosti koje su se odnosile na povezivanje sistema za izvršavanje proizvodnje *OperaMES* sa PLC-ovima korišćenjem OPC-UA. Konkretno, povezani su PLC-ovi *Omron* CPM1-10CDR-A i PLC *Mitsubishi* iQ-F FX5UC korišćenjem klijent/server arhitekture prikazane na slikama 7b i 7c u okviru koje su OPC-UA serveri podignuti na strani PLC-ova, dok je *OperaMES* imala ulogu OPC-UA klijenta. Detalji vezani za ove aktivnosti kao i njihovi rezultati dati su u radovima [32, 33].

4. EDUKACIJA INŽENJERA U OBLASTIMA CPS, IIOT I SAJBER BEZBEDNOSTI

Jedan od izuzetno značajnih elemenata projekta MISSION4.0 predstavljala je diseminacija njegovih rezultata koja je obuhvatala ne samo naučnu i stručnu javnost, već i opštu populaciju. Sajber bezbednost u okviru ICS predstavlja novu naučnoistraživačku i inženjersku oblast koja je zamah dobila tek od 2010. godine nakon Stuxnet napada na iransko nuklearno postrojenje [34]. Imajući u vidu da će implementacija ove oblasti u inženjerskoj praksi tek dobiti zamah u narednom periodu s jedne, kao i posledica do kojih njeno zanemarivanje može dovesti u proizvodnim preduzećima s druge strane, posebna pažnja mora biti usmerena na edukaciju nove generacije inženjera sposobnih da implementiraju bezbednosne mehanizme u okviru ICS. U tom kontekstu, izuzetni napori su usmereni na integraciju rezultata projekta MISSION4.0 u kurikulume odgovarajućih predmeta na master akademskim studijama.

Projekat MISSION4.0 je u tom smislu imao izuzetno povoljnu okolnost – paralelno sa izvršavanjem ovog projekta, na Univerzitetu u Beogradu – Mašinskom fakultetu započeta je implementacija novog Studijskog programa master akademskih studija – Industrija 4.0 [35] na kome je prva generacija studenata upisana školske 2020/21. godine. Kurikulum navedenog studijskog programa obuhvata i predmete Kibernetsko fizički sistemi i Industrijski internet stvari i sajber bezbednost koji su u svojoj osnovi bili pogodni za integraciju rezultata projekta MISSION4.0 i njihovu diseminaciju ka studentskoj populaciji, a dalje, nakon njihovog zapošljavanja, i ka industriji Republike Srbije.

U okviru ovih predmeta uvedene su sledeće nastavne celine:

- Ciljevi sistema za zaštitu od kibernetskih napada,
- Vrste kibernetskih napada u ICS,
- Metode zaštite ICS od kibernetskih napada,
- Koncept dubinske odbrane,
- IDS u okviru sistema sa kontinualnim upravljanjem,
- Otvorena platforma za komunikaciju – OPC-UA standard

u koje su direktno integrisani rezultati projekta MISSION4.0.

Iskustva stečena u razvoju kurikuluma navedenih predmeta i edukaciji studenata podeljena su i sa širom javnosti u okviru rada [36] sa ciljem da se navedene oblasti i rezultati istraživanja u okviru projekta MISSION4.0 što jednostavnije uključe i u kurikulume studijskih programa na drugim visokoškolskim institucijama.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je pregled rezultata istraživanja sprovedenih u okviru radnog paketa Sajber bezbednost u kontinualnim sistemima upravljanja na projektu MISSION4.0. Na osnovu datog pregleda može se zaključiti da su najznačajniji rezultati ovog radnog paketa:

1. Razvoj i eksperimentalna verifikacija na realnoj platformi nove metodologije za potpuno automatsko generisanje sistema za detekciju napada na distribuirane sisteme za kontinualno upravljanje proizvodnim resursima koji su zasnovani na metodama dubokog učenja i čije su karakteristike mala proračunska komplesnost, primenljivost na proračunski i energetski ograničenim hardverskim resursima u okviru ICS, visoka efektivnost i rad u realnom vremenu bez značajnih posledica na funkcionalnost sistema u kome su implementirani;
2. Stvaranje preduslova za automatsku implementaciju planova proizvodnje generisanih tehnikama razvijenim u okviru radnog paketa Dinamičko planiranje i terminiranje kibernetsko fizičkih proizvodnih sistema kroz ostvarivanje interoperabilnosti uređaja u okviru ICS korišćenjem OPC-UA;
3. Sveobuhvatna diseminacija rezultata istraživanja ka naučnoj i stručnoj javnosti, kao i edukacija nove generacije inženjera u oblasti sajber bezbednosti u ICS.

Detalji sprovedenih istraživanja mogu se pronaći u objavljenim radovima i to u 5 radova u naučnim časopisima [6, 7, 9, 12, 37], jednom poglavlju u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja [36] i devet radova saopštenih na međunarodnim i domaćim konferencijama [4, 23, 27, 28, 30, 31, 32, 33].

U narednom periodu će rezultati i iskustva stečena na ovom projektu poslužiti kao osnova za nastavak istraživanja u oblasti sajber bezbednosti u okviru industrijskih sistema upravljanja pri čemu će umesto kontinualnih sistema upravljanja u fokusu biti neki drugi elementi ICS.

6. LITERATURA

[1] Fond za nauku Republike Srbije, http://fondzanauku.gov.rs, datum pristupa: 19.08.2022.

[2] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.: *Recommendations for Implementing Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, Acatech, Germany, 2013.

[3] IEC 62264: *Enterprise-control system integration.* International Electrotechnical Commission,2013-2020, https://webstore.iec.ch/publication/59706, datum pristupa: 19.08.2022.

[4] Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.: *Distribution of Control Tasks to Smart Devices in Industrial Control Systems: a Case Study*, 8th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2021), pp. 585-590, Bijeljina, B&H, 2021.

[5] Jakovljevic, Z., Lesi, V., Pajic, M.: *Attacks on distributed sequential control in manufacturing automation,* IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 2, pp.775-786, 2020.

[6] Lesi, V., Jakovljevic, Z., Pajic, M.: *Security analysis for distributed IoT-based industrial automation*, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, doi: 10.1109/TASE.2021.3106335

[7] Markovic, V., Jakovljevic, Z., Budak, I.: *Automatic recognition of cylinders and planes from unstructured point clouds*, The Visual Computer, pp.1-24, 2021, doi: 10.1007/s00371-021-02299-9

[8] Stouffer, K., Pillitteri, V., Lightman, S., Abrams, M., Hahn, A.: *Guide to industrial control systems (ICS) security*, 2015.

[9] Nedeljkovic, D., Jakovljevic, Z.: *CNN based method for the development of cyber-attacks detection algorithms in industrial control systems*, Computers & Security, Vol. 114, Article 102585, 2022.

[10] Umer, M. A., Mathur, A., Junejo, K. N., Adepu, S.: *Integrating Design and Data Centric Approaches*

to Generate Invariants for Distributed Attack Detection, Proceedings of the 2017 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and Privacy, pp. 131–136, ACM, Dallas, USA, 2017.

[11] Goh, J., Adepu, S., Junejo, K.N., Mathur, A.: *A dataset to support research in the design of secure water treatment systems,* International Conference on Critical Information Infrastructures Security, Springer, Paris, France, pp. 88–99, 2016.

[12] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z., Pajić, M.: *Detection of cyber-attacks in systems with distributed control based on support vector regression*, Telfor Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 104-109, 2020.

[13] Nedeljkovic, D., Jakovljevic, Z.: *New datasets obtained from experimental installations with centralized control*, [Data set]. Zenodo, http://doi.org/10.5281/zenodo.5514351, 2021.

[14] Das, T., Adepu, S., Zhou, J.: *Anomaly detection in industrial control systems using logical analysis of data*, Computers & Security, Vol. 96, Article 101935, 2020.

[15] Elnour, M., Meskin, N., Khan, K.: *Hybrid attack detection framework for industrial control systems using 1D-convolutional neural network and isolation forest*, 4th IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA 2020), pp. 877–884, IEEE, Montreal, Canada, 2020.

[16] Elnour, M., Meskin, N., Khan, K., Jain, R.: *A dual-isolation-forests-based attack detection framework for industrial control systems*, IEEE Access, Vol. 8, pp. 36639-36651, 2020.

[17] Inoue, J., Yamagata, Y., Chen, Y., Poskitt, C. M., Sun, J.:*Anomaly detection for a water treatment system using unsupervised machine learning*, 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW), pp. 1058-1065, IEEE,New Orleans, USA, 2017.

[18] Kravchik, M., Shabtai, A.: *Efficient cyber attack detection in industrial control systems using lightweight neural networks and pca*, IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2021, doi: 10.1109/TDSC.2021.3050101

[19] Priyanga, S., Krithivasan, K., Pravinraj, S., Shankar, S.:*Detection of Cyberattacks in Industrial Control Systems Using Enhanced Principal Component Analysis and Hypergraph-Based Convolution Neural Network (EPCA-HG-CNN)*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, pp. 4394-4404, 2020.

[20] Sapkota, S., Mehdy, A., Reese, S., Mehrpouyan, H.:*Falcon: Framework for anomaly detection in industrial control systems,* Electronics, Vol. 9, No. 8, pp. 1-20, 2020.

[21] Elman, J.: *Finding Structure in Time*, Cognitive Science, Vol. 14, No. 2,pp. 179-211, 1990.

[22] Hochreiter, S., Schmidhuber, J.: *Long short-term memory*, Neural Computation, Vol. 9, No. 8, pp. 1735–1780, 1997.

[23] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.: *Cyber-attack detection method based on RNN*, 7th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2020), pp. 726-731, Belgrade, Serbia, 2020.

[24] Kravchik, M., Shabtai, A.: *Detecting cyber attacks in industrial control systems using convolutional neural networks*, Proceedings of the 2018 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and Privacy, pp. 72-83, ACM, Toronto, Canada, 2018.

[25] Raman MR, G., Somu, N., Mathur, A.: *A multilayer perceptron model for anomaly detection in water treatment plants*, International Journal of Critical Infrastructure Protection, Vol. 31, Article 100393, 2020.

[26] Goh, J., Adepu, S., Tan, M., Lee, Z. S.: *Anomaly detection in cyber physical systems using recurrent neural networks*, 2017 IEEE 18th International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE), pp. 140-145, IEEE, Singapore, 2017.

[27] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.: *Implementation of CNN based algorithm for cyber-attacks detection on a real-world control system*, 14th International Scientific Conference MMA 2021 – Flexible Technologies, pp. 119-122, Novi Sad, Serbia, 2021.

[28] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.: *GAN-based Data Augmentation in the Design of Cyber-attack Detection Methods*, 9th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2022), pp. 669-674, Novi Pazar, Serbia, 2022.

[29] OPC foundation -The Industrial Interoperability Standard, https://opcfoundation.org/, datum pristupa: 19.08.2022.

[30] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.: *Integration of Smart Vision Sensor into Manipulator Control System using OPC-UA*, 28th Telecommunications Forum (TELFOR 2020), Article 4734, Belgrade, Serbia, 2020.

[31] Nedeljković, D., Jakovljević, Ž., Miljković, Z.: *Klasifikacija slike zasnovana na primeni konvolucionih neuronskih mreža*, 42. JUPITER konferencija, str. 4.13-4.23, Beograd, Srbija, 2020.

[32] Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Ševarlić, F., Puzović, R.: *Komunikacija između proizvodnih resursa korišćenjem OPC-UA standarda*, 42. JUPITER konferencija, str. 4.1-4.12, Beograd, Srbija, 2020.
[33] Nedeljković, D., Stanojević, S., Puzović, R., Jakovljević, Ž.: *Integracija proizvodnih resursa u sistem za izvršavanje proizvodnje korišćenjem OPC-UA*, 13. ETIKUM konferencija, str. 65-68, Novi Sad, Srbija, 2021.
[34] Bakić, B., Milić, M., Antović, I., Savić, D., Stojanović, T.: *10 years since Stuxnet: What have we learned from this mysterious computer software worm?*, 25th International Conference on Information Technology (IT), pp. 1-4, IEEE, Žabljak, Montenegro, 2021.
[35] Master akademske studije INDUSTRIJA 4.0, http://i40.mas.bg.ac.rs/, datum pristupa: 19.08.2022.
[36] Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.: *Cyber Physical Systems in Manufacturing Engineers Education*, 11th International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Series Mechanisms and Machine Science - Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (Proceedings of KOD 2021), Springer,2021, doi: 10.1007/978-3-030-88465-9
[37] Lesi, V., Jakovljevic, Z., Pajic, M.: *IoT-Enabled Motion Control: Architectural Design Challenges and Solutions*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, doi: 10.1109/TII.2022.3202175, 2022

Jakovljević, Ž., Nedeljković, D.

CYBER SECURITY IN CONTINUOUS-TIME CONTROLLED SYSTEMS – OVERVIEW OF THE RESULTS WITHIN THE PROJECT OF MISSION4.0

Abstract: *This paper presents the research results conducted within the project Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0, funded by the Science Fund of the Republic of Serbia in the period 2020-2022. The shown results refer to the field of cyber security in continuous-time controlled systems as one of the work packages of the MISSION4.0 project. Accordingly, the research directions were related to developing algorithms for attack detection in Industrial Control Systems with centralized and distributed architecture, as well as the application of an open platform communication to securely exchange the data between the multi-vendor devices. In addition, the achieved results and their integration into lectures and laboratory exercises served as a basis for the education of engineers in cyber-physical systems, Industrial Internet of Things, and cyber security.*
Key words: *cyber security, attack detection, OPC-UA, engineers education*

43. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

30. simpozijum

CAD/CAM

Beograd, oktobar 2022.

CAD/CAM

Živković, S., Malbašić, S., Grubić, A.
AM POTENCIJAL - PROJEKTOVANjE ZA ADITIVNU PROIZVODNjU 2.1

Ranđelović, S., Stamenković, S., Kostić, N.
FEM SIMULACIJA PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA CILINDRIČNIH ELEMENATA 2.8

Matin, I., Štrbac, B., Hadžistević, M., Ranisavljev, M.
THE PLASTIC PRODUCT DEVELOPMENT USING CAD/CAE ADVANCED TOOLS 2.14

Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N.
KONFIGURISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ALATKI U STEP-NC OKRUŽENJU NA PRIMERU ADITIVNIH TEHNOLOGIJA 2.20

Stojanović, J., Pjević, M., Popović, M., Mladenović, G.
STATE OF THE ART IN THE FIELD OF FORCE PREDICTION IN BALL END MILLING 2.27

Jevtić, I., Popović, M., Mladenović, G., Pjević, M., Milošević, M., Milovanović, A.
GENERATIVNI DIZAJN I PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U OKRUŽENJU CREO PARAMETRIC 2.35

Spasojević, B., Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G., Puzović, R.
SIMULACIJA PROCESA KOVANJA PRIMENOM NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA 2.39

Trajkov, A., Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G.
ANALIZA PROIZVODNOSTI DELOVA VEĆIH GABARITA PRIMENOM ADITIVNIH TEHNOLOGIJA I TEHNOLOGIJA SPAJANJA 2.45

← NAZAD

Živković, S., Malbašić, S., Grubić, A.[1)]

AM POTENCIJAL –PROJEKTOVANJE za ADITIVNU PROIZVODNJU[2)]

Sažetak: *U radu je dat prikaz najvažnijih standarda za oblast aditivnih proizvodnih tehnologija sa akcentom na one koji se odnose na proizvodnju delova od metala. Takođe, u radu je objašnjena procedura definisanja potencijala mašinskih delova i sklopova za izradu primenom metode fuzije metalnog praha selektivnim laserskim topljenjem. Na kraju je prikazan dodatak za CAD/CAM sisteme koji omogućava automatsko određivanje tehnologičnosti projektovanih delova za proizvodnju aditivnim tehnološkim postupkom.*

Ključne reči: *Aditivne Tehnologije, Fuzija metalnog praha selektivnim laserskim topljenjem, Standardizacija, Projektovanje za proizvodnju i montažu.*

1. UVOD

Aditivna proizvodnja (eng: *Additive Manufacturing*, u daljem tekstu AM) je izrada mašinskih delova i sklopova dodavanjem materijala u slojevima [1]. Konvencionalnim (subtraktivnim) tehnikama mašinske obrade, delovi se izrađuju odvajanjem/skidanjem materijala (struganje, glodanje, brušenje), uklanjanjem celokupnih zona (probijanje) ili oblikovanjem (presovanje, kovanje, livenje). Iz napred iznetog se može zaključiti da su AM tehnike potpuna suprotnost klasičnim mašinskim tehnologijama jer se AM tehnologijama materijal dodaje sloj po sloj do dobijanja konačnog oblika. S tim u vezi i projektovanje delova i sklopova za aditivnu proizvodnju ima svoje specifičnosti i zakonitosti.

Aditivne tehnologije obuhvataju nekoliko veoma različitih tehnoloških procesa. U neformalnim razgovorima najčešće se naziva *3D_Print* iako je 3D štampa samo jedan od 7-8 različitih AM tehnologija [2]. 3D štampa je termin koji se najviše koristi u žargonskom smislu kod razih hobista i ljubitelja ove tehnologije, dok se termin aditivna proizvodnja koristi u industrijskim krugovima.

Svim AM tehnologijama je zajedničko da se finalni proizvod ne dobija u jednom koraku procesa. AM tehnologije bi trebalo posmatrati kao deo većeg proizvodnog sistema. Za razliku od konvencionalnih kod AM tehnologija je veća povezanost materijala i procesa, veća je zastupljenost različitih promenljivih i parametara.

U nastavku rada opisana je struktura standarda i data objašnjenja u vezi sa terminologijom, formatima podataka, primenjenim materijalima i procesima testiranja karakterističnim za AM. Treće poglavlje objašnjava metodologiju za procenu AM potencijala i *DfAM* (Design for Additive Manufacturing) pristup sa pratećim softverskim paketom. Rad se završava zaključcima i smernicama za nastavak istraživanja u ovoj oblasti.

[1)] dr Srđan Živković, Vojnotehnički Institut Beograd, (srdjan.vti@gmail.com); mr Slobodan Malbašić, Ministarstvo odbrane Uprava za Odbrambene Tehnologije (slobodan.malbasic@mod.gov.rs); Aleksa Grubić, Vojnotehnički Institut Beograd(grubicaleksa8@gmail.com)

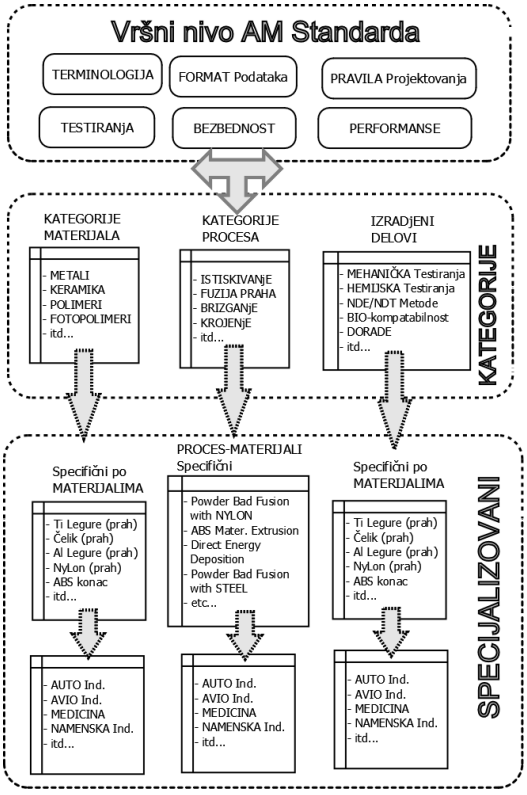
[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koje podržava Ministarstvo Prosvete, Nauke i Tehnološkog Razvoja Vlade Republike Srbije - Ugovor br. 451-03-68/2022-14/200325

2. AM STANDARDI

Paralelno sa razvojem aditivnih tehnoloških postupaka, mašina i prateće opreme, međunarodna organizacija ISO (International Standardization Organization) je intezivno radila na razvoju i primeni standarda iz AM oblast. Činjenica je da je ovo jedna od disruptivnih tehnologija koja se najbrže razvija (počeci razvoja datiraju tokom 80-ih i 90-ih godina prošlog veka) te je razvoj neophodnih standarda paralelno sa razvojem tehnike i različitih tehnologija nesporan i nužan proces. U ovom trenutku usvojeno je oko 70 standarda iz AM oblasti a još 100 standarda je u pripremi. Struktura AM standarda je prikazana na slici 1.

Sa bržim tehnološkim razvojem i većom prisutnošću na tržištu ove tehnologije tako je rasla je i potreba za opštim razumevanje tehničkih pojmova i detalja o AM procesima. AM proizvodnja je danas dostigla nivo industrijske primene. Posebno naglašavamo primenu AM tehnologije u avioindustriji i stomatologiji (koje su takođe na nivou industrijske primene), te s tim u vezi došlo je do porasta zahteva za deklarisanim svojstvima materijala, procedurama testiranja i drugim specifičnostima karakterističnim za AM procese.

Standardizacija je dugotrajan proces, koji realizuju sve zainteresovane strane kroz učešće u svojim nacionalnim telima za standardizaciju. U R.Srbiji nacionalno telo za standardizaciju je ISS (Institut za Standardizaciju Srbije) [1].



Slika 1. *Структура АМ стандарда*

2.1 Terminologija

Prvi korak u razvoju AM standarda se odnosio na terminologiju, zbog činjenice da je bilo previše različitih termina, skraćenica i naziva za AM procese. Najčešće korišćeni izraz za celokupnu AM oblast je „3D štampanje“ što ima svoje poreklo u kućnim primenama jeftinih štampača. Terminologijom za AM se bavi standard SRPS EN ISO/ASTM 52900:2017 Aditivne tehnologije – Opšti principi – Terminologija.

Standard SRPS EN ISO/ASTM 52921:2017 Terminologija u standardima koji se odnose na aditivne tehnologije – Koordinatni sistemi i metodologije ispitivanja definiše termine, njihove definicije i opise, nomenklature i akronime pridružene koordinatnim sistemima i metodologijama ispitivanja za AM tehnologije. Standard je proistekao iz ukazane potreba za usklađivanjem terminologije izveštavanja AM korisnika, proizvođača opreme, nastavnog kadra, istraživača i medija prilikom prikaza rezultata ispitivanja

delova izrađenih AM tehnologijom.

Standard SRPS EN ISO 17296-2:2017 Aditivne tehnologije – Opšti principi – Deo 2: Pregled kategorija procesa i punjenje opisuje osnove AM procesa. Takođe daje pregled postojećih kategorija procesa a zbog svakodnevnog razvoja novih tehnologija standard ne obuhvata u potpunosti sve procese. Ovaj standard objašnjava kako različite kategorije procesa koriste različite vrste materijala za oblikovanje geometrije proizvoda. Takođe opisuje koje vrsta materijala se koriste u različitim kategorijama procesa.

2.2. Format podataka

Standardizacija formata podataka usmerena je na korisnike i proizvođače AM opreme, integrisane softverske sisteme i razmenu podataka.

Standard SRPS EN ISO 17296-4:2017 - Aditivne tehnologije – Opšti principi – Deo 4: Pregled obrade podataka, pokriva glavna razmatranja koja se odnose na razmenu podataka za AM. Određuje termine i definicije koje omogućavaju razmenu geometrijskih informacija delova koji bi mogli mogu biti proizvedeni nekom AM tehnologijom.

Standard SRPS EN ISO/ASTM 52915:2020 - Specifikacija formata dokumenta za aditivne tehnologije (AMF - AM File Format) v 1.2, daje specifikaciju za AM format datoteke, format razmene podataka za trenutne i buduće potrebe AM tehnologije. AMF se može pripremiti, prikazati i preneti pod uslovom da su ispunjeni zahtevi ove specifikacije. Pripremljen u struktuiranom elektronskom formatu, saglasno XML specifikaciji (XML - extensible markup language), ovaj standard podržava interoperatibilnost sa drugim usvojenim standardima za AM. Standard ne precizira nikakve eksplicitne mehanizme za osiguranje integriteta podataka, elektronskog potpisa i zahteve šifriranja.

Prema [3] STL (Stereo Lithography), AMF (Additive Manufacturing File), 3MF (3D Manufacturing Format) su standardi koji omogućavaju transfer podataka sa CAD softvera na hardversku komponentu odnosno štampač. Namena AMF i 3F standard je zamena STL standard jer poseduju bolje karakteristike u segmentu kreiranja/generisanja mreže (orijentacija i skaliranje) kao i druge karakteristike koje podržavaju AM proizvodnju (bolja reprezentacija površine, podržava različite materijale i njihove karakteristike, prepoznavanje unutrašnje strukture, bolje karakteristike boja i grafike, koristi meta podatake, prepoznaje pozicioniranje delova kod 3D štampe). STL je prvi razvijeni standard koji je još uvek u upotrebi ali je sa vremenom postao prevaziđen jer se nije adekvatno unapređivao pogotovo sa aspekta prepoznavanja karakteristika 3D modela (u literaturi poznato i kao MBD – Model Based Design pristup, upotreba 3D modela).

Pored napred navedenih formata, STEP format (protocol *AP242*) ima veliku zastupljenost u razmeni podataka ali se takođe koristi samo za opisivanje modela i ne spada u grupu formata za štampanje. STEP fajl je takođe neophodno prevesti u adekvatan format za štampanje. Novija verzija ovog formata poznata kao STEP-NC (protokol AP 238, NC – Numerical Control) je unapređena verzija u smislu prepoznavanja G-kod za CNC mašinu i isti generiše radi upravljanja sa mašinom bez prevođenja. Oba ova STEP standarda se planiraju za unapređenje u smislu prepoznavanja parametara i karakteristika aditivne proizvodnje (prepusti, saćasta struktura, lamelizacija, parametric mašine, i drugo) što je naročito bitno za hibridnu proizvodnju (kombinacija CNC i aditivne tehnologije).

2.3. Materijali

Materijali i njihova standardizacija su važni u postizanju robusnih procesa i pouzdanih svojstava komponenti proizvedenih AM tehnologijom. Metalni prahovi, kao sirovina, zahtevaju stručno rukovanje i obradu. Čak i najmanja odstupanja karakteristika metalnog praha može imati veoma veliki uticaj na svojstva procesa izrade kao i na krajnje karakteristike izrađenih komponenti [4]. U nastavku je prikazan spisak AM standarda za oblast metalnih materijala prema ASTM (*American Society for Testing and Materials*) i ISO (*International Standardization Organization*) izdanjima:

- ISO 52913-1; Additive manufacturing — Feedstock materials — Part 1: Parameters for characterization of powder flow properties.
- ASTM F2924-14; Standard Specification for AM Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion.
- ASTM F3055-14a; Standard Specification for AM Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion.
- ASTM F3184-16; Standard Specification for AM Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion.

- ASTM F3301-18a; Standard for AM – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion.

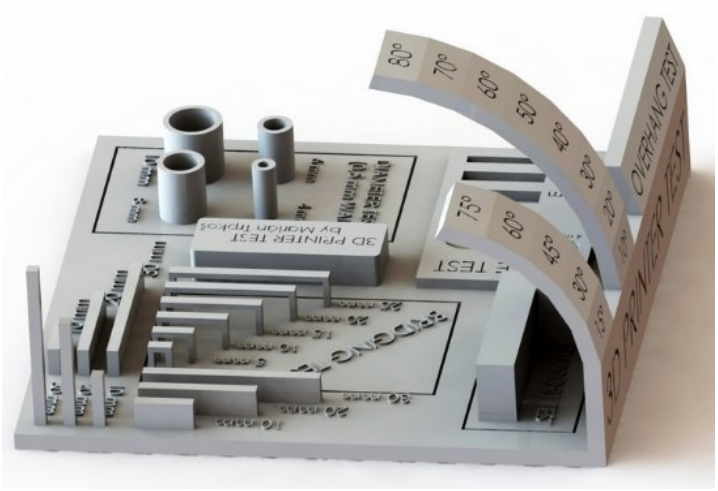
Prethodno navedeni međunarodni standardi su u ISS u fazi planiranih projekata te još nisu usvojeni sprski nazivi i oblast primene ovih standarda.

2.4. Testiranja

Procedure testiranja delova izrađenih nekom od AM tehnologija su pokrivene sa nekoliko standarda. Jedan takav je već naveden u poglavlju 2.1. a to je standard ISO 52921. Kao i kod svakog testiranja, suština je da postoji osnova za međusobna poređenja različitih AM mašina i primenjenih materijala.

Standardom SRPS EN ISO 17296-3:2017 Aditivne tehnologije – Opšti principi – Deo 3: Glavne karakteristike i odgovarajuće metode ispitivanja obuhvaćeni su principijalni zahtevi primenjeni na delove koji se ispituju, a koji su proizvedeni procesima aditivnih tehnologija.

Standard SRPS EN ISO/ASTM 52902:2020 Aditivne tehnologije – Ispitni uzorci – Ocenjivanje geometrijske sposobnosti sistema aditivne tehnologije; 3D digitalni modeli za standardne test artefakte (Slika 2) u STEP formatu mogu se preuzeti na linku ISO organizacije: https://standards.iso.org/iso/52902/ed-1/en/Artefact-2018-19-11.zip.



Slika 2. *ISO 52902: AM test artefakti*

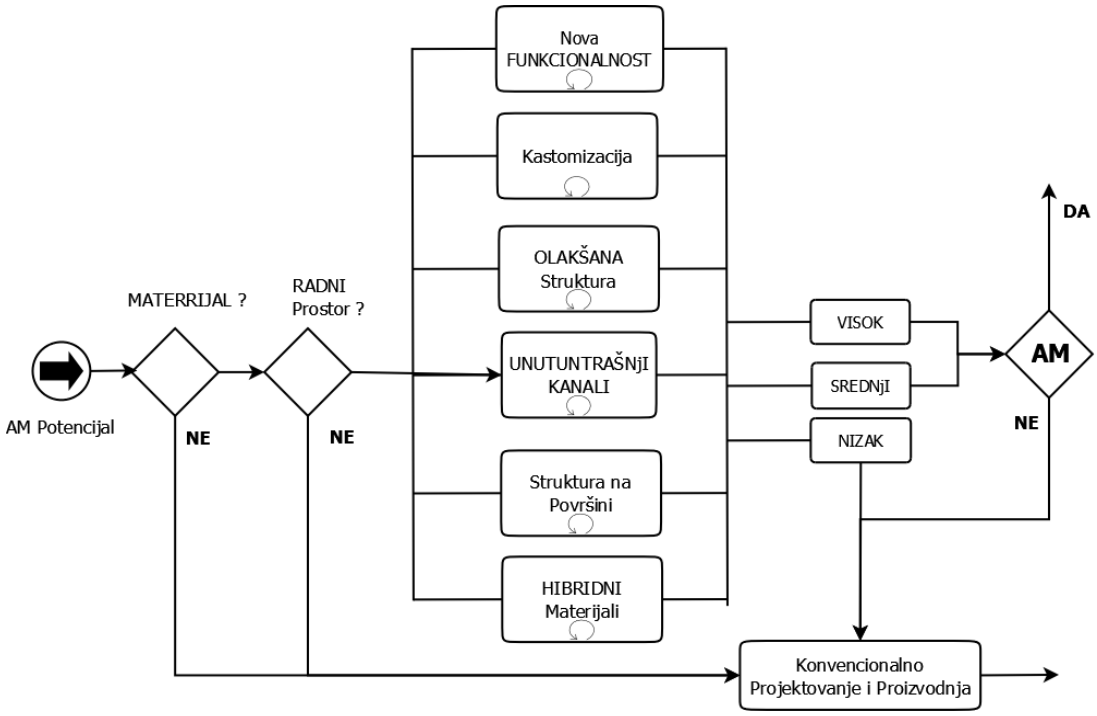
3. AM POTENCIJAL

Proces identifikacije potencijala za proizvodnju primenom AM tehnologije ilustrovan je slikom 3. Ovo je proširenje okvira „identifikacija opšteg AM potencijala“ u okviru procedure koja objašnjava sveobuhvatnu strategiju projektovanja za AM, koja je data standardom SRPS EN ISO/ASTM 52910: Aditivne tehnologije – Projektovanje – Zahtevi, smernice i preporuke.

Ovaj standard daje zahteve, smernice i preporuke za primenu aditivne tehnologije (AM) u projektovanju proizvoda. Standard je primenljiv u procesima projektovanja svih vrsta proizvoda, uređaja, sistema, komponenata ili delova koji se proizvode bilo kojom vrstom AM tehnološkog postupka.

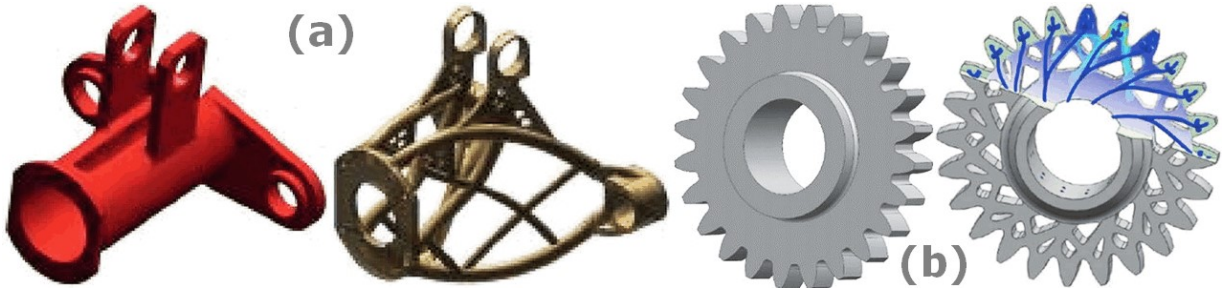
Aditivna proizvodnja se razlikuje od drugih proizvodnih procesa i ove razlike dovode do jedinstvenih mogućnosti i slobode u projektovanju delova i sklopova. Kao opšte pravilo važi da ako se deo može ekonomično proizvesti korišćenjem konvencionalnog procesa proizvodnje, taj deo verovatno ne bi trebalo da se proizvodi AM tehnologijom.

Važi i suprotno, delovi koji su dobri kandidati za proizvodnju AM tehnologijom obično su složene geometrije, imaju mali zahtevani obim proizvodnje (prototip ili maloserijska proizvodnja), posebne funkcionalne zahteve ili karakteristike ili neku kombinaciju svega prethodno navedenog, a često je u pitanju i personalizovana proizvodnja.



Slika 3. *ISO 52910: Procedura za identifikovanje AM potencijala;*

Kao što je prikazano na slici 3, glavni kriterijumi odluke se fokusiraju na dostupnost materijala, bez obzira da li se deo uklapa u zapreminu mašine ili ne, a zatim identifikaciju najmanje jedne karakteristike dela (prilagođavanje, olakšana masa, složena geometrija) za koju je AM tehnologija posebno pogodna. Ovi kriterijumi sa slike 3, su reprezentativni za mnoge tehničke delove i sklopove primenjene u mašinstvu, ali ih ne bi trebalo shvatiti kao krajnje ili potpune već kao primer načina razmišljanja i odlučivanja.



Slika 4. *ISO 52911: Primeri delova optimizovanih za AM izradu PBF-LB/M*[3]

Slika 4, preuzeta iz standarda ISO 52911[4], dobro ilustruje šta se podrazumeva pod optimizacijom strukture i dodavanjem nove funkcionalnosti mašinskim delovima. Na slici 4a je prikazana izvorna zavarena konstrukcija (levo) i optimizovana (desno) za izradu na AM mašini fuzijom metalnog praha. Na slici 4b (levo) je prikazan izvorni zupčanik i optimizovani (desno) kome je dodata nova funkcionalnost ugradnjom kanala za hlađenje direktno na bokovima zuba. Navedeni standard utvrđuje oblike fuzije metalnog praha korišćenjem lasera i definiše detaljne preporuke za projektovanje delova i sklopova.

Okvir i metodologiju za DfAM predstavio je i [5] u svom radu, koji objašnjava da se DfAM odnosi kako na proces projektovanja tako i na proizvodnju koja prati taj proces. U skladu sa iznetim kao i objašnjenim datumom u radu, autori ovog rada smatraju da se napred navedena struktura (slika 3) zasnovana na standardu ISO 52910 može svrstati u prve dve kategorije koje autor definiše kao: 1. Pogodnost za aditivnu proizvodnju i 2. Redizajniranje proizvoda u cilju dostizanja cilja aditivne proizvodnje. U svojoj metodologiji [5] uvodi i treću kategoriju koja se odnosi na definisanje parametara proizvodnog lanca (što je u skladu sa navodima sa

[3]Powder Bed Fusion - Laser Beam/Metals →PBF-LB/M
[4]SRPS EN ISO/ASTM 52911-1:2019; Aditivne tehnologije – Projektovanje – Deo 1: Fuzija praha metala uz pomoć lasera.

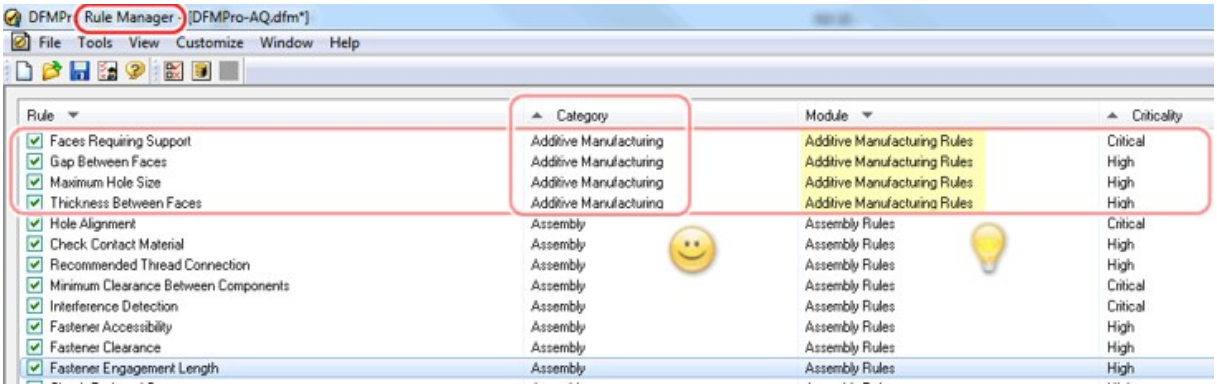
početka pasusa i ideologijom koju zastupa autor) u cilju obezbeđivanja optimizacije proizvoda, a odnosi se na: parametre pripreme za 3D štampu, ograničenja svojstvena primenjenim postupcima 3D štampe, post procesna ograničenja, kontrolni procesi (inspekcija, kontrola kvaliteta i sertifikacija). Predstavljena metodologija na ovaj način zaokružuje ceo aditivni procesni lanac.

3.1. AM Tehnologičnost

Pravila projektovanja delova i sklopova koji bi se izrađivali aditivnom tehnologijom su deo opštih pravila tehnologičnosti koja se naziva „Projektovanje za proizvodnju i montažu“ *DfMA* (Design for Manufacturing and Assemby). U slučaju aditivnih tehnologija ta se pravila nazivaju *DfAM* (Design for Additive Manufacturing).

Sva pravila tehnologičnosti koja se odnose na razne vrste tehnoloških postupaka mašinske obrade pa i na aditivne tehnološke postupke je neophodno poštovati i primenjivati radi smanjenja ukupnih troškova. Istraživanja ukazuju da je do faze završenog dizajna proizvoda [7], 80% troškova u tom trenutku već određeno.

Svrsishodno i ekonomski isplativo rešenje problema automatizacije koja bi u sebi uključivala i *DfAM,* dobilo bi se ugradnjom specijalizovanih dodataka (*Add-In*) na *CAD/CAM* sistemima na kojima kompanije projektuju svoje mašinske delove i sklopove. Slika 5. prikazuje jedno takvo rešenje za automatsku ocenu/procenu AM tehnologičnosti projektovanih delova i sklopova [8].



Slika 5.*Design for Additive Manufacturing: Rule Manager*

Ovakvo rešenje, sveobuhvatnog automatizovanog *DfMA* skraćuje ukupno vreme razvoja proizvoda i izrade funkcionalnih prototipova. Ovakvo automatizovano i fleksibilno radno okruženje bi svakom projektantu pomoglo da u veoma kratkom roku (1-2 minuta) dobije odgovor na temu tehnologičnosti za zadati mašinski deo/sklop i izabrani postupak mašinske obrade (struganje, glodanje, brušenje, livenje, kovanje, oblikovanje lima, aditivna proizvodnja) bez obzira da li je proizovdni pogon na lokaciji gde projektant radi ili je dislociran u drugom gradu ili čak kontinentu (*AM cloud services*). Ovakvo rešenje smanjilo bi ukupne troškove proizvodnje i skratilo ukupno vreme projektovanja [6].

4. ZAKLJUČAK

Aditivne proizvodne tehnologije (AM) su izvršile ogromne promene u raznim industrijskim granama, posebno u avio, auto, medicinskoj i odbrambenoj industriji. Iako se mnogi delovi ovog članka mogu primeniti na širok spektar materijala primenjenih u AM tehnologijama (metali i nemetali), primarni fokus ovog rada je na primenama u proizvodnji delova od metala (materijal je u vidu metalnog praha), primarno zbog projektovanja i proizvodnje najodgovornijih mašinskih delova i sklopova (potpuno funkcionalnih delova) koji bi se izrađivali fuzijom metalnog praha.

Početna iskustva u primeni fuzije metalnog praha selektivnim laserskim topljenjem/zavarivanjem su primarno ukazala na nužnost edukacije inženjera o tehničko-tehnološkim mogućnostima i ograničenjima ove metode, sadržajima relevantnih standarda i pravilima projektovanja za AM (DfAM). Različita terminologija često izaziva zabune kod korisnika (projektanata, tehnologa mašinske obrade) pa je tako tehnologija fuzije metalnog praha (*MPBF* - Metal Powderbed Fusion) poznata u literaturi pod više različitih naziva: *SLM* (Selective Laser Melting), *DMLS* (Direct Metal Laser Sintering), *LPBF* (Laser Powder Bed Fusion).

Kompleksnost AM tehnologija, sa aspekta tehnologije i metoda primene, različite terminologije, novim

konceptom razmišljanja u pristupa u projektovanju, velikim brojem raspoloživih standarda i primenu u različitim industrijama, ukazuje na potreba za kreiranjem jednog savremenog radnog okruženja koje bi projektantima i tehnolozima omogućilo inženjerstvo bazirano na znanju *KBE* (Knowledge Based Engineering).

U takvom okruženju, pored automatskog određivanja tehnologičnosti delova i sklopova, inženjerima bi na raspolaganju trebalo obezbediti analizu mernih lanaca, proračun mašinskih elemenata i pravila projektovanja. Sve ovo i razni drugi dodaci, specifični za oblast primene, morali bi biti dostupni u regularnom inženjerskom *CAD/CAM* radnom okruženju. Sve prethodno navedeno odavno postoji na tržištu samo je pitanje percepcije upravljačkih struktura kompanija o nužnosti i benefitima ovakvih primena.

Svaki od razmatranih aspekata AM proizvodnje (standardizacija, projektovanje, definisanje potencijala za AM, proizvodni parametri i drugo) zahtevaju dodatna i šira razmatranja i analize, te s tim u vezi i daljih fokus naših istraživanja trebalo bi usmeriti u tim pravcima.

5. LITERATURA

[1] Institut za standardizaciju Srbije*, Informacije o standardima: infocentar@iss.rs* , Stevana Brakusa 2, 11030 Beograd, web: https://iss.rs/sr_Latn/, pristupano: Apr. 2022..

[2] Bitonti, F.: 3*D Printing Design - Additive Manufacturing and the Materials Revolution*, Bloomsbury Publishing Pic, London UK, 2019.

[3] Lipman, R. and McFarlane, J. (2015), Exploring Model-Based Engineering Concepts for Additive Manufacturing, Proceedings of the 26th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, https://www.nist.gov/publications/exploring-model-based-engineering-concepts-additive-manufacturing (Accessed May 1, 2022)

[4] Redwood B., Schöffer F., Garret B.: *The 3D Printing Handbook - Technologies, Design and Applications*, 3D Hubs B.V., Amsterdam, 2017.

[5] Tom Vaneker, Alain Bernard, Giovanni Moroni, Ian Gibson, Yicha Zhang. (2020). *Design for additive manufacturing: Framework and methodology.* CIRP Annals - Manufacturing Technology 69 (2020) 578599. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006

[6] *The Free Beginner's Guide*, web:https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/, pristupano: Apr. 2022.

[7] Živković S., Petrović V.: *AUTOMATION of DfMA PRINCIPLES in PARTS and ASSEMBLY DESIGN*, International Journal „Advanced Quality", Vol. 46, No. 2, pp. 34-39, 2018.DOI https://doi.org/10.25137/IJAQ.n2.v46. 2018.p34-39

[8] *DFMPro - CAD Integrated DFM Software*, web: https://dfmpro.com/cad-systems/dfmpro-nx/ , pristupano: Apr. 2022.

Živković, S., Malbašić, S., Grubić, A.

AM POTENTIAL - DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract: *The paper provides a presentation of the most important standards for additive manufacturing with an emphasis on those related to applications in Metal Additive Manufacturing. In addition, paper gives an explanation of the procedure for determining the Additive manufacturing potential for the production of the metal parts through the application of MPBF (Metal Powder Bed Fusion) method. Also, add-in module for the CAD/CAM software is presented as solution for the determination of the parts potential for the Design for the Additive Manufacturing.*

Key words: *Additive Manufacturing, Metal Powder Bed Fusion, Standardization, Design for Manufacturing and Assembly.*

Ranđelović S., Stamenković S., Kostić N.[1]

FEM SIMULACIJA PROCESA DUBOKOG IZVLAČENJA CILINDRIČNIH ELEMENATA

Rezime

FEM simulacija procesa dubokog izvlačenja danas predstavlja nezaobilaznu metodu za predikciju napona i deformacija unutar lima. Za najopštiji slučaj plastične deformacije kontinuuma potrebno je definisati četiri kriterijuma za FEM model. Prvi kriterijum je prelaz iz elastičnog u plastično područje, zatim porast napona u tačci kontinuuma usled ojačavanja, treći je kriterijum rasterećenja pri ponovljenoj plastičnoj deformaciji i četvrti je definisanje konstituvnih jednačina za invarijantnu brzinu promene napona i invarijantnu inkrementalnu meru napona. Ovakvo prepoznavanje problema pri projektovanju tehnologije dubokog izvlačenja pruža mogućnost praćenja plastične deformacije kontinuuma, konstruktivne korekcije alata, korekciju parametara procesa kako ne bi dolazilo do zastoja u realnim procesima.
Ključne reči: FEM, duboko izvlačenje, naponi, deformacije

1. Uvod

Ovaj kompleksni proces plastičnog deformisanja dobija na kvalitetu jer praćenjem i analizom napona i deformacija još u fazi projektovanja moguće je napraviti predikciju stvaranja nabora na vencu elementa, veličinu stanjenja lima na prelaznim radijusima ali u krajnjem i eventualne pojave pukotina u materijalu što je vrlo čest slučaj pri dubokom izvlačenju. To je jedna od najzastupljenijih procesa tokom ljudske istorije jer je uvek bila prisutna želja da se lim oblikuje prema zahtevima u njegovoj bližoj okolini (posuđe, nakit, vojnički oklopi i sl.) [1]. Sa početkom industrijske proizvodnje javljaju se i prva naučna istraživanja čiji autori probaju da objasne uslove nastanka plastičnog tečenja anizotropnih metala sa pridruženim hipotezama plastičnog tečenja. U nekoliko studija autori proveravaju tačnost uslova tečenja zasnovanih gde npr. Yoon sa koautorima [2] ukazuju da kvadratna funkcija Hilla (1948) i nekvadratna funkcije Yld2000-2d [3] uslova tečenja mogu da predvide 4 mesta za pojavu ušiju kod dubokog izvlačenja kod dela napravljenog od legure aluminijuma AA2090-T3 koji u realnim eksperimentalnim uslovima pokazuje da ima 6 ušiju. Autori rada [6] ukazuju na slična ograničenja za iste materijale zasnovani na anizotropnoj funkciji plastičnosti [7]. Može se izvesti zaključak da je vrlo teško za izrazito anizotropni metal napraviti FEM model simulacije uz pomoć modela gde je identična formulacija za uslov tečenja i funkciju plastičnog potencijala [8].

2. Osnove mehanike kontinuuma za čvrsta deformabilna tela

Da bi analizirali plastične deformacije kontinuuma metodom konačnih elemenata u definisanim tačkama generisane mreže neophodno je uzeti u razmatranje nekoliko važnih činjenica.

Prva od njih je da metalni kontinuum u procesu deformisanja uvek prolazi prvo kroz područje elastičnih vrlo malih deformacija, da bi sa porastom opterećenja, ušao u plastično područje velikih deformacija. Iz tih razloga potreban nam je kriterijum koji definiše prelazak iz elastičnog u plastično područje za svaku tačku kontinuuma. To je dobro poznat uslov prelaska deformabilnog kontinuuma u plastično stanje koji se definiše kao skalarna funkcija komponenata napona u izabranoj tačci.

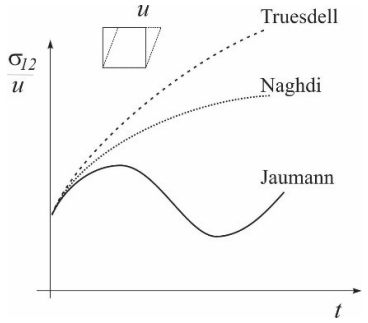
Druga bitna predpostavka je da bi imali kontinualnu ili narednu (rastuću, progresivnu) plastičnu deformaciju, nakon početne, potreban je dodatni napon u tačci kontinuuma. To znači da se za naredni prelazak u plastično područje menja (raste) početni uslov plastičnosti. Ova pojava je karakteristika većine tehnoloških matala i naziva se ojačavanje (*hardening*). Dakle, da bi napravili dobar matematički model ojačavanja metala potreban je kriterijum za sledeći (naredni) ulazak u plastično područje.

[1] Dr Saša S. Ranđelović, redovni porfesor, Mašinski fakultet u Nišu, 018 500702 sassa@masfak.ni.ac.rs
Stefan Stamenković, master student, Mašinski fakultet u Nišu, stefanstefane@hotmail.com
Nikola Kostić, PhD student, Akademija strukovnih studija u Nišu, kostic94nikola@gmail.com

Treće, ukoliko definisano naponsko stanje u metalnom kontinuumu ima opadajući trend (rasterećenje) sam metal se pri ponovnom plastičnom deformisanju ponaša elastično. Da bi definisali ovu pojavu neophodno je definisati kriterijum rasterećenja.
Četvrto, konstitutivna jednačina za plastično ponašanje metala u definisanoj tački kontinuuma najčešće se izražava u brzinskom ili inkrementanom obliku. Tenzori napona za izabrane tačke, koji se pojavljuju u ovim konstitutivnim jednačinama moraju biti stvarni (objektivni, invarijantni) tj., da se ne menjaju sa promenom referentnog koordinatnog sistema. Dok je prethodno uvedeni Cauchy-ijev tenzor napona invarijantan, njegova brzina promene ili inkrement nije invarijantna. Zato je potrebno razviti invarijantnu brzinu promene napona i invarijantnu inkrementalnu meru napona. Konstitutivne jednačine za velike elastične deformacije u nekim slučajevima se izražavaju u brzinskoj ili inkrementalnoj formi.
U mehanici kontinuuma, invarijantna brzina promene napona predstavlja vremenski izvod napona koji ne zavisi od referentnog koordinatnog sistema. Mnoge konstitutivne jednačine su projektovane u obliku relacija između brzine napona i brzine deformacija (ili tenzor brzina deformacija). Mehanički odgovor (reakcija) materijala ne bi trebalo da zavisi od referentnog koordinatnog sistema. Drugim rečima, materijalne konstitutivne jednačine trebalo bi da budu nezavisne od izabranog koordinatnog sistema (invarijantne). Ukoliko su definisani napon i deformacija materijalne veličine onda je invarijantost automatski zadovoljena. Međutim, ukoliko su ove veličine prostorne, onda invarijantost brzine napona nije garantovana čak iako je brzina deformacije invarijantna.
Postoje nekoliko interpretacija invarijantnih brzina napona u mehanici kontinuuma koje se mogu pokazati kao specijalni oblici Lie-ovog izvoda. Najčešće korišćene invarijantne brzine napona su:

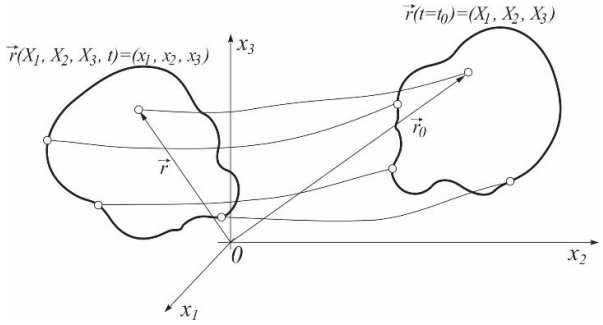
- Truesdell ova brzina Košijevog tenzora napona
- Green Naghdi brzina Košijevog napona
- Zaremba Jaumann brzina Košijevog napona

Na slici su prikazane karakteristike sve tri invarijantne brzine napona kod testa smicanja gde je materijalni model hipoelastičan sa konstantnim modulom elastičnosti. Brzine promene napona smicanja na pomeranju su date u funkciji vremena.

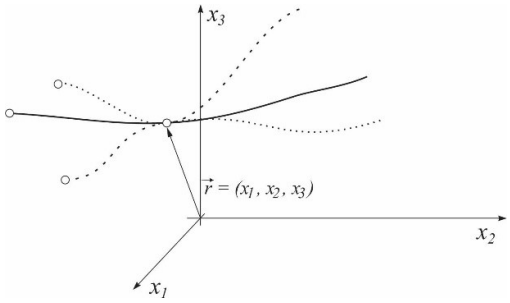


Slika 1. Invarijantne brzine napona

U diferencijalnoj geometriji Li-jev izvod predstavlja procenu promene tenzorskog polja (uključujuću skalarne funkcije, vektorska polja i jedan oblik tenzora) duž toka koje je definisano drugim vektorskim poljem. Promena je koordinatno invarijantna i zato je Li-jev izvod definisan za bilo koji diferencijabilan tok.
Najčešći test ili eksperimentalna proba prelaska iz elastičnog u plastično područje, ali i sam fenomen plastičnih deformacija se razmatra kod jednoosnog istezanja metalne epruvete. To je dobra osnova za definisanje trodimenzionalnog kriterijuma plastičnosti, relacija ojačavanja, kriterijuma rasterećenja itd.. Za izotropne materijale najstariji uslovi plastičnosti su sa početka prošlog veka, tačniji po Huber - Mizesu (energetski uslov plastičnosti) i jednostavniji po Treska - Sen Venan-u (kriterijum maksimalnog smičućeg napona). U literaturi se često govori i o njihovoj eksperimentalnoj verifikciji i potvrđivanju u tehnologijama plastičnog deformisanja metala [4,5].
Za analizu je potrebna veličina plastičnih deformacija koja se izražava na dva načina, preko tenzora inkrementalnih linearnih deformacija i tenzora brzina deformacija [7].
Prvi pristup se koristi za male inkrementalne deformacije i on ima primenu u FEM analizi tehnoloških procesa kovanja, dubokog izvlačenja, savijanja koji su podložni inkrementalnoj formulaciji i koja se u literaturi naziva nova Lagranžeova formulacija [6].



Slika 2. Supstancijalni metod Lagranža



Slika 3. Ojlerov metod u fiksiranoj tački prostora

Kod ovog metoda uoči se položaj svih delića u nekom početnom trenutku $t = t_0$ i dalje se prati kretanje svakog od tih delića. Ako se neki delić u početnom trenutku nalazio u tački:

$$\vec{r}_0 = X_1\vec{e}_1 + X_2\vec{e}_2 + X_3\vec{e}_3$$

onda možemo da kažemo da će se u proizvoljnom sledećem trenutku on nalaziti u tački $\vec{r}(\vec{r}_0, t)$, čiji položaj zavisi kako od početnog položaja $\vec{r}_0 = (X_1, X_2, X_3)$, tako i trenutka t (slika 2). Sve fizičke veličine razmatramo duž putanje delića, dakle u funkciji početnih koordinata (X_1, X_2, X_3) i vremenskog trenutka t. Ako, recimo, sa T označimo temperaturu, onda $T(X_1, X_2, X_3, t)$ predstavlja temperaturu u tački u kojoj se u trenutku t nalazi delić koji se u početnom trenutku nalazio u tački (X_1, X_2, X_3). Generalno može se reći da se u ovom pristupu razmatraju fizičke veličine i pojave onako kako ih "osećaju" delići, tj. supstanca kontinuuma, pa se zato ovaj pristup zove i supstancijalni, a promenljive (X_1, X_2, X_3) supstancijalne promenljive [5]. Slično, zapremina koja se uvek sastoji od istih delića naziva se "supstancijalna zapremina". Ilustracija primene Lagranževog metoda je razmatranje pomeranja velikih vazdušnih masa na satelitskim snimcima u realnom vremenu.

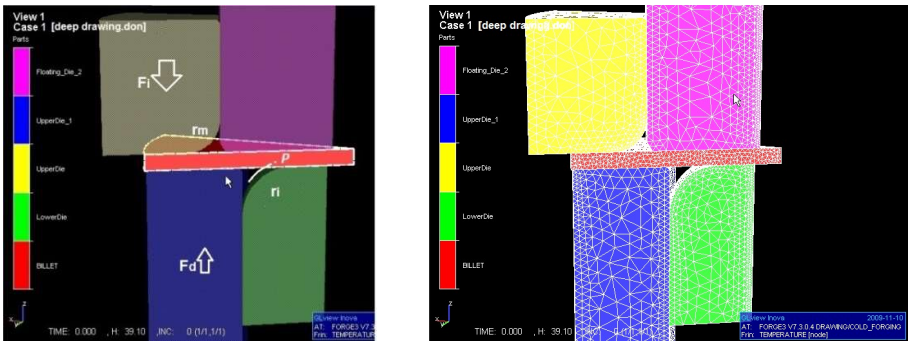
Drugi pristup, preko tenzora brzina deformacija koristi se kod FEM analiza tehnoloških procesa valjanja, vučenja, istiskivanja gde se uočava fiksirani region u materijalnom prostoru (kontrolna zapremina) i uočavaju se deformacije materijalnih čestica koje prolaze kroz tu kontrolnu zapreminu. Ova metoda je poznata kao Ojlerova formulacija.

Ojlerov metod odgovara matematičkom metodu polja, tj. sve fizičke veličine razmatraju se u tačci prostora $\vec{r} = x_1\vec{e}_1 + x_2\vec{e}_2 + x_3\vec{e}_3$, čisto geometrijski, nezavisno od toga koji se delić nalazi u toj tačci, u proizvoljnom vremenskom trenutku t (sl. 3). U tom metodu bi izraz $T(x_1, x_2, x_3, t)$ predstavljao temeperaturu u tačci (x_1, x_2, x_3) u trenutku t. Poređenja radi, mogli bismo da kažemo da $T(x_1, x_2, x_3, t)$ predstavlja temperaturu koju "oseća" delić koji se u trenutku t našao na mestu (x_1, x_2, x_3). U ovom pristupu nas, dakle, ne interesuje šta se sa tim delićem ranije dešavalo, niti šta će se sa njim dešavati posle prolaska kroz tu tačku. Koordinate (x_1, x_2, x_3) nazivaju se Ojlerove promenljive. Beleženje dnevnih vrednosti temperature, pritiska i brzine vetra na jednom mestu predstavlja primer primene Ojlerovog metoda [6].

Iako se u svakoj situaciji mogu primeniti i jedan i drugi metod, Lagranžev metod se češće primenjuje kod čvrstih kontinuuma, kod kojih je pokretljivost delića mala, tj. obično čestice osciluju oko nekog svog srednjeg položaja, dok se kod fluida, koji se odlikuju velikom pokretljivošću, najčešće primenjuje Ojlerov metod.

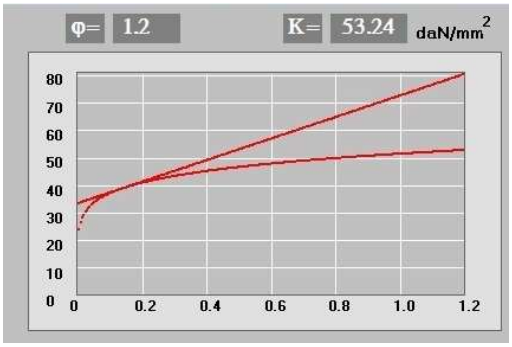
3. Analiza procesa dubokog izvlačenja

Za FEM analizu je izabran osnosimetrični cilindrični element gde je za simulaciju procesa dovoljno uzeti osminu tog sklopa kako bi se postigla zadovoljavajuća efikasnost (sl. 4). Poluprečnik pripremka je R_0 = 33mm sa debljinom s = 1.5mm, i radijusom izvlakača od R_i = 14mm sa prelaznim radijusom na dnu od $\boldsymbol{r_i}$ = 7mm. Radijus pokretne matrice je R_m = 16mm sa prelaznim radijusom od r_m = 6mm. Prema preporukama konstruktivni zazor između matrice i izvlakača je 2mm.



Slika 4. 3D model alata za duboko izvlačenje i FEM mreža pripremka i pozicija alata

Krajnja visina izvučenog dela je h_i = 37.4mm. Za izabrani materijal specifična gustina je ρ = 2700 kg/m^3, dok je Jangov $E = 206 \cdot 10^6$ N/mm^2, Poasonov koeficijent ima vrednost ν = 0.3 i napon na granici plastičnosti σ_o = 235 N/mm^2 (sl. 5).



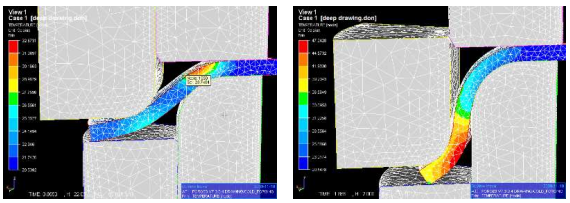
Sika 5. Linerna i eksponencijalna aproksimacija efekta ojačavanja za leguru aluminijuma

Na 3D modelu za FEM analizu mogu se uočiti nekoliko karakterističnih kontaktnih površina sa odgovarajućim koeficijentima trenja koji imaju odlučujuću ulogu za simulaciju procesa dubokog izvlačenja. Koeficijent trenja između pripremka i površine matrice, odnosno na prelaznom radijusu r_m, je μ_p = 0.15. Koeficijent trenja između pripremka i površine držača lima je μ_b = 0.1, dok koeficijent trenja između izvlakača i pripremka nije uzet u razmatranje pošto relativno kretanje između pripremka i izvlakača gotovo da i ne postoji.

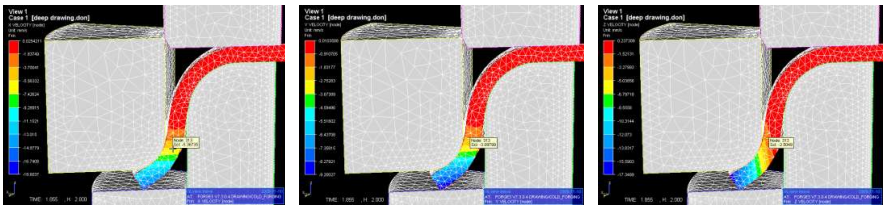
Svi ključni elementi alata mogu se predstaviti odgovarajućom prostornom mrežom konačnih elemenata koje prate njihove elastične deformacije a u cilju optimizacije njihove geometrije , dimenzije i prelaznih radijusa na alatima. To je dobar način da se dobije zadovoljavajući oblik i dimenzije kod ovako jednostavnih alata ali i kod složenijih alata gde se dobijaju složene geometrijske površine.

Da bi se pratile deformacije unutar materijala pripremka izabrana je kontrolna deformabilna zapremina čije naponsko deformaciono stanje se prati tokom procesa izvlačenja. (sl.4). Tačka *P* označava izabrani materijalni element čija putanja se analizirai prati u zadatom vremenskom interevalu.

Proces plastičnog deformisanja lima prati njegovo povećanje unutrašnje temperature kontinuuma. Trajna promena oblika pri većim stepenima deformacije u blizini prelaznog radijusa izaziva povećanje temperature od referentne temperature okoline 20°C do nivoa od 32.57°C u blizini radijusa na tiskaču (sl. 6). Ukoliko se duboko izvlačenje odvija preko manjih radijusa javlja se izraženiji efekat nepovratnog generisanja toplote. Na kraju procesa izvlačenja najviša temperatura dostiže vrednost od 47.24°C (sl. 6).

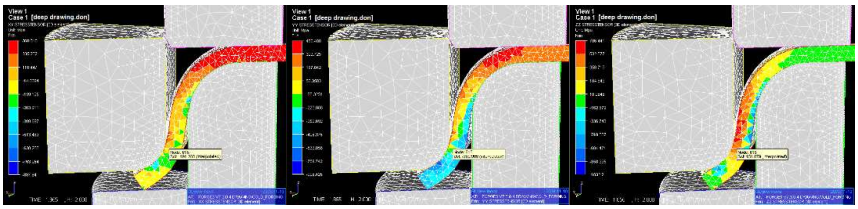


Slika 6. Polje temperatura unutar deformabilne zapremine u blizini prelaznog radijusa, čvor 1950



Slika 7. Polje brzina unutar deformabilne zapremine u x, y i z pravcu u blizini prelaznog radijusa na matrici (čvor 313)

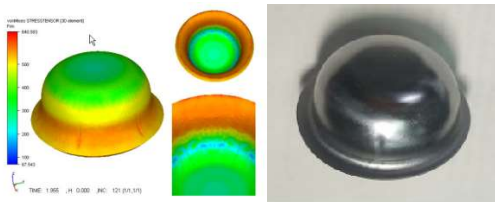
Kao posledica plastičnih deformacija javlja se intenzivno kretanje materijala pripremka koje se manifestuje različitim relativnim brzinama uočenog čvora po pravcima x, y i z koordinatnih osa (sl. 7). Za izabrani čvor 313 mreže konačnih elemenata mogu se identifikovati relativne brzine v_x = 5.36mm/s , v_y = 3.09mm/s i v_z = 2.05mm/s.



Slika 8. Polje tenzora napona σ_{xx} , σ_{yy} i σ_{zz} u blizini prelaznog radijusa matrice (čvor 615)

Polju plastičnih deformacija kod uočenog procesa dubokog izvlačenja odgovara polje glavnih napona koji mogu da se prate u uočenom elementu deformabilne zapremine pripremka (sl. 8). Glavni naponi u izabranom čvoru 615 u blizini prelaznog radijusa pokretne matrice za duboko izvlačenje imaju sledeće vrednosti σ_{xx} = -191.25 N/mm^2, σ_{yy} = -380.9 N/mm^2, σ_{zz} = 151.08 N/mm^2. Tokom odvijanja procesa dubokog izvlačenja negativni naponi u tangencijalnom pravcu i pozitivni naponi u radijalnom pravcu imaju dominantnu i presudnu ulogu. Ovi naponi mogu vrlo često da izazovu neželjene posledice u vidu nabora na vencu elementa i pojave pukotine na prelaznim radijusima izvučenog dela. Ovakvi neželjeni efekti mogu se eliminisati optimalnom i promenljivom silom držanja lima u toku samog procesa.

Raspored napona plastičnog tečenja prema kriterijumu Von Mises su dati na slici 9 gde je kritični element prelazni radijus na matrici u završnom trenutku dubokog izvlačenja. Softver prepoznaje pojavu neželjenih nabora koji se javljaju na zidovima izvučenog dela a koji ukazuju na povećane vrednosti normalnih napona u tangencijalnom pravcu.



Slika 9. Raspored napona po uslovu Von Mises na zidovima izvučenog elementa

4. Zaključak

Prikazani FEM model predstavlja dobru simulaciju ponašanja materijala s obzirom na uočeno naponsko stanje u toku procesa dubokog izvlačenja. Temperaturno polje po debljini materijala pripremka pokazuje dobre vrednosti s obzirom na izmerene vrednosti na samom zidu izvučenog elementa. U delovima zapremine gde postoji intenzivna plastična deformacija javlja se izrazit porast temperature dok na dnu, gde nema promene oblika, ostaje temperatura okoline. Normalni naponi i relativne brzine u x i y pravcu imaju gotovo istu promenu dok je promena u z pravcu nešto drugačija zbog povećanja visine dela.

FEM SIMULATION OF THE DEEP DRAWING PROCESS OF CYLINDRICAL ELEMENTS

Ranđelović S., Stamenković S., Kostić N.

Abstrakt

FEM simulation of the deep drawing process is today an indispensable method for the prediction of stresses and strain inside the sheet. For the most general case of continuum plastic deformation, it is necessary to define four criteria for the FEM model. The first criterion is the transition from the elastic to the plastic area, then the increase in stress at the point of the continuum due to hardening, the third is the unloading criterion of repeated plastic deformation and the fourth is the definition of constitutive equations for the invariant objective stress rate and the invariant objective incremental stress measure. This kind of recognition of problems in the design of deep drawing technology provides the possibility of monitoring the plastic deformation of the continuum, constructive correction of the tool, correction of the process parameters so that there is no stoppage in real production processes.

Key words: FEM, deep drawing, stress, strain

Literatura

[1] Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., 2002, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann.

[2] Yoon, J.W., Stoughton, T.B., Dick, R.E., 2007, *Earing prediction in cup drawing based on non-associated flow rule*, in: CeasarDeSa, J.M.A., Santos, A.D. (Eds.), NUMIFORM '07: Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, Pts I and II. Amer Inst Physics, Melville, pp. 685-690.

[3] Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Lege, D.J., Pourgoghrat, F., Choi, S.H., Chu, E., 2003, *Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – part 1: theory*. International Journal of Plasticity 19, pp. 1297-1319.

[4] Hill, R., 1948, *A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193, pp.281-297.

[5] Souza Neto EA, Perić Dj., Owen DRJ., 2008, *Computational Methods for Plasticity, Theory and Application*, WILEY, 816 p.

[6] Cvitanic, V., Vlak, F., Lozina, Z., 2008, *A finite element formulation based on nonassociated plasticity for sheet metal forming*, International Journal of Plasticity 24, pp. 646-687.

[7] Karafillis, A.P., Boyce, M.C., 1993, *A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor*, J. Mech. Phys. Solids 41, pp. 1859-1886.

[8] Stoughton, T.B., Yoon, J.W., 2009, *Anisotropic hardening and non-associated flow in proportional loading of sheet metals*, International Journal of Plasticity 25, pp. 1777-1817.

Matin, I., Štrbac, B., Hadžistević, M., Ranisavljev, M.[1)]

THE PLASTIC PRODUCT DEVELOPMENT USING CAD/CAE ADVANCED TOOLS

***Abstract**: Injection molding is one of the most common manufacturing process used today. It is able to produce parts with good quality and accuracy. The paper proposes an approach for design and manufacture of the plastic part. Based on the geometry and conditions of moldability, a collection of feasible injection molding parameters is formed using CAD/CAE software. The quality of injection-molded products is influenced by several factors: the geometry of the product, the material used, the mold, the injection molding parameters and molding machine. For this reason, modeling the process by computer is justified and widely used in the industry.*
***Key words**: injection molding, CAD, CAE, numerical simulation.*

1. INTRODUCTION

Today, the time-to-market for plastic products is becoming shorter, thus the lead-time available for making the injection mold is decreasing. There is potential for time saving in the injection cycle because a design process that is repeatable for every mold design can be standardized [1, 2]. Due to its ability to produce complex-shape plastic parts with good dimensional accuracy and short cycle times, injection molding has become the most important process for manufacturing plastic parts in the plastic industry. However, the current plastics industry is under great pressure, due to the globalization of the market, the short life cycle of product development, increasing product multiplicity, high demand of product quality. To meet such requirements, it is important for this trade to adopt various advanced technologies, which include CAD/CAE/CAM integration technology, concurrent engineering, artificial intelligence, and so on, to effectively aid the development of injection molded product. In injection molding, the molding parameters are critical importance for product quality and efficient manufacturing [3]. In most cases, quality of mold is responsible for the economics of the entire process. Injection molding process involves extensive empirical knowledge (heuristic knowledge) about the material structure and material flows. Mold designers are required to possess thorough and wide experience, because detailed decisions require the knowledge of the interaction among various injection molding parameters. Unfortunately, it is presently impossible to cover the growing demand for such experienced designers. Therefore, both CAD and CAE tools that can assist in the various tasks of injection molding process and mold design [3, 4].

To injection mold polymers, designing mold is key task involving several critical decisions with direct implications to yield quality, productivity and cost savings. One main decision among them is specifying injection molding parameters. Intuitively designers decide it wisely and then exasperate by optimizing or manipulating injection molding parameters [5].

The determinate of the injection molding process, whether by the improvement of product`s quality or injection cycle time reduction is highly dependent on the mold design.

Concerning the injection cycle, the cooling stage is the seriously component of the overall cycle time. Furthermore, it has a strong influence on plastic part`s properties and, therefore, cooling should be as efficient as possible. The cooling system design is, therefore, highly dependent on the compromise between temperature uniformity and the duration of the injection molding cycle [6, 7].

Numerical simulations of the injection molding provided excellent prospects concerning the use of conformal channels as the driver for defects minimization or even elimination as well as productivity gains, due to

[1)] Dr Ivan Matin, stručni saradnik, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, (matini@uns.ac.rs),
Dr Branko Štrbac, vanredni profesor, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, (strbacb@uns.ac.rs),
Dr Miodrag Hađžistević, redovni profesor, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, (miodrags@uns.ac.rs),
MSc Miloš Ranisavljev, asistent, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, (ranisavljev@uns.ac.rs).

increased injection process efficiency. Certain plastic parts may have unevenly distributed wall thicknesses and mechanical properties so that the air-cooling process might cause complex, uneven deformations, which will account for a large portion of the whole product deformation [8]. Some researchers are trying to integrate Moldflow™ and Ansys to obtain a more accurate picture of the injection molded plastic product's mechanical performance [9-11]. Kulkarni et al. [9] proposed integrated method to facilitate the design of a plastic injection molded product by using Autodesk Moldflow structural Alliance (AMSA). A number of research activities have been carried out on simulation of the injection molding and its related scientific area over the years using CAX techniques. These research activities range from studying particular areas of plastic simulation to investigating mold design as a completely CAD/CAE system [12-13]. Matin et al. [13] proposed a CAD/CAE integrated mold design software based on PTC Creo Parametric, Pro/Plastic Adviser and Visual Basic module for calculation of parameters of injection molding, mold design calculation and mold plates selection. The feature contains design and analyses related data, called feature attributes. The authors presented a feature-based ontology consisting of a number of CAD/CAE features. The features represent not only geometric product information and specifications of the molded part, but also the design intents oriented to the injection simulation process. The feature-based ontology was used for analytical calculations, mold sizing, and its selection.

2. MATERIALS AND METODOLOGY

Usually, the initial plastic CAD model of the part is provided by the customers to meet their specific requirements, such as dimensions. Then the CAE numerical simulation is carried out to investigate how the manufacturing process will influence the part dimensions and identify shrinkage rates. After that, design updates are carried out by incorporating the manufacturing induced shrinkage rates to the initial part design, so that the updated design will satisfy the dimension requirements after going through the injection molding process. Usually, shrinkage rates induced by the injection molding process are small and the shrinkage pattern for the updated design is similar to the initial product design. The Flowchart of the plastic part development is presented in Fig. 1.

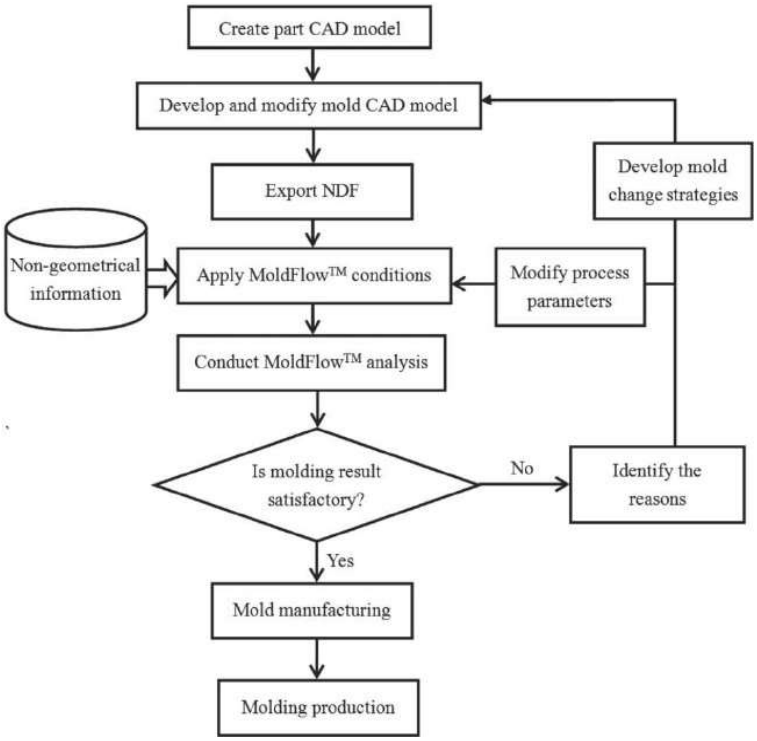


Figure 1. Flowchart of the plastic part development procedure

The flowchart illustrates a methodology for designing the part by determining the critical injection molding parameters using a CAD/CAE tools. This integrated method use PTC Creo Parametric and Moldflow™ software to simulate the injection molding process so that the product shrinkage can be

considered at the early design stage and the quality of the part can be ensured with less molding cycle time. The method integrates injection molding numerical simulation results as the intermediate state data set of CAD simulation model into PTC Creo Mold Design need to mold manufacture. The available commercial CAE software for numerical simulation such as Pro/Plasic Adviser, Moldflow™, Moldex 3D and Sigmasoft can accurately simulate the injection molding process at different molding stages (filling, packing and cooling), so engineers can understand how the plastic melt flows into the mold and evaluate the product warpage effect. If the parts do not meet their quality requirements, potential reasons can be identified and the mold design can be updated on computers until high quality plastic parts can be manufactured. Therefore, the accuracy of the CAE simulation is vital for the product quality and the cost. However, the available technology still has some limitations, as the real injection molding production process is very complicated and hard to control precisely. It has been the claim of Moldflow™ that product deformation due to the injection molding process can be simulated. At the end of the in mold cooling stage, the molded part is usually still warm and the quantity of molten plastic remains significant, especially for thick wall product ejected early. After ejection, these materials will continue to cool to room temperature in air, with in evitable shrinkage.

3. RESULTS OF ANALYSIS

The brine stand assembly are consist of two parts, but only main part is presented in Fig. 2. A real industrial case study will be provided to show the procedure and its validation. The CAD model of the plastic part and its associated draft is shown in Fig. 2.

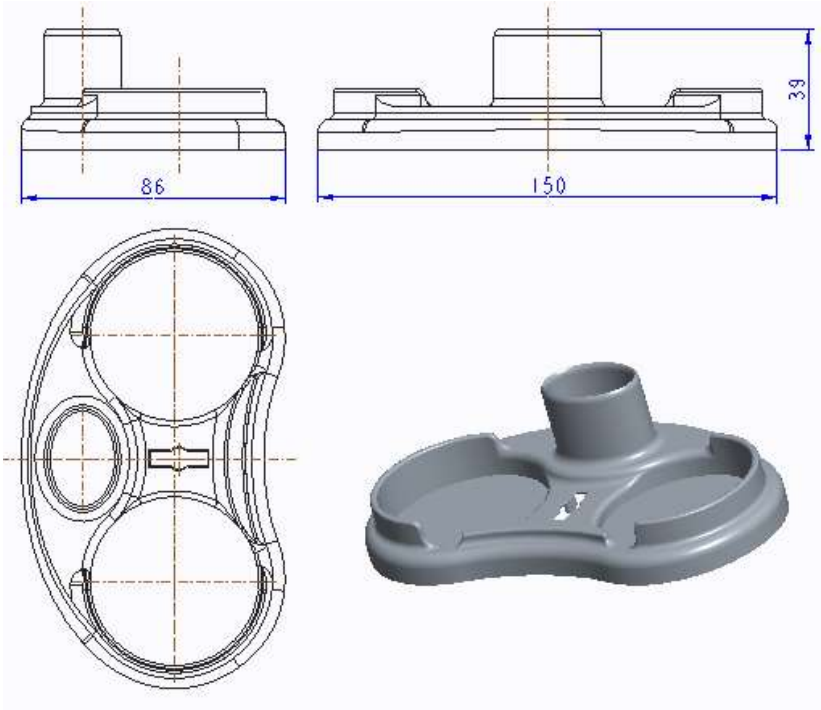


Figure 2. Draft with overall dimensions of the brine stand

The plastic material used in case study is Polypropylene Generic (PP), it has a crystalline structure. The injection molding parameters of the part are determined by using the MoldFlow™ software. The injection molding parameters are determinate using iterative procedure using viscosity P-V-T model. The optimized injection molding parameters are presented in Table 1.

Table 1. The Injection Molding Parameters	
Material Grade and Material Supplier	Polypropylenes Generic PP
Max Injection Pressure	180 (MPa)
Injection Pressure	22 (MPa)
Maximal melt temperature	280 (°C)
Mold Temperature	40 (°C)
Melt Temperature	240 (°C)
Transition temperature	130 (°C)
Injection Time	7 (s)
Structure	Crystalline
Estimated cycle time	19 (s)
Actual cycle time	21 (s)
Recommended ejection temperature	110 (°C)
Shear modulus	481 (MPa)
Maximal estimated shear stress	0,28 (MPa)
Max sink marks estimate	0,14 (mm)
Environmental temperature	20 (°C)
IMM name and manufacturer	270s ARBURG
Specific heat	2740 (J/kg°C)
Surface temperature variance range	-3.9 (°C) to 4.2 (°C)
Melt density	0.72828 (g/cm^3)
Solid density	0.89186 (g/cm^3)
Elastic module	1340 (MPa)

The Estimated cycle time (Table 1) is based on cavity geometry. This means the time for the part to fill and cool is calculated using the model that have analyzed. The actual cycle time (Table 1) is dependent on too many variables for the MoldFlow™ to predict accurately. The MoldFlow Adviser assumes the part can be ejected without distortion or damage when the wall is 90% frozen. Depending upon the type of the injection molding machine being used and the ejection system design, the mold finish, as well as inherent part stiffness, it may be possible to eject earlier or it may require a longer cooling time. These effects may cause the actual cycle time to be much greater than the estimated cycle time in some cases and in others it can be shorter.

The Simulation model is generated using CAD system PTC Creo. The appropriate simulation model consists of the gate subsystem and four plastic parts, as is shown in Fig. 3. The runner system further consists of sprue gate, main runner, sub runners, cold slug and gates. The gates are designed for automatic trim of the runner system during ejection. The cooling channels model is also shown in Fig. 3.

Figure 3. Simulation model

The quality test result measures the expected quality of the model's appearance and its mechanical properties. The quality is derived from combinations of the following five results: flow front temperature, pressure drop, cooling time, shear rate and shear stress. Only if all five results in an area are acceptable, the area is green, and the simulation model has a high quality, as indicated in Fig. 3. Explanation of the colors on the CAD model zone is determined in Table 2.

Table 2. Color explanation on the simulation model

All green	The part is easily filled and part quality should be acceptable.
Some yellow	The part may be difficult to mold or quality may not be acceptable. As the percentage of yellow increases, the difficulty in molding the part will increase and the part quality will decrease.
Some yellow and red	The part will be extremely difficult to fill or quality is more likely to be unacceptable. As the percentages of yellow and red increase, the difficulty in molding the part will increase and the part quality will decrease.
Any translucent	The part cannot be molded because a short shot will occur.

4. CONCLUSIONS

Although there are some limitations, the authors expect that the method described in this paper will provide feasible foundations for full automation design process. Through illustrative case study, the approach is proven powerful and adaptable for use with current CAD/CAE systems and applications in industry. It will help in reducing the cycling time. The proposed method achieves high accuracy and high performance. Example of industrially simulation model is used to demonstrate the performance and simplicity of the proposed method. The approach is generic in nature, allowing its application to be extended to any complex geometry in part and mold design.

Numerical simulation can help the plastics industry to gain a better understanding of the shrinkage and warpage behavior in their products from these industrial data and to optimize the injection molding parameters. The results indicate that the use of described method can enhance performance of the injection molding, which can further improve the quality of the manufactured part. The injection molding parameters are correctly determined, which ensures quality manufacturing of the part and its dimensional stability. The results of these methods were in good agreement with experiments, which validated their use. The results of this study facilitate the knowledge integration and reduce development time. The described working modeling process is feature-based, object-oriented and parametric. An integration CAD/CAE tools and mold

design tools display a good affinity in achieving agile characteristics in the contemporary product design and development process of stand. CAD and CAE systems were instrumental in the development of CAD model, which was carried iteratively to testing in a CAE environment for simulation of zones in order to enhance geometrical modification.

5. REFERENCES

[1] Lin, A.C., Quang, N.H.: *Automatic generation of mold-piece regions and parting curves for complex CAD models in multi-piece mold design*, Computer-Aided Design, Vol. 57, pp. 15-28, 2014.

[2] Low, M.L.H., Lee, K.S.: *A Parametric-Controlled Cavity Layout Design System for a Plastic Injection Mould*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, pp. 807-819, 2003.

[3] Mok, C.K., Chin, K.S., Lan, H.: *An Internet-based intelligent design system for injection moulds*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 24, pp. 1-15, 2008.

[4] Lakkanna, M., Mohan Kumar, G.C., Kadoli, R.: *Computational design of mould sprue for injection moulding thermoplastics*, Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 3, pp. 37-52, 2016.

[5] Nickels, L.: *Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing, Metal Powder Report*, Vol. 64, No. 8, pp. 8-12, 2009.

[6] Agazzi, A., Sobotka, V., LeGoff, R., Jarny, Y.: *Optimal cooling design in injection moulding process – a new approach based on morphological surfaces*, Applied Thermal Engineering, Vol. 52, No. 1, pp. 170-178, 2013.

[7] Vasco, J., Barreirosm, F.M., Nabais, A., Reis, N.: *Additive manufacturing applied to injection moulding: Technical and economic impact*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 25, No. 7, pp. 1241-1249, 2019.

[8] Fu, J., Ma, Y.: *A method to predict early-ejected plastic part air-cooling behavior towards quality mold design and less molding cycle time*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 56, pp. 66-74, 2019.

[9] Kulkarni, A., Aswini, N., Dandekar, C., Makhe, S.: *Modeling of short fiber reinforced injection moulded composite*, Materials Science and Engineering, Vol. 40, No. 1, pp. 012-025, 2012.

[10] Seo, B.U., Song, J.W. Lee, K.S.: *Design and fabrication of multi-cavity injection mold using hot runners and direct edge gates*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C, Vol. 228, pp. 2790-2798, October 15, 2014.

[11] *Kumar, P.S., Srikari, S., Mahesh, N., Reddy, S.: Structural analysis of fiber-filled plastics with moulding process induced anisotropy*, SAS Tech. Journal, Vol. 9, pp. 19-26, 2010.

[12] Ye, X.G., Fuh, J.Y.H., Lee, K.S.: *Automated assembly modeling for plastic injection moulds*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vo1. 16, pp. 739-747, 2000.

[13] Matin, I., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, D.: *Practical aspects of integration in the developed mold design system*, Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 41-44, 2014.

Matin, I., Štrbac, B., Hadžistević, M., Ranisavljev, M

PRIMENA CAD/CAE ALATA ZA PROJEKTOVANJE PROIZVODA OD PLASTIKE

Rezime: *Brizganje (injekciono presovanje) predstavlja jednu od najviše primenjivanih tehnologija prerade plastike. Proizvodi dobijeni ovom tehnologijom se karakterišu visokom dimenzionom tačnošću i kvalitetom obrađene površine. U radu se prikazuje projektovanje plastičnih proizvoda sa stanovišta proizvodnje. Na osnovu geometrijskih specifikacija proizvoda i pogodnosti proizvoda za prozvodnju se određuju optimalni parametri brizganja upotrebom CAD/CAE alata. Na kvalitet proizoda utiče geometrija, materijal, alat, parametri brizganja i ubrizgavalica. Predhodno opravdava široku upotrebu računara u industriji za modeliranje proizvoda, procesa i alata.*

Ključne reči: *brizganje, CAD, CAE, numerička simulacija*

Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N.[1)]

KONFIGURISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ALATKI U STEP-NC OKRUŽENJU NA PRIMERU ADITIVNIH TEHNOLOGIJA[2)]

Rezime

U radu se predstavlja metodologija za konfigurisanje virtuelnih mašina za aditivne tehnologije za rad u okruženju koje je bazirano na STEP-NC protokolu i standardu ISO 10303 AP238. U cilju verifikacije rada konfigurisanih virtuelnih mašina za aditivne tehnologije pripremljen je i primer programa za simulaciju rada mašina u STEP-NC Machine okruženju. Konfigurisane mašine za aditivne tehnologije ili brzu izradu prototipova dodvanjem materijala su integrisane u licencirani softver STEP-NC Machine.

Ključne reči: *virtuelne mašine alatke, STEP-NC, aditivne tehnologije, simulacija rada mašine*

1. UVOD

Novi metod programiranja numeriški upravljanih mašina alatki (NUMA) poznatiji kao STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control), kategorisan je kao budućnost naprednih proizvodnih sistema i omogućava efikasno suočavanje sa izazovima koje prati novo industrijsko doba u eri Industrije 4.0 [1]. Programiranje NUMA na bazi STEP-NC standarda omogućava vrlo visok nivo informacija, objektno orijentisane opise dela u neutralnom formatu, dvosmernu komunikaciju informacija, koja podrazumeva mogućnost i povratnih informacija iz procesa. Međutim, klasična programiranja u G kôdu su još uvek aktuelna i dominantno zastupljena, dok objektno programiranje do sada nije uvedeno u punom obimu, pa oba ova metoda programiranja egzistiraju uporedo [2]. Ovaj novi metod programiranja NUMA bazira se na primeni grupe STEP standarda, ISO 14649 i ISO 10303-238 i dalji razvoj i primena može se pratiti na veb stranici kompanije STEP Tools [3].

Do sada je STEP-NC objektno orijentisano programiranje NUMA delimično primenjeno i razvijeno za procese obrade glodanjem, struganjem, elektroerozijom, obradom glodanjem industrijskim robotima,... S obzirom na aktuelnost primene aditivnih tehnologija, jedan od izazova je primena i na mašinama alatkama za aditivne tehmologije. U oblasti aditivnih tehnologija razvoj primene STEP-NC protokola je u razvoju [1, 4-8]. Razlog za ovo je što se još uvek uspostavlja model podataka koji treba da obuhvati sve potrebne informacije aditivnih procesa u STEP-NC.

U ovom radu se razmatra analiza primene novog metoda programiranja na mašine za aditivne tehnologije na bazi STEP-NC protokola, primenom standarda ISO 10303 AP238 [9] i softvera STEP-NC Machine kod mašina koje uobičajeno izvršavaju G-kôd.

Kod klasičnog metoda programiranja dodavanja materijala kao ulaz koristi se STL datoteka koja se učitava u odgovarajući softver gde se generiše putanja dodavanja materijala u formatu G kôda. Ovi softveri nude pogodnosti za podešavanje potrebnih parametara procesa dodavanja materijala, simulacije dodavanja materijala, ali nemaju mogućnost simulacije rada virtuelne mašine na osnovu zadate putanje alata.

Novi metod programiranja baziran na STEP-NC protokolu AP238 (ISO 10303-238), ima mogućnost konfigurisanja virtuelnih mašina alatki [10,11] i njihovu upotrebu za similaciju rada mašine na bazi STEP-NC programa. U cilju pripreme novog metoda programiranja primenom STEP-NC standarda, konfigurisane su i

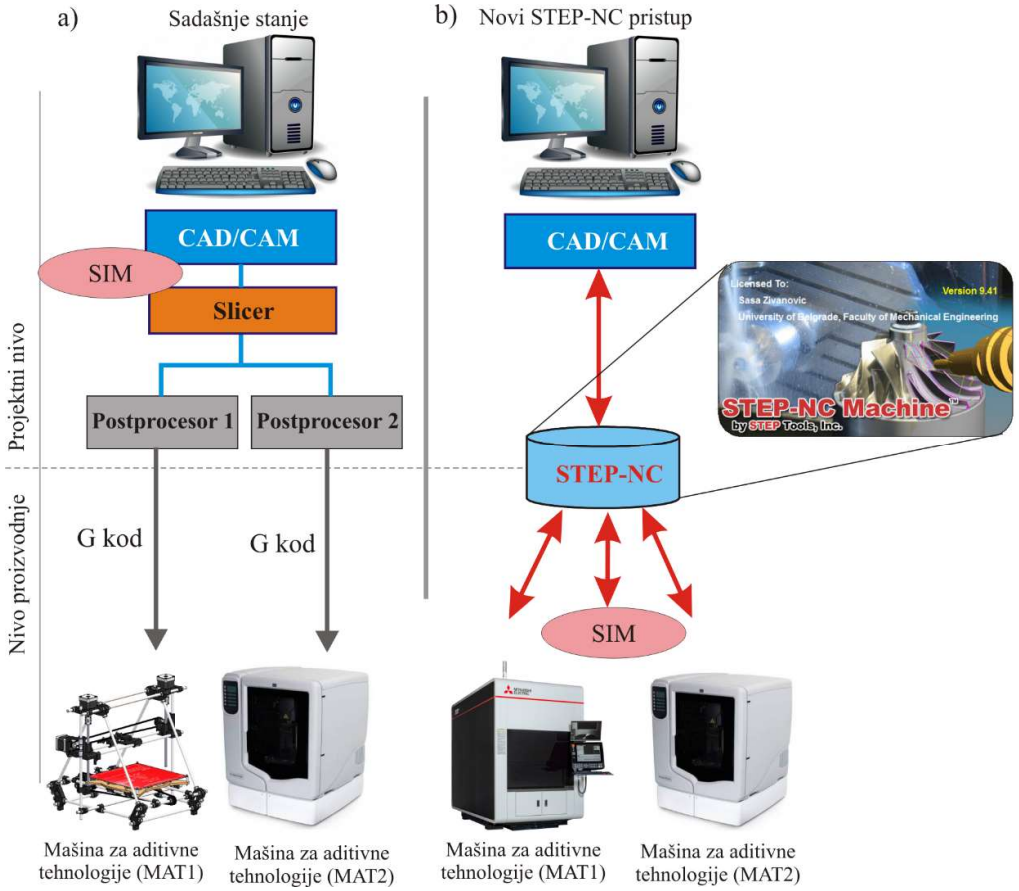
[1)] prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Nikola Vorkapić, (nvrokapic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Nikola Slavković, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo

[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrisana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „ Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema ", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god.

integrisane virtuelne mašine za aditivne tehnologije koje rade po programu u STEP-NC formatu u okruženju softvera STEP-NC Machine. Programi u STEP-NC formatu za potrebe simulacije rada virtuelnih mašina dobijeni su primenom jednog hibridnog metoda programiranja.

2. ADITIVNE TEHNOLOGIJE I PRIMENA STEP-NC PROTOKOLA

Izrada prototipova primenom aditivnih tehnologija se zasniva na digitalnom lancu koji je pokazan na slici 1a). Potreban model prototipa se kreira primenom CAD sistema i uobičajeno se čuva u STL (Standard Triangulation Language) formatu. Ovaj model se učitava u adekvatan CAM sistem, odnosno odgovarajući Slicer, gde se vrši sečenje modela na slojeve definisane debljine i definišu parametri za proces izrade koji je izabran. U zavisnosti od primenjenog aditivnog procesa, postoje i različite mašine za aditivne tehnologije (MAT1, MAT2,...) od kojih svaka ima i odgovarajući specifični format G kôda, koji se izvršava na mašini, što zahteva i odgovarajuće različite postprocesore.



Slika 1. *Uporedni prikaz programiranja primenom G-koda i STEP-NC interfejsa*

U ovakvom digitalnom nizu evidentan je jednosmerni tok podataka, koji otežava komunikaciju između nivoa proizvodnje i projektnog nivoa. G kôd podrazumeva informacije niskog nivoa, pri čemu se značajan broj važnih informacija gubi samim činom konvertovanja u G kôd. Zbog različitosti koje postoje u specifičnim instrukcijama G kôda za različite aditivne procese, po svakoj mašini je neophodan odgovarajući postprocesor. Ovakav sistem zasnovan na G kôdu još uvek uspešno funkcioniše, ali novo proizvodno okruženje, u doba Industrije 4.0, zahteva dalju evoluciju sistema, koja bi mogla biti ostvarena primenom STEP-NC protokola.

Na slici 1b) je ilustrovan novi STEP-NC pristup integrisanog i standardizovanog digitalnog niza u vidu STEP-NC programa koji je usaglašen sa aditivnim tehnologijama od projektovanja do CNC upravljačkih jedinica. Prema ovom pristupu je moguća dvosmerna razmena podataka sa postojanjem povratne sprege kroz jedinstveni STEP-NC program koji je obogaćen informacijama visokog nivoa, uključujući informacije o proizvodu (prototipu), procesima, tehnologiji, putanji. Potreba za postprocesorima je eliminisana, pod uslovom da mašine za aditivne tehnologije poseduju upravljačke jedinice koje mogu direktno da interpretiraju STEP-NC programe i generišu putanje alata i parametre procesa. Takođe, vrlo je značajna mogućnost

multifunkcionlnog proizvodnog pristupa, gde je moguće ostvariti hibridnu proizvodnju, koja podrazumeva aditivno-subtraktivne procese proizvodnje [12].

Objektno programiranje na bazi STEP-NC protokola nije još uvedeno u punom obimu. Probe sa ovim metodom programiranja kao i njegova promocija deo su aktuelnih istraživanja i za sada se obično vrše u hibridnim obradnim sistemima, koji se obično programiraju pomoću G kôda, ali imaju i neku mogućnost da preuzmu i izvrše program dobijen na bazi STEP-NC protokola. Ovo je moguće zahvaljujući postojanju konvertora koji STEP-NC program prevodi u format koji upravljačka jedinica mašine može da interpretira [2,13,14].

3. HIBRIDNI METOD PROGRAMIRANJA MAŠINA ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE PRIMENOM STEP-NC PROTOKOLA

Ovaj rad razmatra metod hibridnog programiranja, zasnovan na standardu ISO 10303-238 i softveru STEP-NC Machine, u cilju pripreme STEP-NC programa koji će biti korišćen za simulaciju rada virtuelnih mašina za aditivne tehnologije. Softver STEP-NC Machine ima mogućnost da na osnovu STEP-NC programa generiše i G kôd, što bi u ovom slučaju bilo potrebno jer mašine za aditivne tehnologije koriste G kôd. Naravno u budućnosti je moguće da se daljim razvojem upravljanja ostvari i direktno interpretiranje STEP-NC programa na mašinama, ili da se u opciji za eksportovanje koja je deo samog softvera pojavi i G-kôd za aditivne tehnologije. Za sada je to u razvoju.

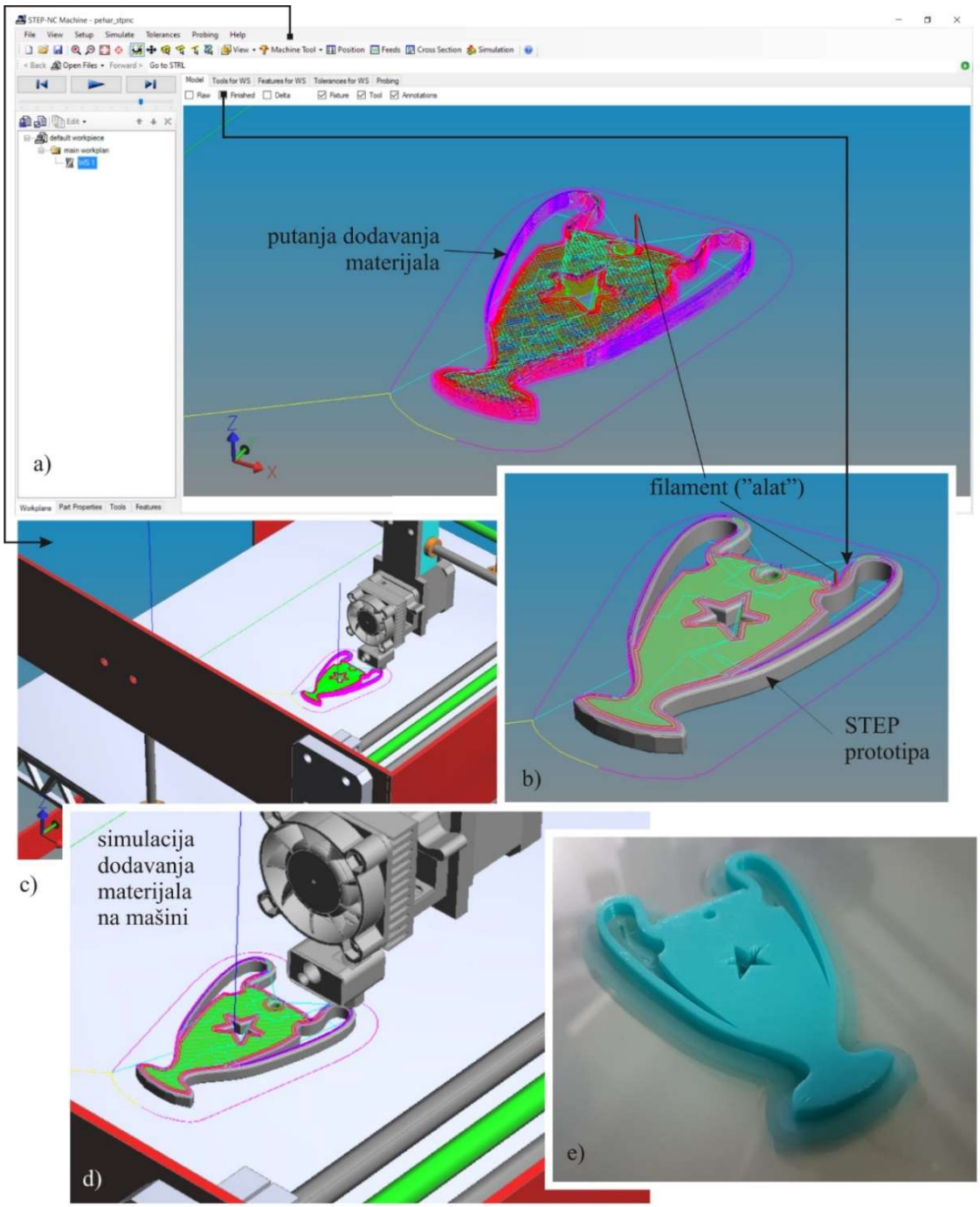
Kao ugledni primer za pripremu modela prototipa za izradu izabran je jednostavan model priveska u vidu pehara lige šampiona u fudbalu. Za izabrani model potrebno je pripremiti putanju dodavanja materijala, kao i odgovarajući STEP model izratka i STEP model alata (u ovom slučaju deo filamenta koji izlazi iz mlaznice), da bi se njihovim učitavanjem u STEP-NC Machine generisao adekvatan program u *.stpnc, odnosno *.p21 formatu. STEP modeli su pripremljeni u CAD/CAM sistemu PTC Creo, dok je putanja alata pripremljena u softveru za programiranje mašina za postupke dodavanja materijala Slic3r u formatu G kôda. Ulaz u softver Slic3r je STL datoteka izratka, na osnovu koje se generiše putanja dodavanja materijala. Ovu putanju koristimo kao ulaz za generisanje STEP-NC programa, ali sada CAD model izratka mora biti u formatu STEP, da bi ga bilo moguće učitati u okruženje STEP-NC Machine. Učitavanjem prethodno pripremljenih geometrijskih informacija kao i generisane putanje alata u STEP-NC Machine ove informacije integrišu se u jedinstven STEP-NC program.

Za uvežbavanje novog metoda programiranja na primeru aditivnih tehnologija, za sada nije moguće učitati mašinu iz baze softvera STEP-NC Machine, jer ne postoji, ali je zato moguće konfigurisati i integrisati svoje mašine u softver, prema proceduri koja je pokazana u [10]. Na slici 2 je pokazan hibridni metod programiranja za generisanje STEP-NC programa kao i primer simulacije na jednoj od konfigurisanih mašina za dodavanje materijala. Na slici 2a) je pokazano okruženje softvera STEP-NC Machine sa učitanom putanjom dodavanja materjala, i delom filamenta (kao alata), dok je na slici 2b) prikazan i učitan STEP model izratka. Simulacija rada na konfigurisanoj virtuelnoj mašini je data na slikama 2c) i 2d). Primer odštampanog prototipa na bazi izvornog G kôda je pokazan na slici 2e). U poglavlju 4, će biti pokazana i procedura konfigurisanja virtuelnih mašina za aditivne tehnologije.

4. KONFGURISANJE VIRTUELNIH MAŠINA ZA ADITIVNE TEHNOLOGIJE U OKRUŽENJU STEP-NC MACHINE I SIMULACIJA NJHIHOVOG RADA

I za tehnologije glodanja, bušenja i struganja čiji je razvoj dosta odmakao u pogledu primene STEP-NC postoji vrlo mali broj mašina koji može direktno interpretirati STEP-NC program. Aditivne tehnologije su vrlo aktuelne i primena STEP-NC programiranja je novi istraživački izazov. U tom pogledu korisno je pripremati se za uvežbavanje novog metoda programiranja i za aditivne tehnologije, kroz primenu hibridnog metoda programiranja, kao i simulacijama na sopstvenim konfigurisanim virtulenim mašinama za dodavanje materijala.

Tako konfigurisane mašine za dodavanje materijala mogu da interpretiraju STEP-NC programe u softverskom okruženju STEP-NC Machine. Procedura konfigurisanja virtuelnih mašina obuhvata sledeći niz aktivnosti [2,10]: (i) priprema CAD modela mašine u raspoloživom CAD/CAM sistemu u STEP formatu (AP203, AP214 ili AP224); (ii) priprema opisa strukture mašine u XML formatu (algoritam upravljanja, baza mašine-nepokretni deo, definisanje koordinatnih osa na grani alata i na grani obratka, hodovi osa, postavljanje alata i obratka); (iii) učitavanje u folder .../ Machine, XML i STEP datoteka mašine; (iv) pokretanje softvera STEP-NC Machine, učitavanje programa; (v) izbor iz padajućeg menija Machine Tool jedne od konfigurisanih virtulenih mašina za dodavanje materijala.

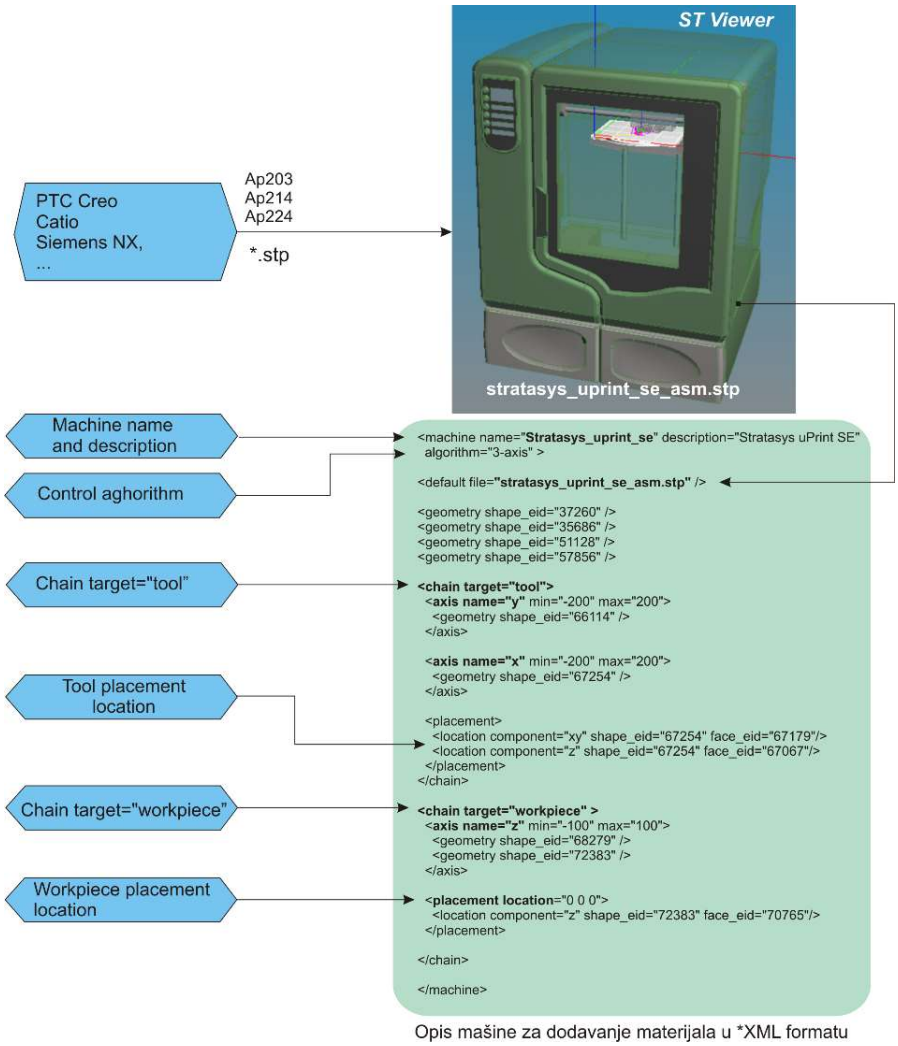


Slika 2. *Hibridni metod programiranja dodavanja materijala i generisanje programa u STEP-NC formatu*

Struktura XML datoteke i STEP model mašine su dati na slici 3. Prvo je neophodno pripremiti CAD model mašine u raspoloživom okruženju (PTC Creo, Catia, Siemens NX, ...). Na početku XML datoteke se definiše ime mašine kao i algoritam upravljanja, koji je ovde troosni. Struktura ima tri osnovne celine: nepokretni deo mašine, ose na grani alata i ose na grani obratka. Za primer mašine za aditivne tehnologije (3D štampač), pokretni klizači su postavljeni na grani alata sa kretanjima po X i Y osama. Treća osa Z je na grani obratka i ona predstavlja pokretanje platforme na kojoj se zasnva model. Naravno ova struktura može biti i drugačija i direktno zavisi od same kinematičke strukture mašine.

Da bi se ostvarila vizuelizacija komponenata virtuelne mašine, neophodno je učitavanje komponenata sklopa iz STEP modela mašine, čiji je naziv dat na početku XML datoteke, slika 3. Za korektno adresiranje

komponenata i značajnih površina, koriste se oznake za komponente shape_eid, kao i za površine face_eid pomoću softvera ST Viewer. One su znacajne pri izboru površina za postavljanje i baziranje alata (ovde filamenta) na čeonoj pobršini mlaznice i izratka (prototipa) na platformi na kojoj se zasniva model.



Slika 3. *Struktura XML datoteke koja je integrisana sa mašinom u STEP formatu*

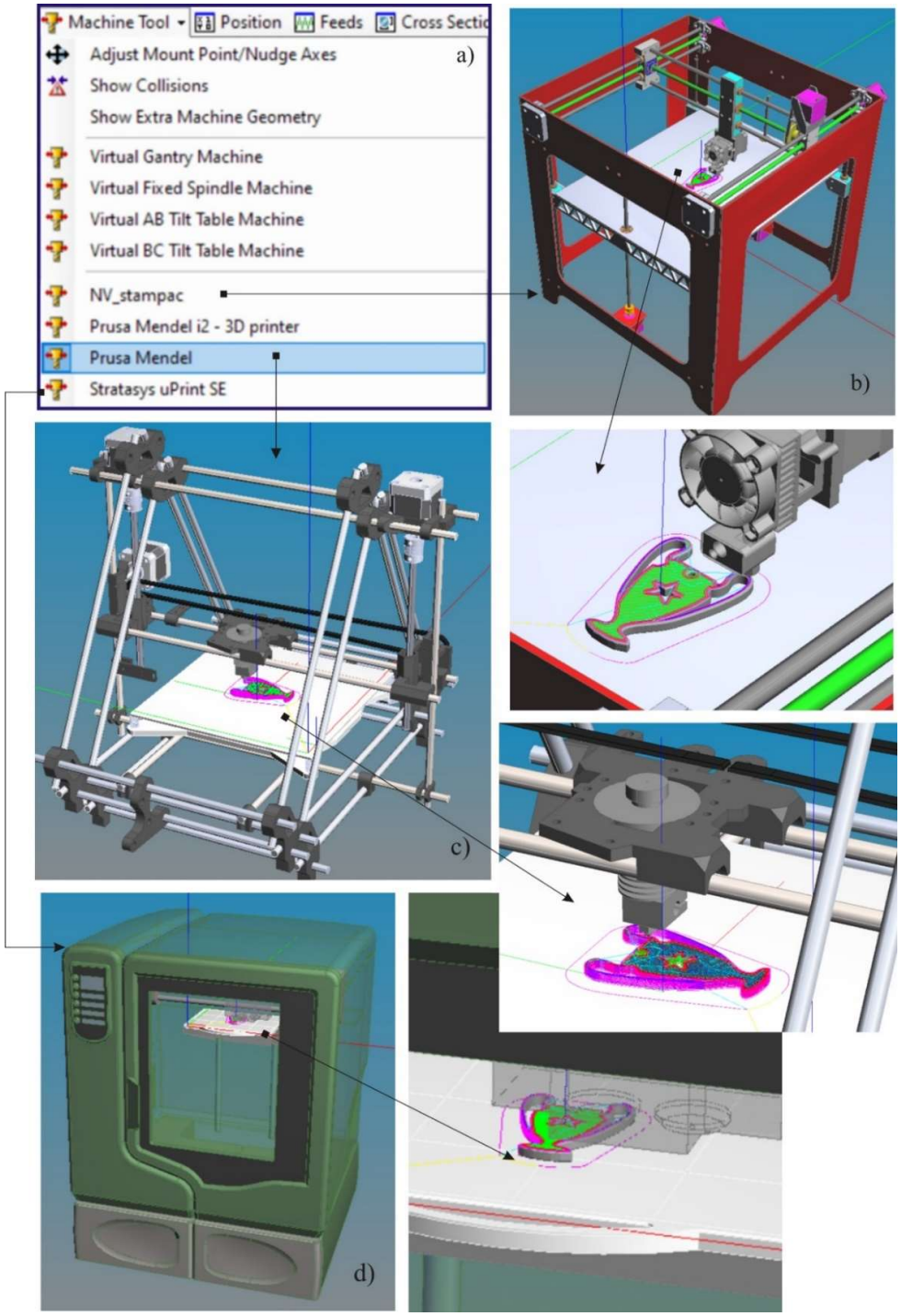
Model mašine u STEP formatu se izvozi u odnosu na referentni koordinatni sistem mašine, u odnosu na koji se postavlja i obradak, koji se može pomerati duž ose Z, što zavisi od položaja nulte tačke obratka. Prilikom pripreme modela ne moraju se učitati sve komponente originalnog modela, da bi model mašine bio što jednostavniji i da bi se brže učitavao [2]. Takođe za učitani model mašine, pojedinim komponentama se može dati transparentnost, radi bolje vidljivosti zone formiranja modela, pogotovu ako mašina ima kabinu, kao što je to slučaj sa štampačem Stratasys uprint se, slika 4d). Primeri, do sada, konfigurisanih virtuelnih mašina za aditivne tehnologije u okruženju STEP-NC Machine sa prikazom simulacije dodavanja materijala je urađeno za tri mašine: (i) NV_stampac, (ii) Prusa Mendel, (iii) Stratasys uprint se, koje su pokazane na slici 4. Na slici 4a) je pokazan padajući meni iz koga se za potrebe simulacije može izbarati željena mašina. Za primer pehara sa slike 2, pokazana je simulacija na sve tri mašine, sa prikazom i uvećanih detalja zone izrade prototipa na svakoj od razmatranih mašina. Na ovaj način je uspešno pokazano da je moguće pripremiti putanju dodavanja materijala u formatu STEP-NC programa, kao i izvršiti simulacije rada mašina za aditivne tehnologije, kada izvršavaju kretanja po programu koji odgovara putanji dodavanja materijala.

5. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni primeri pripreme za novi metod programiranja primenom STEP-NC standarda u oblasti aditivnih tehnologija. Probe i promocija novog metoda programiranja na bazi STEP-NC sada se obično

vrše na hibridnim obradnim sistemima, koji se uobičajeno programiraju G kôdom, ali imaju i neku mogućnost da preuzmu i izvrše program pripremljen objektnim programiranjem. Pokazana je procedura konfigurisanja virtuelnih mašina za aditivne tehnologije, koje su integrisane u licencirani softver STEP-NC Machine u okviru koga su izvršene probe simulacije rada ovih mašina simulacijom putanja dodavanja materijala. Cilj je uvežbavanje i priprema za primenu novog metoda programiranja i u oblasti aditivnih tehnologija.

U okviru daljih istraživanja se planira dalji razvoj procedura za generisanje STEP-NC programa za aditivne tehnologije, kao i translatora za prevođenje STEP-NC programa na specifične formate G kôdova za različite aditivne tehnologije.



Slika 4. *Primeri konfigurisanih virtuelnih mašina za aditivne tehnologije u okruženju STEP-NC Machine sa prikazom simulacije dodavanja materijala*

6. LITERATURA

[1] Rodriguez, E., Bonnard, R., Alvares, A., Progresses in the Development of a STEP-NC Compliant Additive Manufacturing System, Revista Produção e Desenvolvimento, vol.4, no.1, p.39-53, 2018

[2] Živanović, S., Vorkapić, N., Slavković, N., Kokotović, B., Analiza primene novog metoda programiranja CNC strugova primenom STEP-NC protokola, 42. JUPITER konferenencija, 38. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.129-3.134, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 06-07. oktobar 2020.

[3] Step Tools, Inc., https://www.steptools.com/ , 2020.

[4] Step Tools, Additive NC, https://github.com/steptools/AdditiveNC , 2022.

[5] Loffredo, D., Make STEP-NC for Additive Manufacturing, https://github.com/steptools/AdditiveNC , jun 2022.

[6] Rodriguez, E., Alvares, A.: STEP-NC implementation approach for additive manufacturing, Procedia Manufacturing, Vol. 38, pp.9–16, 2019. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.002A

[7] Bonnard, R., Hascoët, J.-Y., Mognol, P., Stroud, I.: *STEP-NC digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation*, Int. J. Comput. Integr. Manuf., Vol. 31, No. 11, pp. 1141–1160, 2018.

[8] Bonnard, R., Hascoët, J.-Y., Mognol, P., Zancul, E., Alvares, A. J.: *Hierarchical object-oriented model (HOOM) for additive manufacturing digital thread*, J. Manuf. Syst., Vol. 50, pp. 36–52, 2019.

[9] ISO10303-238, Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 238: Application protocol: Application interpreted model for computerized numerical controllers, 2007.

[10] Milan Zeljković, Slobodan Tabaković, Aleksandar Živković, Saša Živanović, Cvijetin Mlađenović, Miloš Knežev, OSNOVE CAD/CAE/CAM TEHNOLOGIJA, udžbenik, ISBN 978-86-6022-120-1, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, 2018.

[11] Zivanovic, S., Slavkovic, N.: *Programming of machine tools and robots for machining using STEP-NC in the era of Industry 4.0*, Keynote Lecture, Proceedings of the 15th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2021, pp. 3-26, University of Banjaluka, Faculty of Mechanical Engineering, 28-29 May, 2021.

[12] Rauch, M., Hascoet, J.-Y.: A Manufacturing System for Advanced Multi-Process Manufacturing Based on STEP-NC, in Volume 4: Advanced Manufacturing Processes, Biomedical Engineering, Multiscale Mechanics of Biological Tissues, Sciences, Engineering and Education, Multiphysics, Emerging Technologies for Inspection, Vol. 4, pp. 71, 2012.

[13] Glavonjić, M.: *AN5-Objektno programiranje mašina alatki*, Predavanja iz Mašina alatki M, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.

[14] Glavonjić, M., Živanović, S.: *Novi pristup programiranju numerički upravljanih mašina alatki primenom STEP-NC*, 38. JUPITER konferenencija, 34. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.112-3.117, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2012.

Živanović, S., Vorkapić, Slavković, N.

CONFIGURING OF VIRTUAL MACHINE TOOLS IN STEP-NC ENVIRONMENT ON THE EXAMPLE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract: The paper presents a methodology for configuring virtual machines for additive technologies to work in an environment based on the STEP-NC protocol and the ISO 10303 AP238 standard. In order to verify the operation of configured virtual machines for additive technologies, an example of a program for simulating the operation of machines in the STEP-NC Machine environment was prepared. Configured machines for additive technologies or rapid prototyping by adding materials are integrated into the licensed STEP-NC Machine software.

Key words: *virtual machine, STEP-NC, additive technologies, machine simulation*

Stojanović, J., Pjević, M., Popović, M., Mladenović, G. [1)]

STATE OF THE ART IN THE FIELD OF FORCE PREDICTION IN BALL END MILLING

Abstract: Simulating the process of NC milling is of fundamental importance in computer aided design (CAD) and computer aided manufacturing (CAM). Cutting force prediction is very important to optimize machining parameters and monitor machining state. In order to predict cutting force of surface machining with ball end mill, contact state between cutter and workpiece are studied. The resulting surface quality after machining with ball end cutter is of superior importance because finish milling is often the last process step determining the functional performance of a component. In this paper is presented the state of the art in the field of force prediction in ball end milling and advantages of different methods for determining the cutter-workpiece engagement.

Key words: Cutting force, ball-end milling, free-form surfaces, CAD/CAM, cutter-workpiece engagement.

1. INTRODUCTION

In order to produce the parts with free-form surfaces in an optimum manner in terms of production cycle time, cost and product quality, the machining process of free-form surfaces needs to be simulated faster and more accurately in advance. Ball end milling is mainly used for finishing operations and manufacturing of complex parts. Besides high geometric accuracy and low surface roughness, a compressive residual stress state is often required, e.g. in aerospace parts. Disadvantages of using rounded cutting edges are increased forces because of additional ploughing as well as a possible burr formation. [1-2].

The evident feature of ball end milling for sculptured surface is that the contact condition between the tool and workpiece varies along the tool path. In sculpture surface machining, the cutter/workpiece engagement region does vary along the cutter path and in general, unless some specific and very simple workpiece geometry is machined, it is difficult to find an exact analytical representation for the engagement region. It changes cutter-workpiece engagement (CWE), which defines the area where cutter and workpiece interact to generate cutting force. Beside force calculation prediction, chip load is based on CWE therefore the output of the engagement model is very critical. Chip load and force calculations are based on the cutter/workpiece engagements; therefore the output of the engagement model is very critical. In order to model the process mechanics and dynamics accurately, it is important to have a precise geometric representation of the CWE surface. [3-5]

The researches for CWE under different cutting conditions are mainly divided into three types: solid modeling, discrete representation, and analytical methods, and this paper is divided in sections by these methods and explaining what are advantages and disadvantages of every method studied by different scientists. After these sections there will be presented different examples for determining the cutting forces. Through comparison studies, the model predictions are verified by the corresponding results obtained via different modeling approaches in CAD environment.

2. SOLID MODELING APPROACH

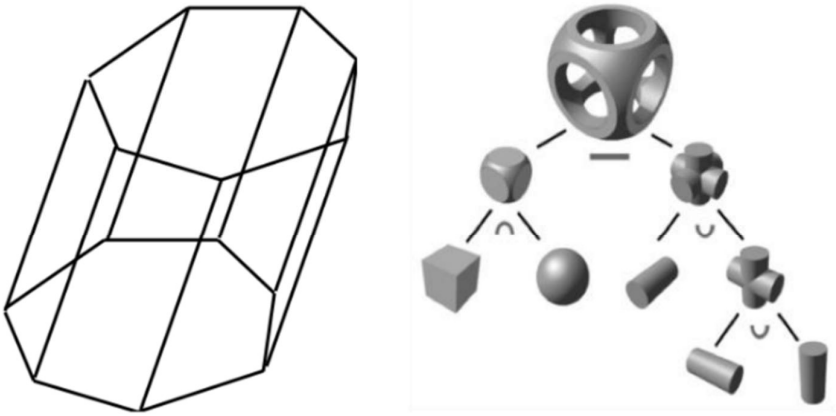
Solid modeling approach or solid modeling techniques mainly are used to model three-dimensional objects and were designed in the 1960s. Most common techniques in the solid modeling approach are: boundary representation (B-Rep)(Fig 2.1.a) and constructive solid geometry (CSG) (Fig 2.1.b).

[1)] Jagoš Stojanović, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, (genijejagos@gmail.com), prof. dr Miloš Pjević, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Mihajlo Popović, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, (mpopovic@mas.bg.ac.rs) prof. dr Goran Mladenović, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs)

B-Rep is a method of describing solid object like it is said in the name of method (Rep is short for representation), by their boundaries. There are many types of boundaries, but the one that is used in this paper are free-form surfaces which could be described in numerous mathematical ways. Some of the most common mathematical descriptions of free-form surfaces are Bézier curves, B-spline curves and non-uniform rational B-Splines also known as NURBS.

Imani and Elbestawi [6] B-rep solid modeling techniques are used to deal with geometric modeling issues encountered in ball-end milling simulation. They used precise B-rep model of the cutter swept volume that is developed using advanced sweeping techniques and developed a simulation system for modeling semi-finishing and finishing operations. B-rep model of the part with free-form surfaces is accurately and efficiently updated by the system.

Sadeghi [7] et al. presented a system for geometric and physical simulation of the ball-end milling process using solid modeling. They have realized that all the research works in this field is done used either geometric or physical modeling of ball-end milling process and set a challenge to develop a method using an integration of these two methods, which could be applied to a wide range of tool and cut geometries. The cutting edge and updated part geometry are modeled using a commercially available geometric modeler (ACIS). By using this method, researchers managed to develop an approach for prediction of the static cutting forces, the dynamic forces and tool deflection in machining of die surfaces with ball-end mills.



a) *b)*

Figure 2.1. *Representaton of most common techniques in the solid moddeling approach*

Lazoglu et al. [8] did their work in making new approach for predicting cutting forces in five-axis machining of parts with complex free form surfaces. Advantages of developed model are numerous: it provides an efficient and accurate solution for extracting the information on contact region at cutter location (CL) points from the in-process workpiece and it allows especially for multi-stage process simulations including roughing, semi-finishing and finishing. Before them, scientists have developed various approaches to improve the performance of five-axis machining process. Sorby et al. [9] proposed an empirical method for selection of cutting tool and machining data for flank milling based cutting tool life and cutting forces. Lauwers et al. [10] developed a five-axis tool path generation algorithm based on faceted or tessellated models. Becze et al. [11] introduced an analytical chip load model for five-axis high-speed milling. Biermann et al. [12] showed effects of workpiece vibrations on five-axis milling of turbine blades. Budak et al. [13] presented models for milling stability analysis where the process geometry is extracted using a semi-analytical engagement method. Ferry and Altintas [14] developed a semi-discrete solid modeler based simulation system for five-axis flank milling.

Yang et al. [15] proposed a solid modeling-based method to extract CWE for multi-axis milling. In addition too improve efficiency they extracted CWE based on the removal volume, rather than the in-process workpiece. Conducted numerical simulations show that the method is reliable and efficient by comparing with existing approach.

Hengyuan et al. [16] proposed a new method for high efficiency calculation of CWE in five-axis milling based on the distance field and envelope theory. In the geometry modeling and milling simulation, workpiece surfaces are modeled using sampled distance fields stored in a well-designed octree data structure for efficient memory usage. The inverted trajectory method is used to calculate the tool swept volume, which is subtracted from the in-process workpiece by performing three-stage intersection Boolean operation.

After comparing the CWE diagrams calculated by newly developed method at specific CL points with the B-rep based method, researcher came to conclusion that the proposed method is faster than the B-rep method with almost the same accuracy except on some independent sharp corners. Another advantage of this method is that the CWE diagrams of over 12,000 CL points can be calculated in several minutes, which makes it practical for industrial applications.

Yip-Hoi et al. [17] presented a solid modeling based solution for calculating CWE geometry when multiple setups and tool changes are considered. The cutter engagement feature (ceF) which represents the characterization of the cutter/workpiece intersection over a single revolution of the cutter has been identified as a representation of the CWE at each feed step of the cutter during $2\frac{1}{2}$ D end milling.

The direct Boolean subtraction approach is an exact and analytical approach. It directly performs the Boolean subtraction operation between a solid model and the volume swept by a cutter between two adjacent tool positions. Although this approach can provide accurate verification and error assessment, the computation cost is known to grow too much for a numerous tool-paths. [5]

3. DISCRETE REPRESENTATION

Main advantage of discrete approaches is that they are computationally simpler than the solid modeling approach. Typically, discrete methods require intersection calculations between simple geometric primitives, allowing simple and robust analytical or algebraic solutions. This simplicity provides robust behavior and also increases the computational efficiency.

Discrete representation of the geometry may result in the loss of geometric accuracy. However, if the simulation parameters are selected properly, considering both workpiece and tool path tolerances, the error introduced by the discrete representation may be kept in an acceptable level.

There are several discrete methods used for the representation of the in-process workpiece such as Octree, Voxel, ray representation and Depth buffer (Dexel) approaches.

In Octree and Voxel approach, workpiece is modeled as volume cells (Voxels), for instance cubes for the Octree data structure. Octree method is based on the divide-and-conquer principle that recursively subdivides a cube into octants up to specified resolution. Coordinates of each vertex (node) in a voxel is stored and by checking the inner–outer nodes stock workpiece is obtained. During NC simulation tool swept volume between two CL points is subtracted from the stock workpiece and machined workpiece is obtained. This method is simple and fast, however, main drawback is the excessive memory requirements (especially at high resolutions) due to the large amount of data stored.

The most popular and commonly used Depth Buffer scheme in the literature and in the CAM software is Z-Buffer method. Z-buffer method is usually referred as Z-map method. In conventional Z-map method, workpiece is represented as the intersection points of the Z direction vectors (ZDV) with the workpiece surface on a 2D grid of ZDVs. These intersection points are also upmost part of the workpiece surface where only one intersection of the workpiece with a ZDV is permitted. [5]

Roth et al. [18] presented graphical representation of the tool movements to determine the in-process chip geometry and tool edge contact length using an adaptive and local depth buffer. In their word this method is improved in the way to include the effects of complex tool geometry.

Jian Guang Li et al. [19] presented an improvement of the geometric simulation efficiency on three-axis milling process using hybrid discrete representation method. Used method is a combination of advantages both of the Z-Map and quadtree in simulation model representation. Researchers came to conclusion that this method can improve simulation efficiency significantly compared to single quadtree.

Taner et al. [20] published research about comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling. The first method is a discrete model which uses three-orthogonal dexelfield, and the second method is a solid modeler-based model using Parasolid boundary representation kernel. They compared both CWE calculation methods in terms of speed, accuracy and performance for three- and five-axis milling of ball-end and flat-end mill tools.

Boz et al. [21] compared two methods for CWE calculations in three- and five-axis virtual milling. First method they used is a a discrete model which uses three-orthogonal dexelfield and the second method is a solid modeler-based model using Parasolid boundary representation kernel.

Popovic et al [22] identified cutting coefficients by applying the orthogonal cutting mechanics, which are used in the cutting forces and torque prediction. In part of their research they used an unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations developed by Kaymakci et al. [23].

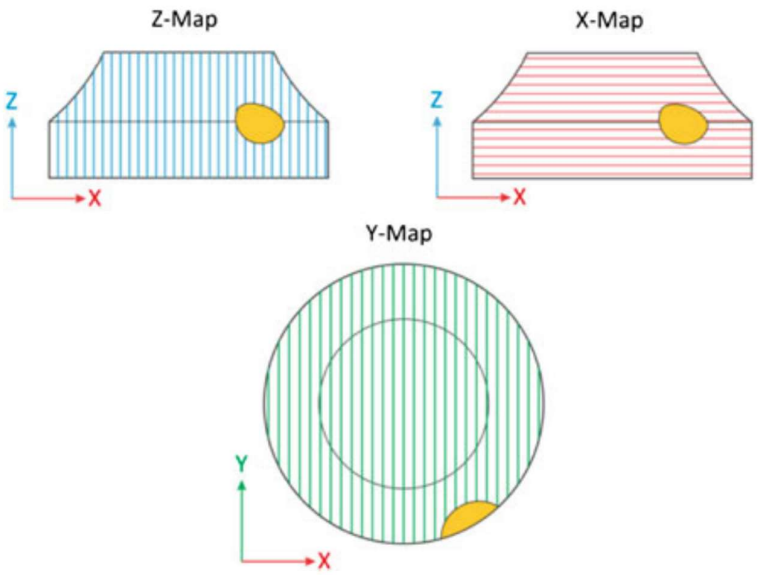


Figure 3.1. *Illustration of three-orthogonal dexelfield [21]*

Theegarten et al. [24] presented an efficient method for calculating discrete engagement maps for five-axis milling operations. Used method is based on the tri-dexel volumetric model, which is commonly used in Computer Aided and Virtual manufacturing for validation and verification of NC programs. Presented approach sometimes suffers due to the errors attributed to the discrete simulation, the existing problems can be mathematically analyzed and reduced.

Wang et al. [25] solid-discrete-based method is used to precisely and efficiently identify the CWE between the end mill and the surface being machined.

In order to realize fast and sufficient precise CWE calculation for five-axis milling, Ma et al. [26] presented an efficient approach based on the distance field and envelope theory is proposed in this paper.

Nie [27] proposed several CWE extraction methods based on vector models, where the in-process workpiece is represented by a set of uniformly distributed line segments along z-axis.

4. ANALYTICAL METHOD

In literature could be found that first analytical positioning was described initially in 1979 [28]. Analytical methods based on geometric analysis or mechanistic force models have also been employed extensively. This method generates the CWE maps by identifying the geometry intersection between the cutter and the workpiece. Bezier, B-spline, and nonuniform rational basis spline (NURBS) curves or surfaces are often used to represent the geometries of the cutter and the workpiece. Mladenovic et al. [29] presented that each point on the surface is calculated using the corresponding formulas as a function of two parameters, u and v. The advantage of analytical method lies in its good accuracy and time saving when the concerned workpiece geometry is relatively simple. [15] These approaches aim to either deal with cutter positioning and/or tool path selection problems or cutting condition value optimization by examining the developed cutting forces. As mentioned, the developed algorithms can easily be used in various optimization schemes and are fairly accurate. On the other hand, they are usually computationally expensive and despite the rigorous mathematical background, they still involve several simplifications about the developed cutting phenomena. [5]

Bailey et al. [30] analytically carried out this calculation by determining the intersection between the NURBS defined cutting edge and the part's local surface topology, defined as the surfaces generated by previous tool paths in the vicinity of the current tool position. Ozturk and Lazoglu [1] used the cutter location (CL) points to yield the instantaneous CWE maps in the machining of monotonic free-form surface. Recently, Budak et al. [13] proposed alternative analytical models to compute the process geometry, such as depth of cut, lead, and tilt angles, together with CWE maps for five-axis milling.

Zhu et al. [31] used a cutting edge element moving method to calculate instantaneous undeformed chip thickness for general cutter five-axis machining. The cutting edge element is involved in cutting when it is under the workpiece surface and outside the tool envelop surface. Zhang et al. [32] determined the boundary of CWE by intersecting the workpiece surface and the cutter geometry, and established the analytic model of entry angel and exit angle to realize the cutting force prediction in five-axis flank milling of sculptured surfaces. Zhu and Zhang [33] proposed instantaneous milling force per tooth for the three-axis horizontal non-grooving milling of ball end mill. The CWE was divided into different milling areas, and the corresponding z-axial boundary analytical expression was derived.

Guo et al. [34] developed a force prediction model for five-axis flat end milling of free-form surface base on a new analytical CWE model. The experiment and simulations of five-axis milling of free-form surface show that the CWE obtained from analytical method matches with that of experiment; a slight error compared with solid modeling method, and the relative area error is within 1.2%.

Wei et al. [35] proposed a new analytic method of CWE and in-cut cutting edge (ICCE) for ball end milling of sculptured surface and established the prediction model of milling force. The CWE is obtained by spatial surfaces intersection in an auxiliary cutter coordinate system. Then space transformation is used to derive analytic algorithms of CWE in cutter coordinate system. Researchers came to conclusion that the simulation of the CWE and the ICCE, the developed analytic model is consistent well with the results of the solid modeling method based on Boolean operation.

Xi et al. [36] used an analytical method based on arc-surface intersection to calculate CWE based on arc-surface intersection method. In this paper it is proven that the proposed method is a modification of ASIM (arc-surface intersection method), an analytical method can achieve the required accuracy. If there is need for a larger number of CL points to be included, additional work should be done to optimize the C++ program to enhance the computing speed.

5. THE PREDICTION MODEL OF CUTTING FORCE

According to the Armarego oblique angle microelement cutting force model [37], the cutting force of the microedge involved in CWE could be expressed as follows:

$$\begin{aligned} dF_r &= K_{rc}t_n db + K_{re}ds \\ dF_a &= K_{ac}t_n db + K_{ae}ds \\ dF_t &= K_{tc}t_n db + K_{te}ds \end{aligned} \tag{1}$$

where dF_r, dF_a and dF_t are the radial, axial, and tangential forces of the microedge cutting edge; K_{rc}, K_{ac} and K_{tc} are the shear coefficients; K_{re}, K_{ae} and K_{te} are the blade force coefficients; tn is the thickness of undeformed chip; db is the projection width of the microedge on the generatrix; and ds is the projection length of the microedge on the generatrix.

The width db could be expressed by microaxial position angle $d\theta_T$ and ball end mill radius R.

$$db = Rd\theta_T \tag{2}$$

The length ds could be solved by the arc length differential formula.

$$ds = \sqrt{x'^2_T(\theta_T) + y'^2_T(\theta_T) + z'^2_T(\theta_T)} \cdot d\theta_T = R\sqrt{1 + \cos^4\theta_T \tan^2\beta_G} \cdot d\theta_T. \tag{3}$$

The thickness t_n is a key parameter in the bevel cutting model, which is the projection of feed per tooth in the normal direction of the sphere [38]. The tool feed direction is consistent with the X_M-axis of IMCS.

According to Duan et al. [39] and based on conventional assumption that the cutting force is proportional to the undeformed chip thickness, basic elemental cutting force model of the cutting edge element along radial, tangential, and axial direction under coordinate system of cutting edge element could be given as:

$$\begin{aligned} df_r &= K_r(h)h_j(\varphi_j, z)db(z), \\ df_t &= K_t(h)h_j(\varphi_j, z)db(z), \\ df_a &= K_a(h)h_j(\varphi_j, z)db(z). \end{aligned} \tag{4}$$

where K_r, K_t and K_a are respectively cutting force coefficients of cutting edge element along radial, tangential and axial direction, and obtained from calibration experiments which will be given in Section 4.2; $h_j(\varphi_j, z)$ is thickness of undeformed chip cut by j tooth at level z when axial immersion angle is φ_j. Figure 5.1. shows the force diagram of elemental cutting edge and transform relation between CSH and CSL.

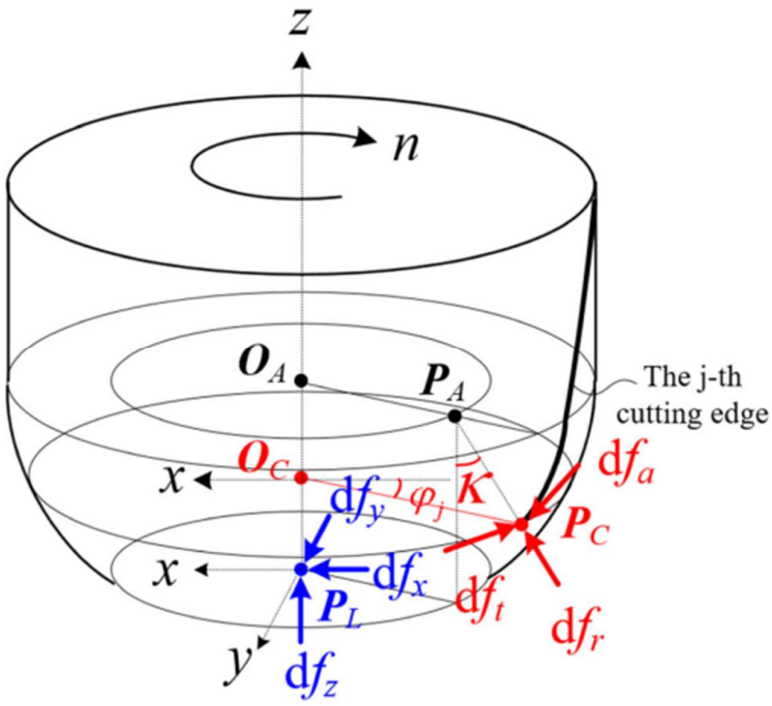


Figure 5.1. *Force diagram of cutting edge element and transform relation between CSH and CSL [39]*

Duan et al. [39] cutting force coefficients calibration experiments are conducted with the same workpiece material and cutting tool as the following verification experiments. Detailed parameters of experimental setup are shown in Table 2.

$$\begin{aligned} K_t(h_j) &= 3683.7 + 6637.16e^{-49.3h_j}, \\ K_r(h_j) &= 1942.2 + 3901.8e^{-44.6h_j}, \\ K_a(h_j) &= -214.9 - 3444.8e^{123.1h_j}. \end{aligned} \tag{5}$$

6. CONCLUSION

In summary, solid modeling can provide accurate geometric information of cutting process, but the process involves a lot of Boolean operations. The more complex the solid topology is, the more time and cost it will consume. So much so that it could not be accepted in the actual engineering application. The Z-Map method loses the geometrical accuracy for the discrete expression of cutter and workpiece geometry. Increasing the grids density can improve the accuracy, but reduce the computational efficiency. Analytic modeling methods describe the geometric relationship between cutter and workpiece with formulas in machining process, which has high efficiency and high accuracy.

Cutting force assessment is a crucial research topic because it is very important for the understanding of the machining process, providing many advantages in terms of process optimization. Based on the IMCS and ITCS, a motion model of the ball end mill for the sculptured surface is established. The motion state and the contact relationship between the cutter and workpiece could be described in a quantitative way and it could be a significant material for future papers and experiments.

7. REFERENCES

[1] Oztruk B., Lazoglu I.: *Machining of free-form surfaces. Part I: Analytical chip load*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 46(7):728-735 , September 2005.

[2] Denkena, B., Krödel, A., Mücke, A., & Ellersiek, L. *Prediction of plastic surface defects for 5-axis ball end milling of Ti-6Al-4 V with rounded cutting edges using a material removal simulation*. CIRP Annals, 70(1), 91–94, 2021.

[3] Mou, W., Zhu, S., Zhu, M., Han, L., & Jiang, L. *A Prediction Model of Cutting Force about Ball End Milling for Sculptured Surface*. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 1–15.

[4] Erdim H., Sullivan A., *Cutter Workpiece Engagement Calculations for Five-axis Milling Using Composite Adaptively Sampled Distance Fields*, Procedia CIRP, Volume 8, 2013, Pages 438-443, ISSN 2212-8271,https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.130.
[5] Paulo Davim, J.: *Machining of Complex Sculptured Surfaces*, Springer London, 2012.
[6] Imani BM, Sadeghi MH, Elbestawi MA (1998) An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. Int J Mach Tools Manuf 38(9):1089–1107. doi:10.1016/S0890-6955(97)00074-6.
[7] Sadeghi, M.H., Haghighat, H. & Elbestawi, M.A. *A solid modeler based ball-end milling process simulation*. Int J Adv Manuf Technol 22, 775–785 (2003). https://doi.org/10.1007/s00170-002-1452-6.
[8] I. Lazoglu, Y. Boz, H. Erdim, *Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces*, CIRP Annals, Volume 60, Issue 1, 2011, Pages 117-120, ISSN 0007-8506, https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.090.
[9] Sorby K, Tonnessen K, Torjusen JE, Rasch FO (2000) Improving High Speed Flank Milling Operations in Multi-Axis Machines. Annals of the CIRP 49:371–374.
[10] Lauwers B, Kiswanto G, Kruth J-P (2003) Development of a Five-axis Milling Tool Path Generation Algorithm based on Faceted Models. Annals of the CIRP 52(1):85–89.
[11] Becze CE, Clayton P, Chen L, El-Wardany TI, Elbestawi MA (2000) High-speed Five-axis Milling of Hardened Tool Steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture 40:869–885.
[12] Biermann D, Kersting P, Surmann T (2010) A General Approach to Simulating Workpiece Vibrations during Five-Axis Milling of Turbine Blades. Annals of the CIRP 59(1):125–128.
[13] Budak E, Ozturk E, Tunc LT (2009) Modeling and Simulation of 5-axis Milling Processes. Annals of the CIRP 58:347–350.
[14] Ferry WB, Altintas Y (2008) Virtual Five-Axis Flank Milling of Jet Engine Impellers—Part I: Mechanics of Five-Axis Flank Milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 130. 011005-1:11.
[15] Yang Y, Zhang W, Wan M, Ma Y (2013) A solid trimming method to extract cutter—workpiece engagement maps for multi-axis milling. Int J Adv Manuf Technol 68:2801–2813.
[16] Hengyuan Ma, Wei Liu, Xionghui Zhou, Qiang Niu, Chuipin Kong, High efficiency calculation of cutter-workpiece engagement in five-axis milling using distance fields and envelope theory, Journal of Manufacturing Processes, Volume 68, Part A, 2021, Pages 1430-1447, ISSN 1526-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.055.
[17] Yip-Hoi, D., & Huang, X. (2006). Cutter/Workpiece Engagement Feature Extraction from Solid Models for End Milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128(1), 249. doi:10.1115/1.1948395.
[18] Roth D, Gray P, Ismail F, Bedi S (2007) Mechanistic modelling of5-a xis milling using an adaptive and local depth buffer. Comput-Aided Des 39(4):302–312. doi:10.1016/j.cad.2006.12.004.
[19] Li JG, Ding JA, Gao D, Yao YX (2010) Quadtree-array-based workpiece geometric representation on three-axis milling process simulation. Int J Adv Manuf Technol 50(5–8):677–687. doi:10.1007/s00170-010-2530-9.
[20] Taner, T.L., Ömer, Ö. & Erhan, B. Generalized cutting force model in multi-axis milling using a new engagement boundary determination approach. Int J Adv Manuf Technol 77, 341–355 (2015). https://doi.org/10.1007/s00170-014-6453-8.
[21] Boz, Y., Erdim, H. & Lazoglu, I. *A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three- and five-axis virtual milling*. Int J Adv Manuf Technol 81, 811–823 (2015). https://doi.org/10.1007/s00170-015-7251-7.
[22] Popović, M., Tanović, Lj., Ehmann, K.: Cutting forces prediction: the experimental dentification of orthogonal cutting coefficients, - FME Transactions, 45(4), 2017.
[23] M. Kaymakci, Z.M. Kilic, Y. Altintas, Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volumes 54–55, 2012, Pages 34-45, ISSN 0890-6955, https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.12.008.
[24] J.M. Theegarten, D. Plakhotnik*, Z.M. Kilic, M. Stautner, E. Berckmann, Y. Murtezaoglu, Discrete Cutter-Workpiece Engagement for Five-Axis Milling Using Tri-Dexel Model, 8th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT), Vancouver, 2019.
[25] Wang, L.; Hao, S.I.; Liheng, G. Prediction of cutting forces in flank milling of parts with non-developable ruled surfaces. Chinese J. Aeronaut 2018, 32, 1788–1796.
[26] Ma H., Liu W., Zhou X., Niu Q., Kong C., *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 68, Part A, August 2021, Pages 1430-1447.

[27] Nie, Z. (2022). Efficient cutter-workpiece engagement determination in multi-axis milling by voxel modeling (T). University of British Columbia.
[28] Stute G, Storr A, Sielaff W (1979) NC programming of ruled surfaces for five axis machining. Annals of the CIRP 28:267–271.
[29] Mladenovic G., Tanovic LJ., Ehmann K.F., *Tool path generation for milling of free form surfaces with feedrate scheduling*, FME Transactions, ISSN 1451-2092, Vol.43, No.1, pp.9-15.
[30] Bailey T, Elbestawi MA, El-Wardany TI, Fitzpatrick P (2002) Generic simulation approach for multi-axis machining, part 1: modeling methodology. J Manuf Sci E-T ASME 124(3):624–633. https://doi.org/10.1115/1.1468863.
[31] Zhu, Z.R.; Yan, R.; Peng, F.Y.; Duan, X.Y.; Zhou, L.; Song, K.; Guo, C.Y. (2016) Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of fiveaxis general end milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 101: 35–51.
[32] Zhang, X.; Zhang, J.; Pang, B.; Zhao, W.H. (2016) An accurate prediction method of cutting forces in 5-axis flank milling of sculptured surface. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 104: 26–36.
[33] Zhu K.P.; Zhang Y. (2017) Modeling of the instantaneous milling force per tooth with tool run-out effect in high speed ball-end milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 118–119: 37–48.
[34] Guo, M.L., Wei, Z.C., Wang, M.J. et al. *Force prediction model for five-axis flat end milling of free-form surface based on analytical CWE*. Int J Adv Manuf Technol 99, 1023–1036 (2018). https://doi.org/10.1007/s00170-018-2480-1.
[35] Z. C. Wei, M. L. Guo, M. J. Wang, S. Q. Li & J. Wang (2019) Prediction of cutting force for ball end mill in sculptured surface based on analytic model of CWE and ICCE, Machining Science and Technology, 23:5, 688-711, DOI: 10.1080/10910344.2019.1575408.
[36] Xi, X., Cai, Y., Gao, Y. et al. *An analytical method to calculate cutter-workpiece engagement based on arc-surface intersection method*. Int J Adv Manuf Technol 107, 935–944 (2020). https://doi.org/10.1007/s00170-020-05100-8.
[37] [E. J. A. Armarego and R. H. Brown, *The machining of metals,* 437 pages, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1969.
[38] Z. C. Wei, M. L. Guo, M. J. Wang et al., "*Prediction of cutting force for ball end mill in sculptured surface based on analytic model of CWE and ICCE*," Machining Science and Technology, vol. 23, no. 5, pp. 688–711, 2019.
[39] Duan, X., Peng, F., Zhu, Z., & Jiang, G. (2019). *Cutting edge element modeling-based cutter-workpiece engagement determination and cutting force prediction in five-axis milling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. doi:10.1007/s00170-018-3082-7.

Stojanović, J., Pjević, M., Popović, M., Mladenović, G. [2)]

TRENUTNO STANJE U NAUCI U OBLASTI PREDIKCIJA SILE REZANJA KOD GLOGANJA LOPTASTIM GLODALOM

Rezime: *Predikcija sile rezanja predstavlja veoma bitan faktor pri podešavanju parametara procesa obrade i praćenja stanja u kome se mašina nalazi. Kako bi se mogla predvideti sila rezanja kod obrade loptastim glodalom neki od parametara procesa obrade koje je potrebno proučiti predstavljaju geometrija alata, sečiva, kao i kontaktne površime između alata i dela. Kvalitet obrađene površine loptastim glogalom od izuzetnog je značaja iz razloga što ovaj proces definiše funkcionalnu upotrebu dobijenog dela. U ovom radu predstavljemo je trenutno stanje u oblasti isrtažavanja predikicje sila rezanja nastalih usled obrade loptastim glodalom.*
Ključne reči: *Sila rezanja, Glodanje loptastim glodalom, složene površine, CAD/CAM.*

Jevtić, I. [1], Popović, M. [2], Mladenović, G. [3], Pjević, M.[4], Milošević, M. [5], Milovanović, A. [6]

GENERATIVNI DIZAJN I PRIMENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U OKRUŽENJU CREO PARAMETRIC[7]

Rezime

Generativni dizajn je jedan od oblika veštačke inteligencije koji nudi niz odgovarajućih rešenja za izbor geometrije dela, a na osnovu postavljene funkcije cilja i ograničenja, koja dovode do poboljšanja u skladu sa potrebama dizajna. Upotreba aditivnih proizvodnih tehnologija dozvoljava njihovu implementaciju uz generativni dizajn, pošto sama tehnologija nudi širi spektar izrade geometrija konačnog dela u odnosu na konvencionalne proizvodne tehnologije. U ovom radu, radi primene generativnog dizajna korišćen je softver Creo Parametric, da bi se dobio poboljšani dizajn dela i kako bi se pripremila izrada dela korišćenjem aditivnih proizvodnih tehnologija.

Ključne reči: *Generativni dizajn, Aditivne tehnologije, Creo Parametric*

1. UVOD

Istorijski gledano, proizvodne tehnologije su nastale još 5000-4000. godine pre nove ere, i tada su se proizvodili predmeti od drveta, keramike, metala i kamena [1]. Sada se, zahvaljujući sve većem razvoju tehnike i tehnologije, proizvodne tehnologije se mogu podeliti u tri grupe, na osnovu principa za dobijanje završne geometrije:

- Tehnologije obrade uklanjanjem materijala (substraktivni procesi obrade)
- Tehnologije dodavanjem materijala (aditivne tehnologije - AT)
- Tehnologije obrade oblikovanjem (formativni procesi obrade)

Za razliku od tehnologije uklanjanjem materijala, aditivne tehnologije predstavljaju proces spajanja materijala, za dobijanje novog objekta. Ovo spajanje materijala, nastaje slojevito, sloj po sloj [2]. Kod aditivne proizvodnje, koja je poznata još i kao 3D štampa, materijali mogu da se tope, omekšaju, polimerizuju i zrače, i tako se novi, naneti sloj spaja sa prethodnim. Na kraju ovog postupka dobija se ili prototip ili neki funkcionalni deo [3]. Ovako dobijen deo, u zavisnosti od postupka štampe, treba ili ne treba dalje da se tretira, odnosno postprocesira, kako bi mogao da se koristi. Prema načinu nanošenja materijala, aditivne tehnologije se na osnovu standarda ASTM F2792-12a, mogu podeliti na:

- Deponovanje rastopljenog materijala (material extrusion, eng.) - proces u kojem se materijal ispušta iz dizne [2]. Najznačajnija tehnologija je FDM.
- Fotopolimerizacija materijala (vat photopolimerization, eng.) - proces polimerizacije tečnog materijala [2]. Najznačajnija tehnologija je SLA.
- Spajanje praškastog materijala (powder bed fusion, eng.) - proces u kojem pomoću korišćene energije dolazi do fuzije materijala u obliku praha [2]. Najznačajnije tehnologije su SLS, SLM i EBM.
- Nanošenje materijala kapljicama (material jetting, eng.) - proces u kojem se kapljice materijala selektivno nanose u mlazu [2].

[1] Ivana Jevtić, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, (ijevtic@mas.bg.ac.rs)
[2] prof. dr Mihajlo Popović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mpopovic@mas.bg.ac.rs)
[3] prof. dr Goran Mladenović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs)
[4] doc. dr Miloš Pjević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mpjevic@mas.bg.ac.rs)
[5] dr Miloš Milošević, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, (mmilosevic@mas.bg.ac.rs)
[6] Aleksa Milovanović, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, (amilovanovic@mas.bg.ac.rs)
[7] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu MPNTR RS po Ugovoru 451-03-68 / 2022-14 / 200105

- Vezivanje materijala prskanjem (binder jetting, eng.) - proces u kojem se vezivni materijal prska na prah [2].
- Direktna depozicija energije (direct energy deposition, eng.) - proces u kojem se toplotna energija koristi za topljenje materijala, koji se nanosi sloj-po-sloj [2].
- Laminacija slojeva (sheet lamination, eng.) - proces u kojem se gotovi slojevi materijala spajaju, kako bi formirali željeni objekat [2].

2. PREDNOSTI ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U ODNOSU NA KONVENCIONALNE METODE I GENERATIVNI DIZAJN

Jedna od osnovnih karakteristika aditivnih proizvodnih tehnologija je upotreba računara u toku celog procesa izrade 3D modela. U nastavku su date ključne prednosti aditivnih proizvodnih tehnologija u odnosu na konvencionalne metode:

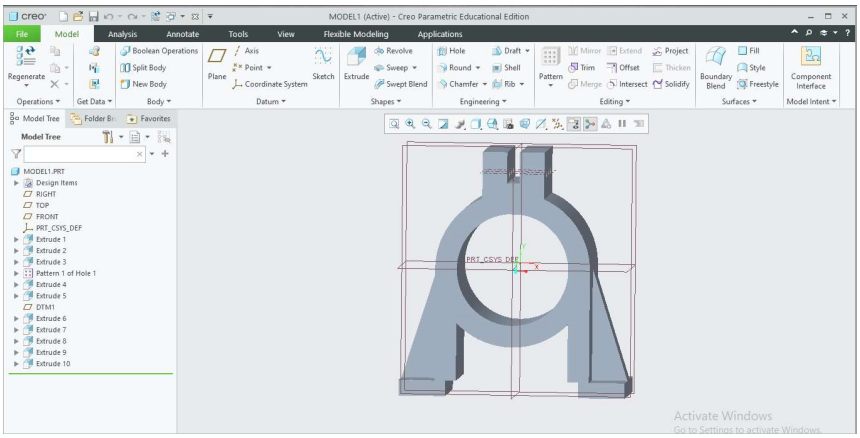
- Proizvoljna složenost geometrije bez dodatnih troškova – Kako se kod aditivnih tehnologija geometrija radnog predmeta generiše na osnovu računarskog programa, dodavanjem slojeva i bez primene posebnih alata, složenost geometrije ne utiče na cenu izrade.
- Minimalno rasipanje materijala – U poređenju sa tehnologijom skidanja materijala (npr. struganje, glodanje...), aditivne tehnologije koje koriste za materijal metalni prah, imaju mnogo manje gubitke u otpadu materijala, pri čemu postoji i mogućnost reciklaže materijala, kao što je slučaj kod SLS (eng. Selective Laser Sintering) tehnologije štampe, gde se već korišćeni prah meša sa novim i tako se štampaju novi delovi.
- Mogućnost kombinovanja materijala – Pojedine aditivne tehnologije omogućavaju izradu radnih predmeta koji su napravljeni od nekoliko različitih vrsta materijala, a koji pored različite teksture i boje mogu imati i različite mehaničke karakteristike. Jedan od pravaca istraživanja u ovoj oblasti je i razvoj digitalnih materijala.
- Mogućnost izrade gotovih sklopova – U konvencionalnoj proizvodnji, montaža sklopova se obavlja kao poslednja u nizu i predstavlja složenu i odgovornu operaciju. Pogodnim izborom zazora i tolerancija, aditivne tehnologije omogućavaju izradu gotovih sklopova.

Kao što je već rečeno, aditivnom proizvodnjom se mogu izraditi delovi uz minimalne troškove, a zahvaljujući generativnom dizajnu ti troškovi mogu biti još smanjeni. Način da se maksimalno iskoristi aditivna proizvodnja je korišćenje generativnog dizajna, koji može stvoriti zamršene oblike visokih performansi. Generativni dizajn je proces dizajna u kom se oblik generiše algoritmima softvera. Prilikom izrade modela koristeći generativni dizajn, dizajner mora da definiše različite parametre i granične uslove. Neki od tih parametara i uslova su vrsta materijala, geometrija koja treba da se zadrži, efektivna opterećenja i željeni proizvodni proces [4]. Koristeći moć računara, neki CAD sistemi omogućavaju paralelno generisanje različitih modela. U generativnom dizajnu, veštačka inteligencija je integrisana u CAD sistem, kako bi se omogućilo generisanje oblika [5]. Kada je reč o primeni generativnog dizajna, on se koristi u mnogim proizvodnim industrijama, kao što su: automobilska industrija, vazduhoplovstvo, industrijske mašine, građevinski proizvodi,...

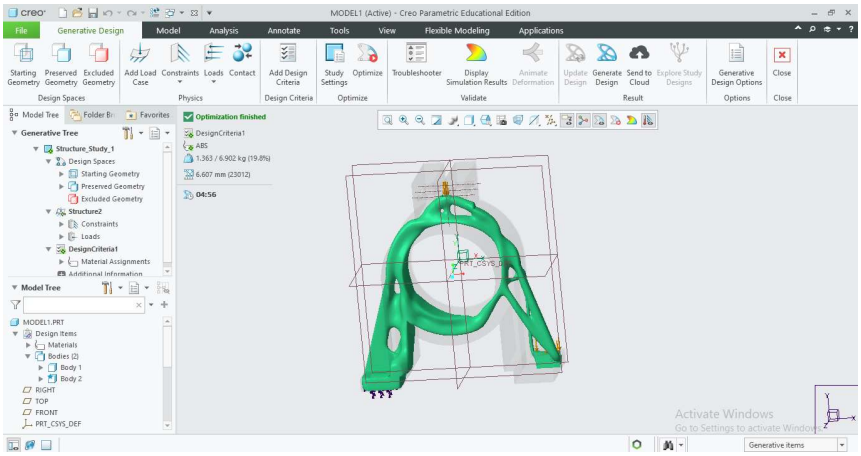
3. GENERATIVNI DIZAJN U OKRUŽENJU CREO PARAMETRIC

Generativni dizajn može da se koristi u mnogim softverima. Jedan od njih je i Creo Parametric, u kom su i urađene simulacije, koje su prikazane u ovom radu. Creo Parametric je program koji omogućava kreativnost pri modeliranju novih proizvoda. Može se koristiti za inženjerski dizajn, analizu, proizvodnju, itd. Takođe, Creo Parametric doneo je revoluciju u CAD svet. Od 1987. godine Creo je postao vodeći CAD sistem. Poseduje parametarsko, tipski zasnovano, asocijativno solid modeliranje. Poslednja verzija ovog softvera je Creo 9.0.

Na slici 1 prikazan je prvobitno konstruisan model u Creo Parametric- u, gde je nakon toga urađena simulacija. Na početnom modelu definisana su ograničenja i opterećenja koja se očekuju u eksploataciji - uklješten sa donje leve strane, pri vrhu je opterećen na pritisak od 20 MPa, a na donjem desnom kraju je opterećen silom od 2000 N. Dobijeni model na osnovu minimizacije mase kao funkcije cilja i maksimalno dozvoljenih napona dobijen je nakon više iteracija i prikazan je na slici 2.

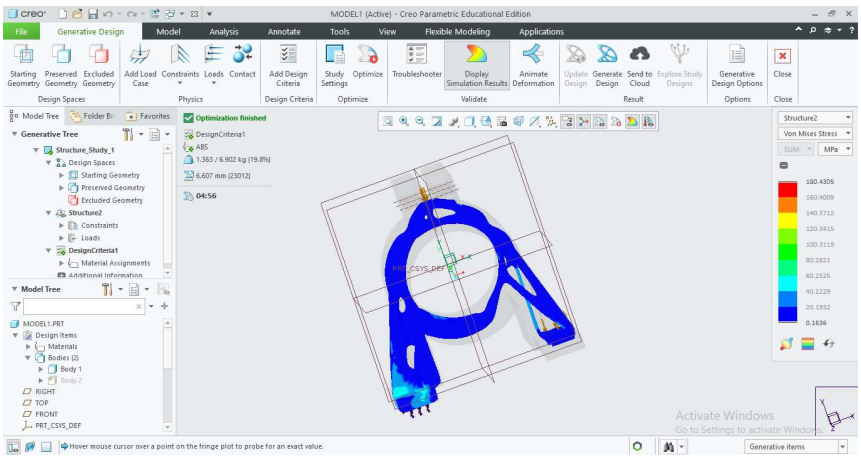


Slika 1: Početni CAD model

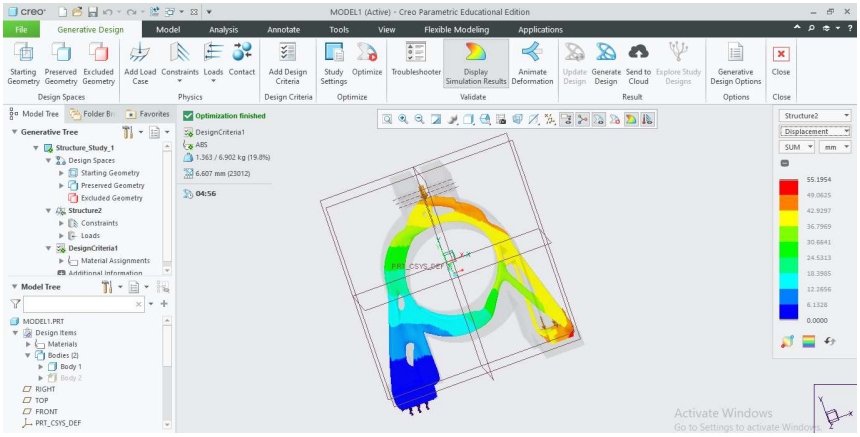


Slika 2: Optimizovani model dobijen generativnim dizajnom

Pored promene oblika, moguće je analizirati i sve ostale elemente koje nude i programi za metod konačnih elemenata: napone, deformacije i promeraje. Na slikama 3 i 4 prikazani su naponsko stanje i pomeraji optimizovanog modela urađenog pomoću generativnog dizajna. Kao što je i očekivano, naponsko stanje dela je uravnoteženo.



Slika 3: Naponsko stanje optimizovanog modela dobijenog generativnim dizajnom



Slika 4: Pomeraji modela usvojenog na osnovu generativnim dizajnom

Novi dizajn, koji je na ovaj način optimizovan, može da se prihvati kao finalno rešenje, i umesto pravilnih oblika koje koristimo pri ručnom konstruisanju u softveru, po pravilu se sastoji od proizvoljnih površina, koje je u procesu izrade najlakše ostvariti primenom aditivnih proizvodnih tehnologija. Sledeća faza bi u tom procesu bilo predprocesiranje dela i priprema za 3D štampu što je omogućeno i u okviru samog Creo-a.

4. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje obuhvata generativni dizajn, pregled aditivnih tehnologija prema standardu ASTM F2792-12a, njihovu primenu, kao i prednosti aditivnih tehnologija u odnosu na konvencionalne metode. Jedan od glavnih ciljeva ovog istraživanja, je generativni dizajn i prikazano je kako se on uklapa sa aditivnim tehnologijama. Sve simulacije su urađene u programu Creo Parametric.

Rezultati istraživanja pokazala su da se primenom generativnog dizajna dobijaju uravnotežena naponska stanja modela, prema postavljenim ograničenjima. Zahvaljujući tim ograničenjima dobijaju se modeli sa manjom masom, pri čemu nije narušena postojeća funkcionalnost dela.

5. LITERATURA

[1] Kalajdžić, M. : *Tehnologija mašinogradnje*, Mašinski fakultet, Beograd, 2014.

[2] ASTM F2792-12a: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. DOI: 10.1520/f2792-12a.

[3] Milovanovic, A., Milosevic, M., Mladenovic, G., Likozar, B., Colic, K., Mitrovic, N.: *Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by FDM and SLA 3D Printing Technology*, CNNTech 2018, LNNS 54, pp. 84-95, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-99620-2_7

[4] Junk, S., Burkart, L.: *Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing*, Procedia CIRP 100, 31st CIRP Design Conference 2021, vol. 100, pp 577-582, 2021.

[5] Akella R., *What generative design is and why it's the future of manufacturing*, Endeavor Business Media, LLC, Nashville, USA, 2018.

Jevtić, I., Popović, M., Mladenović, G., Pjević, M., Milošević, M., Milovanović, A.

GENERATIVE DESIGN AND APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE CREO PARAMETRIC ENVIRONMENT

Abstract: *The generative design represents one of the aspects of Artificial Intelligence and gives a range of suitable available solutions, which can be improved according to the design needs. Additive Manufacturing technologies can be implemented together with generative design since particular technology offers a wider spectrum of possible final part geometries with regard to conventional manufacturing technologies. In this paper, Creo Parametric software was used to implement the generative design in order to prepare the manufacturing procedure of one functional part using Additive technologies.*

Key words*: Generative design, Additive Manufacturing, Creo Parametric*

Spasojević B.[1], **Popović, M., Pjević M., Mladenović, G., Puzović, R.**[2]

SIMULACIJA PROCESA KOVANJA PRIMENOM NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA

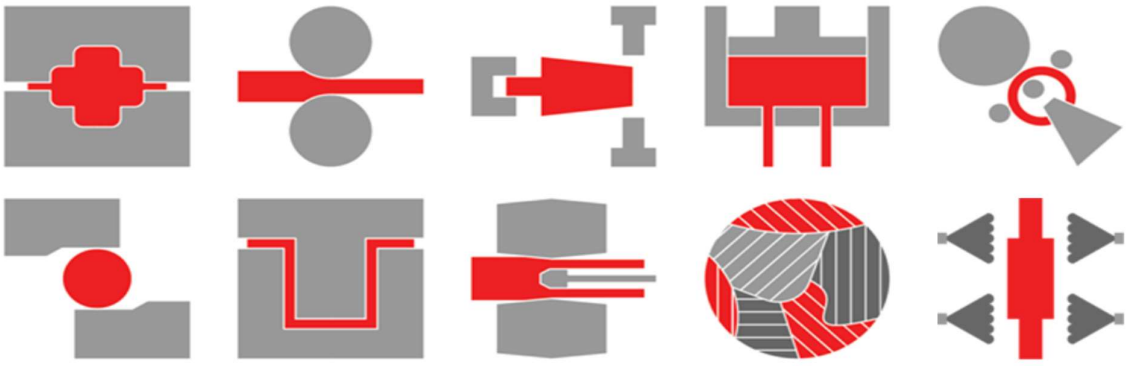
Rezime

U radu je prikazan postupak simulacije procesa kovanja u toplom stanju na primeru dela oblika zupčanika. Kovanje je jedna od najstarijih tehnoloških metoda obrade metala plastičnim deformisanjem. U industrijski razvijenim zemljama projektovanje tehnologije kovanja se izvodi primenom CAD/CAE alata, tj. primenom informacionih tehnologija u svim fazama projektovanja, počev od konstrukcije otkovka, pa do projektovanja faza oblikovanja i optimizacije procesa, konstrukcije i izrade alata. Ovakav koncept projektovanja tehnologije kovanja obezbeđuje visok kvalitet otkovka, smanjenje ukupnih troškova proizvodnje i povećanje konkurentnosti na tržištu u odnosu na tradicionalno projektovanje procesa koje se bazira na iskustvenom radu inženjera. Simulacije procesa kovanja u toplom stanju odrađene su u softveru QForm.
***Ključne reči**: Kovanje, CAD/CAE, Simulacija, QForm*

1. UVOD U SIMULACIJU PROCESA KOVANJA PRIMENOM QFORM SOFTVERA

Softver **QForm**, kompanije „QForm Group FZ LLC“, UAE, jedan je od softvera za simulaciju, koji se koristi za razvoj i optimizaciju različitih procesa oblikovanja metala, za proizvodnju delova u vazduhoplovstvu, odbrani, automobilskoj industriji, energetici i drugim industrijama. Mnogi od kovanih ili ekstrudiranih proizvoda koji su razvijeni uz pomoć QForm-a mogu se naći kao deo našeg svakodnevnog života. Softver se razvija od 1991. godine pa nudi više od 30 godina iskustva u simulaciji oblikovanja metala. Za rad je korišćena edukativna verzija softvera, dobijena od proizvođača na 3 meseca u sklopu onlajn takmičenja studenata.

QForm može da simulira većinu procesa oblikovanja metala uključujući: hladno i toplo kovanje, slobodno kovanje, valjanje prstenova i točkova, poprečno valjanje, valjanje vijaka, ekstrudiranje profila, oblikovanje limova... (slika 1)



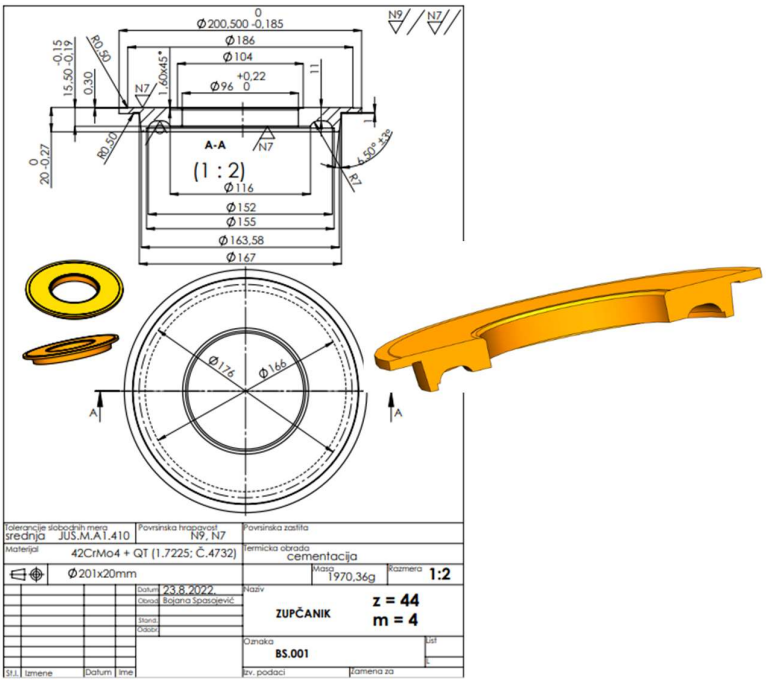
***Slika 1** Shematski prikaz tehnologija koje se mogu simulirati primenom QForm-a [1]*

Slobodno kovanje sa ravnim kalupima često se koristi za operacije prethodnog kovanja za dalje korake kovanja, na primer na čekiću. Ono predstavlja zapravo prvi proces kovanja kojim su ljudi ovladali.

[1] Bojana Spasojević, mast. inž. maš., (bojana.98.bs@gmail.com)
[2] Prof. dr Mihajlo Popović (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Goran Mladenović, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Radovan Puzović, (rpuzovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

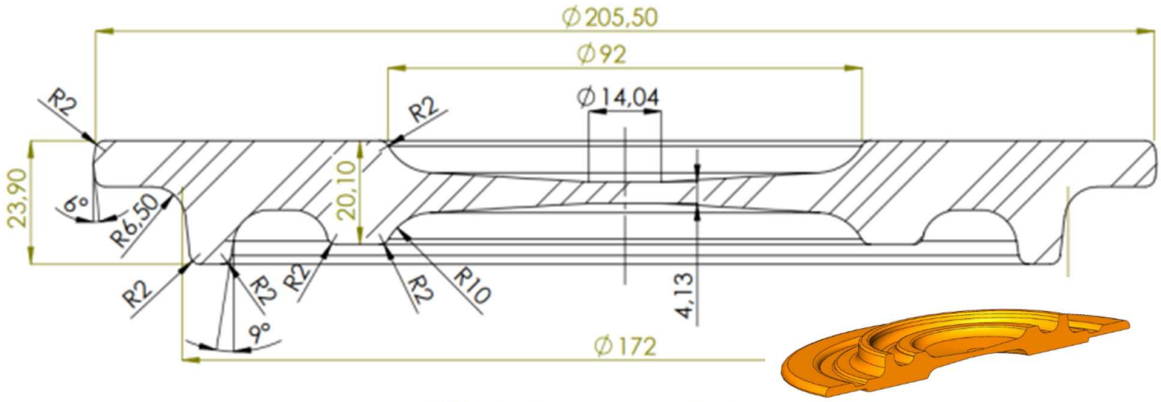
2. RAZRADA TEHNOLOŠKOG PROCESA IZRADE I SIMULACIJA PROCESA KOVANJA ZA IZRADU DELA „ZUPČANIK“

Za ilustraciju simulacije kovanja, izabran je zupčanik koji je komponenta novog motora, fabrike motora koja sprovodi plan smanjenja troškova proizvodnje. Iz tog razloga, potrebno je projektovati tehnologiju proizvodnje zupčanika sa najvećom mogućom stopom iskorišćenja materijala i u skladu sa važećim standardima. Na slici 2 prikazana je tehnička dokumentacija zupčanika. S obzirom da je deo osnosimetričan, da bi se uštedelo u računarskom vremenu, tokom simulacije u Qform-u specificirano je da tip problema bude „2D osno simetričan“.



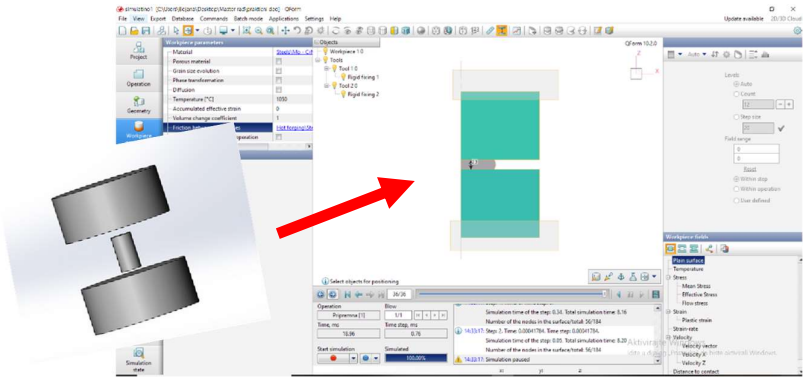
Slika 2. *Crtež izradka – zupčanika*

Nakon definisanja konstrukciono – tehnoloških karakteristika otkovka (podeone linije, kovačkih nagiba, radijusa zaobljenja spoljašnjih i unutrašnjih stranica, minimalne debljine zidova koji se kuju, formiranja otvora na otkovcima, dodatka za naknadnu obradu i tolerancija), klasifikacije oblika otkovka i određivanje oblika kanala za venac, projektovan je otkovak (slika 3). Zatim se pristupa definisanju termičke obrade: zagrevanje pripremka i žarenja, definisanju pripremnog, međufaznog, završnog kovanja i opsecanja otkovka, konstrukciji alata i izboru potrebne mašine i opreme, čime se obezbeđuju uslovi za dalju analizu procesa kovanja primenom nekog od softvera, u ovom slučaju Qform-a.



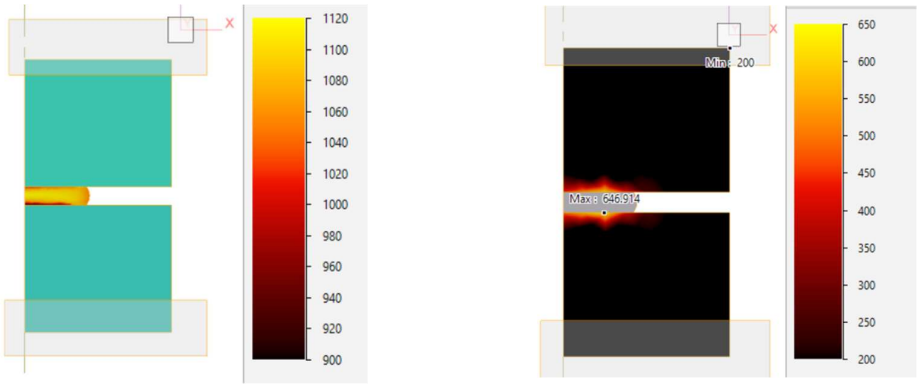
Slika 3. *Konstrukcija otkovka*

Određivanjem dimenzija pripremka i alata za pripremno kovanje, pristupa se analizi procesa pripremnog kovanja, uvozom dxf fajla modela pripremka i alata u softver Qform.

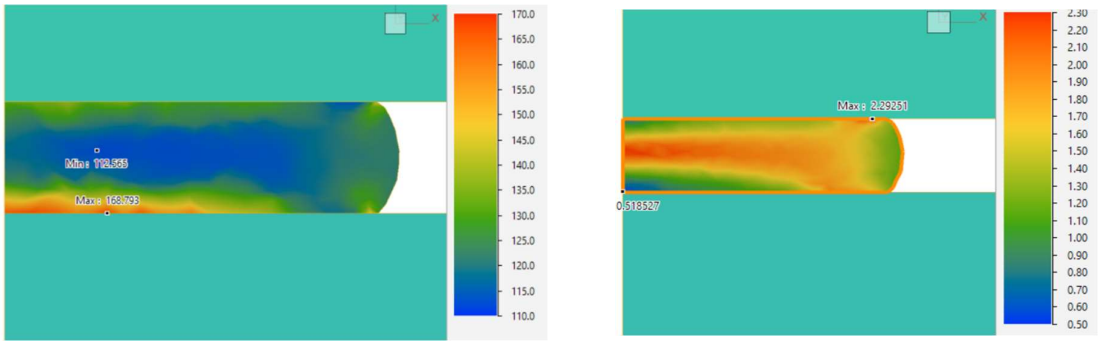


Slika 4 *Alat i pripremak za operaciju pripremnog kovanja*

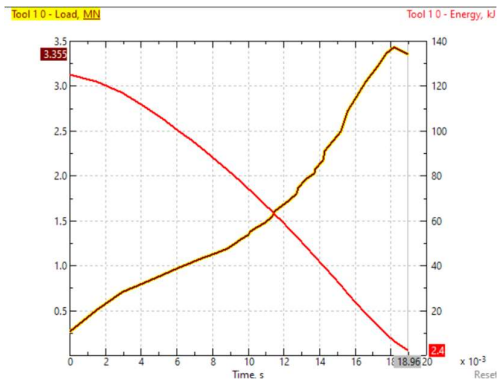
Posle definisanja svih parametara, izvršena je analiza, čiji su rezultati prikazani na slikama 5-7 [2].



Slika 5 *Temperature obratka i alata na kraju procesa pripremnog kovanja*

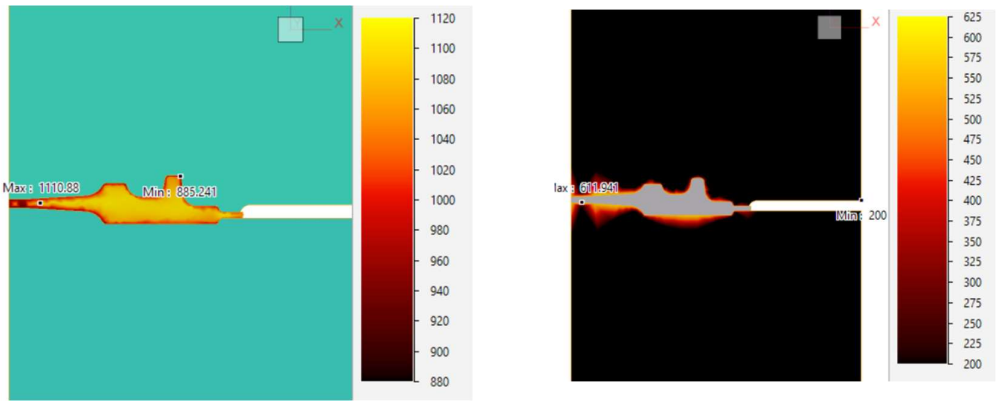


Slika 6 *Efektivni naponi (levo) i plastične deformacije (desno) pri procesu pripremnog kovanja*

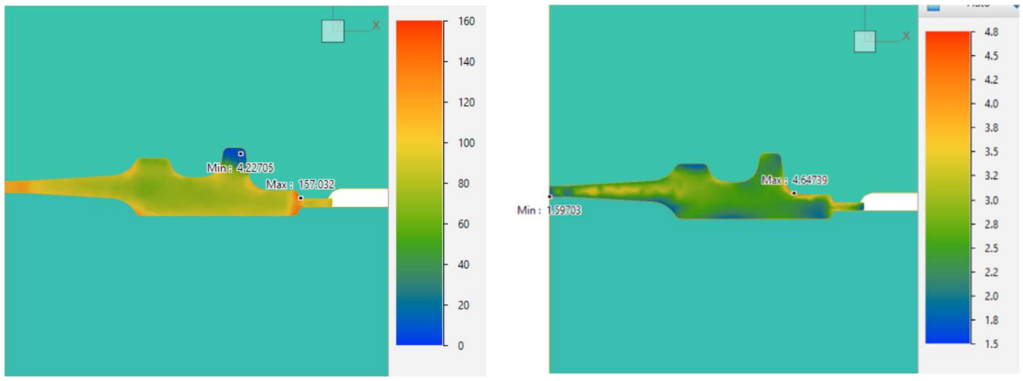


Slika 7 *Opterećenje alata i utrošena energija čekića pri procesu pripremnog kovanja*

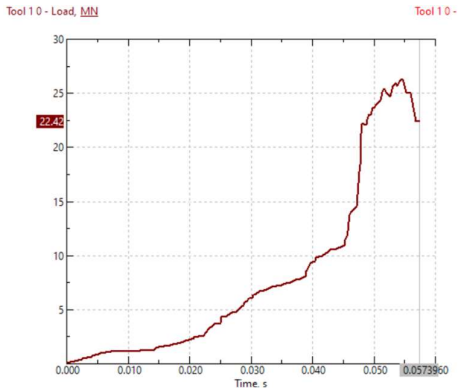
Prema istom postupku izvršena je analizi procesa završnog kovanja, što je prikazano na slikama 8-10 [2].



Slika 8 *Temperature na kraju procesa završnog kovanja*

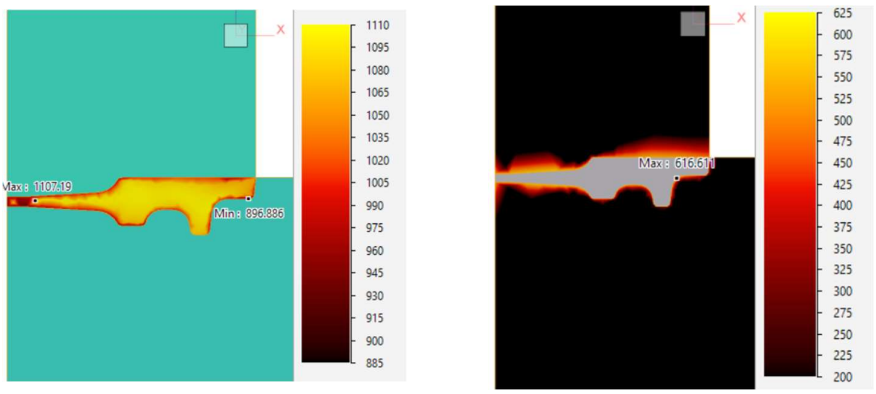


Slika 9 *Efektivni napon (levo) i plastične deformacije (desno) pri procesu završnog kovanja*

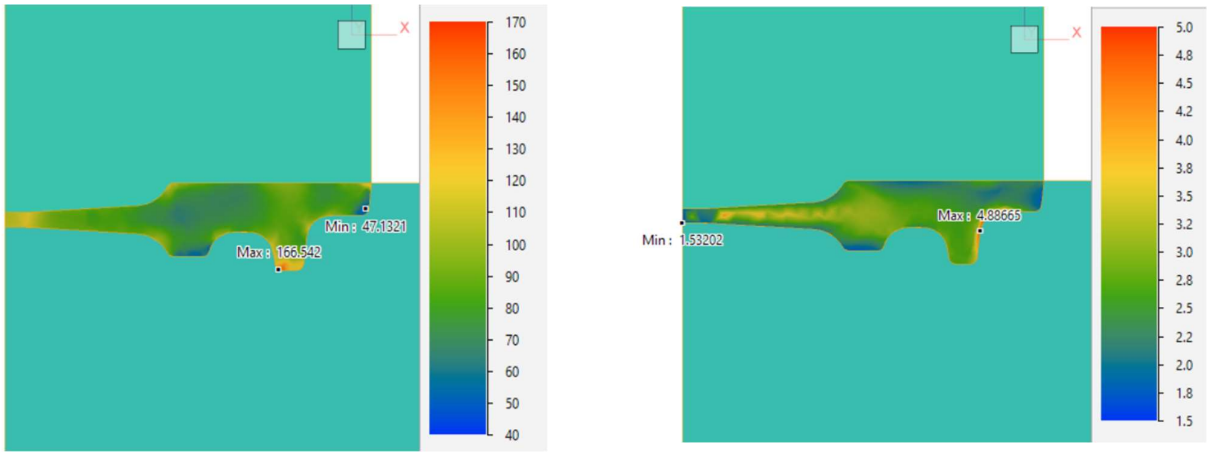


Slika 10 *Raspodela opterećenja pri procesu završnog kovanja*

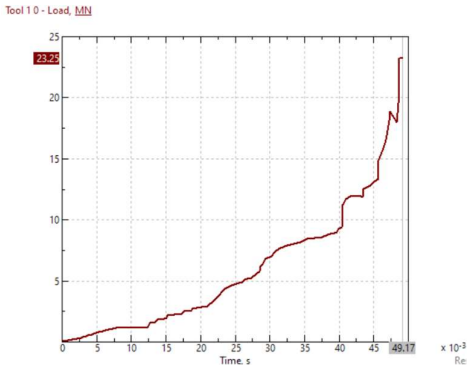
Kao varijantno rešenje, analiziran je proces kovanja zupčanika u zatvorenom alatu. Ovaj slučaj je daleko povoljniji od prethodnog, kovanja u otvorenom alatu, jer nema koncentracije napona u zoni zuba, koji učestvuju u prenosu velikog opterećenja. Rezultati su prikazani na slikama 11-13 [2].



Slika 11 *Temperatura otkovka na kraju procesa završnog kovanja u zatvorenom alatu*



Slika 12 *Efektivni naponi (levo) i plastične deformacije (desno) u zatvorenom alatu*



Slika 13 *Raspodela opterećenja pri procesu završnog kovanja u zatvorenom alatu*

3. ZAKLJUČAK

Zupčanici su mašinski elementi koji prenose velika dinamička opterećenja. Najčešće se kompletno izrađuju kombinacijom određenih metoda rezanja, ali one se znatno mogu olakšati, ako se polazi od pripremka dobijenog kovanjem – otkovka. Cilj ovog rada bio je prikaz projektovanja otkovka za izradu zupčanika, izbor tipa alata, analize više varijanti procesa kovanja primenom softvera QForm, da bi se na kraju omogućilo projektovanje i samog alat za kovanje.

Postupak kovanja otkovka zupčanika, uspešno je izveden kako u zatvorenom, tako i u otvorenom tipu alata. Razlog izbora tehnologije kovanja u ovom radu, jeste zahtev za serijskom proizvodnjom zupčanika za automobilsku industriju. Međutim, takođe, iz razloga velikih opterećenja koja prenosi zupčanik; velika čvrstoća, tvrdoća, dinamička izdržljivost, dobar kvalitet površine i dr. karakteristike čine kovanje idealnom tehnologijom za njihovu izradu.

Kovanje i dalje predstavlja konkurentnu metaloprerađivačku tehnologiju koja ima primenu u različitim industrijskim granama, a poseban značaj ima u automobilskoj industriji. Međutim, brzo, kvalitetno i ekonomski opravdano projektovanje tehnologije kovanja zahteva primenu savremenih informacionih tehnologija u svim fazama, počev od konstrukcije otkovaka, pa do projektovanja faza oblikovanja i optimizacije procesa, konstrukcije i izrade alata. Numerička simulacija procesa kovanja, osim optimizacije faza oblikovanja, omogućuje i analizu habanja alata, zatim predviđa strukturu materijala nakon kovanja i daje podatke o veličini elastičnih deformacija alata i elemenata mašine, što predstavlja osnovu za procenu tačnosti izrađenih otkovaka.

4. LITERATURA

[1] Qform group, Application, 2022, https://www.qform3d.com/processes.
[2] Spasojević, B., Razrada tehnološkog procesa izrade i simulacija procesa kovanja, za izradu dela „zupčanik“, Master rad, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, 2022.

Spasojevic, B., Popović, M., Pjević M., Mladenović, G., Puzović, R.

FORGING PROCESS SIMULATION USING ADVANCED SOFTWARE TOOLS

Abstract: *The paper presents the simulation procedure of the forging process in the hot state on the example of a part of the shape of a gear. Forging is one of the oldest technological methods of metal processing by plastic deformation. In industrially developed countries, the design of forging technology is performed using CAD/CAE tools, i.e. by applying information technologies in all stages of design, starting from the construction of the forging, and up to the design of the stages of shaping and optimization of the process, construction and tool making. This concept of design of forging technology ensures high quality of forging, reduction of total production costs and increase of competitiveness in the market compared to traditional process design which is based on experienced work of engineers. Simulations of the hot forging process were performed in the QForm software.*
Key-words: *Forging, CAD/CAE, Simulation, QForm*

Trajkov, A.[1)], Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G.[2]

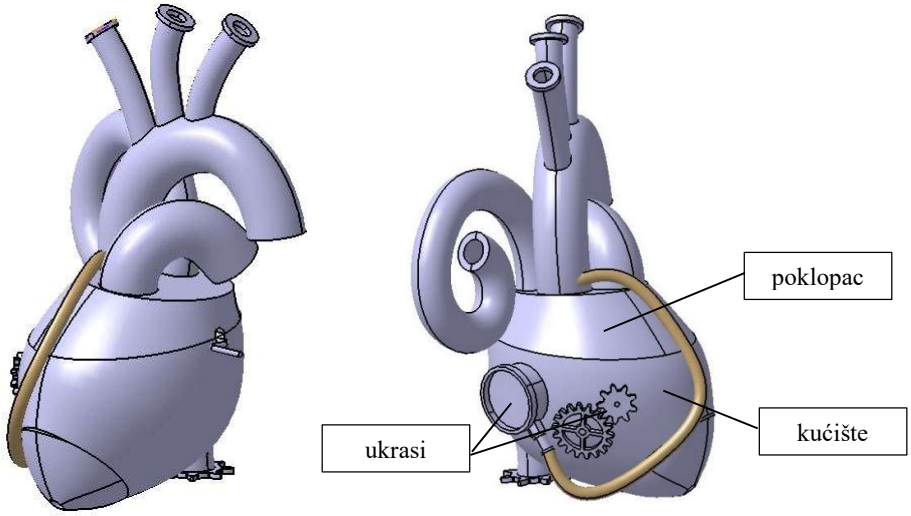
ANALIZA PROIZVODNOSTI DELOVA VEĆIH GABARITA PRIMENOM ADITIVNIH TEHNOLOGIJA I TEHNOLOGIJA SPAJANJA

Rezime

U ovom radu prikazan je postupak izrade i postprocesiranja proizvoda koji je dobijen iz delova aditivnom tehnologijom na 3D štampaču sa radnim prostorom koji nije bio dovoljan za integralnu štampu. Korišćeni štampač radi na principu fotopolimerizacije. Kao rezultat, napravljen je proizvod koji je dobijen spajanjem mnoštva manjih delova lepljenjem i dodatnom aplikacijom fotopolimera na spojeve. Testirane su i poređene različite vrste lepkova za spajanje manjih delova u finalni proizvod. Kao poslednje operacije postprocesiranja, na finalni proizvod naneseni su prajmer i boja.
Ključne reči: *3D štampanje, SLA štampač, stereolitografija, lepak, spajanje delova.*

1. UVOD

U CAD softverskom paketu CATIA dizajniran je proizvod u obliku anatomskog srca koji funkcionalno predstavlja oklop za muzičku kutiju (slika 1). Ukupna dimenzija sklopa je 110 x 185 x 95 mm i sastoji se iz kućišta, poklopca i tri ukrasa manjih dimenzija. Za izradu je korišćen SLA (stereolitografija) 3D štampač CREALITY LD-002R čija je dimenzija radnog prostora 68 x 121 x 160 mm. Štampanje kućišta i poklopcaje na ovom štampaču jedino bilo moguće iz više manjih delova, koji su dobijeni podelom po ravnim površinama u CAD softveru. U radu je prikazano kako su ovi delovi objedinjeni u postupku postprocesiranja.



Slika 1. *Dizajniran sklop za muzičku kutiju izrađen u softverskom paketu CATIA*

1.1. Stereolitografija

Stereolitografija (Stereolithography), SLA, je jedna od tehnologija 3D štampe koja se zasniva na fotopolimerizaciji. Uz pomoć nje mogu da se odštampaju izuzetno mali i fini detalji sa savršeno glatkom

[1)] Aleksandra Trajkov, maš. inž., student master studija Mašinskog fakulteta u Beogradu (1134-2021@studenti.mas.bg.ac.rs)
[2] Prof. dr Mihajlo Popović (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Goran Mladenović, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

površinom koja ne zahteva nikakvu dodatnu obradu. Kao gradivni materijal koristi se tečni fotopolimer, za razliku od čvrstih praškastih i filamenata. Fotopolimer je materijal koji menja svoju strukturu pod ultraljubičastom svetlošću, kada iz tečnog prelazi u čvrsto stanje.

SLA štampači rade s posudom napunjenom fotopolimerom i platformom koja se kreće po vertikalnoj osi. Mašina počinje izradu modela sloj po sloj uz pomoć izuzetno preciznog lasera ili UV lampe. Kada jedan sloj očvrsne platforma se podiže (ili spušta u zavisnosti od tipa štampača) i formira novi sloj polimera. Laser konstantno prati zadatu putanju od strane softvera kojom treba da se kreće sve dok predmet ne bude izrađen. Nakon toga, operater nežno odvaja predmet od radne platforme. U zavisnosti od samog štampača i vrste polimera, moguće je da predmet treba da se potopi u posudu s alkoholom kako bi se skinuo višak polimera, da se tretira u UV posudi da bi dodatno očvrsnuo kada je spreman za dalju upotrebu. Kod delova koji nemaju temelj koriste se potporne strukture inače bi štampanje bilo nemoguće.

Ključnu prednost predstavljaju izuzetno visoka preciznost i brzina štampe. Mala debljina sloja od 0.05 milimetra daje savršeno glatku površinu i tačnost geometrije. Nedostatak je viša cena korišćenja.

Predmeti proizvedeni sa SLA tehnologijom 3D štampe imaju izuzetno visoku rezoluciju i kvalitet i često ne zahtevaju nikakvu dodatnu obradu. Mogu biti polirani i ofarbani [1].

2. TESTIRANJE LEPKOVA ZA SPAJANJE POJEDINAČNIH DELOVA

Istraživanjem se pokazalo da je korišćenje lepka između dve ravne površine uspešno, a neefektivno je na zaobljenim površinama. Takođe je bitno naglasiti da je pored lepljenja neophodno dodatno popuniti prorez između delova tečnim fotopolimerom od kog je sam deo napravljen da bi se dobila glatka površina. Ne može se koristiti samo fotopolimer između dve ravne površine jer UV svetlo ne dopire unutar njih. Prednost ručnog rada sa fotopolimerom je dugo vreme rada, a kratko vreme očvršćavanja korišćenjem UV svetla, tako da neće očvrsnuti sve dok se ne izloži zračenju UV lampe. Ukoliko se u međuvremenu napravi greška, lako se može ispraviti pre očvršćavanja. [2]. Na kraju se koristi šmirgla da bi se dobila glatka površina.

2.1. Vrste korišćenih lepkova

Pre stavljanja lepka je bitno da se površine išmirglaju. Iskustva drugih autora [3-6] pokazuju da je superlepak i dvokomponentni epoxy jedan od najboljih izbora pored dodatnog popunjavanja prostora fotopolimerom i izlaganja UV svetlu.

Lepkovi koji su korišćeni za ovaj eksperiment su: dvokomponentni epoxy lepak, lepak za gumu, lepak za plastiku, super lepak, super lepak gel i univerzalni lepak. Svaki je apliciran između dve ravne išmirglane površine na testnim komadima i nakon sušenja je ručno primenjena sila odvajanja tih delova. Rezultat eksperimenta je bio zadovoljavajući gde su se uprkos razdvajanju, delovi držali, sem lepka za plastiku koji jedini nije uspeo da drži. Na osnovu raznovrsnosti izbora u ovom eksperimentu i iskustva drugih autora [3-6], odlučeno je da se koristi dvokomponentni epoxy lepak, a super lepak koji se osuši za nekoliko sekundi je korišćen samo na narandžastom krivudavom delu.

3. POSTUPAK IZRADE PROIZVODA

3.1. Priprema za štampanje i štampanje delova

Priprema delova za štampanje – predprocesiranje izvedena je u programskom paketu CHITUBOX. Nakon učitavanja modela u stl formatu, podešeni su sledeći parametri:

- Štampač na kome će se izraditi deo (CREALITY LD-002R)
- Visina sloja (0,05 mm)
- Broj donjih slojeva (10)
- Vreme izloženosti (14 s)
- Vreme izloženosti donjih slojeva (50 s)

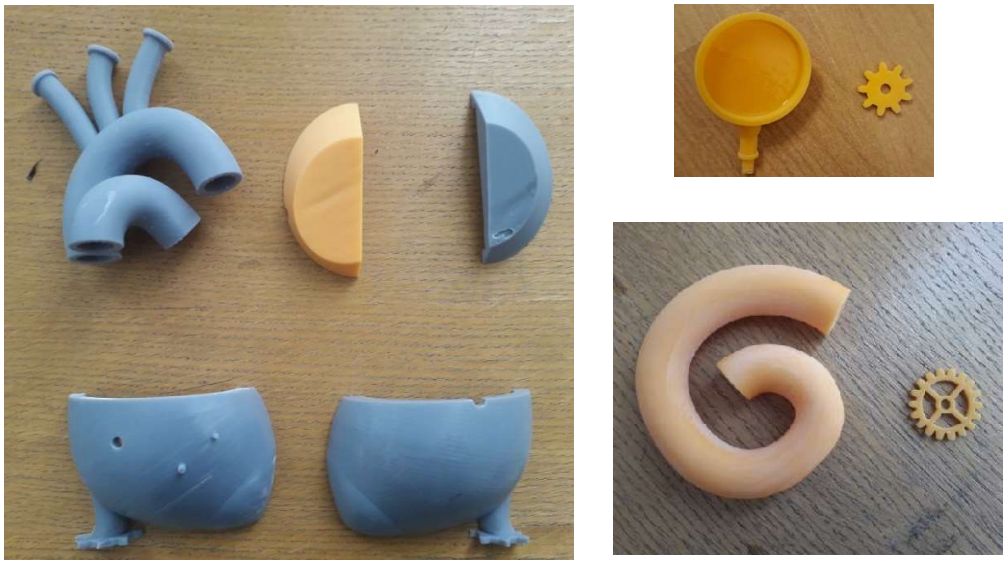
Nakon ovoga postavljena je potpora srednje debljine koja je u zavisnosti od veličine dela koji se štampa i generiše se g-kod koji se na štampač prenosi preko “fleš memorije”. Deo se na štampaču izrađuje na osnovu generisanog g-koda.

Na slici 2 prikazana je odštampana jedna polovina poklopca zajedno sa jednim ukrasom koji su pričvršćeni na platformi štampača.

Slika 2. *Odštampani delovi na platformi štampača*

3.2. Postprocesiranje

Prilikom postprocesiranja skinute su potpore, delovi dodatno očišćeni medicinskim alkoholom i dodatno izloženi UV svetlu. Nije bilo potrebno dodatno obrađivati ukrase koje čine 2 zupčanika i „manometar".



Slika 3. *Skinute potpore, očišćeni delovi alkoholom i dodatno izloženi UV svetlu*

Delovi su izrađivani od fotopolimera u dve boje, što nije predstavljalo estetski problem jer je proizvod na kraju obojen u željenu boju. Uočeni nedostaci na pojedinim odštampanim delovima, neplanirane rupe popunjavane su fotopolimerom i naknadno očvršćavane. Ista tehnika je iskorišćena i posle spajanja. Pre spajanja delovi su ošmirglani i odmašćeni.

Slika 4. *Fotopolimerom popunjene neravnine i rupe, očvršene i ošmirglane*

3.1. Spajanje delova

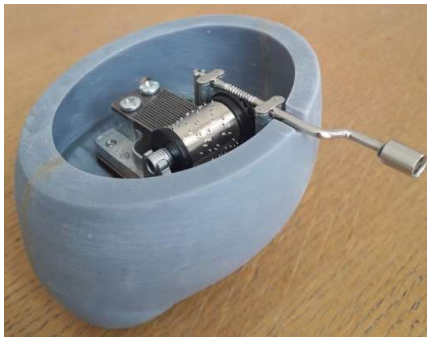
Na slici 5 prikazani su zalepljeni delovi kućišta i poklopca. Za lepljenje je iskorišćen dvokomponentni epoxy lepak za koji je ranije utvrđeno da daje najbolje rezultate.

Slika 5. *Delovi zalepljeni dvokomponentnim epoxy lepkom*

Na slici 6 prikazan je izgled kućišta i poklopca posle popunjavanja šupljina fotopolimerom, njegovog očvršćavanja i šmirglanja.

Slika 6. *Delovi sa popunjenim procepima i ošmirglani*

U kućište je ubačen mehanizam muzičke kutije (slika 7) i ono je zatvoreno poklopcem lepljenjem na šta su nalepljeni i ostali elementi poklopca (slika 8)



***Slika** 7. Postavljena muzička kutija*

***Slika 8**. Zalepljeni i popunjenifinalni sklop*

Super lepak koji se brzo suši korišćen za narandžasti vijugavi deo zbog njegove nestabilnosti prilikom lepljenja. Sklopljen proizvod je odmašćen, na njega je nanesen prajmer i bronzana boja metodom airbrush (slike 9 i 10).

***Slika 9**. Sklop sa nanesenim prajmerom i špric-gitom metodom airbrush-a*

***Slika 10**. Finalni izgled sklopa muzičke kutije*

4. ZAKLJUČAK

Ne može se očekivati kvalitetno ištampan proizvod odmah nakon završetka štampanja. Postprocesiranje je je bitan i delikatan posao kome se posvećuje mnogo pažnje za dobijanje proizvoda najvišeg kvaliteta.

5. LITERATURA

[1] 3D republika, Stereolitografija – preciznost i detalji, 24.6.2016., https://www.3drepublika.com/faq/sta-je-stereolitografija/
[2] Renaissance Laboratories, Glue vs. Resin for 3D model joints. Advanced techniques on when to use resin with examples, 9.6.2021, https://www.youtube.com/watch?v=vnngazga1Q8
[3] https://www.reddit.com/r/PrintedMinis/comments/dq0al3/what_glue_for_resin_printed_models/
[4] https://www.reddit.com/r/resinprinting/comments/ld1q6n/how_do_you_glue_resin_prints/
[5] https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/m5nwlu/best_way_to_glue_together_big_3d_parts/
[6]https://www.reddit.com/r/minipainting/comments/r8o3nx/noob_question_how_to_glue_3d_printed_resin_models/

Trajkov, A., Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G.

ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF LARGER DIMENSION PARTS BY APPLYING ADDITIVE TECHNOLOGIES AND JOINING TECHNOLOGIES

Abstract: *This paper shows the process of manufacturing and post-processing of a product obtained from parts using additive technology on a 3D printer with a working space that was not sufficient for integral printing. The used printer works on the principle of photopolymerization. As a result, a product was created that was obtained by joining many smaller parts by gluing and additional application of photopolymer to the joints. Different types of glues were tested and compared for joining smaller parts into the final product. As the last post-processing operations, primer and paint were applied to the final product.*

Key words: *3D printing, SLA printer, stereolitography, glue, joining parts*

43. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

39. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, oktobar 2022.

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 1

Živanović, S., Tanović, Lj., Puzović, R., Kokotović, B., Slavković, N., Popović, M., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N., Dimić, Z., Rakić, A., Manasijević, S.
REVITALIZACIJA HORIZONTALNE BUŠILICE GLODALICE LOLA HBG 80 UPRAVLJANJEM OTVORENE ARHITEKTURE NA LINUXCNC PLATFORMI 3.1

Miljković, Z., Babić, B., Petrović, M., Jokić, A., Miljković, K., Jevtić, Đ., Đokić, L.
INTELIGENTNO STEREO-VIZUELNO UPRAVLJANJE MOBILNIH ROBOTA I OPTIMALNO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA - PREGLED REZULTATA ISTRAŽIVANJA U OKVIRU PROJEKTA MISSION4.0 ..... 3.13

Јовановић, Р., Бугарић, У., Весовић, М., Перишић, Н.
ФАЗИ И НЕЛИНЕАРНО УПРАВЉАЊЕ ЗАХВАТНОГ МЕХАНИЗМА И МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ ПРОЈЕКТА MISSION4.0 ..... 3.26

Paprocki, M., Erwinski, K., Zivanovic, S.
CNC MACHINE LABORATORY STAND WITH H-BOT PARALLEL KINEMATICS USING THE ETHERCAT BUS 3.39

Erwinski, K., Karasek, G., Zivanovic, S., Dimic, Z., Slavkovic, N.
REAL-TIME CONTROL OF A KEOPS-DELTA PARALLEL KINEMATICS MACHINE USING LINUXCNC AND ETHERCAT 3.47

Vasić, M., Blagojević, M., Nestorović, G.
VISOKOPRECIZNI REDUKTORI ZA INDUSTRIJSKE ROBOTE 3.55

Dučić, N., Dragović, G., Jovičić, A., Stakić, A.
MODELOVANJE I SIMULACIJA UPRAVLJANJA POMOĆNIM KRETANJIMA KOD CNC SISTEMA UPOTREBOM SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB/SIMULINK 3.61

← NAZAD **SESIJA 2**

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 2

Rodić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B., Aleksić, A.
ANALIZA PROIZVODNOSTI KOD ELEKTROEROZIVNE OBRADE U DIELEKTRIKUMU SA POMEŠANIM PRAHOM 3.67

Tešić, S., Zeljković, M., Tabaković, S., Čiča, Đ., Borojević, S., Sredanović, B.
EKSPERIMENTALNA ANALIZA I OPTIMIZACIJA TVRDOĆE OBRAĐENE POVRŠINE U KRIOGENIM I MQL USLOVIMA GLODANJA LOPTASTIM GLODALOM LEGURE TITANIJUMA Ti-6Al-4V 3.73

Vasilić, G., Živanović, S., Milutinović, M., Dimić, Z.
KINEMATIKA KOMPLEKSNE VIŠEOSNE I VIŠEVRETENE MAŠINE ALATKE NAMENjENE ZA PROCES OBRADE GLODANjEM 3.79

Knežev, M., Živković, A., Štrbac, B., Hadžistević, M., Mlađenović, C., Marinković, D.
OPTIMIZACIJA KOLIČINE PROTOKA RASHLADNOG SREDSTVA ZA HLAĐENJE KUĆIŠTA MOTOR-VRETENA 3.89

Milutinović, M., Živanović, S., Vasilić, G., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z.
STRATEGIJA 3+2 OSNE OBRADE NA NOVOJ BRUSILICI ZA IZRADU PROFILNIH KOTURASTIH GLODALA 3.95

Baralić, J., Nedić, B.
SPECIFIČNA ENERGIJA OBRADE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM 3.101

Vorkapić, N., Maletić, J., Nešovanović, Lj., Živanović, S., Pjević, M.
EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA SA EKSPERIMENTIMA OBIMNOG GLODANJA 3.106

Dimić, Z., Pavlović, D., Živanović, S., Furtula, M., Đurković, M.
DINAMIČKI REKONFIGURABILNI UPRAVLJAČKI SISTEM SA PROMENLJIVIM TOKOM IZVRŠAVANJA KINEMATIČKOG ALGORITMA 3.112

← NAZAD

SESIJA 1

Živanović, S., Tanović, Lj., Puzović, R., Kokotović, B., Slavković, N., Popović, M., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N., Dimić, Z., Rakić, A., Manasijević, S.[1)]

REVITALIZACIJA HORIZONTALNE BUŠILICE GLODALICE LOLA HBG 80 UPRAVLJANJEM OTVORENE ARHITEKTURE NA LINUXCNC PLATFORMI [2)]

Rezime

U radu je pokazana revitalizacija horizontalne bušilice glodalice LOLA HBG 80 koja je uključila hardversko softversku nadogradnju postojeće mašine. Kao sistem upravljanja izabarano je upravljanje otvorene arhitektrue na LinuxCNC računarskoj platformi. Uspostavljen je sistem za programiranje i verifikaciju programa. Konfigurisane su ekvivalentne virtuelne mašine u sistemu za programiranje i upravljanje. Revitalizovana mašina je uspešno testirana i verifikovan je njen rad.

Ključne reči: horizontalna bušilica glodalica, sistem upravljanja, LinuxCNC, virtuelne mašine, programiranje, simulacija

1. UVOD

Jedan od čestih problema je životni vek mašina, koje posle višegodišnje upotrebe gube na svojoj radnoj sposobnosti, produktivnosti ili čak postaju potpuno neupotrebljive zbog zastarelosti ili kvara upravljanja. Mašine alatke pripadaju kategoriji opreme dugog životnog veka. Mnoge mašine se koriste više od 20 godina, a zatim se potpuno revitalizuju. U Srbiji nema sistematizovanih podataka na ovu temu, ali kao ilustracija mogu poslužiti podaci iz izveštaja [1], po kome je u Italiji prosečna starost ukupno instaliranih mašina u 2014. godini bila 12,8 godina, a u Nemačkoj , po podacima iz 2015. prosečna starost numerički (CNC) i ne-CNC mašina bila je 10,5 i 19,7 godina. Podaci pojedinih evropskih proizvođača mašina alatki takođe pokazuju da je u proseku 80% mašina i dalje u funkciji deset godina nakon ugradnje, dok je 65% i dalje u upotrebi nakon 20 godina.

Ovde se uvek javlja dilema, da li je bolje investirati u nove mašine alatke ili raditi revitalizaciju postojećih uz opremanje novim upravljanjem i nadogradnjom delova novog hardvera, čime se starim mašinama može udahnuti novi život i omogućiti im opstanak u poslovanju [2], posebno malih i srednjih preduzeća. Isplativost ovakvih nadogradnji ukazuje na porast rekonstrukcija i revitalizacija upravljanja, umesto kompletne zamene starih mašina alatki.

Bez obzira na starost neke mašine alatke, koja može biti predmet revitalizacije, svakako se mogu pronaći dobri razlozi da ona ne postane staro gvožđe. Svakako jedan od bitnih faktora je ušteda novca, u poređenju sa varijantom nabavke nove mašine. Mašina koja će biti revitalizovana, može dobiti nikad bolje performanse u poređenju sa njenim prethodnim radnim životnim ciklusom. Tako obnovljena mašina će biti i lakša za upravljanje i može imati značajno unapređen grafički korisnički interfejs upravljačkog sistema, sa mogućnostima 3D prikaza i simulacije putanje alata i rada virtuelne mašine prema zadatom programu. Ako je nekada bila mala memorija, ili prenos programa preko čitača bušenih traka, sada to svakako više neće predstavljati problem, i moći će da se izvršavaju i vrlo dugački programi. Operateri na mašinama, vrlo cene

[1)] prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Radovan Puzović, (rpuzovic@mas.bg.ac.rs), doc dr Branko Kokotović, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Nikola Slavković, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Goran Mladenović (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Slavenko Stojadinović, (sstojadinovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Nikola Vorkapić, (nvrokapic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dr Zoran Dimić, (zoran.dimic@li.rs), Aleksandar Rakić, (aleksandar.rakic@li.rs), Srećko Manasijević. (srecko.manasijevic@li.rs), Lola Institut, Beograd

[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrisana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „ Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema ", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god.

poboljšanu grafiku, napredne funkcije podešavanja, kao i nove standardne cikluse, koji prethodno nisu bili dostupni [2].

U pogledu programiranja, naravno dostupna je mogućnost primene CAD/CAM sistema, kao i verifikacija programa na konfigurisanim virtuelnim mašinama u različitim okruženjima [6]. Danas je dostupno dosta različitih standardnih CAD/CAM ili specijalizovanih CAM sistema, za programiranje CNC mašina alatki. U tom pogledu u radu se razmatra i formiranje nekoliko okruženja za programiranje horizontalne bušilice glodalice koja je predmet revitalizacije u ovom radu.

2. STANJE MAŠINE PRE REVITALIZACIJE I PLANOVI ZA NJEN RETROFIT

LOLA HBG 80 OC je horizontalna bušilica glodalica koja se pojavila 1980. godine kao prvi obradni centar domaće proizvodnje u bivšoj Jugoslaviji sa vertikalnim lančanim magacinom alata i Bosch upravljanjem, slika 1. Po svojim funkcionalnim karakteristikama bio je u rangu obradnih centara vodećih svetskih proizvođača. Nastao je kao rezultat koncepta modularnog projektovanja koji je praktično primenjen u fabrici Ivo LOLA Ribar. U cilju daljeg razvoja savremenih CNC mašina alatki, ovaj obradni centar je instaliran na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za proizvodno mašinstvo, gde se i danas nalazi [3,4].

Slika 1. *Originalna mašina LOLA HBG 80 sa Bosch Micro 5 upravljanjem*

Mašina nije u radnom stanju od 2004. godine. Osnovni problem je upravljanje i stanje elektronike koja je zahtevala zamenu, a nije postojala mogućnost adekvatnog servisiranja.. Postojala su tri plana revitalizacije upravljanja mašine, od kojih je realizovan treći, a geneza ovih planova na osnovu dobijenih ponuda data je u Tablici 1.

Prvi plan revtalizacije potiče iz 2011. godine, i tada je planirana zamena postojeće upravljačke jednice BOSCH MICRO 5 sa upravljanjem Siemens Sinumerik 802C bl ili sa Siemens Sinumerik 802D sl. U obe ove varijante je planirano zadržavanje postojećih pogona na mašini, kao i pogona glavnog vretena. Takodje je planirano i kompletno uklanjanje magacina i manipulatora za automatsku izmenu alata (planirano je da pripadajući pogon i regulator budu rezerva za pogone ostalih osa gde je to moguće). Takođe je planirana i izgradnja potpuno novog visećeg pulta. Detalji ovg opisa sačinjeni su na osnovu ponuda LOLA Instituta Br. 034-2/11 i Br. 034/11, od 22.9.2011.

Drugi plan revitalizacije potiče iz 2013. godine i rezultat je konsultacija direktno sa Siemens d.o.o. Beograd. Data su dva predloga: (i) zamena upravljačke jedinice i svih motora i pogona i (ii) zamena samo upravljačke jedinice uz zadržavanje postojećih pogona. Prvi predlog podrazumeavao bi kompletnu zamenu elektro opreme, sa ugradnjom CNC upravljačke jedinice Sinumerik 840D sl sa HMI softverom Sinumerik Operate na Windows platformi koja omogućava totalnu otvorenost sistema za različite aplikacije koje bi mogle biti predmet naučno istraživačkog rada. Kao pogoni bi se koristili Sinamics S120 servo drajvovi u kombinaciji sa 1FK7 motorima. U pitanju su sinhroni motori sa permanentnim magnetima bez četkica. Dokumentacija se nalazi u prilogu. Predloženo rešenje ne podrazumeva korišćenje linearnih mernih sistema jer Sinamics nema mogućnost integracije Inductosyn-a. Moguća je integracija ovih mernih sistema kupovinom signal konvertora koji pretvaraju rizolverski signal inductosyna u enkoderski signal. Ovo je dodatna investicija koja može da se kasnije realizuje. Druga predložena varijanta je podrazumeva korišćenje iste upravljačke jedinice i HMI softvera ali bi se umesto zamene pogona zadržali stari pogoni pri čemu bi se koristili analogno-digitalni pretvarači kako bi CNC mogao da komunicira sa pogonima. U ovoj varijanti je neophodno kupiti i signal konvertore za Inductosyn jer je neophodno njihovo korišćenje.

Treća varijanta je ugradnja CNC otvorene arhitekture uravljanja na LinuxCNC [5] platformi, uz zadržavanje postojećih pogona, i zamenu mernih sistema. Svi ovi planovi su bili spisak lepih želja, koji mnogo zavisi od budžetskih sredstava koja nam mogu biti raspoloživa. Zbog toga je na kraju i treća varijanta planiranih revitalizacija i relizovana.

Tablica 1. Planovi za revitalizaciju horizontalne bušilice glodalice LOLA HBG 80

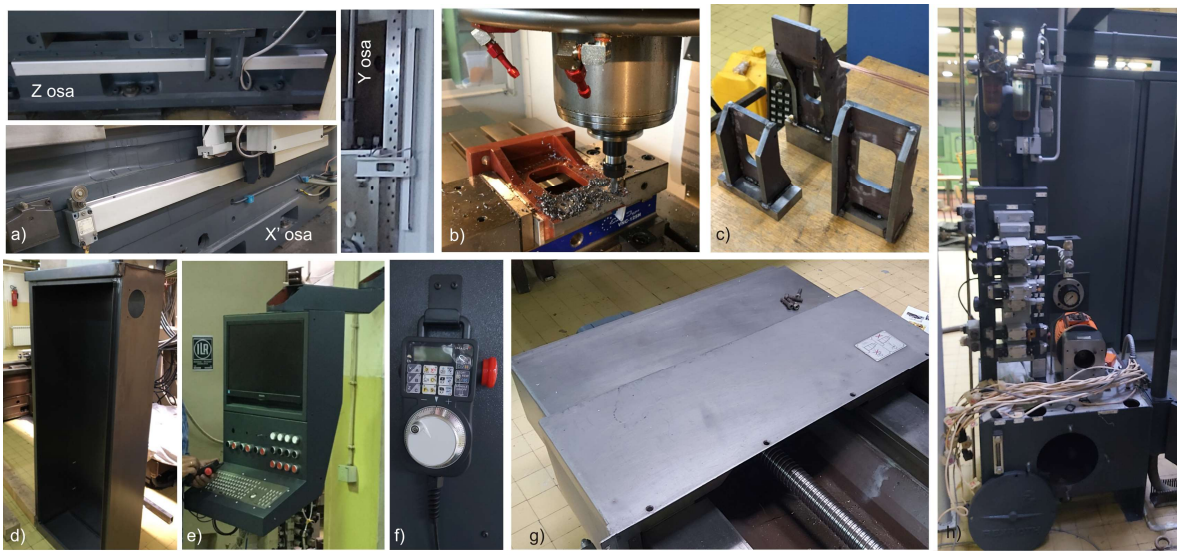
Godina	Upravljacka jedinica	Pogoni / Opis poslova	Budžetska procena
2011	**Sinumerik 802C bl** • 3 analogne ose i vreteno (±10V), Toolbox, Logbook • Podržava TTL (RS422) merne sisteme • Priključak za 1 handwheel • Implementacija PLC S7-200 sa 48 DI + 16DO 24V/0.5ADC, moguće proširenje DIO sa jednim modulom 16+16 DIO • RS232 korisnički port za prenos podataka	Zadržavaju se postojeći Siemens-ovi DC pogoni osa X, Y, Z i B. • Zadržava se postojeći DC pogon radnog vretena. • U el. ormanu se zadržava sva postojeća niskonaponska rasklopna oprema za zaštitu i napajanje pogona mašine i pomoćnih agregata. • Uklanja se kompletan lančasti magacin i manipulator (ruka) za automatsku izmenu alata. • Uklanja se el. orman sa opremom za pogon magacina i manipulatora. Napomena: DC motor magacina i priadajući regulator mogu se čuvati kao rezerva za pogone osa. • Postojeći linearni induktivni davači osa: X, Y i Z (Inductosyn-i) se zamenjuju optičkim linearnim davačima rezolucije 1µm. • Isporučuje se mehanika za nov viseći pult za smeštaj operator panela nove upravljačke jedinice. • Menja se elektrodokumentacija prema izvedenom stanju	15.930 EUR
	Sinumerik 802D sl. podržava 4 servoose i glavno vreteno, ima integrisan PLC S7-200 (216DI i 144DO), korisničke portove: RS 232, ethernet i USB. PROFIBUS DP za spregu I/O modula. DRIVE-CliQ za spregu sa SINAMICS S120 digitalnim pogonima. U konfiguraciji sa analognim interfejsom ADI4 može se povezati na analogne ose.	• Zadržavaju se postojeći Siemens-ovi DC pogoni osa X, Y, Z i B. • Zadržava se postojeći DC pogon radnog vretena. • U el. ormanu se zadržava sva postojeća niskonaponska rasklopna oprema za zaštitu i napajanje pogona mašine i pomoćnih agregata. • Uklanja se kompletan lančasti magacin i manipulator (ruka) za automatsku izmenu alata. • Uklanja se el. orman sa opremom za pogon magacina i manipulatora. Napomena: DC motor magacina i priadajući regulator mogu se čuvati kao rezerva za pogone osa. • Postojeći linearni induktivni davači osa: X, Y i Z (Inductosyn-i) se zamenjuju optičkim linearnim davačima rezolucije 1µm. • Isporučuje se mehanika za nov viseći pult za smeštaj operator panela nove upravljačke jedinice. • Menja se elektrodokumentacija prema izvedenom stanju.	21.358 EUR
2013	**Sinumerik 840D** sl sa HMI softverom Sinumerik Operate na Windows platformi koja omogućava totalnu otvorenost sistema za različite aplikacije.	Koristili bi se pogoni Sinamics S120 servo drajvovi u kombinaciji sa 1FK7 motorima. U pitanju su motori sa permanentnim magnetom bez četkica.	25.000 EUR
	Sinumerik 840D sl sa HMI softverom Sinumerik Operate na Windows platformi, ali bi se umesto zamene pogona zadržali stari pogoni.	Postojeći pogoni na mašini • analogno-digitalni pretvarači kako bi CNC mogao da komunicira sa pogonima. • signal konvertori za Inductosyn jer je neophodno njihovo korišćenje.	Cena Siemens opreme je oko 14.000 EUR + 3x900$ za signal konvertore.
2018 - 2019	**LinuxCNC (EMC2)** Ugradnja nove CNC jedinice na PC platformi u elektro-ormar i viseci pult.	Postojeći pogoni na mašini • Nabavka i isporuka sprežnog hardvera MESA 6125 SuperPort FPGA based PCIE interfejs kartica za upravljanje mašinom, • MESA 7I77 6-osna analogna U/I sprežna kartica • MESA 7I84 digitalna U/I sprežna kartoca • Izmene u elektro-ormaru • Izmene elektrodokumentacije mašine, povezivanje DI/O na postojeće ožičenje • Povezivanje mernih sistema osa X, Y, Z, B i vretena.	oko 8500 EUR

3. REVITALIZACIJA LOLA HBG 80 V3

Mašina LOLA HBG 80 već dugi niz godina nije bila radnom stanju. U okviru tekućih podprojekata na Katedri za proizvono mašinstvo TR35022 i TR35004 koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije, obezbeđena su sredstva za revitalizaciju i nabavku potrebne

hardversko softverske opreme za vraćanje mašine u funkcionalno radno stanje. Revitalizacija razmatrane mašine je rezultat ostvarene saradnje sa LOLA institutom iz Beograda, čiji je zadatak bio zamena upravljanja na mašini, dok je kompletnu pripremu hardverske nadogradnje, zamene mernih sistema, reparacije pojedinih komponenata mašine, izvršio projektni tim sa podprojekta TR35022. Deo tih poslova koje je trebalo uraditi tokom hardverske revitalizacije horizontalne bušilice glodalice LOLA HBG80 bi se mogao iskazati kao sledeći niz aktivnosti (slika 3.1):

- zamena postojećih linijskih mernih elemenata novim, slika 2.a;
- izrada novih nosača mernih glava za čitanje pozicije, slika 2.b,c;
- izrada novog elektroormana za potrebe smeštaja novog upravljanja otvorene arhitekture, slika 2.d;
- izrada novog visećeg pulta za smeštaj ekrana i industrijske tastature, slika 2.e;
- Handwheel prilagođen novom upravljanju LinuxCNC, slika 2.f;
- reparacija teleskopskih pokrivača, slika 2.g;
- Revizija hidraulične i pneumatske instalacije, Slika 2.h.



Slika 2. *Ilustracija dela izvedenih aktivnosti revitalizacije hardverskih komponenata mašine*

Na samom početku radova iskazao se značajan problem u smislu nepostojanja većeg dela originalne dokumentacije za mašinu, sa uobičajenim šemama pneumatskih, hidrauličkih, elektro-energetskih kola i upravljačkih kola. Iz tog razloga je, uz puno pažnje, izvršeno snimanje postojećih instalacija i njihovo dokumentovanje, kako bi bio omogućen rad na izradi projekta upravljanja u onom delu koji se odnosi na funkcije PLC.

Provera stanja vitalnih mehaničkih podstruktura je pokazala da zamena ležaja glavnog vretena, kugličnih zavojnih vretena i njihovih ležaja nije neophodna. Isto je i sa klizniim vođicama sve tri ose (kombinacija čeličnih kaljenih i brušenih staza uparenih sa Turcite-B oblogom na klizačima. Pregledom sklopa obrtnog stola uočen je problem sa iskrivljenim poteznim vijcima za blokadu stola. Ovaj problem je otklonjen ispravljenjem na presi.

U pogledu zaštite vođica od kontaminacije, zamenjeni su brisači vođica sve tri ose. Teleskopski pokrivači vođica su zatečeni sa prilično korozije, sa mehaničkim oštećenjima i sa potpuno pohabanim brisačima između segmenata. Obavljeno je temeljnio čišćenje i ispravljanje i ugradnja gumenih traka kao brisača.

Obavljeno je temeljno čišćenje instalacije za centralno impulsno podmazivanje (cevi i distributeri). Takođe je instalacija za cirkulaciono podmazivanje vreteništa temeljno očišćena (cevovod i hladnjak).

Deo cevovoda pneumatske instalacije je modifikovan, kako bi se obezbedilo napajanje jedinice za hlađenje alata smesom vazduha i sredstva za hlađenje i podmazivanje. Svi cevovodi, akumulator i pripremna grupa su temeljno očišćeni uz zamenu dotrajalih zaptivki. Uočen je problem sa radom cilindra za kompenzaciju težine vreteništa. Iz tog razloga su na njemu zamenjeni čaura za odzračivanje i brzoispusni ventil.

Obavljeni su minimalni radovi na hidrauličkoj instalaciji: čišćenje rezervoara hidroagregata, zamena filtera ulja, dopuna akumulatora, zamena zaptivki na modulima montiranim na gornju ploču agregata, zamena ulja i zamena kompleta zaptivki sklopa cilindra za pozicioniranje glavnog vretena.

Postojeći linearni merni sistemi pozicija osa (induktosini) sa pratećim modulima za interpolaciju su zamenjeni linearnim inkrementalnim enkoderima sa integrisanim modulima za interpolaciju, sa signalima koji se direktno mogu dovesti na interfejs modul novog upravljačkog sistema (LinuxCNC). Ugradnja ovih mernih sistema je zahtevala izradu novih nosača (adaptera) za pričvršćivanje njihovih čitača (glava) za sve tri translatorne ose mašine.

Zatečene konstrukcija klizača ose X i obrtnog stola je takva da nije dozvoljavala ugradnju inkrementalnog enkodera u osi obrtanja stola. To ograničenje je bio razlog što se u projektu upravljačkog sistema odustalo od obrtnog kretanja stola (osa B) kao pune servo ose i mogućnosti da mašina nakon revitalizacije bude četvoroosna, što postojeća LinuxCNC platforma inače dozvoljava. Zadržana je mogućnost pozicioniranja stola na 4 ugaone pozicije na svakih 90 stepeni. U postojećoj konstrukciji , zadržavanje stola u tačnoj poziciji (bilo kojoj od ove 4) se zasniva na specifičnom modu rada motora ose B, čijim se radom postiže nulta vrednost analognog signala sa senzora (induktivni polumost) sa čeličnom metom u obrtnom stolu, u odgovarajućoj poziciji. Senzori su zadržani, a za pobudu mosta i kondicioniranje signala je razvijen i napravljen novi elektronski modul korišćenjem specilanog hibridnog integrisanog kola za eksitaciju i procesiranje signala sa pomenutih senzora.

U cilju dovođenja mašine u radno stanje, najpre su uklonjeni stara upravljačka jedinica sa pripadajućim PLC-om i električni orman u kome su bili smešteni. Identifikovani su svi ulazno-izlazni vodovi ka aktuatorima za kontrolu pomoćnih procesa na mašini, kao i vodovi za signalnu vezu sa servo regulatorima glavnog i pomćnih kretanja. Na osnovu dobijenih informacija, urađena je izmena i dopuna postojeće elektro-dokumentacije i implementiran PLC program za upravljanje pomoćnim fukcijama mašine. Realizovan je nov električni orman, koji sadrži PC upravljačku jedinicu sa pripadajućim MESA interfejsima za kontrolu kretanja i upravljanje pomoćnim procesima na mašini. Digitalni ulazni i enkoderski signali su dovedeni direktno na interfejse upravljačkog sistema, dok su izlazni signali razdvojeni odgovarajućim interfejs relejima.

Specifičnost operativnog rada sa mašinom, upravljanom pomoću LinuxCNC, je nametalo potrebu gradnje specifičnog upravljačkog pulta, koji se u velikoj meri razlikuje od tipičnih rešenja kod komercijalnih CNC sistema. U tu svrhu je predviđen veliki led monitor (32 inča, poželjan za implementaciju vrlo bogatog HMI) i industrijska QWERTY tastatura sa integrisanim mišem. Novi pult je projektovan kao viseći, na zglobnoj ruci i obrtan oko svoje vertiklane ose, takav da omogućava maksimalnu pristupačnost operateru na manjoj ili većoj razdaljini od same mašine. Na pultu su i nephodni tasteri za start i stop izvršenja NC programa, dopuštanje, zaustavljanje i override kako glavnog obrtnog kretanja, tako i kretanja linearnih servo osa. Jedan USB priključak je iskorišćem za MPG (handwheel), a drugi je predviđen za prenos programa preko USB memorije.

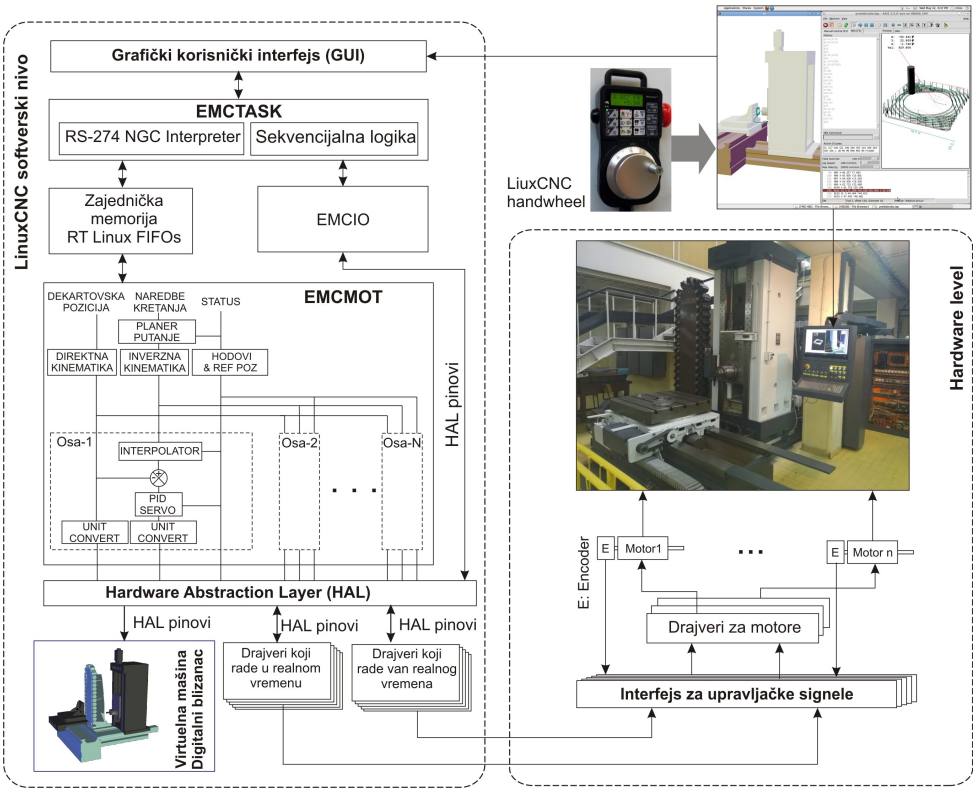
4. UPRAVLJANJE OTVORENE ARHITEKTURE NA BAZI LINUX CNC

Za implmentaciju upravljačkog sistema mašine LOLA HBG 80, korišćen je sistem upravljanja otvorene arhitekture LinuxCNC [5]. Članovi projektnog tima, kao i istraživači Lola instituta u dosadašnjoj vrlo uspešnoj saradnji, su imali dosta realizovanih rezultata upravljanja na bazi LinuxCNC-a i pozitivnih iskustava sa ovim sistemom upravljanja i to na primerima različitih mašina alatki, mašina i robota sa paralelnom kinematikom i industrijskog robota, mašina za obradu drveta, [7-12] itd. LinuxCNC predstavlja real-time softver za upravljanje mašinama alatkama i robotima, čiji se kod može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License). LinuxCNC omogućava programiranje mašina standardizovanim G-kôd instrukcijama. Osnovu softverskog paketa razvio je Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (NIST-National Institute of Standards and Technology) [10].

Konfigurisanje novog upravljačkog sistema predmetne mašine alatke je zahtevala sprovođenje sledećih aktivnosti:

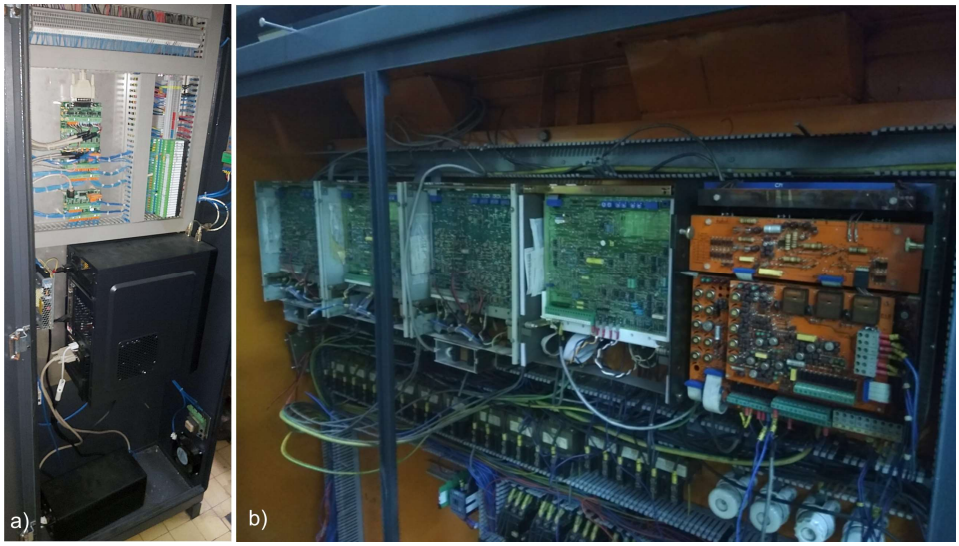
- realizacija prototipa upravljačke jedinice na hardverskoj osnovi standardnog PC računara uz korišćenje MESA kartica kao interfejsa za spregu sa pogonima, mernim sistemima i pomoćnim agregatima mašine alatke;
- realizacija PLC programa koji, između ostalih funkcija, upravlja zakretanjem B ose mašine i promenom stepena prenosa između motora glavnog kretanja i obradnog vretena;
- prilagođenje korisničkog interfejsa;
- izrada konfiguracionih datoteka za identifikaciju mašine;
- definisanje veza između hardverskog interfejsa za kontrolu kretanja i softverskog modula LinuxCNC-a za upravljanje kretanjem,
- konfigurisanje virtuelne mašine i njena integracija kao digtalnog blizanca sa sistemom upravjanja.

Na slici 3 je prikazana interna softverska struktura LinuxCNC-a, koja sadrži četiri osnovna programska modula i to: kontroler kretanja (EMCMOT), kontroler diskretnih U/I (ulazno/izlaznih) signala (EMCIO), kontroler procesa koji ih koordiniše (EMCTASK) i kolekciju tekstualnih, ili grafičkih korisničkih inerfejsa (GUI). Mogu se koristiti različiti grafički interfejsi, kao što su: xemc, TkEmc, Mini i Axis. Najčešće je u upotrebi Axis korisnički interfejs, koji je i korišćen pri konfigurisanju upravljanja. Ovo okruženje je vrlo intuitivno za rad, sa prepoznatljivim ikonicama, koje olakšavaju posao operatera. Pored toga, pogodnost Axis okruženja je i mogućnost integracije sa virtuelnom mašinom, što je takođe bilo predmet realizacije [10].



Slika 3. *Struktura realizovanog sistema upravljanja otvorene arhitekture na bazi LinuxCNC*

Na slici 4 su pokazani elektro-orman tokom ugradnje CNC na PC platformi i LinuxCNC sistemu upravljanja, kao i elektro orman sa napajanjem i regulatorima.



Slika 4. *Ugradnja nove CNC jedinice i povezvanje na postojeće ožičenje a) elektro-orman sa PC računarom za LinuxCNC, b) elektro-orman sa napajanjem i regulatorima*

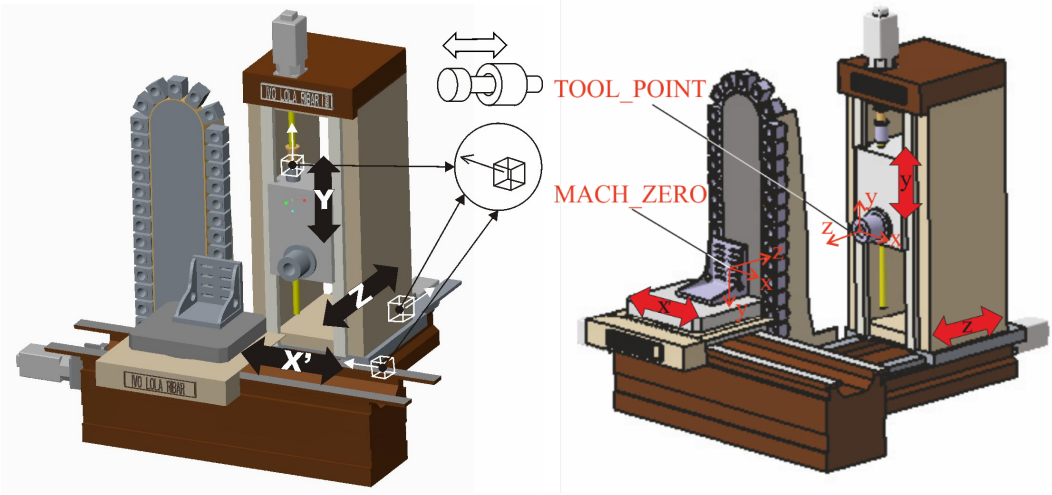
5. VIRTUELNE MAŠINE LOLA HBG80 KAO DIGITALNI DVOJNICI

Uporedo sa revitalizacijom hardverskih i softverskih komonenti upravljanja mašinom, razmatrano je i adekvatno okruženje za programiranje buduće revitalizovane mašine. Za programiranje se mogu koristiti raspoloživa CAD/CAM okruženja kao što su PTC Creo, Catia, Cimatron i dr. Programiranje obrade na mašini se može smatrati konvencionalnim sa upotrebom postprocesora za pretvaranje generisane putanje alata, odnosno CL datoteke u G-kod. To znači da programer počinje, na uobičajen način, od CAD modela radnog komada u CAD/CAM sistemu, generišući putanju alata koja se testira kroz NC proveru (NC Check) koja podrazumeva simulaciju uklanjanja materijala. Postprocesiranje se vrši za 3-osni horizontalni obradni centar, sa kinematičkom strukturom X'OZY. LinuxCNC upravljanje, koristi G-kod prema standardu ISO6983, koji je u ovom slučaju po formatu veoma sličan programima za Fanuc CNC sisteme.

U okviru sistema za programranje i upravljanje su razmatrane i konfigurisane virtuelne mašine, kao digitalnih blizanaca, u cilju verifikacije programa, pre izvršavanja programa na stvarnoj mašini. U nastavku će biti pokazane virtuelne mašine u okviru sistema za programiranje (Creo i Catia) i sistema za NC Check proveru (Vericut). Takođe, je konfgurisan i digitalni blizanac mašine, koji je integrisan sa sistemom uravljanja LinuxCNC.

5.1 Virtuelne mašine u sistemu za programiranje

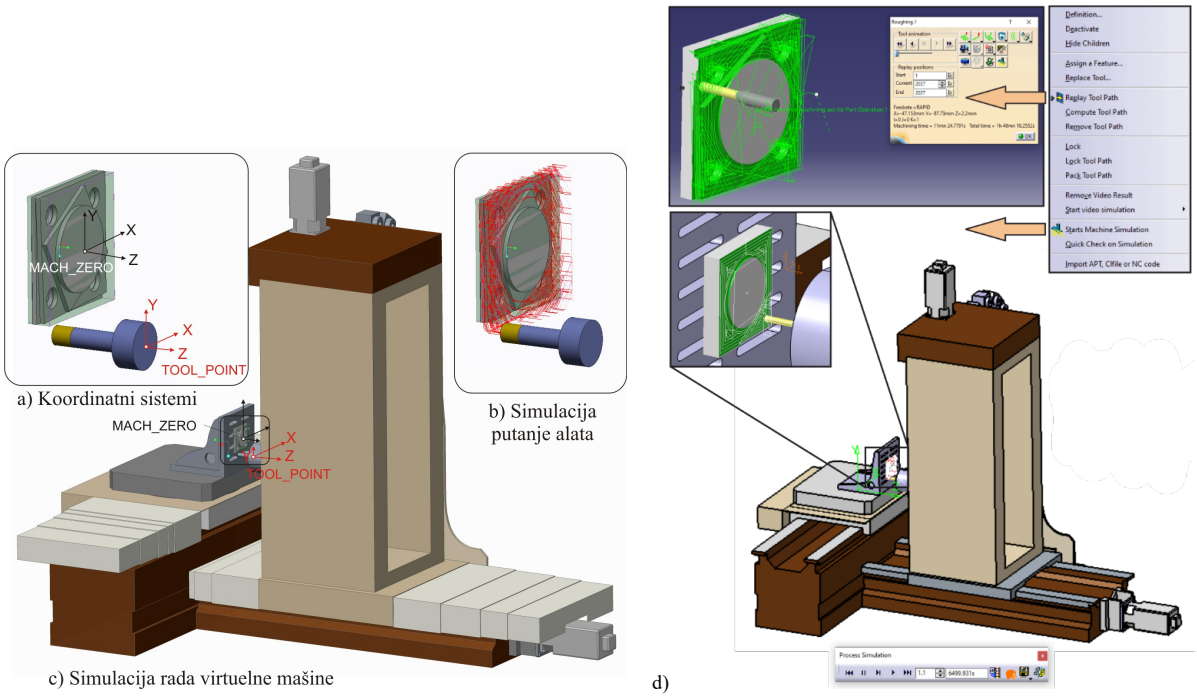
Konfigurisanje virtuelnih mašina u sistemu za programiramnje i simulacija njihovog rada po zadatom programu, danas je uobičajena u CAD/CAM okruženjima. Izabrana okruženja za programiranje su PTC Creo i Catia. Oba okruženja podržavaju sve faze modeliranja koje su bile potrebne za razvoj modela razmatrane virtuelne mašine alatke i te faze su [13]: (i) modeliranje mehanizma sa definisanim kinematičkim vezama, (ii) definisanje opsega u kinematičkim vezama, (iii) ručna interaktivna inspekcija definisanih virtuelnih kinematičkih veza, (iv) kreiranje video datoteke putanje alata simulacija na virtuelnoj mašini. Simulacija putanje alata je moguća pokretanjem programa sa učitavanjem kompletnog modela virtuelne mašine sa svim kinematičkim vezama između pokretnih komponenti, što omogućava njihovo kretanje u okviru modela virtuelne mašine kao sistema krutih tela. Primer virtuelne mašine LOLA HBG 80 V3 sa definisanim kinematičkim vezama u dva okruženja [14], pokazan je na slici 5.



a)PTC Creo b) Catia

Slika 5. *Virtuelna mašina LOLA HBG 80 V3 [6]*

Horizontalni obradni centar LOLA HBG80 V3 je 3-osna CNC mašina alatka. Mašina ima tri translatorne ose (X', Y, Z), koje su modelirane kinematičkim vezama tipa Slider, slika 5. Postoji i obrtna osa B', ali je ovo poziciona osa sa rotacijama od po 90°. Za svaku od osa je definisan opseg translatornog pomeranja klizača. Ovakav vid simulacije putanje alata omogućava kretanje pokretnih komponenata virtuelne mašine, prema pokrenutom programu i predstavlja jedan od načina verifikacije programa, slika 6.



Slika 6. *Simulacija rada virtuelne mašine u PTC Creo (a,b,c) i CATIA okruženju (d) [6]*

Ove provere su važne jer se na ovaj način mogu predvideti i izbeći greške koje se javljaju u procesu programiranja NUMA. Rad virtuelne mašine u okruženju PTC Creo, slika 6.a,b,c izvodi se na osnovu putanje alata odnosno CL (Cutter Location) datototeke, što znači da ne obuhvata eventualne greške nastale postprocesiranjem. U okruženju CATIA, slika 6.d, simulacija rada može biti i na bazi putanje alata, odnosno CL datoteke, ali i na osnovu G-koda, uključujući i simulaciju uklanjanja materijala.

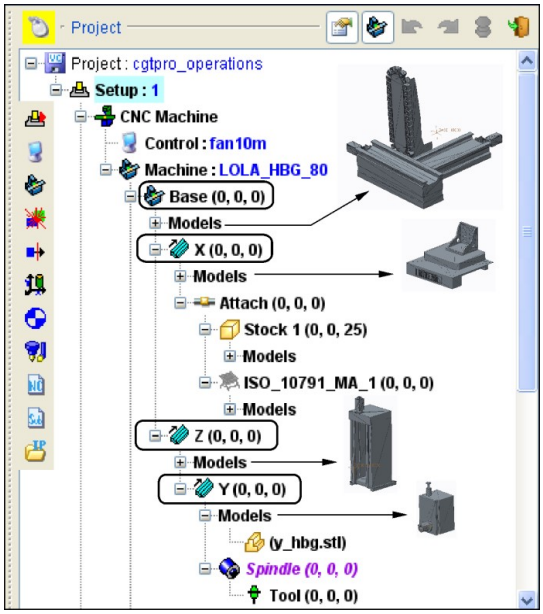
5.2 Virtuelna mašina u okruženju Vericut

Za potrebe verifikacije programa pripremljeno je još jedno okruženje i to Vericut. Simulacija rada virtuelne mašine alatke u Vericut okruženju prema datom programu, omogućava simulaciju rada mašine na osnovu G-koda, uz simulaciju uklanjanja materijala i sa mogućnošću dobijanja virtuelnog obratka u STL formatu [15-17]. Procedura konfigurisanja virtuelnih mašina je detaljno data u [16], dok je primer konfigurisanja virtuelne mašine razmatranog horizontalnog obradnog centra LOLA HBG80 V3 dato u [6].

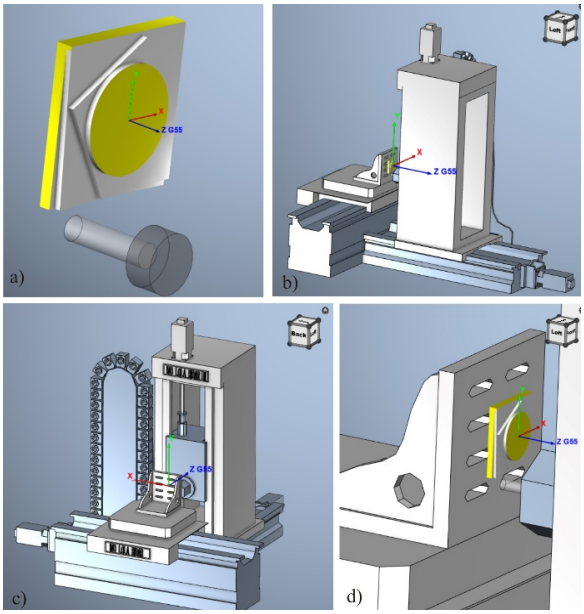
Kinematička struktura razmatrane mašine X'OZY opisuje raspored i vrstu veza između baze i pokretnih komponenata mašine. Potrebno je definisati način i redosled vezivanja komponenata baze, grane alata i grane pripremka, odnosno BASE, TOOL i STOCK [17]. Nepokretni deo mašine je baza (Base), na koju treba dodati komponente grane alata (Z i Y) i komponente grane obratka (X'), slika 7. Konfigurisanje virtuelne mašine započinje od baze (O), kao fiksne komponente. Osa X' se prva dodaje na bazu kao translatorna osa (X Linear), kao deo kinematike na grani obratka. Na ovoj osi se takođe nalaze odgovarajući pribor u vidu ugaonika za postavljanje i baziranje pripremaka. Nepokretna baza (O) je, takođe povezana i sa preostale dve translatorne ose Z i Y, pri čemu se ova kretanja realizuju na grani alata. Horizontalna translatorna osa Z (Z Linear) je prva dodata bazi, a zatim je na nju dodta i vertikalna translaciona osa Y (Y Linear). Na vretenu koje se kreće duž Yose nalazi se glavno vreteno (Spindle) i alat (Tool), čime se kompletira kinematička struktura mašine. Hijerarhijska struktura stabla X'OZY mašine je prikazana na slici 7. Mašina je posle konfigurisanja sačuvana pod imenom LOLA_HBG_80 i dodata u Vericut bazu podataka virtuelne mašine [6].

Nakon definisanja kinematičke strukture mašine u Vericut-u moguće je dodati modele komponenata mašine u STL formatu i kompletirati virtuelnu mašinu koja omogućava vizuelizaciju komponenata mašine čiji se rad simulira na osnovu programa u G-kodu. Za realizaciju projekta simulacije obrade potrebno je definisati: (i) pripremak (Stock), (ii) radni predmet, koordinatni sistem (Nultu tačku programa),iii) podešavanje položaja nulte tačke na virtuelnoj mašini (G code Offsets), (iv) alate koji se koriste u obradi i (v) NC programe i eventualno i potprograme [17]. Primer jedne izvršene simulacije obrade u VeriCUT

okruženju za razmatranu mašinu, pokazan je na slici 8. Pokazana je simulacija obrade test dela prema ISO 10791-7 koji se koristi za ispitivanje radne tačnosti numerički upravljanih mašina alatki.



Slika 7. *Hijerarhijsko stablo mašine [6]*



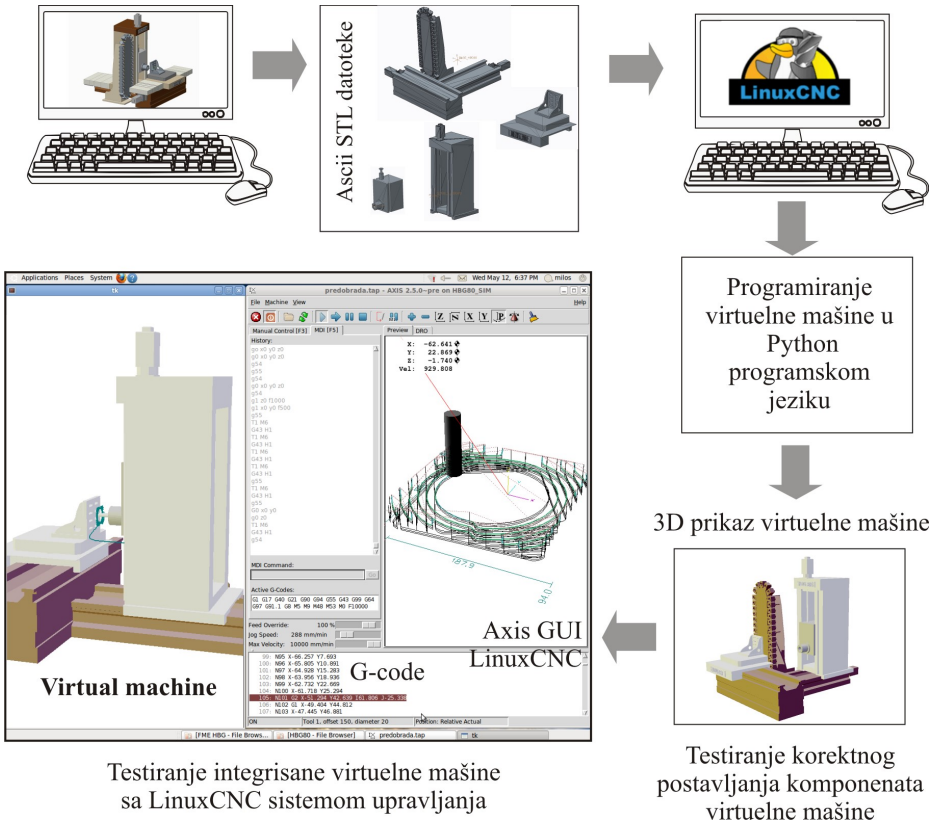
Slika 8. *Simulacija rada virtuelne mašine u Vericut okruženju [6]*

5.3 Virtuelna mašina kao digitalni blizanac u sistemu za upravljanje

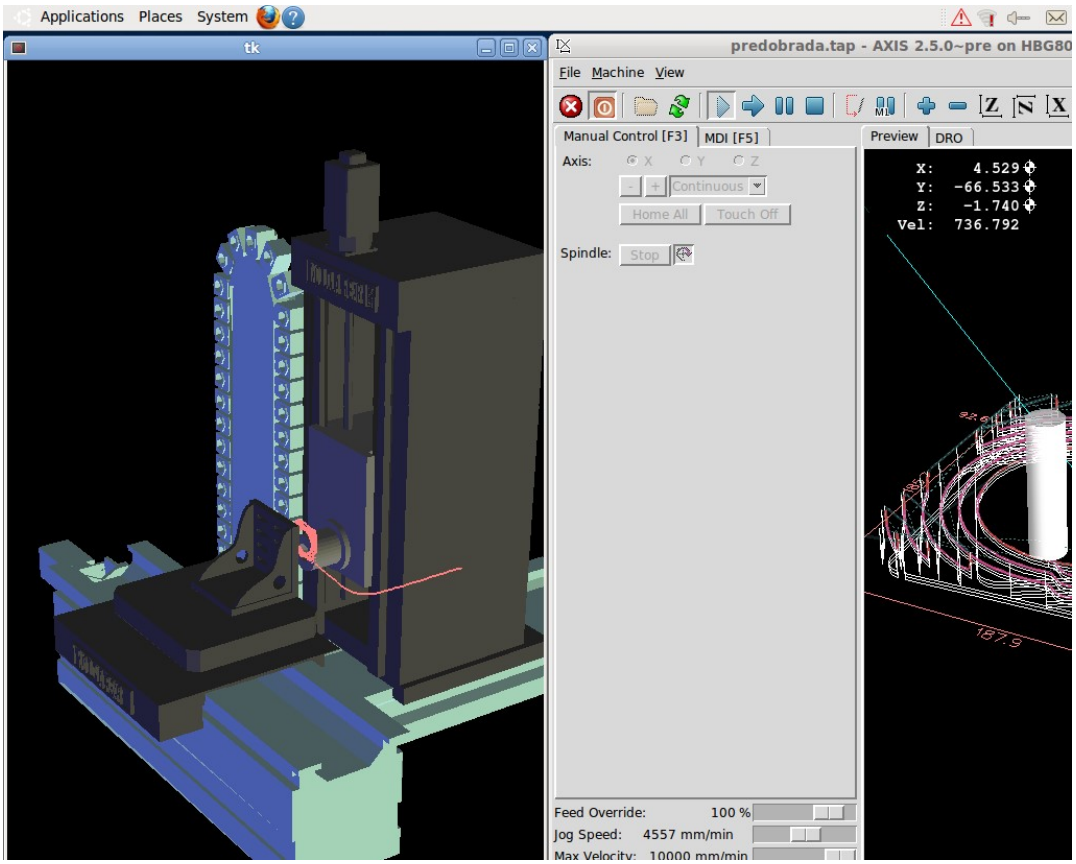
Integracija virtuelne mašine u sistem upravljanja otvorene arhitekture LinuxCNC omogućava simulaciju obrade u OpenGL 3D okruženju. Konfigurisanje interaktivne virtuelne mašine kao digitalnog blizanca se vrši preko programskog jezika Python, što omogućava njenu direktnu integraciju sa grafičkim korisničkim interfejsom Axis, u LinuxCNC sistemu upravljanja. Ovakva konfigurisana virtuelna mašina omogućava verifikaciju programa G-koda i praćenje procesa obrade [6,18,19].

Za konfigurisanje virtuelne mašine u Python programskom okruženju korišćen je već postojeći virtuelni model iz CAD/CAM sistema. Kompletan model mašine je raščlanjen na osnovne funkcionalne delove, koji se konvertuju u datoteke u ASCII STL formatu. Tokom programiranja virtuelne mašine u programskom jeziku Python, modeli osnovnih komponenti se učitavaju, orijentišu i postavljaju u virtuelno okruženje, prema strukturi mašine i usvojenom referentnom koordinatnom sistemu. Virtuelna mašina se pojavljuje u posebnom prozoru i omogućava iscrtavanje putanja alata izvršavanjem G-koda. Tokom izvršavanja programa za obradu pisanog u G-kodu, elementi virtuelne mašine se kreću u realnom vremenu, potpuno sinhronizovani sa pokretnim delovima stvarne mašine, što rezultira potpuno funkcionalnom virtuelnom mašinom. Osnovni tok aktivnosti konfigurisanja i integrisanja virtuelne mašine u sistem upravljanja LinuxCNC, slika 9, obuhvata: (i) pripremu AsciiSTL komponenta mašine, (ii) programiranje virtuelne mašine u Python programskom jeziku sa učitavanjem komponenata mašine, (iii) pravilno orijentisanje i postavljanje komponenata mašine u virtuelnom okruženju, (iv) testiranje korektnog postavljanja komponenata virtuelne mašine u 3D prozoru virtuelne mašine inetgrisanog sa AxisGUI, (v) testiranje kompletirane virtuelne mašine puštanjem uravljačkih programa u G-kodu.

Virtuelna mašina je integrisana sa sistemom upravljanja i prima upravljačke signale preko HAL interfejsa od LinuxCNC upravjačkih modula u realnom vremenu. Takva virtuelna mašina omogućava posmatranje mašine iz različitih perspektiva sa mogućnošću rotiranja, pomeranja i zumiranja. Virtuelna mašina se može koristiti za simulaciju i verifikaciju programa obrade direktno u grafičkom korinsičkom interfejsu Axis, ili se može koristiti za praćenje aktivnosti mašine tokom operacija obrade pošto su kretanja stvarne i virtuelne mašine identična, slika 10 [6].



Slika 9. *Osnovni tok aktivnosti konfigurisanja i integrisanja virtuelne mašine u sistem upravljanja LinuxCNC*



Slika 10. *Virtuelna mašina LOLA HBG 80 V3 integrisana sa Axis GUI*

6. PROBNI RAD

Testiranje implementiranog LinuxCNC upravljanja, realizovano je na početku kretanjem pogonskih osa u random režimu izvršavanjem programa za predobradu test probnog dela, ali bez obrade. Razlog za to su uklonjeni teleskopski pokrivači za vođice zbog njihove reparacije i zamene gume na kliznom površinama metalnih segmenata teleskopskih pokrivača. Testirana je i integrisana virtuelna mašina, koja simultano izvršava G kod na osnovu koga radi i stvarna mašina. Primer ekrana, na novoizgrađenom visećem pultu mašine, sa prikazom simulirane putanje alata, kao i simulacije rada virtuelne mašine integrisane sa upravljanjem, pokazano je na slici 11.

Slika 11. *Mašina posle revitalizacije, LOLA HBG V3, sa LinuxCNC upravljanjem*

7. ZAKLJUČAK

Krajem 2018 i tokom 2019 godine ostvarena je saradnja sa LOLA institutom iz Beograda, koja je izvršila zamenu upravljanja na mašini, dok je pripremu hardverske nadogradnje i zamene mernih sistema izvršio projektni tim sa podprojekta TR35022. Sada je mašina ponovo u funkciji za nova istraživanja i edukaciju na Mašinskom fakultetu. Mašina sada ima moderno upravljanje otvorene arhitekture na bazi LinuxCNC sistema. Mašina (LOLA HBG80 OC) pre revitalizacije sa Bosch upravljanjem je predstavljala 2 1/2-osni sistem obrade, dok je posle revitalizacije unapređena na 3-osni sistem obrade (LOLA HBG80 V3).

8. LITERATURA

[1] Maitane Olabarria M. (ed), THE EUROPEAN MACHINE TOOL SECTOR AND THE CIRCULAR ECONOMY, CECIMO Circular Economy Report, Edition April 2019.

[2] Retrofits keep CNC machines in business, https://www.ctemag.com/news/articles/retrofits-keep-cnc-machines-business, december, 2021.

[3] Milojevic, M., Lukic, Lj.: *Modularno projektovanje*, Monografija, Beograd, 1996.

[4] Lukic, Lj.: *Fleksibilni tehnološki sistemi,* Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet Kraljevo, 2008.

[5] LinuxCNC, http://linuxcnc.org/, decembar 2021.

[6] Vokapic, N., Zivanovic, S., Dimic, Z., Kokotovic, B., Slavkovic, N.: *Virtual Horizontal Machining Center LOLA HBG 80 for Program Verification and Monitoring*, FME Transactions, Vol. 49, No. 3, pp. 696-703, 2021.

[7] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrgić, V.: Koncept razvoja CNC upravljanja za mašine alatke specifične konfiguracije na bazi EMC softvera, 34. JUPITER konferenencija, 30. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str.3.19-3.26, Mašinski fakultet, Beograd, jun 2008.

[8] Dimić Z., Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Kvrgić V.: Milićević M., Upravljački sistem otvorene arhitekture za upravljanje troosne mašine sa paralelnom kinematikom, 37. JUPITER konferenencija, 39. Simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-724-9, str. 4.17- 4.22, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2011.

[9] Dimic Z., Milutinovic, D., Zivanovic, S., Kvrgic, V.: Virtual environment in control and programming system for reconfigurable machining robot, Tehnički vjesnik / Technical Gazette, Vol. 23, No. 6, pp. 1821-1829, 2016.

[10] Živanović, S., Glavonjić, M., Dimić, Z.: Konfigurisanje virtuelne mašine troosne glodalice sa paralelnom kinematikom za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja, XI međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2012, Zbornik radova, Vol. 11, str. 464-469, Jahorina, BiH, epublika Srpska, mart 2012.
[11] Dimić, Z., Milutinović, D., Živanović, S., Mitrović, S., Kvrgić, V.: Metod konfigurisanja upravljačkog sistema otvorene arhitekture rekonfigurabilne robotske ćelije za obradu, 41. JUPITER konferenencija, 37. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-978-6, str. 3.1-3.7, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 05-06. jun 2018.
[12] 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.
[13] Zivanovic, S., Dimic, Z., Vorkapic, N., Mitrovic, S.: Configuring of 3-axis mini CNC machine tool with control system based on LINUXCNC. in: *Proceedings of the 14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019*, 24-25.5.2019, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, pp. 15-28.
[14] Stojadinovic, S., Durakbasa, N., Zivanovic, S.: An Optimized and Virtual on - Machine Measurement Planning Model, FME Transactions, Vol. 48, No. 4, pp. 745-752, 2020.
[15] CGTech Vericut, https://www.cgtech.com/, januar 2022.
[16] Zeljković, M., Tabaković, S., Živković, A., Živanović, S., Mlađenović, C., Knežev, M.: Osnove CAD/CAE/CAM tehnologija, udžbenik, ISBN 978-86-6022-120-1, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, 2018.
[17] Živanović, S., Vorkapić N., Dimić, Z.: Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osnemini CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi, TEHNIKA, Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Broj 6, str. 823-831, 2019.
[18] 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.
[19] Živanović, S., Dimić Z., Rakić, A., Knežević, M., Mitrović, S.: An open architecture control system for multi-axis wood CNC machining center, Proceedings of the 15th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019, ISBN 978-99938-39-92-7, pp. 113-119, University of Banjaluka, Faculty of Mechanical Engineering, 28-29 May, 2021.

Živanović, S., Tanović, Lj., Puzović, R., Kokotović, B., Slavković, N., Popović, M., Mladenović, G., Stojadinović, S., Pjević, M., Vorkapić, N., Dimić, Z., Rakić, A., Manasijević, S.

REVITALIZATION OF THE HORIZONTAL MACHINING CENTER LOLA HBG 80 USING OPEN ARCHITECTURE CONTROL BASED ON LINUXCNC PLATFORM

Abstract: The paper shows the revitalization of the LOLA HBG 80 horizontal machining center, which included a hardware and software upgrade of the existing machine. Open architecture control on the LinuxCNC computer platform was chosen as the control system. A system for programming and program verification has been established. Equivalent virtual machines are configured in the programming and control system. The revitalized machine was successfully tested and its operation verified.

Key words: *horizontal machining center, control system, LinuxCNC, virtual machines, programming, simulation*

Miljković, Z., Babić, B., Petrović, M., Jokić, A., Miljković, K., Jevtić, Đ., Đokić, L.[1)]

Inteligentno stereo-vizuelno upravljanje mobilnih robota i optimalno terminiranje tehnoloških procesa - pregled rezultata istraživanja u okviru projekta MISSION4.0[2)]

Rezime

Projekat MISSION4.0 podrazumevao je, u okviru nekoliko radnih paketa, razvoj inteligentnog stereo-vizuelnog upravljanja mobilnih robota, kao i optimalno planiranje i terminiranje tehnoloških procesa, i to baziranim na tehnikama veštačke inteligencije, posebno na konvolucionim veštačkim neuronskim mrežama i biološki inspirisanim algoritmima optimizacije. Tokom dvogodišnjih intenzivnih naučnih istraživanja razvijena je nova metodologija za autonomnu navigaciju i inteligentno upravljanje mobilnih robota sopstvenog razvoja, nazvanih RAICO i DOMINO. Generisanje optimalnog plana terminiranja tehnoloških procesa, u okviru koga se izvršava i inteligentni unutrašnji transport korišćenjem mobilnih robota, takođe je bio jedan od važnih ciljeva ovih naprednih istraživanja. U ovom radu, dat je pregled nekih od ključnih rezultata projekta MISSION4.0, poput publikovanih u vodećim međunarodnim i nacionalnim naučnim časopisima, objavljenih poglavlja u naučnim monografijama, saopštenih i odštampanih naučnih radova u zbornicima prestižnih konferencija održanih u inostranstvu i regionu, zatim u okviru verifikovanih tehničkih rešenja, kao i preko skupova podataka sa otvorenim pristupom.

***Ključne reči**: inteligentno upravljanje mobilnih robota, stereo mašinsko gledanje, konvolucione neuronske mreže, terminiranje tehnoloških procesa, biološki inspirisani algoritmi optimizacije*

1. UVOD

Projekat „*Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0*“ (akronim MISSION4.0, ev. broj: 6523109), realizovan u periodu od 1. septembra 2020. do 31. avgusta 2022. godine, prvi je naučno-istraživački projekat Univerziteta u Beogradu – Mašinskog fakulteta koji je finansiran od strane Fonda za nauku Republike Srbije. U izraženoj konkurenciji od 70 predloga projekata, MISSION4.0 predstavlja jedan od 12 projekata koji je ostvario finansiranje u okviru poziva „Program za razvoj projekata iz oblasti veštačke inteligencije“, odnosno jedan od šest projekata finansiranih u domenu primenjenih istraživanja (PRVI_P). Projekat MISSION4.0 realizovao je multidisciplinarni istraživački tim iz dve naučno-istraživačke organizacije Univerziteta u Beogradu – Mašinskog fakulteta (nosilac projekta) i Univerziteta u Beogradu – Filozofskog fakulteta (učesnik projekta), a rukovodilac projekta bio je prof. dr Zoran Miljković. Projektni tim činilo je, u svakom trenutku, 13 naučnika i mladih istraživača sa Mašinskog fakulteta i jedan naučnik sa Filozofskog fakulteta, pri čemu su ispunjeni i zahtevni evropski kriterijumi za ravnopravnost polova u oblasti tehničko-tehnoloških nauka, s obzirom da 43% projektnog tima predstavljaju dame. U okviru Mašinskog fakulteta, tri katedre bile su uključene u realizaciju projekta i to Katedra za proizvodno mašinstvo sa ukupno devet istraživača, Katedra za automatsko upravljanje sa tri istraživača i Katedra za industrijsko inženjerstvo sa jednim istraživačem, dok je

[1)] Prof. dr Zoran Miljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zmiljkovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Bojan Babić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bbabic@mas.bg.ac.rs), vanr. prof. dr Milica M. Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (mmpetrovic@mas.bg.ac.rs), asistent Aleksandar Jokić, MSc, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ajokic@mas.bg.ac.rs), Katarina Miljković, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (kmiljkovic@mas.bg.ac.rs), Đorđe Jevtić, MSc, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (drjevtic@mas.bg.ac.rs), Lazar Đokić, MSc, stručni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (ldjokic@mas.bg.ac.rs).

[2)] U ovom radu, saopštava se pregled dela rezultata istraživanja ostvarenih u okviru naučnog projekta MISSION4.0, ev. broj: 6523109, koji je finansijski podržan od Fonda za nauku Republike Srbije, kao i potprojekta Mašinskog fakulteta u Beogradu, ev. broj: 451-03-68/2022-14/200105, finansijski podržanog od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

sa Filozofskog fakulteta uključena Katedra za sociologiju. Četiri proizvodno orijentisane kompanije podržale su istraživanja i implementaciju rezultata ostvarenih na projektu MISSION4.0: *Servoteh*, Beograd; *IVA-28*, Beograd; *FMP konzorcijum*, Beograd i *SAP West Balkans*, Beograd.

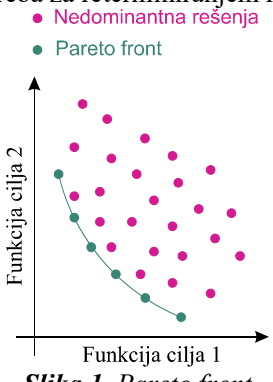
Osnovi cilj projekta MISSION4.0 podrazumevao je razvoj inovativnih algoritama baziranih na tehnikama veštačke inteligencije za upravljanje, termininiranje i ostvarivanje sajber bezbednosti kibernetsko fizičkih proizvodnih sistema Industrije 4.0. Uloga člana projektnog tima sa Filozofskog fakulteta ogledala se u definisanju društveno-etičkih normativa koje je potrebno uzeti u obzir prilikom uvođenja tehnika veštačke inteligencije u okviru proizvodnih sistema. Plan realizacije projektnih aktivnosti definisan je kroz šest radnih paketa. Prvi i šesti radni paketi posvećeni su administraciji i obezbeđivanju uspešne realizacije projekta, kao i popularizaciji ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, dok su radni paketi dva, tri, četiri i pet naučno-istraživački orijentisani. Primarni cilj radnog paketa dva predstavljao je ostvarivanje optimalnog plana termininiranja u dinamičkim uslovima na bazi biološki inspirisanih algoritama optimizacije. Razvoj strategije stereo vizuelnog upravljanja mobilnih robota na osnovu tehnika dubokog učenja predstavljao je osnovni cilj radnog paketa tri. U okviru radnog paketa četiri, cilj je bio razvoj sistema za inteligentno upravljanje mobilnih robotskih sistema na bazi fazi logike i dubokog učenja ojačavanjem. Cilj radnog paketa pet sastojao se u razvoju novih modela dubokog učenja primenjenih radi ostvarivanja sajber bezbednosti pametnih senzora i aktuatora. Detaljan opis ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, proisteklih iz radnih paketa dva i tri, biće prikazan u okviru ovog preglednog rada.

Ukupan budžet projekta iznosi 199.949,18 € i podeljen je u osam kategorija. Najveći deo budžeta, u iznosu od 69,87%, predviđen je za lične prihode istraživača. Druga najveća budžetska kategorija namenjena je nabavci opreme u iznosu od 10,83% ukupnog budžeta. Troškovi nadoknade za NIO predstavljaju treću po veličini budžetsku kategoriju i iznose 9,92%. Troškovi predviđeni za putovanja (2,97%) i konferencije, odnosno publikacije (2,88%) su naredne po veličini budžetske kategorije; zatim, 2,41% budžeta opredeljeno je za troškove promocije i popularizacije (diseminacije) ostvarenih naučno-istraživačkih rezultata, dok su najmanje budžetske kategorije predviđene za angažovanje podizvođača (0,77%) i potrošni materijal (0,35%).

2. VIŠEKRITERIJUMSKO DINAMIČKO TERMINIRANJE TEHNOLOŠKIH ENTITETA

Termininiranje fleksibilnih tehnoloških procesa predstavlja aktivnost vremenskog raspoređivanja tehnoloških operacija i posebnih procesa za skup delova koje je potrebno obraditi u okviru tehnološkog sistema. Kako usled fleksibilnosti mašina alatki, alata, orijentacija alata, procesa i redosleda operacija varijantnost mogućnosti obrade skupa delova postaje izrazito velika [1], sve se veća pažnja istraživača u ovoj oblasti posvećuje razvoju algoritama optimizacije koji imaju mogućnost da na efikasan način izvrše proces termininiranja. Izrazito velika varijantnost broja rešenja problema termininiranja onemogućava efikasnu primenu optimizacionih algoritama koji pretražuju celokupan prostor rešenja, prevashodno zbog vremena koje je potrebno za određivanje svih mogućih rešenja. Iz tog razloga, primena metaheurističkih metoda optimizacije predstavlja adekvatnu alternativu [2]. Metaheuristički algoritmi optimizacije ne garantuju pronalaženje optimalnog rešenja, međutim, moguće je ostvariti rešenje približno optimalnom u znatno kraćem vremenskom periodu. U okviru projekta MISSION4.0, analizirana su dva kompleksnija slučaja termininiranja – dinamičko i višekriterijumsko termininiranje.

Dinamička priroda realnih tehnoloških sistema može uzrokovati poremećaje u okviru trenutnog plana termininiranja čime celokupan proces optimizacije postaje višestruko kompleksniji. Neki od uobičajenih poremećaja podrazumevaju prestanak rada mašine alatke, potrebu za obradom novog dela, otkaz dela čija je obrada u toku [3] itd. Pomenuti poremećaji narušavaju optimalnost inicijalnog plan termininiranja čime se stvara potreba za reterminiranjem radi uzimanja u obzir novog stanja tehnološkog sistema [4].



Slika 1. *Pareto front*

Kako bi se izvršio proces optimizacije i odredio optimalni plan termininiranja, potrebno je definisati funkciju cilja koja matematički formalizuje neki od kriterijuma termininiranja, npr. minimalno vreme potrebno da bi se obradili svi delovi čije se termininiranje vrši, minimalna cena obrade, minimalni transport [5] itd. Potreba za višekriterijumskom optimizacijom javlja se ukoliko je pri procesu termininiranja neophodno optimizovati dva kriterijuma (tj. dve funkcije cilja) istovremeno [6]. U tom slučaju, ne postoji jedno optimalno rešenje procesa optimizacije, već postoji skup rešenja koja kreiraju tzv. Pareto front (slika 1). Sva rešenja u Pareto frontu su optimalna, sa različitim uticajima funkcija cilja 1 i 2. Odabir optimalnog rešenja koje će se plasirati u proizvodnju definisan je proizvodnim prioritetima koji su u korelaciji sa pomenutim funkcijama

cilja. Na osnovu odabranog rešenja, moguće je kreirati Gantov dijagram rasporeda tehnoloških operacija, po raspoloživim mašinama alatkama sa odabranim alatima i orijentacijama alata u tehnološkom okruženju.

2.1 Pregled stanja u oblasti dinamičkog i višekriterijumskog terminiranja tehnoloških procesa

U nastavku biće analizirani radovi koji su predstavljali osnovu, tj. polazište za istraživanja sprovedena u okviru drugog radnog paketa projekta MISSION4.0. Celokupan pregled stanja podeljen je u dve oblasti; prvo će biti analizirani radovi vezani za dinamičko terminiranje, a zatim i radovi koji tretiraju višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa.

Primena metodologije za dinamičko terminiranje *job-shop* tipa tehnološkog sistema na bazi genetičkih algoritama (engl. *Genetic Algorithm* – GA) predložena je u [7]. Jedan od analiziranih dinamičkih poremećaja predstavlja dolazak novog dela u sistem. Autori analiziraju dva modela za rešavanje problema dinamičkog terminiranja, kod prvog uzima se u obzir da je vreme dolaska delova u sistem stohastički, a kod drugog deterministički definisano. Eksperimentalni rezultati optimizacije, koja uključuje šest različitih funkcija cilja, pokazuju poboljšanje koje obezbeđuje nova metodologija u odnosu na pristup baziran na pravilima prioriteta. Razvoj GA za napredno terminiranje tehnološkog procesa gde se dinamika procesa ostvaruje kroz kontinualno uvođenje novih delova u tehnološki sistem predložen je u radu [8]. Funkcija cilja definisana je tako da uzima u obzir prosečno vreme koje svi delovi provedu u tehnološkom sistemu, kao i pravovremeno završavanje obrade svakog mašinskog dela. Pomenuta funkcija cilja implementirana je u okviru inicijalnog i svih reterminiranih planova terminiranja. Radi obezbeđivanja stabilnost procesa terminiranja, uvedena je strategija periodičnog zaustavljanja, koja onemogućava uzastopno reterminiranje usled uvođenja novih delova u sistem i uvodi određeni period između dva uzastopna procesa reterminiranja. Eksperimentalna verifikacija predložene metodologije bazirane na GA obezbeđuje povišenu stabilnost terminiranja koja ne umanjuje efikasnost procesa optimizacije. Autori rada [9] predlažu metodologiju koja minimizira efekat prestanka rada mašine alatke na trenutni plan terminiranja. Predložen je hibridni GA koji vrši optimizaciju u dva koraka. Prvi korak podrazumeva klasično terminiranje uz minimizaciju vremena potrebnog da se obrade svi delovi, dok se pri drugom koraku nastavlja proces optimizacije sa funkcijom cilja koja obezbeđuje robusnost plana terminiranja na prekid rada mašine alatke. Ova dva suprotstavljena kriterijuma optimizacije objedinjena su u okviru tri različite funkcije cilja. Predložena metodologija testirana je i eksperimentalni rezultati pokazali su povišenu robusnost na prestanak rada mašine, kao i stabilnost celokupnog plana terminiranja. Primena algoritma inspirisanog inteligencijom roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization* – PSO) za rešavanje problema dinamičkog i statičkog terminiranja razmatrano je u radu [10]. Predloženi PSO algoritam unapređen je dodavanjem operatora elitizma, mutacije i ukrštanja, kako bi se primenio za diskretne probleme. Dva razmatrana dinamička poremećaja podrazumevaju prestanak rada mašine alatke i dolazak novog dela koji urgentno treba obraditi. Rezultati tri eksperimentalne verifikacije ukazuju na efikasnost predloženog algoritma.

Razvoj evolucionog algoritma za višekriterijumsko dinamičko terminiranje predstavljen je u okviru rada [11]. Optimizacija je izvršena na osnovu sledeće dve funkcije cilja (i) vreme potrebno za obradu svih delova čije se terminiranje vrši i (ii) ravnomerno iskorišćenje mašina alatki. Matematičko definisanje problema izvršeno je primenom MINLP (engl. *Mixed-integer non-linear programmin*) modela. Predloženi algoritam upoređen je sa višekriterijumskom verzijom GA i PSO algoritama, a eksperimentalni rezultati pokazali su da predloženi algoritam ostvaruje bolja rešenja na većini test problema. Metodologija za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa, koja uključuje maksimizaciju energetske efikasnosti i minimizaciju ukupnog vremena potrebnog da se obrade svi delovi, predložena je u [12]. Razvijeni matematički model uključuje ograničenja vezana za transportni sistem na bazi automatski vođenih robokolica. Unapređeni višekriterijumski GA, koji podrazumeva integraciju PSO i algoritma simuliranog žarenja (engl. *Simulated Annealing*), predložen je za rešavanje ovog problema. Rad [13] takođe razmatra problem višekriterijumskog terminiranja radi ostvarivanja optimalne energetske efikasnosti i minimalnog vremena potrebnog za obradu svih delova čije se terminiranje vrši. Primenjena napredna verzija GA integrisana je sa pretragom promenljivih susedstava (engl. *Variable Neighborhood Search*) radi obezbeđivanja intenzivnijeg lokalnog pretraživanja. Predloženi algoritam ostvario je bolja optimalna rešenja u okviru Pareto fronta u poređenju sa tradicionalnim višekriterijumskim GA. Višekriterijumska optimizacija planova terminiranja, koja uključuje stohastički definisana vremena obrade i vremena dolazaka delova u sistem, razmatrana je u radu [14]. Metod baziran na koloniji pčela primenjen je za generisanje optimalnih planova terminiranja. Razmatrane su kombinacije pet funkcija cilja, a predloženi algoritam ostvario je bolja rešenja od tradicionalnog GA algoritma.

Različito od analiziranih radova, u okviru drugog radnog paketa projekta MISSION4.0 predložena je metodologija za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških sistema u okviru kojih transport vrši jedan mobilni robot [6]. Razvijeno je 13 funkcija cilja, na osnovu čije kombinacije je vršena višekriterijumska optimizacija.

Četiri optimizaciona algoritma predložena su za rešavanje ovog problema, od kojih je unapređeni algoritam inspirisan čoporom vukova [15] pokazao najbolje performanse u poređenju sa aritmetičkim algoritmom [16], kao i sa tradicionalnim višekriterijumskim GA i PSO algoritmom.

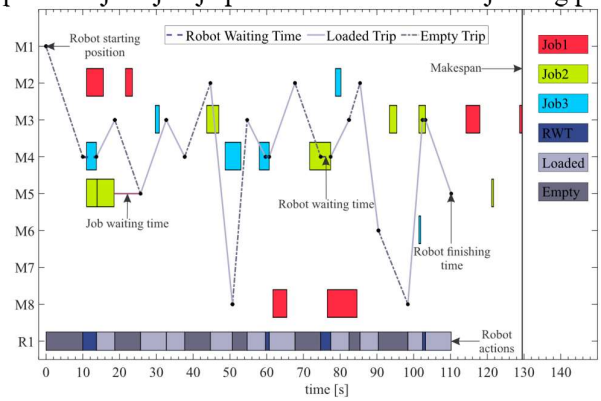
2.2 Dinamičko i višekriterijumsko terminiranje tehnoloških procesa

U nastavku, detaljno su analizirani radovi koji su proistekli kao rezultat rada istraživača u okviru oblasti terminiranja tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima. Detaljan pregled stanja u oblasti dinamičkog terminiranja fleksibilnih tehnoloških procesa predstavljen je u radu [17]. Pored inicijalnog definisanja stanja u oblasti istraživanja, predstavljena je i matematička formulacija pet funkcija cilja. Takođe, definisan je niz pretpostavki koje se moraju uvesti kako bi se adekvatno modelirao problem dinamičkog terminiranja tehnoloških procesa. Formulisana su sva neophodna ograničenja, koje je potrebno ispuniti kako bi se obezbedio validan reterminirani plan nastao usled različitih poremećaja koji se javljaju u tehnološkom okruženju.

Analizirani pristupi u rešavanju problema dinamičkog terminiranja podeljeni su u četiri kategorije: (i) multiagentni sistemi, (ii) evolucioni algoritmi, (iii) algoritmi bazirani na inteligenciji roja (iii) i (iv) hibridni pristupi. Neki od metaheurističkih algoritama koji se najčešće koriste za rešavanje problema dinamičkog terminiranja su simulirano žarenje (engl. *Simulated Annealing*), tabu pretraga (engl. *Tabu Search*), genetički algoritmi (engl. *Genetic Algorithms*), evolucioni algoritmi (engl. *Evolutionary Algorithms*), algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica (engl. *Particle Swarm Optimization*), algoritam inspirisan kolonijom mrava (engl. *Ant Colony Optimization*), algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova (engl. *Grey Wolf Optimizer*) i algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova (engl. *Whale Optimization Algorithm*).

U okviru realizovanog tehničkog rešenja [18], predložen je metod za generisanje planova terminiranja u okviru dinamičkog tehnološkog sistema na bazi genetičkih algoritama. Cilj tehničkog rešenja bio je da se obezbedi mogućnost izvršenja ponovnog terminiranja (reterminiranja) nakon pojave određenih poremećaja, uz ispunjenje optimizacionih kriterijuma. Razmatrani poremećaji predstavljaju dolazak novog dela u tehnološki sistem i otkaz obrade dela. Alternativni tehnološki procesi delova koji se terminiraju predstavljeni su AND/OR mrežama [19]. Funkcije cilja korišćene pri optimizaciji su minimalno vreme potrebno da se obrade svi delovi čije se terminiranje vrši i uravnoteženo iskorišćene mašina alatki. Takođe, prikazana je i detaljna procedura kodiranja hromozoma GA kojima su predstavljeni trenutni planovi terminiranja. Šest eksperimentalnih verifikacija, za različite funkcije cilja i skupove delova čije se dinamičko terminiranje vrši, sprovedeno je radi dokazivanja validnosti predloženog koncepta. Takođe, pri eksperimentalnoj verifikaciji uzet je u obzir i poremećaj koji podrazumeva da u okviru tehnološkog sistema više različitih novih delova dolazi istovremeno.

Višekriterijumska optimizacija primenjena u terminiranju mašina alatki i jednog mobilnog robota predstavljena je u radu [6]. Četiri metaheuristička algoritma višekriterijumske optimizacije predložena su za rešavanje ovog problema. Izvršeno je matematičko modeliranje problema, uz formiranje devet višekriterijumskih funkcija cilja relevantnih za tehnološko okruženje. Za algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova, predložene su tri nove strategije za selekciju dominantnih rešenja. Gantov dijagram obrade tri dela, sa specifičnim operacijama koje mobilni robot treba da izvrši, prikazan je na slici 2. Sposobnosti konvergencije i adekvatnog obuhvatanja celokupnog prostora rešenja predloženih algoritama analizirani su na osnovu četiri metrike. Inicijalno, izvršena je procedura podešavanja parametara optimizacionih algoritama. Na osnovu dve sprovedene eksperimentalne verifikacije, algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova pokazao je najbolje performanse za rešavanje ovog problema.



Slika 2. *Gantov dijagram sa karakterističnim vremenima i akcijama mobilnog robota* [6]

Primena algoritama baziranih na svim rešenjima u populaciji za višekriterijumsko terminiranje tehnoloških entiteta analizirana je u [20]. Genetički algoritam, algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova implementirani su za rešavanje ovog kombinatorno-optimizacionog problema. Pored kvantitativnih rezultata procesa optimizacije, predstavljeni su i kvalitativni u vidu Pareto fronta i Gantovog dijagrama. Eksperimentalna verifikacija ukazuje da algoritam inspirisan inteligencijom jata kitova poseduje optimalnu sposobnost konvergencije i adekvatnog obuhvatanja celokupnog prostora rešenja.

3. STEREO VIZUELNO UPRAVLJANJE INTELIGENTNIH MOBILNIH ROBOTA

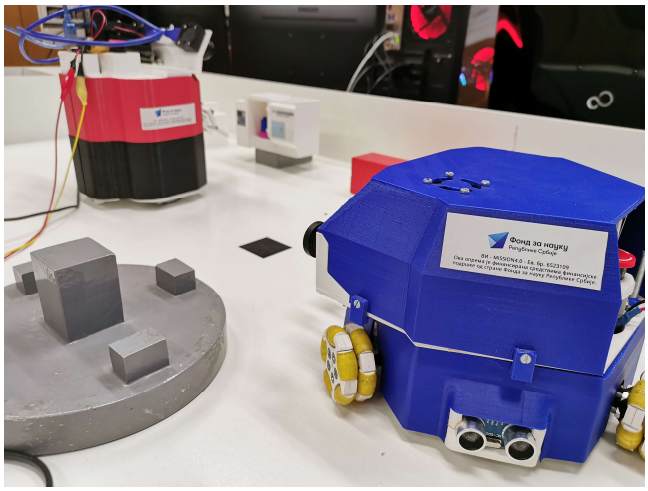
Vizuelno upravljanje (engl. *Visual servoing*) predstavlja metodologiju za upravljanje robotskih sistema na osnovu razlike podataka dobijenih od kamere u trenutnom i željenom položaju (tj. poziciji i orijentaciji) [21], [22]. Korišćenjem stereo vizuelnog sistema, moguće je oceniti udaljenost karakterističnih objekata, čime se dodatno unapređuje sistem vizuelnog upravljanja. Takođe, za razliku od tradicionalnih metoda vizuelnog upravljanja koji koriste karakteristične objekte kao što su tačke, linije ili kružnice na slici, moderni sistemi teže ka korišćenju kompleksnijih informacija za upravljanje. Kompleksnije informacije pružaju veću redundantnost podataka koji se koriste za upravljanje pa samim tim obezbeđuju i znatno veću robusnost pri upravljanju. Iz tog razloga, napredni sistemi vizuelnog upravljanja imaju značajno veću tačnost u odnosu na tradicionalne. U nastavku, biće analizirani radovi vezani za sisteme vizuelnog upravljanja koji koriste različite reprezentacije slika u cilju vizuelnog upravljanja.

Jedan od inicijalnih radova u oblasti vizuelnog upravlja gde se svi podaci sa slike koriste pri vizuelnom upravljanju je rad [23]. Autori modeliraju celokupan algoritam vizuelnog upravljanja kao optimizacioni proces, gde se minimizira razlika intenziteta osvetljenosti između korespondentnih piksela. Predloženi pristup karakteriše visoka tačnost finalnog položaja koji robot ostvaruje. Međutim, domen konvergencije ovakvog sistema poprilično je ograničen. Kako bi se povećao domen konvergencije, autori rada [24] predlažu korišćenje momenata intenziteta osvetljenosti piksela. Slike su podeljene u određeni broj regiona u okviru kojih su grupisani pikseli predstavljeni momentom intenziteta osvetljenosti. Predložena je metodologija na osnovu koje se računaju brzine robotskog sistema koje obezbeđuju minimizaciju razlike između momenata u okviru istih regiona na trenutnoj i ciljnoj slici. Predloženi sistem ima značajno veći domen konvergencija u odnosu na metod predložen u [23], međutim, tačnost ostvarenog položaja je na nižem nivou. Korišćenje različitih histograma generisanih na osnovu slike u cilju ostvarivanja vizuelnog upravljanja razmatrano je u radu [25]. Autor predlaže tri vrste histograma: (i) bazirane na intenzitetu RGB vrednosti piksela, (ii) bazirane na HS vrednosti piksela (na osnovu HSV modela boje) i (iii) histograme orijentisanih gradijenata (engl. *Histogram of Oriented Gradients* – HOG). Eksperimentalni rezultati predloženih metoda prikazuju da su HOG histogrami najrobusniji u okviru sistema vizuelnog upravljanja. Primena trifokalnog tenzora u okviru sistema vizuelnog upravljanja robotskih sistema analizirana je u radu [26]. Autori analiziraju mogućnost korišćena tri slike (trenutnu, referentnu i ciljnu) pri vizuelnom upravljanju. Predstavljeni sistem vizuelnog upravljanja omogućava ostvarivanje kraće trajektorije, dok celokupan sistem obezbeđuje robusnost na šum generisanja slika, greške u kalibraciji i greške u estimaciji položaja robota.

Za razliku od analiziranih pristupa, informacije koje se koriste u okviru algoritama za vizuelno upravljanje razvijenih u okviru projekta MISSION4.0 su semantičke mape. Semantičke mape dobijaju se kada se svakom pikselu na slici dodeli klasa objekta kojoj taj piksel pripada (slika 3). Na slici 3, različite klase prikazane su drugim bojama pa se može videti da su stolovi označeni crvenom bojom, pod svetlo žutom, stolice zelenom, dok su zidovi žuti itd. Korišćenje semantičkih mapa ima nekoliko prednosti u odnosu na korišćenje intenziteta osvetljenosti piksela: 1) semantičke mape ne zavise od šuma ili promene osvetljenja u okruženju, 2) semantičke mape predstavljaju intenzivnije nosače podataka jer pružaju informacije o realnim objektima u okruženju i 3) semantičke mape se mogu adekvatno generisati u simulaciji čime se otvara mogućnost za intenzivnim učenjem robotskih sistema. Brojna istraživanja posvećena su razvoju algoritama koji tačno mogu da izvrše semantičku segmentaciju (engl. *Semantic segmentation*) i da generišu semantičke mape.

Slika 3. *Primer semantičke segmentacije objekata u Laboratoriji ROBOTICS&AI*

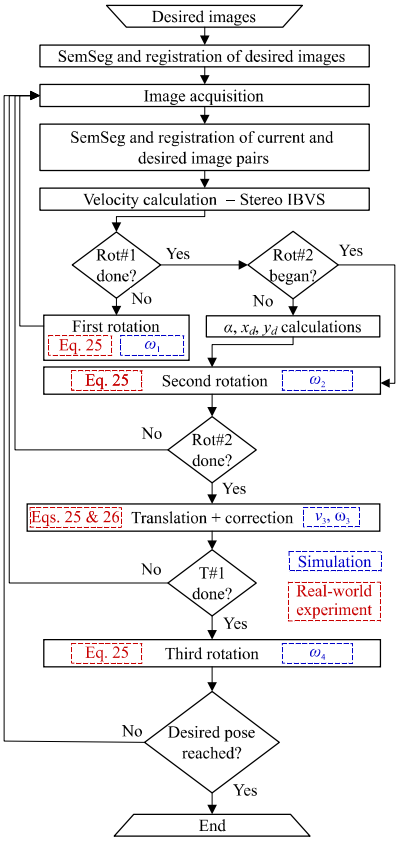
Trenutno stanje u oblasti istraživanja indikuje da duboko mašinsko učenje (engl. *Deep learning*) predstavlja tehniku koja ima najveći potencijal za generisanje semantičkih mapa. Takođe, efikasni modeli konvolucionih neuronskih mreža (engl. *Convolutional Neural Networks – CNNs*) imaju mogućnost generisanja semantičke mape u dovoljno kratkom vremenu, kako bi se kompletan proces mogao iskoristiti za upravljanje. Razvijeni algoritmi eksperimentalno su verifikovani korišćenjem robotskih sistema RAICO i DOMINO, u okviru laboratorijskog modela tehnološkog okruženja (slika 4). U nastavku, analizirani su radovi koji su proistekli iz projekta MISSION4.0, a direktno su vezani za razvoj sistema dubokog mašinskog učenja radi vizuelnog upravljanja na osnovu semantičke segmentacije.



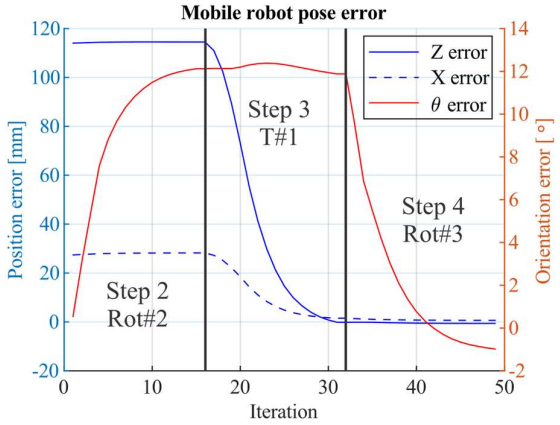
Slika 4. *Mobilni roboti RAICO (levo) i DOMINO (desno) u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja*

U radu [27] predstavljena je analiza primene biološki inspirisanih algoritama optimizacije radi registracije slika u okviru vizuelnog upravljanja mobilnih robota. Registracija slika predstavlja optimizacioni proces geometrijske transformacije prve slike sve dok se ona u potpunosti ne poklopi sa drugom slikom. U okviru ovog rada, slike generisane u trenutnom položaju registrovane su sa slikama generisanim u željenom položaju. Implementirana su tri biološki inspirisana algoritma: genetički algoritmi, algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova. Eksperimentalna verifikacija pokazala je da su genetički algoritmi optimalni za primenu u registraciji slika. Kako je analizirani rad nagrađen kao najbolji rad mladog istraživača na sesiji Robotika i fleksibilna automatizacija sedme međunarodne konferencije *The International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN*, ostvarena je mogućnost da uz proširenje rezultati budu objavljeni i u okviru časopisa [28]. U proširenoj verziji, tri nova napredna metaheuristička algoritma optimizacije implementirana za registraciju slika su algoritam zasnovan na inteligenciji jata jastrebova, algoritam zasnovan na inteligenciji jata kitova i algoritam zasnovan na načinu širenja plesni. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je algoritam zasnovan na načinu širenja plesni optimalan za proces registracije slika. Razvoj nove funkcije cilja adaptirane za registraciju semantičkih mapa predstavljen je u radu [29]. Pored standardne funkcije cilja koja se isključivo odnosi na tačnost, predložena funkcija cilja uključuje i uticaj netačno registrovanih piksela semantičke mape, broj piksela koji još uvek nisu adekvatno registrovani, kao i težinski odnos koji dodatno favorizuje registraciju određenih klasa. Eksperimentalna verifikacija pokazala je poboljšana svojstva registracije slika, kao i mogućnosti primene u realnom robotskom sistemu sa implementiram vizuelnim upravljanjem. Jedan od ishoda istraživanja na projektu MISSION4.0 je i skup podataka za semantičku segmentaciju [30]. Skup podataka sadrži preko 400 slika i semantičkih mapa generisanih u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja. Slike su generisane stereo vizuelnim sistemom mobilnog robota RAICO, koji se sastoji od dve *Basler acA1920-25uc* kamere sa *Fujinon DF6HA-1B* sočivima. Od ukupno pet definisanih klasa, četiri klase predstavljaju mašine alatke, a peta klasa predstavlja pozadinu. Razvoj sistema percepcije koji se bazira na dubokom mašinskom učenju inteligentnog mobilnog robota RAICO sa stereo vizuelnim sistemom upravljanja predložen je u referenci [31]. Potpuno povezana konvoluciona veštačka neuronska mreža (engl. *Fully convolutional network*) sa *ResNet* arhitekturom predložena je kao model dubokog mašinskog učenja za generisanje semantičkih mapa. Predloženi model ostvario je visoku globalnu tačnost semantičke segmentacije od 65,6%, kao i brzinu procesiranja od 11 slika u sekundi za celokupni stereo vizuelni sistem. Rad [31] nagrađen je kao najbolji rad mladog istraživača u okviru sesije Robotika i fleksibilna automatizacija osme međunarodne konferencije *The International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN*, čime je ostvarena mogućnost da se unapređena verzija rada objavi u časopisu [32]. Autori su predložili da dodatno povećaju tačnost sistema percepcije primenom tehnika augmentacije skupa reprezentativnih podataka za treniranje. Predložene su četiri grupe tehnika augmentacije: geometrijske transformacije slika, dodavanje šuma, manipulacija intenziteta piksela i ostale metode. Primenom sve četiri grupe, ukupna tačnost sistema percepcije povećana je za 6.2%, dok je grupa koja je imala najveći uticaj na povećanje bila grupa metoda dodavanja šuma.

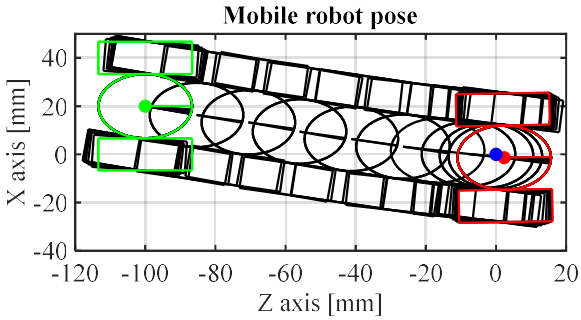
Korišćenjem metoda razvijenih u referencama [27-31] uspešno je razvijen stereo vizuelni sistem upravljanja baziran na semantičkoj segmentaciji, tj. na bazi semantičkih mapa [33]. Predloženi algoritam upravljanja sastoji se od četiri faze (slika 5). Svaka faza (engl. *step*) posvećena je jednom određenom kretanju koje mobilni robot treba da ostvari na osnovu vizuelnih informacija, kako bi na kraju kretanja ostvario željeni položaj. Predloženi sistem verifikovan je u 3D dinamičkoj simulaciji (greška upravljanja tokom iteracija može se uočiti na slici 6), kao i u realnom laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja (promena položaja robota prikazana je na slici 7). Na osnovu analize eksperimentalnih rezultata, potvrđuje se tačnost pozicioniranja mobilnog robota RAICO primenom predloženog sistema vizuelnog upravljanja. Takođe, prikazana je i mogućnost upravljanja realnog mobilnog robota na osnovu slika koje su generisane u simulaciji, što dodatno unapređuje fleksibilnost i primenjivost celokupnog sistema. Na kraju, prikazana je i mogućnost funkcionisanja sistema u uslovima kada je scena koju mobilni robot snima parcijalno zaklonjena dodatnim objektima.



Slika 5. *Algoritam za stereo vizuelno upravljanje* [33]



Slika 6. *Promena greške mobilnog robota kroz iteracije i etape* [33]



Slika 7. *Promena položaja mobilnog robota kroz iteracije* [33]

Naredni korak u ostvarivanju kognitivnih sposobnosti mobilnih robota ogleda se u razvoju sistema za odlučivanje [34], [35]. Odlučivanje na koordinacionom nivou ostvareno je primenom višekriterijumske optimizacije planova terminiranja mobilnog robota, dok je odlučivanje na izvršnom nivou ostvareno primenom konvolucionih neuronskih mreža na osnovu informacija dobijenih od stereo vizuelnog sistema. Izlaz višekriterijumske optimizacije predstavlja plan terminiranja na osnovu koga se generišu putanje koje mobilni robot treba da prati, a sve u cilju izvršavanja obrade skupa mašinskih delova. Sa druge strane, pored slika generisanih vizuelnim sistemom, dodatne podatke koji predstavljaju ulaz u sistem odlučivanja na izvršnom nivou predstavljao je vektor položaja mobilnog robota. Izlaz iz sistema za odlučivanje na izvršnom nivou predstavlja verovatnoća uspešnosti hvatanja mašinskog dela (slika 8).

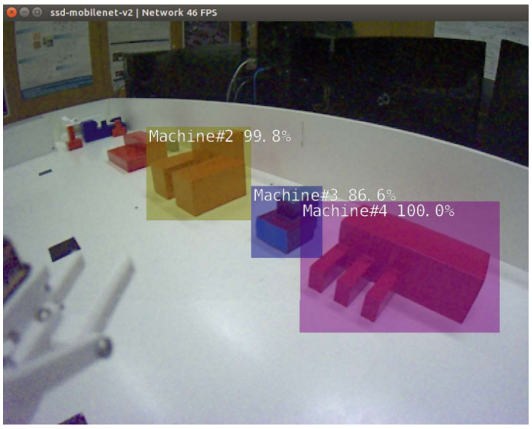
Slika 8. *Perspektiva mobilnog robota – verovatnoća uspešnosti hvatanja mašinskog dela* [35]

Proces hvatanja dela primenom sistema odlučivanja prikazan je na slici 9. Mogućnost primene sistema vizuelnog upravljanja na bazi dubokog mašinskog učenja u domenu servisnih robota razmatrana je u radu [36]. Sistem dubokog mašinskog učenja na bazi *DeepLabv3+* obučen je da generiše semantičke mape enterijera kancelarija i stanova. Eksperimentalni rezultati pokazuju znatan nivo obučenosti vizuelnog sistema, kao i mogućnost primene različitih metaheurističkih algoritama optimizacije u okviru sistema vizuelnog upravljanja. Analiza efikasnosti sistema dubokog mašinskog učenja primenjenog u okviru robotskog sistema RAICO izvršena je u radu [37]. Različiti tipovi konvolucionih slojeva implementirani su kako bi se ostvario optimalan odnos brzine procesiranja i tačnosti CNN mreže. Ukupno 24 CNN mreže obučene su za zadatak semantičke segmentacije. Optimalna mreža ostvarila je tačnost od 83,6%, a visok nivo efikasnosti potvrđen je ostvarivanjem brzine procesiranja od 42,6 FPS. Optimalna mreža implementirana je u okviru mobilnog robotskog sistema RAICO, a primenjena je za problem izbegavanja prepreka.

Slika 9. *Mobilni robot RAICO tokom manipulacije mašinskog dela sa modela mašine alatke* [34]

4. PRIMENA TEHNIKA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U OSTVARIVANJU KONCEPTA INDUSTRIJE 4.0

Primena simulacionog softvera AnyLogic radi kreiranja digitalnog blizanca realnog tehnološkog sistema razmatrana je u radovima [38], [39]. Kreirani modeli zasnovani su na statičkoj i dinamičkoj postavci. Dinamički model pruža veću fleksibilnost primene u odnosu na statički, ali je zato kompleksniji za razvoj kod kompleksnih tehnoloških sistema. Fleksibilnost dinamičkog modela ogleda se u mogućnosti modifikacije broja mašina, robota ili bilo kojih drugih tehnoloških entiteta u okruženju na osnovu trenutnog stanja sistema, dobijenog na osnovu pametnih senzora i aktuatora. Eksperimentalna verifikacija ukazuje na mogućnost kreiranja realnog digitalnog blizanca na osnovu obe postavke modela. U okviru rada [40] prikazana je mogućnost inteligentnog upravljanja motora jednosmerne struje, uz detaljno matematičko modeliranje realnog sistema. Veštačke neuronske mreže, kao univerzalni aproksimator, primenjene su radi obezbeđivanja željenog odziva sistema pri različitim ulaznim pobudama. Na osnovu simulacije i realnih eksperimenata, zaključeno je da je inteligentno upravljanje ostvareno sa zadovoljavajućom tačnošću. Razvoj mobilnog robotskog sistema, u okviru Laboratorije za industrijsku robotiku i veštačku inteligenciju, nazvanog DOMINO (engl. *Deep learning-based Omnidirectional Mobile robot with INtelligent cOntrol*), čiji se pogonski sistem zasniva na korišćenju omnidirekcionih točkova prikazan je u radu [41]. Predstavljeni su detalji vezani za izradu mehaničke strukture robota, mehanizma za hvatanje, integraciju stereo vizuelnog sistema, senzora udaljenosti, kao i upravljačke jedinice na bazi računarske platforme *Raspberry Pi 4*. Takođe, prikazan je razvoj modela kretanja na osnovu brzina (engl. *velocity-based motion model*). Na kraju, eksperimentalno je demonstrirana mogućnost mobilnog robota DOMINO da izbegne koliziju i da detektuje prepreke na definisanoj putanji kretanja. Detaljan opis softversko-hardverske integracije sistema percepcije mobilnog robota na bazi dubokog učenja pri detekciji objekata u okruženju prikazan je u radovima [42], [43]. Hardverski deo sistema percepcije podrazumeva odabir upravljačke jedinice, detaljno podešavanje parametara kamera i selekciju sočiva. Analizirane kompjuterske platforme su *Nvidia Jetson Nano* i *Raspberry Pi 4*. Odabrana upravljačka jedinica je *Nvidia Jetson Nano*, primarno zbog grafičke kartice koja omogućava primenu modela dubokog učenja u realnom vremenu.



Slika 10. *Detekcija objekata u okruženju*

Odabrano je sočivo koje obezbeđuje uže vidno polje kamere uz manju distorziju generisanih slika. Zatim, izvršeno je obučavanje modela dubokog mašinskog učenja na osnovu SDD arhitekture, koji ima mogućnost da u realnom vremenu detektuje objekte (slika 10). Ostvarena tačnost detekcije iznosi 91.85%, dok je prosečno vreme izvršavanja celokupne akvizicije i obrade slike za jednu kameru iznosilo 40 FPSa. Tri različite funkcije cilja, kao i tri različita metaheuristička algoritma na bazi jedinstvenog rešenja, predložena su u okviru sistema vizuelnog upravljanja predstavljenog u radu [44]. Globalna tačnost, zajedničke informacije i mIOU (engl. *mean Intersection over Union*) su tri

predložene funkcije cilja, dok su implementirani algoritmi simuliranog žarenja, gradijentni postupak i 1+1 evolucioni algoritam. Prvenstveno, izvršena je *offline* analiza funkcija cilja, a kao najbolja pokazala se funkcija cilja bazirana na zajedničkim informacijama. Zatim, izvršen je eksperiment vizuelnog upravljanja sa sva tri predložena algoritma i zaključeno je da 1+1 evolucioni algoritam poseduje najbolje optimizacione karakteristike za ovaj tip problema. Primena modela dubokog mašinskog učenja za detekciju radi poboljšanja stereo vizuelnog upravljanja analizirana je u radu [45]. *R-CNN* model konvolucionih neuronskih mreža korišćen je za prepoznavanje mašina alatki u laboratorijskom modelu tehnološkog okruženja. Zatim je izlaz iz CNN-a (region modela mašina alatki) korišćen za detekciju karakterističnih objekata u istom regionu na trenutnoj i željenoj slici. Ova metodologija znatno je povećala robusnost detekcije i uparivanja karakterističnih objekata, a samim tim i celokupanog procesa stereo vizuelnog upravljanja. Eksperimentalna verifikacija u 3D simulaciji i na realnom robotskom sistemu DOMINO potvrdila je tačnost ostvarivanja položaja primenom predloženog algoritma vizuelnog upravljanja.

Kooperacija heterogenih mobilnih robotskih sistema na bazi informacija dobijenih algoritmom dubokog mašinskog učenja za detekciju i praćenje objekata predložena je u radu [46]. Detekcija i praćenje objekata izvršeno je primenom dubokog mašinskog učenja, tj. *YOLOv5* konvolucione neuronske mreže, dok je prosečna tačnost detekcije sedam različitih mašina alatki iznosila 95.3%. Eksperimentalna verifikacija podrazumevala je da su trajektorije oba robota usvojene tako da omogućavaju potencijalnu koliziju. Međutim, kada mobilni robot DOMINO detektuje robot RAICO, zaustavlja se, a zatim u zavisnosti od pozicije detektovanog robota na slici izvršava određene akcije kako bi izbegao koliziju. Primena veštačkih neuronskih mreža u okviru sistema za ocenu položaja robota na bazi ultra širokopojasne radio tehnologije (engl. *Ultra Wide Band* - UWB) razmatra se u okviru rada [47]. Veštačke neuronske mreže primenjuju se za poboljšanje sistema za kalibraciju ocenjenih pozicija emitera radio talasa na bazi ABPE (engl. *Apparent Beacon Position Estimation*) metodologije. Pored povećanja tačnosti, dodatna pogodnost primene veštačkih neuronskih mreža je i u mogućnosti korišćenja izrazito malog broj merenja (pet merenja) kako bi se izvršila predikcija položaja visokog nivoa tačnosti. Optimizacija parametara P/PI kaskadnih upravljačkih sistema CNC mašina alatki razmatrana je u okviru rada [48]. Izvršeno je simultano podešavanje pozicionog P parametra u spoljašnjoj petlji i PI brzinskih parametara unutrašnje petlje kontrolera. Dva metaheuristička algoritma (algoritam inspirisan inteligencijom roja čestica i algoritam inspirisan inteligencijom čopora vukova) poređena su sa standardnom industrijom metodom za podešavanje parametara upravljačkih sistema u okviru tri metrike. Oba predložena metaheuristička algoritma ostvaruju poboljšanje predloženog sistema i do 60% u pogledu smanjenja maksimalne greške ostvarene trajektorije.

U naučnom radu [49] prikazan je koncepcijski razvoj komercijalno najzastupljenijeg tipa malih bespilotnih letelica - kvadkoptera. Njegove prednosti poput jednostavne mehanike leta, jednostavnosti upravljačkog sistema, manjih dimenzija u poređenju sa drugim tipovima letelica detaljno su objašnjene u ovom radu. Takođe, pokazano je da, u opštem slučaju, vučna sila zavisi od brzine letelice i njenog napadnog ugla, ali i od blizine zemlje. Ono što ovaj tip letelica izdvaja od drugih jeste suprotan smer obrtanja rotora, što za posledicu ima samokompenzovanje reaktivnog momenta nastalog usled obrtanja rotora u vazduhu, ali i značajnoj umanjivanje giroskopskog efekata i mahanja lopatica. Osim navedenog, u radu je predstavljen i glavni razlog nepostojanja repnog rotora kod ovog tipa letelica. Na samom kraju, dato je matematičko modeliranje kvadkoptera sa usvojenom jednom ravni simetrije. Razvoj novog inteligentnog upravljanja mobilnog robota-letelice prikazan je u radu [50]. U okviru rada, predložen je pristup za rešavanje upravljačkog sistema koji ostvaruje autonomnu navigaciju mobilnog robota-letelice pri čišćenju gabaritnih staklenih površina eksterijera visokih zgrada. Upravljački problem može se prikazati kroz sledeće faze: (1) mobilni robot-letelica postavljen je u proizvoljni položaj u blizini objekta (zgrade koju je potrebno očistiti), (2) aktivira se sistem za detekciju u cilju prepoznavanja i praćenja karakterističnih objekta, (3) određuje se leva i desna ivica zgrade na osnovu osrednjenih vrednosti koordinata regiona u kome se nalazi objekat, međusobno rastojanje između leve i desne ivice (širina zgrade), a zatim ocenjuje udaljenost mobilnog robota-letelice od objekta, (4) tokom prilaska mobilnog robota-letelice zgradi, potrebno je izbeći prepreke (automobili, drveće, ulične svetiljke i sl.) primenom tehnika mašinskog učenja ojačavanjem, (5) određuju se položaji koji definišu granice objekta u horizontalnoj ravni, (6) izvršava se semantička segmentacija staklenih površina sa krajnjim ciljem dobijanja 3D mape staklenih površina, (7) definiše se plan kretanja mobilnog robota-letelice na osnovu inicijalno utvrđenih prioriteta. Da bi se prethodno navedene faze uspešno ostvarile, u radu je predstavljena originalna metodologija za ocenu (estimaciju) udaljenosti objekta proizvoljne početne orijentacije u odnosu na mobilni robot-letelicu, kao i novi algoritam mašinskog učenja ojačavanjem baziran na Q-mašinskom učenju. Radi ostvarivanja visoke tačnosti ocene udaljenosti objekata, neophodno je prvo razviti dovoljno pouzdan sistem za detekciju objekata. Kako modeli dubokog učenja razvijeni poslednjih godina mogu da generišu sve tačnije predikcije i procesiraju podatke u realnom vremenu, u ovom radu korišćen je model konvolucione neuronske

mreže baziran na *Tiny YOLOv2* arhitekturi. U tu svrhu, kreiran je skup podataka od 679 obučavajućih parova koje su autori rada generisali u okviru simulacionog okruženja *Unreal Engine*. Eksperimentalni rezultati za više različitih testova dobijenih korišćenjem modela kreiranog u *Simulink* okruženju pokazali su primenljivost predložene metodologije. Ističe se da je ovo jedan od retkih radova u svetu koji koristi sistem za odlučivanje o narednim akcijama mobilnog robota-letelice u okviru *Simulink* okruženja u kombinaciji sa 3D scenom kreiranom u *Unreal Engine*-u. U referenci [51], prikazan je pristup zasnovan na mašinskom učenju ojačavanjem sa krajnjim ciljem ostvarivanja autonomnog kretanja mobilnog robota-letelice u prepoznatom radnom prostoru - okruženju. Kako navedeni problem zahteva visok stepen prilagodljivosti, kao i sposobnost permanentnog učenja inteligentnog agenta tokom vremena, primenjena je jedna od najzastupljenijih tehnika mašinskog učenja ojačavanjem – mašinsko Q-učenje za realizaciju zadataka simultane lokalizacije i navigacije. Cilj ove metodologije je da, na bazi informacija o početnom i ciljnom položaju, a uz prethodno usvajanje određenih pretpostavki, inteligentni agent nauči optimalnu putanju kretanja. Treniranje, odnosno obučavanje inteligentnog agenta, izvršeno je primenom softverskog paketa *Python*, dok je animacija realizovana u okviru *ROS-Gazebo* okruženja. Rezultati su pokazali da se primenjenom metodom inteligenti agent može uspešno obučiti da ostvari ciljni položaj, uz minimalan broj realizovanih iterativnih koraka mašinskog učenja.

Sistematično prikazani naučno-istraživači rezultati drugog i trećeg radnog paketa projekta MISSION4.0 prikazani su u Tabeli 1. Rezultati su predstavljeni na osnovu Pravilnika o sticanju istraživačkih i naučnih zvanja od decembra 2020. godine[3]. Kvantitativni pokazatelji aktivnosti promocije i diseminacije naučnih rezultata široj nenaučnoj javnosti mogu se pronaći na sajtu projekta[4].

Tabela 1. Objavljeni naučni rezultati drugog i trećeg radnog paketa projekta MISSION4.0

Redni broj	Vrsta rezultata	Reference	Broj rezultata	Bodovi
1.	M13	[29], [37], [39], [41], [43], [44], [45], [49], [50]	9	63
2.	M14	[36]	1	4
3.	M21a	[6], [33]	2	20
4.	M21	[47]	1	8
5.	M31	[48]	1	3,5
6.	M33	[20], [27], [31], [35], [46], [51]	6	6
7.	M51	[17]	1	2
8.	M52	[28], [32]	2	3
9.	M63	[38], [40]	2	1
10.	M85	[42], [18], [34]	3	6
11.	Skupovi podataka	[30], [19]	2	/
		Σ	**30**	**116,5**

5. ZAKLJUČAK

U okviru rada sistematično su predstavljeni ključni naučno istraživački rezultati proistekli iz dva radna paketa projekta *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0* - MISSION4.0. Ostvareni rezultati grupisani su u tri kategorije: višekriterijumska optimizacija pri dinamičkom termininranju fleksibilnih tehnoloških procesa, stereo vizuelno upravljanje inteligentnih mobilnih robota i primena tehnika veštačke inteligenciju u ostvarivanju koncepta Industrije 4.0. U okviru ostvarenih naučno istraživačkih rezultata vezanih za dinamičko višekriterijumsko termininranje tehnoloških procesa, predstavljeno je detaljno matematičko modeliranje problema. Zatim, predstavljena je razvijena metodologija za problem termininranja na osnovu metaheurističkih algoritama optimizacije od kojih je GWO algoritam pokazao najbolje performanse. Istraživanja vezana za stereo vizuelno upravljanje mobilnih robotskih sistema bila su fokusirana na primenu tehnika dubokog mašinskog učenja, tj. konvolucionih neuronskih mreža radi obezbeđivanja adekvatnih informacija sistemu percepcije mobilnog robota. Na osnovu informacija generisanih od strane sistema percepcije, razvijen je sistem za stereo vizuelno upravljanje mobilnih robota. Na kraju, predložen je sistem za odlučivanje mobilnih robotskih sistema na bazi konvolucionih neuronskih mreža, čijom primenom je moguće oceniti sigurnost hvatanja mašinskog dela. U okviru rezultata vezanih za primenu tehnika veštačke inteligencije u ostvarivanju koncepta Industrije 4.0, fokus je bio na razvoju CNN modela za rešavanje različitih zadataka mašinskog

[3] http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/ministarstva/pravilnik/2020/159/18/reg
[4] http://mission4-0.mas.bg.ac.rs/

gledanja, na primeni mašinskog učenja ojačavanjem za različite zadatke autonomne navigacije mobilnih robota, kao i na primeni algoritama optimizacije u procesima potrebnim za vizuelno upravljanje.

Sve aktivnosti projekta MISSION4.0 vezane za drugi i treći radni paket, koje su definisane predlogom projekta, veoma su uspešno realizovane, a svi predloženi ambiciozni ciljevi ostvareni su sa značajno više naučno-istraživačkih rezultata nego što je inicijalno predviđeno.

6. LITERATURA

[1] Kundakcı, N., Kulak, O., *Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 96, pp. 31–51, 2016.

[2] Petrović, M., *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, 2016.

[3] Zhang, S., Wong, T. N., *Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: a hybrid MAS/ACO approach*, International Journal of Production Research, Vol. 55, No. 11, pp. 3173–3196, 2017.

[4] Liu, Y., Wang, L., Wang, Y., Wang, X. V., Zhang, L., *Multi-agent-based scheduling in cloud manufacturing with dynamic task arrivals*, Procedia Cirp, Vol. 72, pp. 953–960, 2018.

[5] Petrović, M., Miljković, Z., Jokić, A., *A novel methodology for optimal single mobile robot scheduling using whale optimization algorithm*, Applied Soft Computing, Vol. 81, p. 105520, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105520.

[6] Petrović, M., Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z., *Multi-Objective Scheduling of Single Mobile Robot Based on Grey Wolf Optimization Algorithm*, SSRN, 2022, [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4058009

[7] Lin, S.-C., Goodman, E. D., Punch III, W. F., *A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem.*, ICGA, pp. 481–488, 1997.

[8] Chen, K. J., Ji, P., *A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval*, Expert systems with Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1004–1010, 2007.

[9] Al-Hinai, N., ElMekkawy, T. Y., *Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm*, International Journal of Production Economics, Vol. 132, No. 2, pp. 279–291, 2011.

[10] 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, No. 3, pp. 279–296, 2018.

[11] Sreekara Reddy, M. B. S., Ratnam, C., Rajyalakshmi, G., Manupati, V. K., *An effective hybrid multi objective evolutionary algorithm for solving real time event in flexible job shop scheduling problem*, Measurement, Vol. 114, pp. 78–90, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.022.

[12] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., *Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 59, pp. 143–157, 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.04.006.

[13] Jin, L., Zhang, C., Fei, X., *Realizing energy savings in integrated process planning and scheduling*, Processes, Vol. 7, No. 3, p. 120, 2019, doi: 10.3390/pr7030120.

[14] Wen, X., Li, X., Gao, L., Wang, K., Li, H., *Modified honey bees mating optimization algorithm for multi-objective uncertain integrated process planning and scheduling problem*, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1177/1729881420925236.

[15] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A., *Grey Wolf Optimizer*, Advances in Engineering Software, Vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

[16] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., Gandomi, A. H., *The arithmetic optimization algorithm*, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 376, p. 113609, 2021.

[17] Miljković, K., Petrović, M., *Integrisano planiranje i termininiranje tehnoloških procesa u dinamičkim uslovima – pregled stanja u oblasti istraživanja*, Tehnika, Vol. 69, No. 6, pp. 733–746, 2020.

[18] Miljković, K., Petrović, M., Babić, B., *Dinamičko integrisano planiranje i termininiranje tehnoloških procesa bazirano na genetičkim algoritmima*, Tehničko rešenje, 2021.

[19] Miljković, K., Petrović, M., *Dataset of alternative process plan networks for dynamic integrated process planning and scheduling (Version 0.1.0) [Data set]*, *Zenodo*, 2020.

[20] Petrović, M., Jokić, A., Miljković, Z., Kulesza, Z., *Multi-Objective Population-based Optimization Algorithms for Scheduling of Manufacturing Entities*, The International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR2022), pp. 403–407, 2022.

[21] Chaumette, F., Hutchinson, S., *Visual servo control. I. Basic approaches*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82–90, 2006, doi: 10.1109/MRA.2006.250573.
[22] Chaumette, F., Hutchinson, S., *Visual servo control. II. Advanced approaches [Tutorial]*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 109–118, 2007, doi: 10.1109/MRA.2007.339609.
[23] Collewet, C., Marchand, E., *Photometric Visual Servoing*, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27, No. 4, pp. 828–834, Aug. 2011, doi: 10.1109/TRO.2011.2112593.
[24] Bakthavatchalam, M., Chaumette, F., Marchand, E., *Photometric moments: New promising candidates for visual servoing*, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5241–5246, 2013. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631326.
[25] Bateux, Q., Marchand, E., *Histograms-Based Visual Servoing*, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 1, pp. 80–87, Jan. 2017, doi: 10.1109/LRA.2016.2535961.
[26] Zhang, K., Chaumette, F., Chen, J., *Trifocal tensor-based 6-DOF visual servoing*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 38, No. 10–11, pp. 1208–1228, 2019.
[27] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Biologically Inspired Optimization Methods for Image Registration in Visual Servoing of a Mobile Robot*, 7th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2020), pp. 715–720, 2020.
[28] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Slavković, N., Miljković, Z., *Application of Metaheuristic Optimization Algorithms for Image Registration in Mobile Robot Visual Control*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 155–170, 2021.
[29] Jokić, A., Petrović, M., Kulesza, Z., Miljković, Z., *Visual Deep Learning-based Mobile Robot Control: A Novel Weighted Fitness Function-based Image Registration Model*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp. 744–752.
[30] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Dataset for semantic segmentation of the laboratory model of manufacturing environment (Version 0.1.0) [Data set]*, *Zenodo*, 2020.
[31] Jokić, A., Đokić, L., Petrović, M., Miljković, Z., *A Mobile Robot Visual Perception System based on Deep Learning Approach*, 8th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2021), pp. 568–572, 2021.
[32] Jokić, A., Đokić, L., Petrović, M., Miljković, Z., *Data Augmentation Methods for Semantic Segmentation-based Mobile Robot Perception System*, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 19, No. 3, in press, 2022.
[33] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Semantic segmentation based stereo visual servoing of nonholonomic mobile robot in intelligent manufacturing environment*, Expert Systems with Applications, Vol. 190, p. 116203, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2021.116203.
[34] Petrović, M., Jokić, A., Babić, B., *Višekriterijumsko odlučivanje inteligentnog mobilnog robota na bazi metoda metaheurističke optimizacije i dubokog mašinskog učenja*, Tehničko rešenje, 2022.
[35] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Mobile robot decision-making system based on deep machine learning*, 9th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering (IcETRAN 2022), pp. 653–656, 2022.
[36] Petrović, M., Jokić, A., Kulesza, Z., Miljković, Z., *Deep learning of mobile service robots*, Book Service robots – Advances in Research and Applications, Nova Science Publishers, New York, 2021, pp. 77–97.
[37] Petrović, M., Miljković, Z., Jokić, A., *Efficient Machine Learning of Mobile Robotic Systems based on Convolutional Neural Networks*, Artificial intelligence for Robotics and Autonomous Systems. Studies in Computational Intelligence, A. Koubaa and A. T. Azar, Eds. Springer, submitted in July 2022.
[38] Babić, B., Višic, J., Đermanović, A., *Digitalni blizanci u pametnoj proizvodnji i industriji 4.0*, 42. JUPITER konferencija, pp. 1.1-1.11, 2020.
[39] Babić, B., *Digital twins in smart manufacturing*, Soft Computing in Smart Manufacturing: Solutions toward Industry 5.0. Series Advanced Mechanical Engineering, T. Sibalija and P. Davim, Eds. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021, pp. 113–134.
[40] Miljković, K., Petrović, M., Jovanović, R., *Prilog razvoju inteligentnog upravljanja servo motora jednosmerne struje primenom veštačkih neuronskih mreža*, 42. JUPITER konferencija, pp. 4.24-4.35, 2020.
[41] Đokić, L., Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Design and development of a holonomic mobile robot for material handling and transportation tasks*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp.

709–716.
[42] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., *Stereo vizuelni sistem percepcije mobilnog robota baziran na dubokom mašinskom učenju*, Tehničko rešenje, 2021.
[43] Jokić, A., Petrović, M., Miljković, Z., *Real-time Mobile Robot Perception based on Deep Learning Detection Model*, New Technologies, Development and Application V (NT 2022). Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham, 2022, pp. 670–677.
[44] Miljković, Z., Jokić, A., Petrović, M., *Image Registration Algorithm for Deep Learning-Based Stereo Visual Control of Mobile Robots*, Deep Learning for Unmanned Systems. Studies in Computational Intelligence, A. Koubaa and A. T. Azar, Eds. Springer, Cham, 2021, pp. 447–479.
[45] Miljković, Z., Đokić, L., Petrović, M., *Application of convolutional neural networks for visual control of intelligent robotic systems*, Soft Computing in Smart Manufacturing: Solutions toward Industry 5.0. Series Advanced Mechanical Engineering, T. Sibalija and P. Davim, Eds. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2021, pp. 83–112.
[46] Miljković, Z., Đokić, L., Petrović, M., *Object detection and tracking in cooperative multi-robot transportation*, 38th International Conference on Production Engineering (ICPE-S 2021), pp. 137–143, 2021.
[47] Petrović, M., Ciężkowski, M., Romaniuk, S., Wolniakowski, A., Miljković, Z., *A novel hybrid NN-ABPE-based calibration method for improving accuracy of lateration positioning system*, Sensors, Vol. 21, No. 24, p. 8204, 2021, doi: 10.3390/s21248204.
[48] Miljković, Z., Petrović, M., *A Survey of Swarm Intelligence-based Optimization Algorithms for Tuning of Cascade Control Systems: Concepts, Models and Applications*, 5th International Conference "Mechanical Engineering in the 21st Century" (MASING 2020), pp. 3–8, 2020.
[49] Jevtić, Đ., Svorcan, J., Radulović, R., *Flight Mechanics, Aerodynamics and Modelling of Quadrotor*, New Technologies, Development and Application IV (NT 2021). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, Ed. Springer, Cham, 2021, pp. 681–689.
[50] Miljković, Z., Jevtić, Đ., *Object Detection and Reinforcement Learning Approach for Intelligent Control of UAV*, New Technologies, Development and Application V (NT 2022). Lecture Notes in Networks and Systems, I. Karabegović, A. Kovačević, and S. Mandžuka, Eds. Springer, Cham, 2022, pp. 659–669.
[51] Miljković, Z., Jevtić, Đ., Svorcan, J., *Reinforcement learning approach for autonomous UAV navigation in 3D space*, 14th International Scientific Conference MMA 2021 – Flexible Technologies, pp. 189–192, 2021.

Intelligent stereo-visual mobile robot control and optimal process planning and scheduling – overview of research results within the project MISSION4.0

Abstract: *The project MISSION4.0 was focused on developing intelligent stereo-visual control of mobile robots and optimal process planning and scheduling based on artificial intelligence techniques. Particularly, project team members developed novel convolutional neural networks and biologically inspired optimization algorithms. During two years of intensive scientific research, a new methodology was developed for autonomous navigation and intelligent control of own developed mobile robots RAICO and DOMINO. One of the important goals was to generate an optimal scheduling plan within a manufacturing environment, in which intelligent internal transport is executed using mobile robots. In this paper, we present an overview of some of the key research results of the MISSION4.0 project, such as publications in leading international and national scientific journals, publication of chapters in scientific monographs, scientific papers published in the proceedings of prestigious regional and international conferences, results achieved within verified technical solutions, as well as through the publication of open access data sets.*
Key words: *intelligent mobile robot control, stereo vision, convolutional neural networks, process planning and scheduling, biologically inspired optimization algorithms*

Јовановић, Р., Бугарић У., Весовић, М., Перишић Н. [1)]

ФАЗИ И НЕЛИНЕАРНО УПРАВЉАЊЕ ЗАХВАТНОГ МЕХАНИЗМА И МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ ПРОЈЕКТА MISSION4.0 [2)]

Резиме

Рад на пројекту Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION4.0 је у оквиру једног од радних пакета подразумевао истраживање у области нелинеарних проблема оптимизације и управљања кретања захватног механизама у присуству ограничења. У циљу постизања задате путање врха захватног механизма, пројектовани су управљачки системи засновани на фази логици у управљању, чији параметри су оптимизовани применом различитих метахеуристичких метода оптимизације. Примена предложених техника управљања приказана је на примеру захватног механизма аутономног мобилног робота. Други део истраживања односио се на управљање брзине и позиције мотора једносмерене струје, као главног покретача захватног механизма, где су примењене различите технике управљања: фази управљање, техника feedback линеаризације, као и њихове оптимизоване верзије различитим метахеуристичким алгоритмима. У овом раду даје се преглед једног дела резултата пројекта MISSION4.0, објављених у различитим међународним и националним часописима и конференцијама, као и преглед резултата приказаних у техничком решењу.

Кључне речи: захватни механизам, мотор једносмерне струје, трапезоидни и полиномијални профил брзине, фази управљање и feedback линеаризација, метахеуристички алгоритми оптимизације

1. УВОД

Роботи имају важну улогу у тренутној производној индустрији. Наиме, суштинска карактеристика Индустрије 4.0 су аутономне производне методе које извршавају роботи и који те задатке могу да извршавају интелигентно, са фокусом на сигурност, флексибилност, разноликост и међусобну сарадњу [1]. После много деценија истраживања, пројектовање и синтеза управљања за роботске системе је још увек савремена и актуелна област истраживања. Потешкоће у управљању робота последица су њихове нелинеарне и комплексне природе, постојања немоделоване динамике, поремећаја и неодређености параметара [2]. Стога, много различитих линеарних и нелинеарних техника се користи за управљање кретања, односно праћење задате путање у роботским системима: традиционалне методе управљања (пропорционално-интегрално-диференцијално (ПИД) управљање и његове варијанте), адаптивно управљање, робусно управљање, управљање у клизном режиму, оптимално управљање, фази управљање, комбинација претходних и многих других техника. ПИД алгоритми управљања су засигурно најраспрострањенија стратегија управљања у индустрији, уопштено, (па и у роботским системима) због своје једноставне структуре и робусних перформанси у широком спектру радних

[1)] Проф. др Радиша Јовановић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (rjovanovic@mas.bg.ac.rs), проф. др Угљеша Бугарић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (ubugaric@mas.bg.ac.rs), Митра Весовић, MSc, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, (mvesovic@mas.bg.ac.rs), Наталија Перишић, MSc, истраживач приправник, Универзитет у Београду, Машински факултет, (nperisic@mas.bg.ac.rs).

[2)] У овом раду, саопштава се преглед дела резултата истраживања остварених у оквиру научног пројекта MISSION4.0, ев. број: 6523109, који је финансијски подржан од Фонда за науку Републике Србије, као и потпројекта Машинског факултета у Београду, ев. број: 451-03-68/2022-14/200105, финансијски подржаног од Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије.

услова.

Иако ПИД управљање представља најједноставније и ефикасно решење многих проблема, оптимално подешавање параметара је прилично тешко. Као алтернатива, може се користити фази управљање, чија је једна од важних карактеристика да није неопходно познавати модел објекта за синтезу управљања, као и робусност. Једна од нелинеарних техника управљања се добија увођењем нелинеарног закона управљања методом тзв. feedback линеаризације, којом се нелинеарни систем алгебарски трансформише у делимично или потпуно линеарни, тако да се могу применити познате линеарне технике управљања.

Побољшање перформанси ПИД управљања у погледу тачности управљања и брзине конвергенције може се постићи различитим поступцима оптимизације, а у односу на изабрану функцију циља. У ту сврху све више се користе метахеуристички алгоритми оптимизације, и то не само за оптимизацију ПИД управљања, већ и за оптимизацију фази контролера, а многи од њих се могу користити за неконвексне, нелинеарне и мултимодалне проблеме оптимизације у присуству линеарних или нелинеарних ограничења, у виду глобалних алгоритама за оптимизацију.

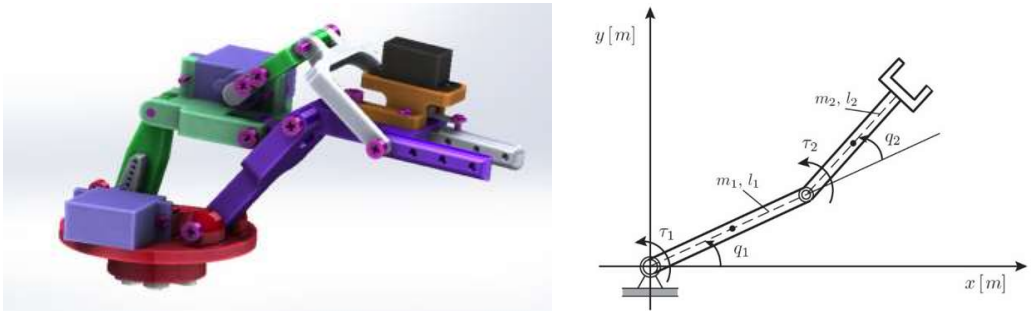
Оптимално кретање захватног механизма мобилног робота, као и управљање брзине и позиције мотора једносмерне струје (краће: DC мотор), били су тема истраживања у оквиру једног од радних пакета пројекта *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION4.0,* и овај рад представља преглед реултата поменутих истраживања. Неке од претходно наведених техника управљања су управо искоришћене за остваривање постављених задатака, кроз директну примену, модификацију и развој нових алгоритама и метода.

2. ОПТИМАЛНО КРЕТАЊЕ ЗАХВАТНОГ МЕХАНИЗМА

Проблем оптималног кретања захватног механизма (његовог врха) спада у категорију нелинеарних проблема оптимизације у присуству ограничења. У циљу његовог решавања, неопходно је било урадити следеће: математички моделовати динамичко понашање захватног механизма мобилног робота; одредити оптималну трајекторију, односно профил брзине кретања захватног механизма; пројектовати управљачки систем који омогућава праћење задате, оптималне трајекторије, и оптимизовати параметре управљачког система у циљу остваривања што је могуће мање грешке праћења.

2.1 Опис и математички модел захватног механизма

На слици 1а приказан је стварни објект – захватни механизам мобилног робота *RAICO*, који је у потпуности развијен у Лабораторији за индустријску роботику и вештачку интелигенцију Машинског факултета Универзитета у Београду.



Слика 1. *а) Захватни механизам, б) шематски приказ захватног механизма*

Његов шематски приказ дат је на слици 1б, где q_i, l_i и m_i представљају угао, дужину и масу i- тог сегмента, следствено, за i=1,2. Математички модел кретања посматраног захватног механизма, не узимајући трење и поремећаје, је облика:

$$M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + G(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}, \tag{1}$$

где су $\boldsymbol{q}$, $\dot{\boldsymbol{q}}$ и $\ddot{\boldsymbol{q}} \in \mathbb{R}^{2x1}$ вектори позиције, брзине и убрзања. Улазни вектор момента означен је са $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{2x1}$

, а $M(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{2x2}$, $C(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^{2x2}$ i $G(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{2x1}$ су позитивно одређена матрица инерције, матрица центрипеталних и Кориолисових сила, као и гравитациони вектор, следствено. У случају посматраног захватног механизма, $\boldsymbol{q}$ је вектор угаоних помераја q_1 и q_2, $\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 \end{bmatrix}^T$. Елементи матрица $M_{ij}(\boldsymbol{q})$, $C_{ij}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$, $i = 1,2$ и вектора гравитационог момента $G(\boldsymbol{q})$ дати су једначинама (2), (3) і (4), следствено, уз претпоставку да се центри маса сегмената налазе на њиховим срединама.

$$M_{11} = \frac{1}{3}m_1 l_1^2 + \frac{1}{3}m_2 l_2^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos q_2,\ M_{12} = M_{21} = \frac{1}{3}m_2 l_2^2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \cos q_2,\ M_{22} = \frac{1}{3}m_2 l_2^2. \quad (2)$$

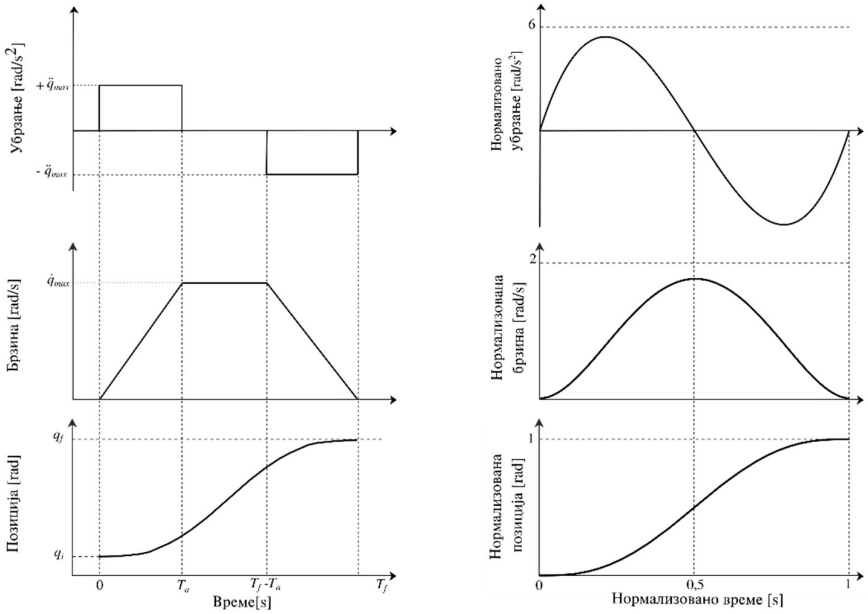
$$C_{11} = -\frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{q}_2 \sin q_2,\ C_{12} = -\frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2\right),\ C_{21} = -\frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 \sin q_2,\ C_{22} = 0. \quad (3)$$

$$G_1 = \left(\frac{1}{2}m_1 l_1 + m_2 l_1\right) g \cos q_1 + \frac{1}{2}m_2 l_2 g \cos\left(q_1 + q_2\right),\ G_2 = \frac{1}{2}m_2 l_2 g \cos\left(q_1 + q_2\right). \quad (4)$$

2.2 Планирање путање

Након добијања аналитичког математичког модела објекта, за увођење управљања неопходно је било изабрати жељену трајекторију, тј. путању кретања захватног механизма. Приликом одређивања оптималног кретања захватног механизма транспортне машине (у овом случају мобилног робота), разматрана је само кинематика кретања, и то у *Oy* правцу, а што због независности погона кретања важи и за кретање у *Ox* правцу. Задатак одређивања оптималног кретања решен је применом принципа максимума. Коначно, заменом на оптималан начин добијених закона кретања у једначину (1), могуће је одредити промену момената које би то кретање остварило.

Постоје бројни приступи планирању путање врха захватног механизма (и робота уопште) од почетне q_i до коначне q_f позиције. Циљ је да кретање механизма буде глатко јер нагле или скоковите промене, било у убрзању, брзини или положају, захтевају много више енергије од постепених. Линеарна интерполација, на пример, даје континуирану промену брзине, али такође може довести до наглог покретања или заустављања, а то може довести до теоријски бесконачних убрзања. Штавише, нагле промене у брзини у великој мери повећавају ризик од великих убрзања, што може бити тешко изводљиво са становишта актуатора.



Слика 2. *а) Трапезоидни профил брзине, б) полиномијални профил брзине*

У погледу практичне примене, трапезоидни профил брзине је један од најједноставнијих профила кретања. Његова предност се огледа у томе што се време потребно за достизање константне брзине користи и распоређује тако да је кретање глатко, без наглих почетних покрета и без изненадног заустављања при кочењу. Подешавање овог профила се заправо врши подешавањем убрзања тако да

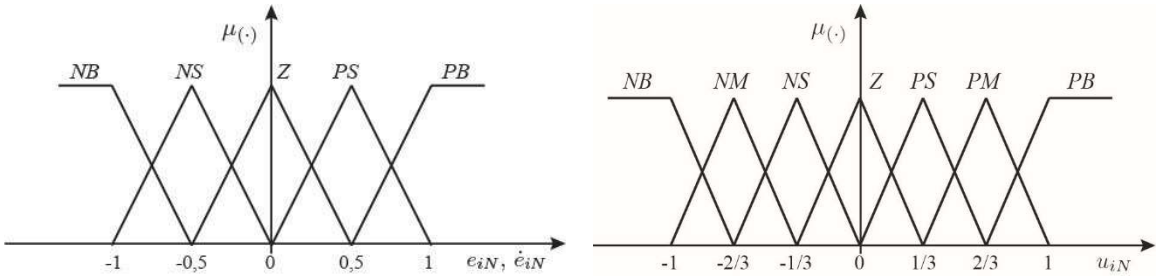
брзина благо расте (опада) док не достигне маскималну вредност (нулу). Имплементација трапезоидног профила брзине, приказаног на слици 2а, је реално изводљива, али је у овом приступу убрзање дисконтинуална функција времена у укупном трајању кретања T_f, те треба бити обазрив – услед ове нагле промене убрзања могу се јавити и нежељене осцилације. Параметри неопходни за дефинисање трапезоидног профила су почетни q_i и крајњи q_f положај, коначно трајање кретања T_f и време потребно за убрзање T_a, при чему важи да је $2T_a \le T_f$.

Када је то могуће, препоручљиво је изабрати функцију која ће омогућити континуиране промене, не само положаја и брзине, већ и убрзања. Као погодни кандидати, полиноми су се природно наметнули, јер је опште познато да су непрекидни полиноми бесконачно диференцијабилне глатке функције са свим својим изводима. Ако се са $p = (q - q_i)/(q_f - q_i)$ и $\tau = t/T_f$ означе нормализована позиција и нормализован временски интервал код полиномијалног профила, трапезни и полиномијални профил се могу описати једначином (5), са одговарајућим индексима *tr* и *pol* у ознакама величина. Трапезни профил брзине коришћен је у радовима [1]], [2] и [4]. У раду [3] коришћен је полиномијални профил брзине петог реда, приказан на слици 2б, са шест граничних услова: $p(0) = 0$, $p'(0) = 0$, $p''(0) = 0$, $p(1) = 1$, $p'(1) = 0$ i $p''(1)=0$. Диференцирање израза за полином петог реда у односу на нормализовано време даје израз за нормализовану брзину и нормализовано убрзање. Систем једначина се добија заменом граничних услова у овим полиномима, што представља решење које одређује непознате коефицијенте. Коначно решење гласи: $p(\tau) = 6\,\tau^5-15\tau^4+10\tau^3$, $p'(\tau)=30\tau^4-60\tau^3+30\tau^2$, $p''(\tau)=120\tau^3-180\tau^2+60\tau$.

$$
\begin{aligned}
q_{pol}(t) &= q_i + (q_f - q_i)\,p(\tau) \quad \text{и} \quad q_{tr}(t) = \begin{cases} q_i + 0,5\cdot \ddot{q}_{\max}\cdot t^2, & 0 < t \le T_a \\ q_i + \ddot{q}_{\max}\cdot T_a\left(t - \dfrac{T_a}{2}\right), & T_a < t \le T_f - T_a \\ q_f - 0,5\ddot{q}_{\max}\cdot\left(T_f - t\right)^2, & T_f - T_a < t \le T_f \end{cases} \\
\dot{q}_{pol}(t) &= \frac{q_f - q_i}{T_f}\,p'(\tau) \qquad \text{и} \quad \dot{q}_{tr}(t) = \begin{cases} \ddot{q}_{\max}\cdot t, & 0 < t \le T_a \\ \ddot{q}_{\max}\cdot T_a, & T_a < t \le T_f - T_a \\ \ddot{q}_{\max}\cdot\left(T_f - t\right), & T_f - T_a < t \le T_f \end{cases} \\
\ddot{q}_{pol}(t) &= \frac{q_f - q_i}{T_f^2}\,p''(\tau) \qquad \text{и} \quad \ddot{q}_{tr}(t) = \begin{cases} +\ddot{q}_{\max} & 0 < t \le T_a \\ 0 & T_a < t \le T_f - T_a \\ -\ddot{q}_{\max} & T_f - T_a < t \le T_f \end{cases}
\end{aligned}
\tag{5}
$$

2.3 Фази управљање

У радовима [1][2]-3] коришћена је техника фази управљања за пројектовање управљачког система (УС) који је у стању да помера врх хватача захватног механизма у циљу праћења жељене путање. Конкретно, коришћена су два фази УС пропорционално-диференцијалног (ПД) типа за управљање кретања захватног механизма дуж одабране трајекторије, по један за сваки сегмент механизма. Улазне величине контролера су сигнали грешке и извод грешке угаоног положаја, а излазна, односно управљачка величина, је обртни момент. Функције припадности свих улазних и излазних величина дефинисане су на нормализованом домену [-1,1], слика 3.



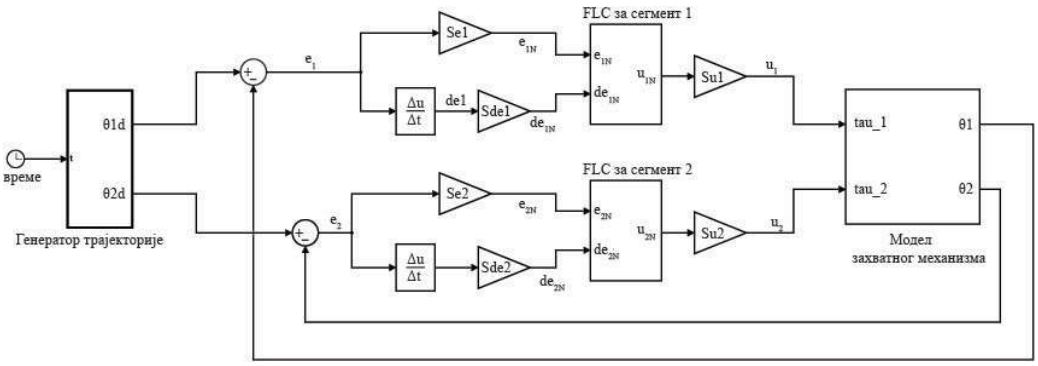
Слика 3. *а) Улазне функције припадности, б) излазне функције припадности*

Ознаке NL, NM, NS, Z, PS, PM і PL представљају лингвистичке вредности фази променљивих, односно њихове негативно велике, негативно средње, негативно мале, нула, позитивно мале, позитивно

средње и позитивно велике вредности. Примена нормализованих домена је захтевала нормализацију улазних и денормализацију излазних величина, што је учињено увођењем фактора скалирања S_{ei}, S_{dei}, S_{ui}, на следећи начин: $e_{iN} = S_{ei}\, e_i$, $\dot{e}_{iN} = S_{dei}\, \dot{e}_i$, $u_i = S_{ui}\, u_{iN}$, за $i = 1,2$, где e_{iN}, $\dot{e}_{iN}$ и u_{iN} представљају нормализоване вредности грешке, извода грешке и управљања, следствено. У имплементацији предложених фази контролера коришћена је Ларсенова метода закључивања и метода осредњавања центара као метода дефазификације. Табела 1 представља базу правила описаних контролера, а слика 4 приказује Симулинк модел разматраног захватног механизма са предложеним фази управљањем, који је коришћен за симулацију и верификацију рада система.

Табела 1. Фази правила

e_N \ $\dot{e}_N$	**NB**	**NS**	**Z**	**PS**	**PB**
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB



Слика 4.*Симулинк модел система управљања*

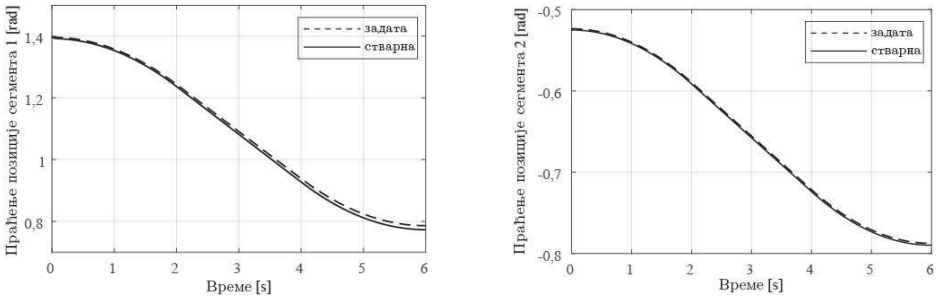
2.4 Оптимизација фази контролера метахеуристиичким алгоритмима

Уопштено, фази контролери имају велики број параметара који се могу подешавати у покушају да се достигне оптимално динамичко понашање. Неки од њих су облик и параметри функција припадности, број лингвистичких вредности за улазне и излазне величине, фази правила, улазни и излазни фактори скалирања, итд. У овим истраживањима, избором унапред дефинисаних функција припадности и базе правила, оптимизација фази контролера се свела на подешавање фактора скалирања улазних и излазних величина, као параметара од којих директно зависе перформансе целог система управљања. За овакву оптимизацију најпре је коришћен метахеуристички алгоритам грбавих китова у комбинацији са трапезоидним профилом брзине [1] и [2]. Даље, увођењем полиномијалног профила брзине у раду [3] оптимизација је извршена са четири различита метахеуристичка алгоритма: грбавих китова (енг. Whale Optimization Algorithm WOA), синусно-косинусног алгоритма (енг. Sine-Cosine Algorithm SCA), мрављих лавова (енг. Ant Lion Optimizer ALO) и афричких супова (енг. African Vultures Optimization Algorithm AVOA), од којих је последњи један од најновијих и издвојио се као супериорнији од осталих. Сви поменути параметри (тј. фактори скалирања) су додељени једном агенту коришћењем једног вектора са шест параметара. За функцију циља коришћен је ITAE (интеграл апсолутне грешке помножене временом) критеријум, који је, узимајући у обзир оба сегмента механизма, дефинисан са: $J = \int_0^\infty t\left[\left|e_1(t)\right| + \left|e_2(t)\right|\right] dt$.

2.5 Експериментални резултати

Резултати добијени на основу симулационог модела захватног механизма са два степена слободе су приказани на слици 5. Почетни положај захватног механизма је дефинисан са $\boldsymbol{q}_0 = [1{,}3963\ -0{,}5236]^T$ rad, крајњи са $\boldsymbol{q}_f = [0{,}7854\ -0{,}7854]^T$ rad, а жељено време да систем достигне овај положај је изабрано да буде

T_f = 6 s. Након оптмизације WOA алгоритмом (величина популације 10 и укупан број итерација 30), добијени су фактори скалирања: S_{e1} = 1,8505, S_{de1} = 0,0784, S_{u1} = 0,9218, S_{e2} = 1,5, S_{de2} = 0,0025 и S_{u2} = 1,4385. Симулација рада система и поређење стварне и задате путање за оба сегмента захватног механизма, показали су да се стварна и задата путања скоро поклапају, са готово занемарљивим одступањем. Грешке у праћењу положаја првог сегмента мања је од 0,005 rad, док је за други сегмент она мања од 0,001 rad. Робусност синтетизованих фази управљачких система је тестирана тако што су масе оба сегмента повећане три пута, а сви остали параметри су остали непромењени. Чак и тада, фази УС раде веома задовољавајуће, остварујући грешке од 0,015 rad и 0,001 rad за први и други сегмент, следствено, што је и приказано на слици 5.



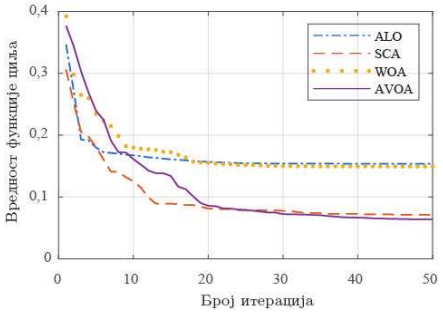
Слика 5. *Поређење стварне и задате путање при три пута повећаној маси*

У случају полиномијалног профила брзине [3] ефикасност фази контролера се тестирала за три различите жељене трајекторије механизма. У првом случају, захватни механизам се налази у дефинисаној почетној тачки. Други случај за тестирање претпоставља да се захватни механизам не налази у почетној тачки, већ да постоји извесно одступање, од по 5° за сваки сегмент. У пракси је то случај да мобилни робот приликом свог кретања и позиционирања испред производне машине није заузео потпуно тачну позицију. Последњи случај је тестирање робусности предложеног алгоритма управљања у случају када се масе сегмената повећају три пута. У Табели 2 се налазе осредњени резултати добијени након 10 извршавања, као и најбоље добијене вредности постигнуте применом различитих оптимизационих алгоритама. За све претходно поменуте метахеуристичке алгоритме подешено је да број јединки буде 30, а број итерација 50. Криве конвергенције за осредњене вредности функције циља различитих алгоритама су приказане на слици 6.

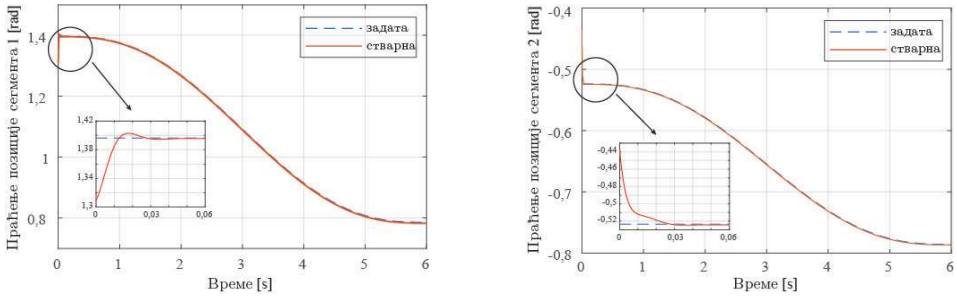
На основу Табеле 1 и слике 6 може се закључити да најбољи резултат по питању минималне вредности функције циља даје AVOA метода. Ипак, примећује се и да су брзине конвергенције SCA i AVOA у великој мери сличне. Након оптимизације AVOA методом, добијене вредности фактора скалирања су: S_{e1} = 1,999, S_{de1} = 0,0106, S_{u1} = 1,5, S_{e2} = 1,998, S_{de2} = 0,0104 и S_{u2} = 0,6834. Слика 7 приказује поређење стварне и жељене трајекторије првог и другог сегмента, за случај примене AVOA алгоритма оптимизације. Примећује се да се обе трајекторије, за оба сегмента готово поклапају. Резултати тестирања када се механизам налази у одговарајућем почетном положају, за све оптимизационе алгоритме такође дају задовољавајуће резултате. Примећује се да је потребно око 0,03 s да би дошло до скоро поклапања трајекторија. Предложени оптимизовани фази алгоритам управљања се показао ефикасним и када се маса сегмената троструко повећала. Грешка праћења позиције првог семента тада износи око 0,008 rad, док грешка другог сегмента износи око 0,004 rad.

Табела 2. Средња и најбоља вредност функције циља

Оптимизациони алгоритам	Средња вредност функције циља	Најбоља вредност функције циља
ALO	0,1539	0,0769
SCA	0,0712	0,0597
WOA	0,1494	0,0623
AVOA	**0,0636**	**0,0558**



Слика 6. *Криве конвергенције вредности функције циља*



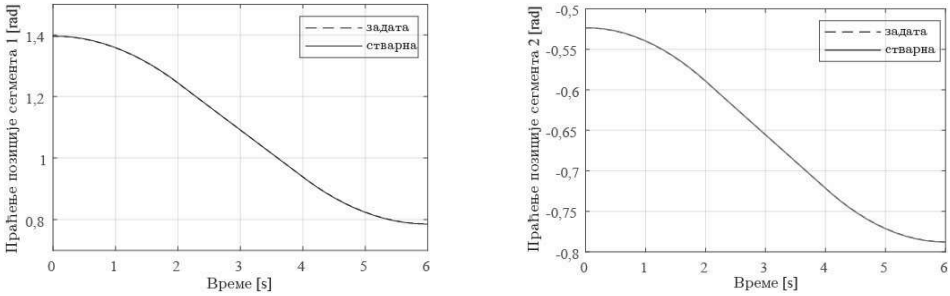
Слика 7. *Стварна и задата трајекторија при ненултим почетним условима сегмента*

2.6 Нелинеарно управљање применом технике feedback линеаризације

Један од озбиљних инжењерских проблема је проналажење математичког модела који је довољно добар да опише систем, а у исто време довољно лак за математички и аналитички третман. Моделовање нелинеарности често је компликовано и увек представља изазов. Претходна истраживања показала су креирање управљачког сигнала без детаљне анализе математичког модела, а главни циљ истраживања [4][2] је развој и имплементација нелинеарног управљачког система, методом feedback линеаризације (енг. feedback linearization, FBL), за захватни механизам чији је модел описан у претходним одељцима. Оно што битно разликује FBL од Јакобијан линеаризације јесте чињеница да она важи на целом домену интереса и не представља апроксимацију система. Како је у овом приступу од посебне важности алгоритам повратне спреге који ће довести до поништавања нелинеарности у једначинама које описују систем, и омогућити коришћење познатих линеарних техника, јасно је да генерализација ове идеје није могућа у сваком нелинеарном систему. Постоје четири услова која морају бити испуњена да би се омогућило овакво управљање: једначина система по стањима мора имати структуру: $\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + B\gamma(\boldsymbol{x})\left[u - \alpha(\boldsymbol{x})\right]$; пар (A,B) мора бити управљив; $\gamma(\boldsymbol{x})$ мора бити несингуларна и приликом коришћења трансформације модела пресликавања морају бити непрекидна и диференцијабилна. Коначно, када су услови задовољени, може се креирати закон управљања у облику: $u = \alpha(\boldsymbol{x}) + 1/\gamma(\boldsymbol{x})\, z$, где z представља нови управљачки сигнал.

2.6.1 Експериментални резултати

Након што су проверени сви услови за примену FBL (једначина система је у одговарајућој форми, матрица управљивости има ранг једнак реду система, γ(x) има скаларну вредност различиту од нуле и све функције су синусног и косинусног типа, па су самим тим и диференцијабилне) и након што је утврђено да је релативни ред система једнак реду система (па се линеаризацијом од улаза до излаза врши потпуна линеаризација свих стања, што гарантује непостојање унутрашње динамике), изабран је управљачки сигнал у облику: $\boldsymbol{\tau} = C\dot{\boldsymbol{q}} + G + M\boldsymbol{z}$, где је нови управљачки сигнал z пропорционално-диференцијабилног типа: $\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} \\ K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} \end{bmatrix}$. Коефицијенти у закону управљања, који су исти за оба сегмента захватног механизма, K_P = 87,8555 и K_D = 18,4000, одређени су преко задатог прескока и времена смирења. За задату путању, идентичну као у случају фази управљања, применом предложеног закона управљања симулација рада система је показала да је кретање механизма глатко, и без наглог кочења, са грешком праћења путање мањом од 0,001 rad, што говори о ефикасности пројектованог УС. У оригиналном раду се могу пронаћи позиције, профили брзине и убрзања за оба сегмента, а овде је, на слици 8, приказано поређење у праћењу задате позиције.



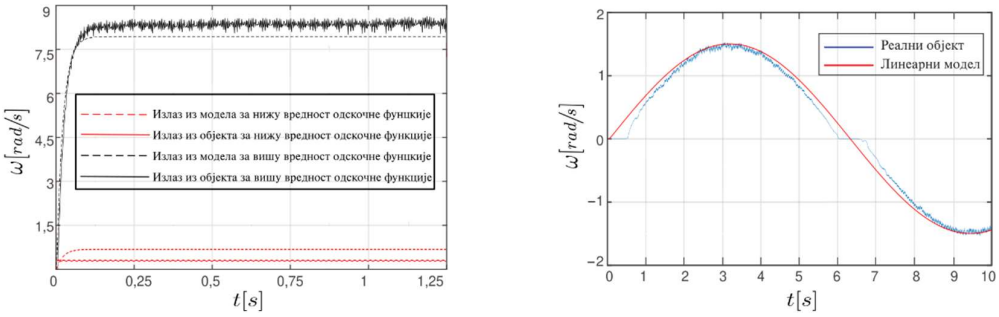
Слика 8. *Поређење стварне и задате путање*

3. УПРАВЉАЊЕ DC МОТОРА

3.1 Управљање DC мотора применом feedback линеаризације

Иако пројектовање захватних механизама првенствено зависи од природе саме имплементације, за главне покретаче најчешће се бирају серво мотори једносмерне струје. Они долазе у много облика и величина, па је њихова примена прилично лака и флексибилна, док истовремено пружају високу поузданост и ниску цену, имају једноставну структуру и добру стабилност. Истраживања у оквиру пројекта подразумевала су развијање и имплементацију алгоритама управљања брзине и позиције DC мотора. Након што је одређен линеарни математички модел мотора (занемаривањем свих нелинеарних ефеката), поређењем симулације његовог рада у Матлаб/Симулинк окружењу и стварног одзива објекта (експериментално снимљеног), показано је да линеарни модел није довољно добар модел посматраног система, слика 9.

Нелинеарни математички модел DC мотора креиран је коришћењем нелинеарне компоненте момента трења која потиче од Стрибековог ефекта. Најпре је одређен Тустинов модел трења, а затим је извршена његова апроксимација функцијом стрмог хиперболичког тангенса у циљу превазилажења дисконтинуитета, а да би се задовољио услов непрекидности и диференцијабилности за примену FBL технике. На овај начин је заправо моделовано само Кулоново и вискозно, а занемарено је статичко трење. Нелинеарни модел DC мотора је дат једначином (6), где J_{eq} , $B_{eq,v}$, A_m и $f(x)$ представљају еквивалентни момент инерције, коефицијент пригушења, константу актуатора и нелинеарну компоненту трења, следствено. Овај модел је експериментално верификован поређењем са стварним одзивом система на различите улазне побуде.



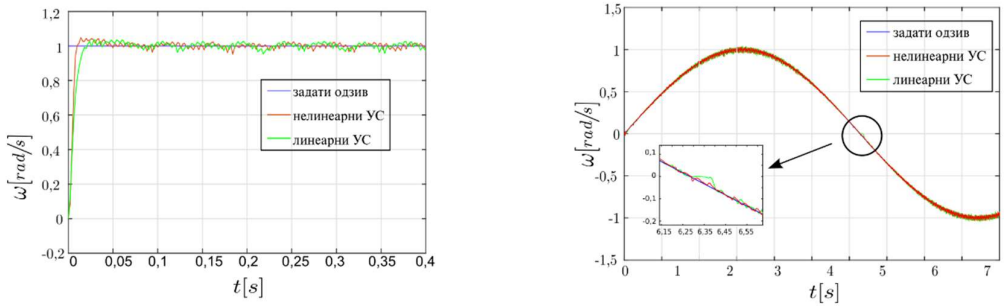
Слика 9. *Поређење одзива објекта и линеарног модела на различите побуде*

$$\dot{x} = -\frac{B_{eq,n}}{J_{eq}}x - f(x) + \frac{A_m}{J_{eq}}u,\ \ y = x,\ \ f(x) = \lambda_1\left(\frac{2}{1+e^{-\lambda_2 x}} - 1\right). \tag{6}$$

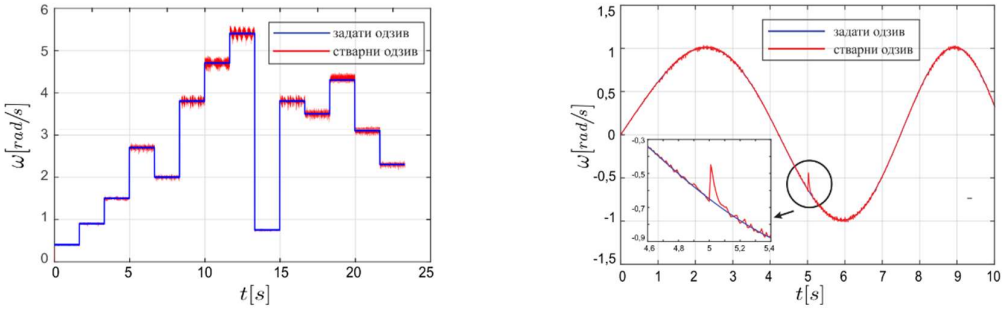
3.1.1 Управљање брзине

Након што су проверени услови за испуњеност FBL усвојен је закон управљања у облику $u = \frac{J_{eq}}{A_m}\left[f(x) + v\right]$, где нови управљачки сигнал узима пропорционално-интегралну форму [5]: $v = K_p\varepsilon + K_i\int_0^t \varepsilon d\tau$. Дефинисањем жељеног динамичког понашања тј. постављањем границе прескока на максималну вредност од 5% и времена прескока на максимално 0,05s, пронађени су пропорционално и интегрално појачање: K_p = 1,34 и K_i = 124,9. Линеарни управљачки алгоритам се добија на исти начин, али без дела којим се поништава нелинеарност. Слика 10 приказује разлику линеарног и нелинеарног управљања за два различита задата одзива: одскочну функцију (лево) и синусну функцију (десно), одакле се лако уочава да нелинеарни закон управљања даје боље динамичко понашање система. У циљу даљег побољшања рада система, у раду [6] извршена је оптимизација управљачког система (тј. подешавање параметара претходно синтетизованог PI закона управља FBL техником) коришћењем GWO алгоритма. Конкретно, оптималне вредности пропорционалног K_p и интегралног K_i појачања су добијене према усвојеном критеријуму интеграла апсолутне грешке (енг. Integral of absolute errors IAE). Оптимизовани нелинеарни управљачки сигнал је примењен на стварни објект са симулираним белим шумом и поремећајем у облику одскочне функције који, засебно, континуирано делују на објект. Коначно, за неколико задатих сигнала, снимљени су и упоређени одзиви система. Резултати потврђују

робусност оптимизованог нелинеарног УС. На слици 11 (лево) показано је да се, чак и када је задати сигнал функција са скоковитим променама вредности и када на објект делује поремећај у виду белог шума, предложеним алгоритмом остварује жељена брзина. На слици 11 (десно) задата вредност је *chirp* сигнал, где као и код синусоидног сигнала долази до промене смера обртања и тренутка у којем је угаона брзина једнака нули. Управљачки систем је тестиран поремећајем који је уведен у петој секунди у облику одскочне функције. На увеличаном детаљу се примећује како УС успева да се веома брзо избори са овим поремећајем.



Слика 10. *Експериментални резултати: линеарно и нелинеарно управљање брзине мотора*



Слика 11. *Поређење одзива у случају деловања поремећаја белог шума (лево) и одскочне функције(десно)*

3.1.2 Управљање позиције

Нелинеарни математички модел DC мотора по позицији тј. његова једначина стања гласи:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \dfrac{-B_{eq,n}}{J_{eq}} \end{bmatrix} \boldsymbol{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} f(\boldsymbol{x}) + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{A_m}{J_{eq}} \end{bmatrix} u \quad \text{i} \quad y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{x}. \tag{7}$$

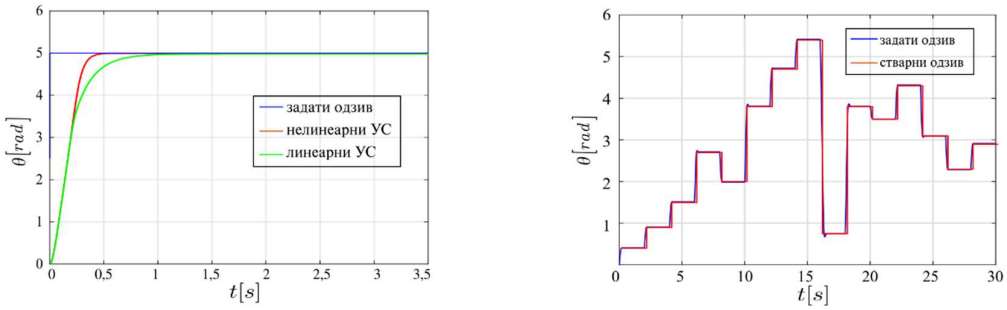
Након што су, и у овом случају, проверени услови за испуњеност FBL, усвојен је закон управљања у облику

$$u = \frac{J_{eq}}{A_m} \left[\frac{B_{eq,n}}{J_{eq}} + f(x) + v \right], \quad v = -K_0 x_1 - K_1 x_2 + K_0 x_{ref}. \tag{8}$$

Постављањем услова да нема прескока и да време смирења не прелази 2,3s пронађени су коефицијенти K_0 и K_1. Као и у случају управљања брзине, линеарни управљачки алгоритам има идентичне коефицијенте. На слици 12 (лево) се уочава разлика линеарног и нелинеарног управљања за одскочну функцију, а супериорност нелинеарног управљања показана је у [7], за различите задате одзиве. Оптимизација предложеног нелинеарног управљања извршена је метахеуристичким алгоритмима GWO и WOA, са IAE критеријумом као функцијом циља [8]. Поређење добијених резултата за случај оптимизације GWO алгоритмом приказани се на слици 12 (десно), када је за задату жељену вредност узета произвољна функција са брзим одскочним променама. У раду [8] може се пронаћи табеларни приказ поређења ова два метахеуристичка алгоритма, за различите побуде.

3.2 Фази управљање DC мотора применом условне оптимизације

Још једна тема истраживања у оквиру пројекта која се односила на управљање DC мотора била је примена фази управљања и условне оптимизације. Претходно развијена, оригинална метода условне оптимизације линеарних дискретних система применом потпуне преносне функције овде је проширена на класу нелинеарних дискретних система у облику Такаги-Сугено (TC) фази система. Употреба потпуне преносне функције омогућила је увођење новог облика индекса перформансе – у облику суме квадрата грешака у општем, реалном случају, при истовременом дејству свих утицаја на

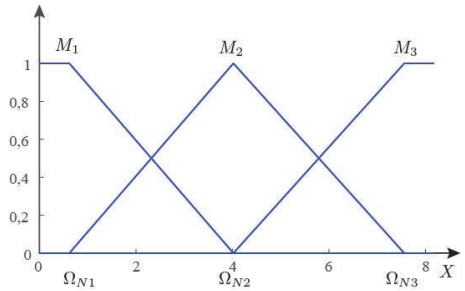


Слика 12. *Поређење стварне и задате угаоне позиције*

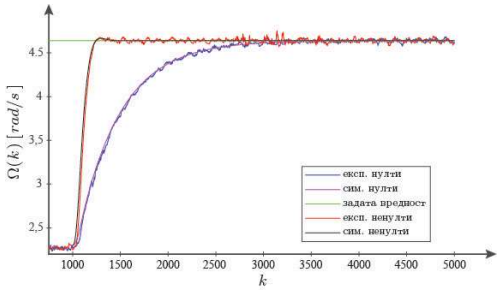
систем: ненултих почетних услова и спољашњег улаза. Због дужине рада, математичке и теоријске основе развијених метода, које се могу наћи у [9], овде се неће излагати, већ ће се само укратко приказати основни резултати.

Нелинеарни TC фази модел, који веродостојно описује динамичко понашање система на целом простору излаза, се добија интерполацијом неколико линеарних математичких модела. У ту сврху, извршена је идентификација три линеарна временски дискретна математичка модела DC мотора, за три различите номинална тачке Ω_{Ni}, i=1,2, где $\Omega(k)$ представља угаону брину у тоталним координатама. TC фази модел је пројектован применом тих модела, који представљају понашање објекта у околини изабраних номиналних тачака. Функције припадности су равномерно диструбиране, са центрима у номиналним тачкама, слика 13. TC фази модел мотора се математички може изразити са (9), где је $X(k) = \Omega(k)$, а $X_i(k) = X(k)$ представља излазну величину, а параметри a_i, b_i и α_i представљају идентификоване параметре линеарних модела.

$$\textbf{АКО } X(k) \text{ је } M_i \textbf{ ОНДА } \left\{ \begin{array}{c} X(k+1) = a_i X(k) + b_i U(k) + \alpha_i,\ i = 1,2,3, \\ X_i(k) = X(k) \end{array} \right\}. \tag{9}$$



Слика 13. *Функције припадности Такаги-Сугено фази моделеа DC мотора*



Слика 14. *Симулациони и експериментални резултати пројектованог PDC управљања*

За управљање је искоришћена техника паралелног расподељеног управљања (енг. Parallel Distributed Compensation, PDC), где се свако управљачко правило добија из еквивалентног правила TC фази модела:

$$\textbf{АКО } X(k) \text{ је } M_i \textbf{ ОНДА } \text{контролер је } \mathbf{C}_i \tag{10}$$

За разлику од оригиналне PDC технике, која користи статички закон управљања у простору стања, овде је искоришћен пропорционално-сумарни тип управљања првог реда, чији је облик:

$$u(k+2)+(T-2)u(k+1)+(1-T)u(k)=KT\varepsilon(k+1)+\left(K_S T^2-KT\right)\varepsilon(k) \tag{11}$$

Излаз из контролера је тада:

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{3} w_i(X(k))C_i}{\sum_{i=1}^{3} w_i(X(k))}=\sum_{i=1}^{3} h_i(X(k))C_i,\ i=1,2,3. \tag{12}$$

где C_i представља пропорционално-сумарни контролер првог реда дефинисан у комплексном домену након примене Z-трансформације на једначину (11):

$$C_i(z)=\frac{K_i T z+K_{Si}T^2-K_i T}{z^2+(T-2)z+1-T},\ i=1,2,3. \tag{13}$$

За условну оптимизацију у параметарском простору са два подешљива параметра (K и K_S) коришћен је карактеристични полином потпуне преносне функције сваког од линеарних подсистема, што је уз примену новог индекса перформансе омогућило да се одреде њихови оптимални параметри, уважавајући захтев да сви појединачни затворени системи управљања имају захтевани степен пригушења ζ=0,7. Ови оптимални параметри су одређени за оба случаја – и нултих (класичан приступ) и ненултих почетних услова, а у циљу будућег поређења. Предложена метода је експериментално верификована на DC мотору, а на слици 14 приказани с добијени симулациони и експериментални резултати. Када се систем пројектује на класичан начин (нулти почетни услови) и крене из ненултих почетних услова, динамичко понашање (одзив) система је значајно лошије у односу на случај када је он пројектован на нови начин, који узима у обзир те ненулте почетне услове. Иако класична метода даје параметре који би требало да буду оптимални за све почетне услове, ово истраживање је показало да то није случај, и да је развијена метода потпунија од класичне управо зато што узима у обзир ненулте почетне услове из којих објект започиње свој рад.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду, дат је преглед дела резултата истраживања остварених у оквиру научног пројекта MISSION4.0, а који се односе на оптимално кретање захватног механизма мобилног робота, као и на управљање брзине и позиције DC мотора. Реализовани је фази управљачки систем у сврху праћења задате путање захватног механизма са два сегмента, као дела радног циклуса мобилног робота. Задата путања је добијена поступком оптимизације кретања захватног механизма применом принципа максимума, а у циљу минимизације времена трајања, при чему су коришћена два профила брзине – трапезни и полиномијални. Различити метахеуристички алгоритми искоришћени су за оптимизацију фактора скалирања предложеног фази контролера ПД дејства, са ITAE критеријумом као функцијом циља. Нумеричким симулацијама приказане су и анализиране перформансе праћења задате путање. Штавише, робусност контролера је тестирана у случају претпоставља да се захватни механизам не налази у почетној тачки и у случају промене масе сегмената захватног механизма. Такође, за постављени задатак праћења задате путање пројектован је управљачки систем са законом управљања заснованим на feedback линеаризацији, као нелинеарној техници управљања. Резултати симулације показали су да су предложени закони управљања у стању да се носе са нелинеарностима захватног механизма и и променом његових параметара, те да се стога ради о веома корисним и ефикасним техникама за управљање кретања захватног механизма.

Други циљ истраживања био је управљања брзине и позиције DC мотора, као главног покретача захватног механизма, и роботске руке уопште. DC мотор је разматран као објект аутоматског управљања и добијен је његов линеарни математички модел. Како се овај модел показао недовољно тачан, за потребе истраживања извршена су мерења и идентификација трења, чиме је добијен и нелинеарни модел објекта. Након симулације рада неуправљаног објекта урађена је и експериментална провера валидности добијених модела. Затим је извршена апроксимација функције трења у

диференцијабилну функцију хиперболичког тангенса, у сврху управљања објекта техником feedback линеаризације. Комплетни поступци су експериментално верификовани, на модуларном едукационом систему QUANSER за управљање у реалном времену. Разматрани су одзиви објекта управљаног различитим техникама: линеарном, постављањем одређених захтева одзиву система у виду прескока, времена прескока и смирења, нелинеарном, као и нелинеарном техником оптимизованом метахеуристичким алгоритмима. Коначно, предложено је и експериментално верификовано и фази управљање DC мотора применом Такаги-Сугено фази модела мотора и претходно развијене нове методе условне оптимизације његових линеаризованих подсистема на бази потпуне преносне функције. Као техника управљања коришћено је паралелно расподељено управљање, са законом управљања пропорционално-сумарног дејства. Значај нове методе условне оптимизације је да узима у обзир истовремено и дејство ненултих почетних услова (за разлику од класичних метода, које узимају нулте почетне услове) и спољашњег улаза. Показано је да оптимални параметри управљачког система за дати систем при свим нултим почетним условима нису адекватни за његов рад у почетним условима који нису нулти и да је предложена метода знатно супериорнија.

Остварени резултати који су презентовани у часописима са SCI листе и међународним конференцијама дају нам за право да сматрамо истраживања веома успешним, и да она представљају основу за даља истраживања у овој веома актуелној и значајној области.

5. ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

Представљени резултати истраживања, као и овај рад, подржани су од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије по Уговору бр. 451-03-68/2022-14/200105, као и од Фонда за науку Републике Србије, по Уговору бр. 6523109,

6. ЛИТЕРАТУРА

Ово је списак литературе која представља остварене резултате истраживања на пројекту *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION 4.0* који су презентовани у часописима са SCI листе, међународним конференцијама и део су техничког решења, и која је коришћена за састављање овог прегледног рада.

[1] Jovanović, R., Bugarić, U., Laban, L., Vesović M.: *Trajectory Tracking of a Two – Link Gripping Mechanism,* Proceedings of the X Triennial International Conference Heavy Machinery, Session C 1-8, Vrnjačka Banja, June 23-25, 2021.

[2] Јовановић, Р., Бугарић У., Весовић М., Лабан, Л.: *Оптимално управљање кретања захватног уређаја*, Техничко решење, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2021.

[3] Jovanović R., Bugarić U., Vesović M., Perišić N.: *Fuzzy Controller Optimized by the African Vultures Algorithm for Trajectory Tracking of a Two–Link Gripping Mechanism,* FME Transactions, Vol. 50, No. 3, pp. 491-501, 2022.

[4] Vesović M., Jovanović, R., Laban, L., Bugarić, U., Feedback Linearization Control of a Two – Link Gripping Mechanism, Proceedings of the X Triennial International Conference Heavy Machinery, Session C 9-16, Vrnjačka Banja, June 23-25, 2021.

[5] Vesović, M., Jovanović, R., Zarić, V., Modelling and Speed Control in a Series Direct Current (DC) Machines Using Feedback Linearization Approach, Proceedings of the 5th International Conference "Mechanical Engineering in the 21st Century" - MASING 2020, ISBN 978-86-6055-139-1, pp. 207-212, Niš, December 09-10, 2020.

[6] Vesović, M., Jovanović, R. Trišović, N.: *Control of a DC motor using feedback linearization and gray wolf optimization algorithm,* Advances in Mechanical Engineering, Vol 14, No. 3, pp. 1-16, 2022.

[7] Vesović, M., Jovanović, R., Zarić, V., Laban, L.: *Modelling and Control of a Series Direct Current (DC) Machines Using Feedback Linearization Approach*, Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020, ISBN 978-86-7466-852-8, pp. 191-196, Belgrade, Čačak, Niš, Novi Sad, September 28-29, 2020.

[8] Vesović, M., Jovanović, R.: Grey Wolf Optimization for Position Control of a Direct Current Motor Driven by Feedback Linearization Method, In Sinteza 2022-International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research, pp. 36-43. Singidunum University, 2022.

[9] Jovanović, R., Zarić, V., Bučevac, Z. Bugarić, U.: *Discrete-Time System Conditional Optimization Based on Takagi–Sugeno Fuzzy Model Using the Full Transfer Function,* Applied Sciences, Vol. 12, No. 15, 7705, 2022.

Jovanović, R., Bugarić, U., Vesović, M., Perišić N.

FUZZY AND NONLINEAR CONTROL OF THE GRIPPING MECHANISM AND A DIRECT CURRENT MOTOR – OVERVIEW OF THE RESEARCH RESULTS WITHIN THE MISSION4.0 PROJECT

Abstract: *One of the work packages in the project Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 - MISSION4.0 included research in the field of nonlinear optimization problems and control of the motion of the gripping mechanism in the presence of constraints. In order to achieve the proposed path of the gripping mechanism, control systems based on fuzzy logic, were designed and their parameters were optimized using various metaheuristic optimization methods. The application of the proposed control techniques is shown on the example of the gripping mechanism of an autonomous mobile robot. The second part of the research was related to the control of the speed and position of the direct current motor, as the main actuator of the gripping mechanism, where different control techniques were applied: fuzzy control, feedback linearization technique, as well as their optimized versions with different metaheuristic algorithms. This paper provides an overview of a part of the results of the MISSION4.0 project, published in various international and national journals and conferences, as well as an overview of the results presented in the technical report.*

Key words: *gripping device, DC motor, trapezoidal and polynomial velocity profile, fuzzy control and feedback linearization, metaheuristic optimization algorithms.*

Paprocki, M., Erwiński, K.[1)], Zivanovic, S.[2)]

CNC machine laboratory stand with H-Bot parallel kinematics using the EtherCAT bus[3)]

Summary

This paper presents an H-Bot kinematics machine control system. The H-Bot machine accuracy depends on the servo drives' synchronous operation and mechanical design. Therefore, the mechanical axes' movement quality is influenced by the communication bus and the ability to detect backlash and elasticity in the machine axes. EtherCAT – an industrial bus will be used for communication between the controller and other machine control system elements. Each mechanical axis at the H-Bot machine is equipped with a position measurement system. The laboratory stand was equipped with accelerometers. It is planned to perform research in the Predictive Maintenance and Trajectory Optimization field.

Keywords: H-Bot machine, machine control system, EtherCAT, LinuxCNC

1. INTRODUCTION

The positioning accuracy in machines with H-Bot kinematics depends on the machine's mechanical structure and the CNC machine's control system. In this system, a CNC controller in which calculations related to parallel kinematics is presented. The accuracy of the H-Bot machine depends on the synchronous operation of servo drives. Therefore, the quality of synchronous movement of mechanical axes is influenced by the communication bus (synchronous data exchange between the drives and the CNC controller).

The article (chapter 2) will discuss the basics of parallel kinematics for machines with an H-Bot design. The third chapter will discuss the design of the H-Bot machine used and the developed CNC numerical control system based on a PC and LinuxCNC software. This chapter will also address issues related to the EtherCAT communication interface of the CNC controller. Three different configurations of this interface developed by the article's authors will be discussed. In the chapter on research, the results on the quality of work of the developed EtherCAT communication interfaces will be presented and discussed.

2. KINEMATICS OF H-BOT MACHINES

In machines with the H-Bot design (Figure 1), there are two parallel tracks along which a linear bridge with bearings is routed. A third track is mounted on the bridge, perpendicular to the first two tracks on which the trolley is located. Three linear motion units form a structure similar to the letter "H" (hence H-Bot). At each end on two parallel tracks, there is one pulley. At two ends of parallel units, the pulleys are directly attached to the shafts of the engines. Four blocks are mounted on the bridge – two at each end. The toothed belt on the H-Bot machine passes through all eight pulleys. The belt ends are assembled to the trolley on the bridge. The kinematic system of a machine is not open kinematics. In the H-Bot design, rotary motors are mounted stationary. The proper movement of these motors allows the entire bridge to move along the x-axis and the cart itself on the bridge along the y-axis. Finally, the combination of these two linear movements allows the movement of the final effector.

[1)] dr Marcin Paprocki (marcin.paprocki@umk.pl), dr Krystian Erwinski (erwin@umk.pl), Institute of Engineering and Technology, Faculty of Physics Astronomy and Informatics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland
[2)] prof. dr Saša Živanović (szivanovic@mas.bg.ac.rs), University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
[3)] The work was created as a result of the research project No. 2021/05/X/ST7/01635 financed by the National Science Center

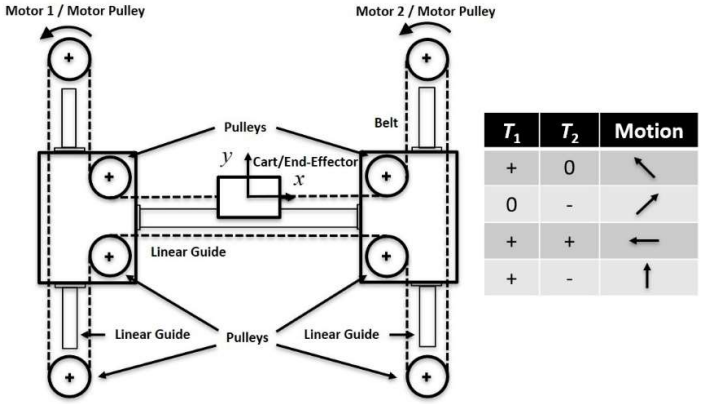


Figure 1. *Diagram of H-Bot type construction*

The rotation of the shaft of motor 1 with motor 2 stopped causes a linear movement of the effector at an angle of ±45° towards the XY coordinate system. Right rotation to the shaft of motor 2 with motor 1 stopped causes movement in positive directions of x and y axes. In contrast, rotation to the left of the same motor would cause movement in the negative direction of y and x. Mathematically, this can be written as:

$$r\Delta\varphi_1 = \Delta x - \Delta y \tag{1}$$

where r is the radius of the motor pulley and Δx, Δy is the change in the x and y axes position, and $\Delta\varphi_1$ is the resultant change in motor position.

Similarly, turning motor 1 to the right while stopping the shaft of motor 2 will cause movement in the positive x direction and the negative direction in the y direction, while the left rotation of the same motor would cause movement in the positive y direction and the negative x direction. Mathematically, this can be written as:

$$r\Delta\varphi_2 = -\Delta x - \Delta y \tag{2}$$

Solving equations (1) and (2) will result in the corresponding relationship for Δx and Δy:

$$\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\frac{1}{2}r & \frac{1}{2}r\\ -\frac{1}{2}r & -\frac{1}{2}r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\varphi_1\\ \Delta\varphi_2\end{bmatrix} \tag{3}$$

To build a dynamic machine model, assign generalized coordinates must be assigned. It can be assumed that the pulleys are as springs, so all pulleys are allowed to rotate freely apart to some extent. In the work of Sollmann et al. [1], he developed a twentieth-order model with cumulative parameters of the H-Bot design. Due to the large order of the model and the resulting computational problems in the simulation of this model, the same authors, in their next work [2], simplify the model by grouping some elements of this model. Finally, he managed to get an eighth-order model. Excellent compliance of the model with the data collected from the test stand has been shown.

The authors of this article plan to conduct research in the future to develop such a model of the H-Bot structure.

3. H-BOT MACHINE WITH LINUXCNC BASED CONTROL SYSTEM

The photo of the laboratory stand with the H-Bot machine is shown in Figure 2. The range of movement of the machine is 2m along the y-axis and 1m along the x-axis. The motors used in the machine are Delta Electronics PMSM motors with a rated torque of 1.5Nm and a nominal speed of 3000 rpm. The motors are equipped with absolute rotary encoders with 24-bit resolution. The gear ratio of the motor is 5:1. PMSM motors are connected to ASD-A3-E drives from Delta Electronics. Each axis has a linear encoder with a resolution of 1μm. All components are connected to the CNC controller via the EtherCAT communication bus [3].

Figure 2. *Photo of the stand with the H-Bot machine*

2.1 H-Bot CNC control system

The used control system [4] consists of a PC (with a real-time system based on Linux), two servo drives, auxiliary devices such as I/O modules, and linear encoders measuring modules. All components of the control system communicate with each other via the EtherCAT bus. Figure 3 shows a block diagram of the control system.

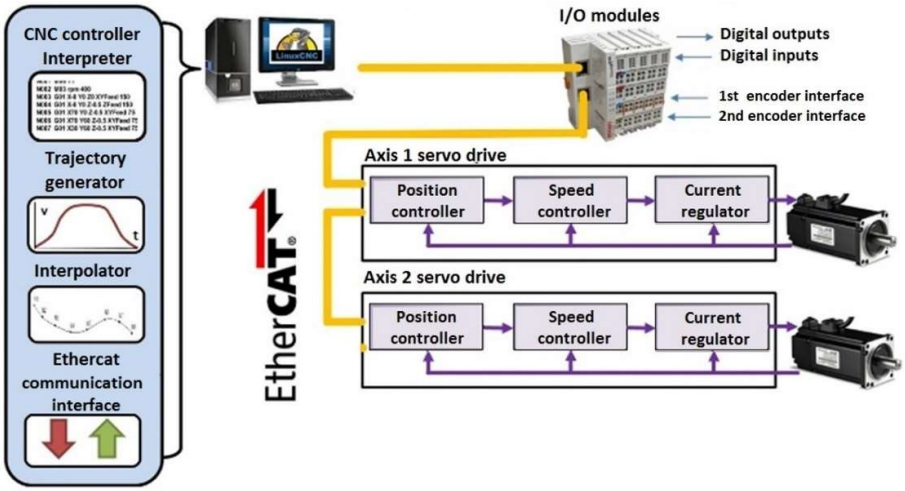


Figure 3. *H-Bot CNC control system*

The CNC controller is a desktop computer with an Intel Core i3 processor and an SSD drive. LinuxCNC was used as the control software, in which numerically controlled and kinematic transformations for the H-Bot system was implemented. All slave devices of the controller (drives, I/O, encoder interfaces) are supported by the Ethernet interface - EtherCAT bus. The PC controller communicates with 2 servo drives, an I/O module, and linear encoder modules cyclically (in cycles of 1ms, 500µs, or 250µs - depending on the settings).

The LinuxCNC control software on the PC uses the Linux RT-Preempt [5] real-time operating system, which enables deterministic execution of time-critical tasks. The main tasks of the controller are motion control and real-time communication via EtherCAT. Linux RT-Preempt is based on the standard version of the Linux kernel, which has been modified by installing an additional "system patch" RT-Preempt. Such modification enables the handling of all recurring tasks in real-time. All non-critical and real-time tasks are handled by the Linux kernel, with the difference that the last ones always have priority in handling (they have higher priorities than standard system tasks). Priorities also apply to hardware interrupts so that non-real-time drivers do not interfere with real-time tasks. Real-time and non-real-time timing tasks can be assigned to different processor cores to improve performance.

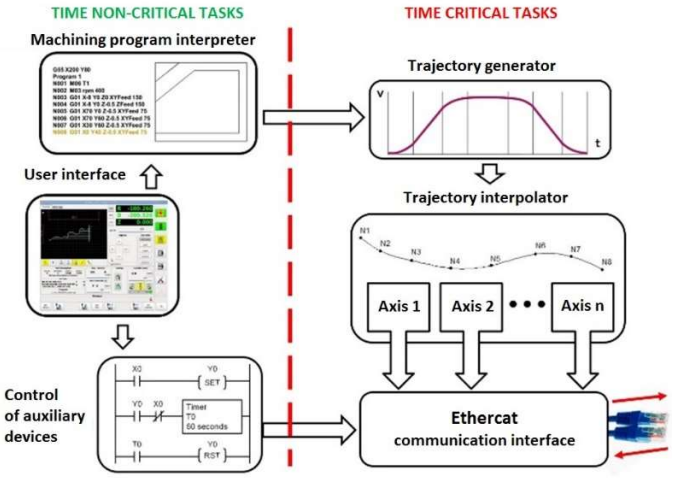


Figure 4. *Non-critical and deterministic tasks in CNC application.*

Figure 4 shows a block diagram of LinuxCNC real-time and non-real-time tasks. Non-real-time tasks include software modules like Graphical User Interface (GUI), G-Code interpreter [6], and peripheral handling devices. Real-time tasks are handled in the HAL hardware space as dedicated modules. The standard HAL modules include the *Motion* control module, which consists of a trajectory generator with trapezoidal acceleration profiling and an interpolator. H-Bot transformation kinematic module and EtherCAT communication interface module is also implemented there.

2.2 EtherCAT communication interface

To connect slave devices (servo drives and I/O modules) in LinuxCNC via EtherCAT buses, the authors had to implement a non-standard communication interface module. This module contains the EtherCAT standard communication stack, which implements the CANopen standard in the application layer according to the OSI model. An additional standard, CiA402, has been developed to control Delta Electronics ASD-A2-E servo drives.

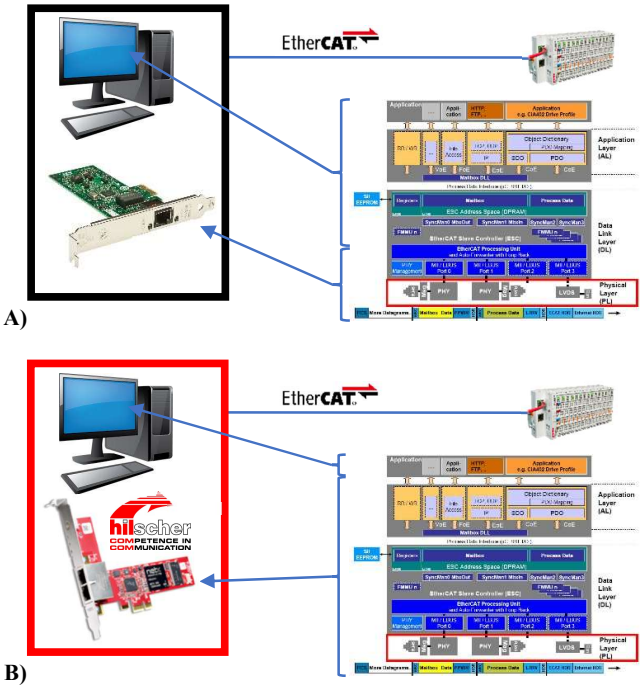


Figure 5. *Implementation of EtherCAT communication interface: A) 1st concept, B) 2nd concept*

To choose the best implementation of the communication interface, the authors decided to develop and implement two concepts for the implementation of this stack. In the first concept (Figure 5A), it was decided that the communication module in the data link layer and the physical layer of the OSI model would be based on the standard Intel 82574 Ethernet card. The application layer in this concept will be entirely based on the EtherCAT stack software module - the EtherLab open programming library [7]. This library enables the implantation of the driver module of the used network card in two variants. The first variant uses the dedicated *e1000e* driver for the 82574 Ethernet card. The second variant uses a *generic* general-purpose driver. The authors used both variants of drivers in this concept.

The second concept (Figure 5B) assumes using a dedicated EtherCAT communication card. In this case, the authors decided to use the Hilscher cifx-50RE card. The communication card has the EtherCAT (hardware stack) stack wholly implemented in this solution. To integrate the card stack with LinuxCNC software, the authors developed a dedicated software interface for communication with the EtherCAT Stack application layer on the card. Dedicated commercial libraries of the manufacturer were used.

4. RESEARCH

The accuracy of the positioning of the mechanical system in this type of machine is influenced by the mechanical structure of the machine itself and the CNC machine control system. The accuracy of the H-Bot machine operation largely depends on the synchronous operation of the servo drives. The authors decided to investigate the quality of machine operation communication, first focusing on the control system. The critical thing is the transfer and cyclicality data exchange between the controller (PC) and the peripherals - especially PMSM servo drives.

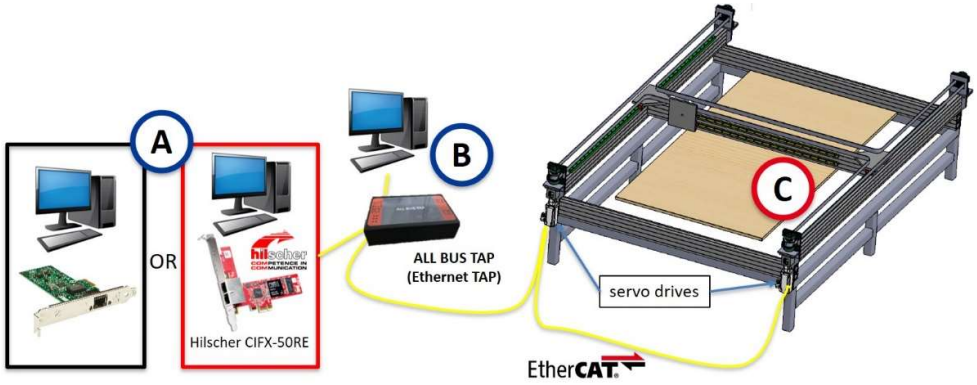


Figure 6.*Diagram of the stand for examining the jitter of EtherCAT cyclic communication: A) CNC controller with two different communication interfaces, B) measuring computer with ALL BUS TAP, C) H-Bot machine with servo drives*

The authors conducted control quality tests, particularly the developed EtherCAT communication interfaces in the CNC controller. The research measured the jitter of the communication cycle in the EtherCAT bus (connection of the CNC controller - servo drives) for all developed communication interfaces according to the aforementioned concepts 1 and 2. For this purpose, the authors connected the measuring device ALL BUS TAP to the EtherCAT bus, which is an Ethernet TAP device (Figure 6). The measuring device does not affect the quality parameters of EtherCAT communication (it is "transparent" for communication data). The device allows the measurement of time stamps, the arrival of data intended for drives, and data intended for the CNC controller system. The timestamp measurement data is sent to a second measurement computer that aggregates it. From these data, it is possible to calculate the time differences between individual time stamps, which determine the jitter of the communication cycle in the EtherCAT bus.

The tests were carried out for three different configurations of the communication interface. The first configuration is according to concept 1 with the *generic* driver variant, the second is according to concept 1 with the *e1000e* driver variant, and the third uses the cifx-50RE card (concept 2).

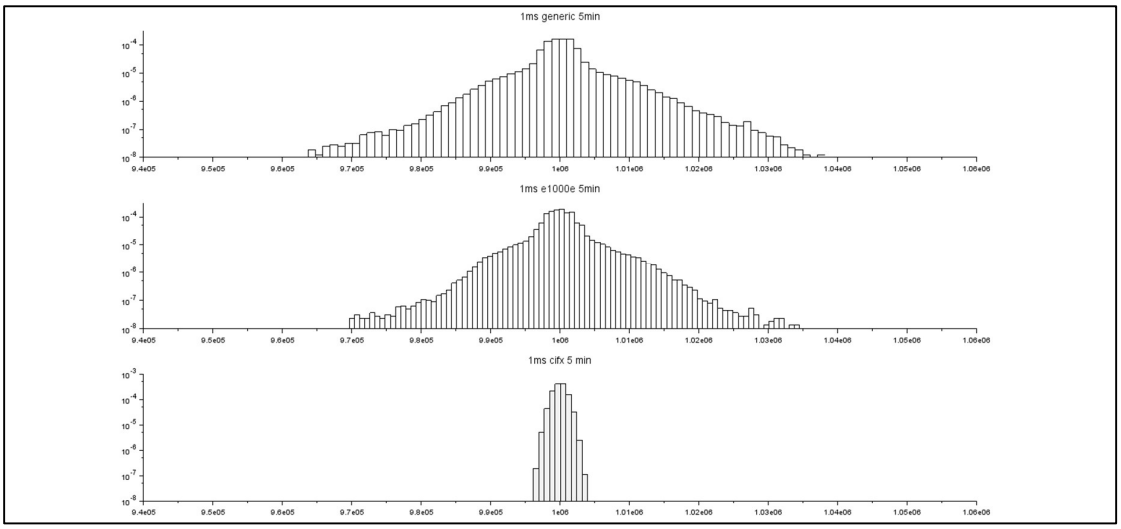


Figure 7. *Jitter- 1 millisecond EtherCAT cycle time*

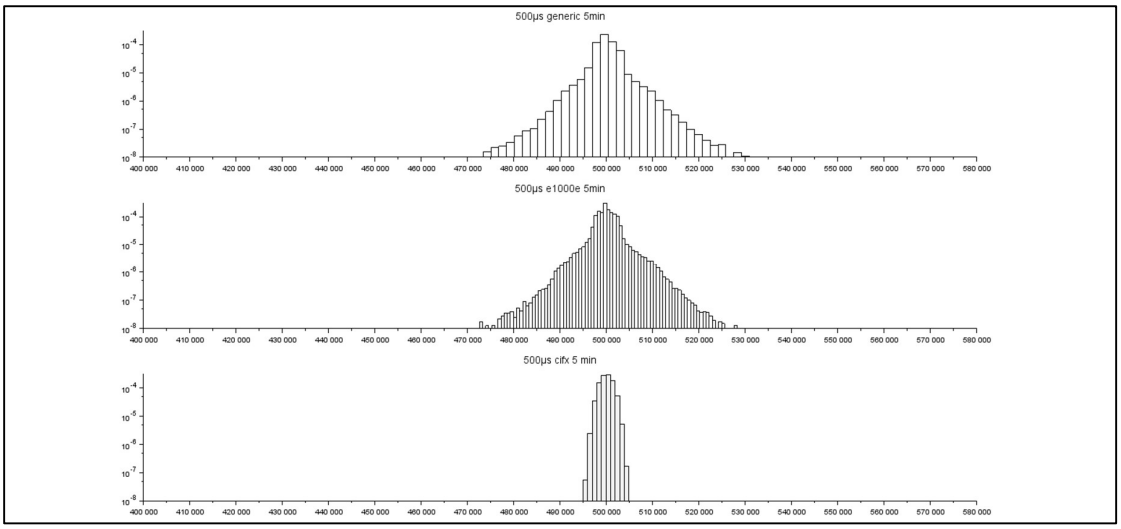


Figure 8. *Jitter - 500 microseconds EtherCAT cycle time*

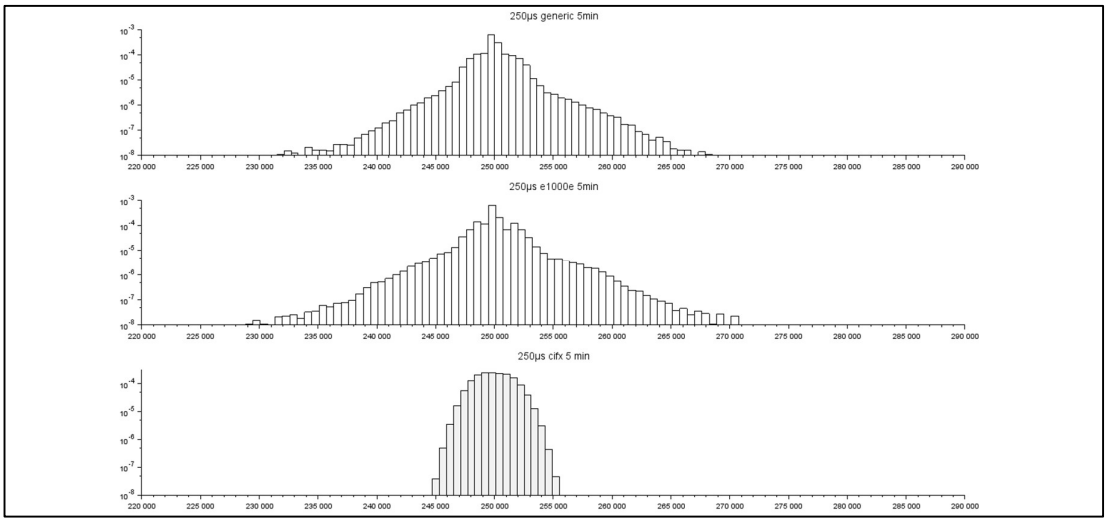


Figure 9. *Jitter - 250 microseconds EtherCAT cycle time*

Table 1. 1ms (300 000 samples) – jitter values			
	generic driver	*e1000e* driver	cifX-50RE card
Minimum	941350ns	964470ns	996130ns
Maximum	1047670ns	1038160ns	1003930ns
Range	106320ns	73690ns	7800ns
Standard Deviation	4011.3650ns	3424.3098ns	845.78597ns
Mean	999991.15ns	999990.96ns	999966.54ns

Table 2. 500µs (600 000 samples) – jitter values			
	generic driver	*e1000e* driver	cifX-50RE card
Minimum	400560ns	468480ns	494940ns
Maximum	569750ns	535590ns	504820ns
Range	169190ns	67110ns	9880ns
Standard Deviation	2519.5714ns	2542.4667ns	1186.0991ns
Mean	499995.46ns	499995.44ns	499982.97ns

Table 3. 250µs (1 200 000 samples) – jitter values			
	generic driver	*e1000e* driver	cifX-50RE card
Minimum	222560ns	220070ns	244110ns
Maximum	282240ns	282640ns	256110ns
Range	59680ns	62570ns	12000ns
Standard Deviation	1449.8119ns	1798.8300ns	1403.5689ns
Mean	249997.73ns	249997.72ns	249991.47ns

Tests were carried out for three different configurations of the EtherCAT communication interface in the CNC controller for three communication cycles with 1ms, 500µs, and 250µs. Communication cycle jitter data are summarized in Figures 7-9 and Tables 1-3.

In the case of a communication cycle of 1 ms, the jitter for the third configuration (using the cifX-50RE card) is the smallest of the other configurations (software EtherCAT stack implemented in the structures of the CNC controller). The situation is similar for shorter communication cycles - 500µs and 250µs. This result is in line with expectations because the dedicated and independent EtherCAT stack (implemented in the cifX-50RE card hardware) is not susceptible to interference in data processing compared to software solutions in the CNC controller (based on the Etherlab library).

However, the suspects about differences in the EtherCAT communication interface in the case of the first configuration using *generic* and *e1000e* drivers did not prove correct. It is expected that for the *e1000e* driver, the jitter spread values for all communication times will be significantly lower than for the *generic* driver. However, research shows that this difference is practically negligible.

5. CONCLUSION

The article describes the construction and operation of a CNC machine laboratory stand with H-Bot parallel kinematics using the EtherCAT bus. The basics of parallel kinematics for the H-Bot structure are presented. The developed numerical control system for machines was introduced and discussed. The research shows the results of the jitter of communication cycles (1ms, 500µs, and 250µs) for three different, developed by the authors, EtherCAT communication interfaces of the CNC controller. It can be concluded from the research results that the EtherCAT bus is most suitable for use in controlling CNC machines.

This is of particular importance in the case of further research on that stand, especially in developing and implementing advanced control algorithms and predictive maintenance in CNC machine control systems. The EtherCAT bus allows to connect of various types of control modules and measurement modules. In the future, it is planned to equip the H-Bot machine with sensors such as strain gauges (for measuring the tension of toothed belts) and accelerometers (single and triaxial - placed on a moving beam in the Y axis) connected to measuring modules with an EtherCAT interface. This will enable the aforementioned predictive maintenance research to be carried out in the future.

6. LITERATURE

[1] Sollmann, K. S.: *Modeling, simulation, and control of a belt driven, parallel H-frame type two axes positioning system*, M.S. thesis, Univ. Rhode Island, Kingston, RI, 2007.

[2] Sollmann, K.S., Jouaneh, M.K., and Lavender, D.: *Dynamic Modeling of a Two-Axis, Parallel, H-Frame-Type XY Positioning System*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 15, no. 2, pp. 280-290, April 2010, DOI: 10.1109/TMECH.2009.2020823.

[3] Paprocki, M., Erwinski, K.: *Synchronization of Electrical Drives via EtherCAT Fieldbus Communication Modules*, Energies, Vol. 15 No. 2, 604, 2022.

[4] Paprocki, Marcin, et al.: *PC-based CNC machine control system with LinuxCNC software*, Measurement Automation Monitoring, vol. 63, 2017.

[5] Siro, A., Emde, C., and Mc Guire, N.: *Assessment of the real-time preemption patches (RT-Preempt) and their impact on the general purpose performance of the system*, Proceedings of the 9th Realtime Linux Workshop, 2007.

[6] Shin, S.J., Suh, S.H., Stroud, I.: *Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications*, *Computer-Aided Design* vol.39, no.1, pp.1-16, 2007.

[7] IGH EtherCAT master for Linux, https://etherlab.org/en/ethercat/index.php, 09.2022

Paprocki, M., Erwiński, K., Zivanovic, S.

Laboratorijska CNC mašina sa H-Bot paralelnom kinematikom koja koristu EtherCAT magistralu

Rezime: *Ovaj rad predstavlja sistem upravljanja kinematikom H-Bot mašine. Tačnost mašine H-Bot zavisi od sinhronog rada servo pogona i mehaničkog dizajna. Dakle, na kvalitet kretanja mehaničkih osa utiču komunikaciona magistrala i sposobnost detekcije zazora i elastičnosti u osama mašine. EtherCAT – industrijska magistrala će se koristiti za komunikaciju između kontrolera i drugih elemenata sistema upravljanja mašinom. Svaka mehanička osa na H-Bot mašini je opremljena mernim sistemom pozicije . Laboratorijski štand je bio opremljen akcelerometrima. Planirano je izvođenje istraživanja u oblasti prediktivno održavanje i optimizacija putanje.*

Ključne reči: *H-Bot mašina, sistem upravljanja mašinom, EtherCAT, LinuxCNC*

43. JUPITER konferencija
39. simpozijum
Beograd 2022
NU * ROBOTI * FTS

Erwinski, K., Karasek, G. [1], Živanović, S. [2], Dimic, Z. [3], Slavkovic, N. [2]

REAL-TIME CONTROL OF A KEOPS-DELTA PARALLEL KINEMATICS MACHINE USING LINUXCNC AND ETHERCAT

Abstract

This paper presents a laboratory stand for investigating trajectory optimization algorithms for non-cartesian numerically controlled machines. The stand consists of a Delta machine in KEOPS configuration with linear motors controlled by high performance servo-drives. The machine is controlled by real-time control system with LinuxCNC software. The control is performed via real-time communication bus EtherCAT. The paper also describes the extension of the LinuxCNC control system with NURBS interpolaion and s-curve feedrate profiling. Also research to be performed on the machine is discussed concerning development of trajectory optimization algorithms for parallel kinematics machines.

Key words: *parallel kinematics, real-time Linux, LinuxCNC, Delta, KEOPS*

1. INTRODUCTION

Numerically controlled machines are an important part of modern manufacturing industry. Most of these machines are cartesian machines in which linear axes correspond to axes of the cartesian coordinate system. These axes are often serially linked. Recently multi-axis machines with parallel kinematics configuration are becoming more popular. In parallel kinematics machines the joints are directly coupled to the end effector but usually do not correspond to the cartesian axes. This allows to achieve highly dynamic motion with high speeds and accelerations. This is especially useful in applications which require highly dynamic motion such as laser engraving and pick and place There are numerous types of parallel kinematics machines of which the Delta kinematics is often used in industry.

In Delta kinematics three motors are coupled to the end effector usually via double rods connected by spherical joints [1]. The motors can be rotary or linear. The first type is often used by pick and place robots. The second type is also used in numerical machines such as milling machines or 3d printers due to higher stiffness and better precision. The linear axes can be vertical as in 3d printers, horizontal or angled [2]. Delta kinematics with angled linear axes is known as KEOPS-Delta or Tri-Pyramid kinematics [3]. The linear axes form a tetrahedron and are usually located 120 degrees apart on the base plate. This type provides a good compromise between vertical and horizontal stiffness and significantly better stiffness than a rotary delta machine. The linear axes can be driven by rotary motors with linear motion generated by a toothed belt or ball-screw. This introduces additional inaccuracies, mass and complicates the machine design. An alternative solution is to use linear motors which is presented in this paper.

In this paper a numerical control system is developed for a linear motor driven parallel kinematics machine in KEOPS-Delta configuration. Use of linear motors greatly simplifies the mechanical part of the machine. Because of the end effector rods are driven directly by linear motor forcers the stiffness and accuracy of the machine should also improve. Further accuracy improvement is achieved because each linear motor forcer is directly coupled to a linear encoder.

The paper describes the KEOPS Delta machine including the direct and inverse kinematic transformations. The Linux PC-based control system which is capable of Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) toolpath

[1] dr Krystian Erwinski (erwin@umk.pl), Gabriel Karasek (gabkaras@umk.pl), Institute of Engineering and Technology, Faculty of Physics Astronomy and Informatics, Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland
[2] prof. dr Saša Živanović (szivanovic@mas.bg.ac.rs), dr Nikola Slavković (nslavkovic@mas.bg.ac.rs) , University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
[3] dr Zoran Dimić, Lola Institute, Belgrade, Serbia, (zoran.dimic@li.rs)

interpolation capability is also described. The last section presents future research planned to be conducted on the research station.

2. DELTA-KEOPS MACHINE AND CONTROL SYSTEM

The parallel kinematics machine in KEOPS-Delta configuration, for which a control system was developed is presented in Figure1. The machine consists of three linear axes driven by Tecnotion UXA3S coreless linear motors with a nominal force of 120N each. Each linear axis is integrated with a linear absolute magnetic encoder (Renishaw LA11) with 1µm resolution and BiSS-C serial interface. The motors are controlled by Beckhoff AX8206 servo drives which communicate over EtherCAT fieldbus [4]. The linear axes are arranged in the form of a tetrahedron with an inclination angle of 45 degrees. Each axis has a movement range of 580mm.

In order to control any numerically controlled machine a centralized drive control system has to be used. Such a system generally consists of a graphical user interface (GUI), program interpreter, trajectory generation block, trajectory interpolation block and drive interface. The program interpreter converts the program to an internal path reference. The trajectory generation algorithm generates a feedrate profile for the desired path. The interpolator block generates consecutive positions on the toolpath which serve as machine position commands. The interpolator outputs are then processed by the inverse kinematics module to generate drive position commands

The Delta KEOPS machine is controlled by a PC with a real-time kernel Linux operating system and LinuxCNC control software. The real-time kernel provides time determinism for the control processes by prioritizing different critical and non-critical processes. The time-critical processes responsible for machine control cannot be preempted by lower priority processes such as handling the user interface which ensures that consecutive position commands will be sent to the drives at equal intervals regardless of system load. In this case the RT-Preempt real-time Linux kernel is used, however the system is capable of using the more mature RTAI kernel [5].

LinuxCNC is an open-source software for controlling Computerized Numerical Control machines. The software integrates a CNC GUI, G-Code interpreter, trajectory generation algorithm and interpolator. Furthermore the software provides an API to interface with the specialized real-time functions of RT-Preempt and RTAI Linux kernels. The API called HAL also facilitates creation of custom user real-time and non-real-time modules. These modules are created in C programming language and can be easily integrated with the rest of the system by using dedicated shared variables. The software also provides several kinematic transformations for 5-axis machines, robots, rotary and linear delta machines. The KEOPS-Delta kinematics transformation is not supported by default and had to be implemented by the authors. The equations describing the KEOPS kinematic transformation are presented in section 3. A block schematic of the control system and the picture of the actual KEOPS-Delta machine is presented on Figure 1.

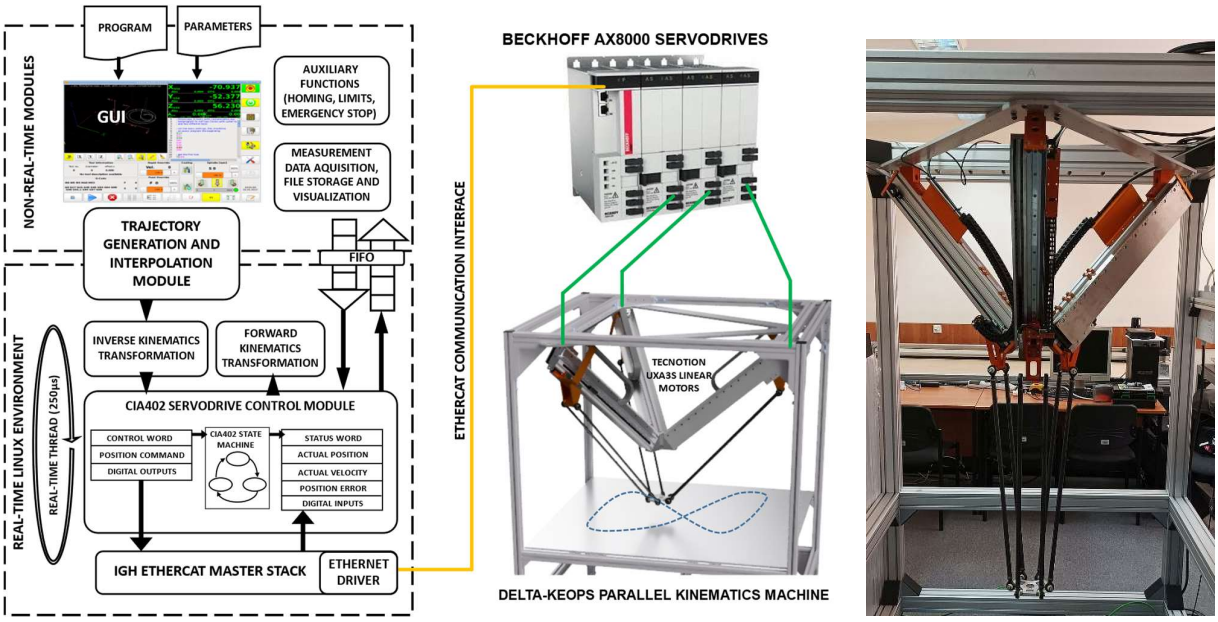


Figure 1. *Block schematic of the control system* (left) and picture of the KEOPS-Delta machine

The software does not provide any modern industrial communication interface. In order to communicate with the servo drives the EtherCAT communication stack was implemented in software. EtherCAT is an industrial real-time communication bus based on 100Mbps Ethernet physical layer. Due to its compatiblity with standard Ethernet cards the master stack can be implemented on a standard PC. Time deterministic communication is achieved by precise synchronization between slave nodes and the master as well as on-the-fly processing of the protocol frame by each slave. Due to real-time requirements it is critical that the stack is implemented on a platform with a real-time operating system.

At the application layer EtherCAT utilizes the CANOpen standard which is commonly used in industry with CAN BUS. The CANOpen standard defines a set of objects that form the Object Dictionary. Each object has an address (index) and possibly a subaddress (subindex) that identifies each configuration or process variable. These can be mapped to a Process Data Object (PDO) which is a data structure of process variables that are transmitted and recieved between the master and slaves at each communication cycle. Most EtherCAT drives including the AX8000 series require the master to follow the Can in Automation 402 device profile which defines standard Object Dictionary entries common to all drives regardless of the manufacturer. There is also a standard state machine which governs each drive and can be controlled by the master via standardized Control Word and Status Word transmitted cyclically [6].

In order to integrate EtherCAT with LinuxCNC an open-source stack IGH EtherCAT Master [7] was used. The stack uses standard Ethernet cards and system drivers but utilizes the capabilities of the real-time kernel to deterministically communicate with servo-drives. The compiled stack is a kernel module which provides an API to map chosen variables into the Process Data Object and send and recieve it over the network. In order to access this API a dedicated module was developed by the authors in the LinuxCNC HAL that implements variables compatible with the CiA402 standard such as Control Word, Status Word, Position Demand, Actual Position etc. These variables are made available to the LinuxCNC HAL as shared variables (also called pins) which can be connected to any other module such as those responsible for path interpolation or kinematics transformation. A 250µs real-time thread is created to which all functions of modules related to machine control are attached.

3. Delta KEOPS kinematics

Most machine control system perform trajectory planning and interpolation in cartesian space. For any machine with non-cartesian kinematics an inverse kinematics transformation is required to convert position command values in cartesian space to drive commands in axis/joint space. Forward kinematics transformation is used to convert axis positions to cartesian positions which is useful for actual path visualisation and control.

The Delta-KEOPS kinematics is derived by assuming that each linear axis is equally spaced at 120 degrees. The first linear axis q1 corresponds to the x axis of the cartesian coordinate system, which origin is placed at the center of the triangual base. Other important design parameters that influence the computation of forward and inverse kinematics are:

- linear axis inclination angle (α)
- length of rods that connect the axis carriage and the end effector plate (L)
- x-plane projection of the distance between the origin and the axis rod joint (xref)
- y-plane projection of the distance between the origin and the axis rod joint (yref)
- end effector offset (EO) – distance between the end effector plate center and rod joint

It is assumed that the x_{ref} and y_{ref} distances are specified for axis position q_1=0 (maximum top position of each linear axis). It is also assumed that the first axis (q_1) is colinear with the x axis of the cartesian system. The design parameters are illustrated on Figure 2.

In order to obtain the forward and inverse kinematics transformations unit vectors a_1, a_2, a_3 have to be computed which point to the vertices of the triangual base plate:

$$a_1 = [-\cos(\alpha); 0; \ -\sin(\alpha)\ ] \tag{1}$$

$$a_2 = [1/2 * \cos(\alpha); \ -1/2 * \sqrt{3} * \cos(\alpha); \ -\sin(\alpha)\ ] \tag{2}$$

$$a_3 = [1/2 * \cos(\alpha); \ 1/2 * \sqrt{3} * \cos(\alpha); \ -\sin(\alpha)\ ] \tag{3}$$

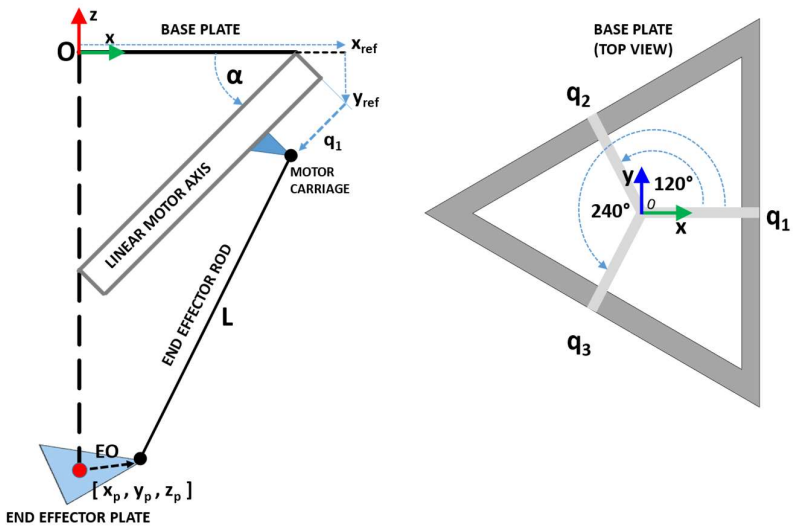


Figure 2. *Ilustration of parameters relevant to forward and inverse kinematic transformation for axis q1*

Then the d_1 vector is computed which is the vector between the q_1 linear axis rod joint and the centerline minus the end effector offset vector (EO). Vectors d_2 and d_3 are created by applying a rotation transformation around the origin to vector d_1. The vectors are rotated by 120 and 240 degrees respectively which corresponds to linear axes q_2 and q_3.

$$d_1 = [-(xref - EO);\ 0\ ;\ yref\ ] \tag{4}$$

$$d_2 = [\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) * d_1(1) - \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) * d_1(2)\ ;\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) * d_1(1) + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) * d_1(2)\ ; yref\ ] \tag{5}$$

$$d_3 = [\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) * d_1(1) - \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) * d_1(2)\ ;\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) * d_1(1) + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) * d_1(2)\ ; yref\ ] \tag{6}$$

Inverse kinematics is obtained by the following formulas:

$$E_i = \mathrm{a_i}(1)\ * \left(\mathrm{x} + \mathrm{d_i}(1)\right) + \mathrm{a_i}(2) * \left(\mathrm{y_p} + \mathrm{d_i}(2)\right) + \mathrm{a_i}(3) * \left(\mathrm{z_p} + \mathrm{d_i}(3)\right) \tag{7}$$

$$F_i = \left(x_p + d_i(1)\right)^2 + \left(y_p + d_i(2)\ \right)^2 + \left(z_p + d_i(3)\ \right)^2 + L^2 \tag{8}$$

$$q_i = E_i - \sqrt{E_i^2 - F_i} \tag{9}$$

where: i – index of each linear axis (1,2,3), q_i – position of the linear axis i, x_p,y_p,z_p – cartesian position of end effector, E_i, F_i – auxiliary variables for each linear axis used to simplify the formulas.
In order to obtain forward kinematics some auxiliary variables are first introduced which use d vectors given by equations 4-6 and positions of the linear axes q_i:

$$A_i = 2 * (\mathrm{d_i}(1) + q_i * \cos(\alpha) * \cos\left((i-1) * \frac{2\pi}{3}\right) \tag{10}$$

$$B_i = 2 * (\mathrm{d_i}(2) + q_i * \cos(\alpha) * \sin\left((i-1) * \frac{2\pi}{3}\right) \tag{11}$$

$$C_i = 2 * (\mathrm{d_i}(3) + q_i * \sin(\alpha) \tag{12}$$

$$D_i = \mathrm{d_i}(1)^2 + \mathrm{d_i}(2)^2 + \mathrm{d_i}(3)^2 + q_i^2 - \mathrm{L}^2 + 2 * q_i * (d_i(1) * \cos(\alpha) * \cos\left((i-1) * \frac{2\pi}{3}\right) + \cdots$$
$$+ d_i(2) * \cos(\alpha) * sin((1-i) * \frac{2\pi}{3})\ + d_i(3) * \sin(\alpha)) \tag{13}$$

Further auxiliary variables are introduced to simplify the formulas:

$$B_4 = -\frac{B_1 - B_2}{A_1 - A_2}\ ;\ C_4 = -\frac{C_1 - C_2}{A_1 - A_2}\ ;\ D_4 = -\frac{D_1 - D_2}{A_1 - A_2} \tag{14}$$

$$C_5 = -\frac{C_2 - C_3 + (A_2 - A_3) * C_4}{B_2 - B_3 + (A_2 - A_3) * B_4} \tag{15}$$

$$D_5 = -\frac{D_2 - D_3 + (A_2 - A_3) * D_4}{B_2 - B_3 + (A_2 - A_3) * B_4} \tag{16}$$

$$C_6 = C_4 + B_4 * C_5 \tag{17}$$

$$D_6 = D_6 + B_6 * D_5 \tag{18}$$

$$K_1 = C_6^2 + C_5^2 + 1 \tag{19}$$

$$K_2 = 2 * C_6 * D_6 + 2 * C_5 * D_5 + A_3 * C_6 + B_3 * C_5 + C_3 \tag{20}$$

$$K_3 = D_6^2 + D_5^2 + A_3 * D_6 + B_3 * D_5 + D_3 \tag{21}$$

$$K_1 z_p^2 + K_2 z_p + K_3 = 0 \tag{22}$$

The solutions to the forward kinematics problem are given by a solution to quadratic equation (22). One of two solutions is chosen which corresponds to the case where the end effector lies below the linear axes:

$$z_p = \frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4 * K_1 * K_3}}{2 * K_1} \tag{23}$$

$$y_p = C_5 * z_p + D_5 \tag{24}$$

$$x_p = C_6 * z_p + D_6 \tag{25}$$

4. EXTENSION OF THE CONTROL SOFTWARE AND PLANNED RESEARCH

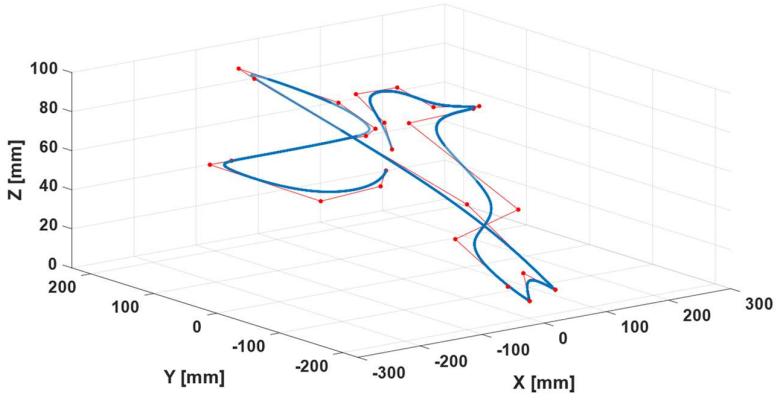


Figure 3. *Example of a 3d NURBS Curve (blue) with control points (red)*

The KEOPS-Delta parallel kinematics machine motion can be programmed using standard G-Code by utilizing the standard LinuxCNC block AXIS. This block performs linear and circular interpolation with look-ahead function and trapezoidal feedrate profiling. Due to high dynamics of a linear motor based parallel kinematics machine more advanced profiling and interpolation methods are required. For several years Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) polynomial curves are used in research for defining toolpaths [8, 9]. NURBS can define complex shapes with much less data points than g-code. The toolpath defined by NURBS is also smooth which is important when travelling along the path with high speeds. The curve shape is defined by control points which influence the curve locally. Any point on the curve is defined by a unique value of a unitless curve parameter (u). Position on the curve as well as curve derivatives for a given value of u are computed using de Boor's algorithm [10]. An example NURBS toolpath is shown in Figure 3.

The NURBS curve toolpath interpolation is more complex than linear and circular interpolation due to non-linear and unique relationship between the curve's arc length and parameter value. At each interpolation step a curve parameter increment is computed which corresponds to the desired arc-lenght increment which in turn depends on the feedrate value. The feedrate value (velocity tangent to the toolpath) is defined by a feedrate profile which is a function of the curve parameter or time. This non-linear interpolation problem can be solved using Taylor series or Predictor-Corrector methods [11, 12].

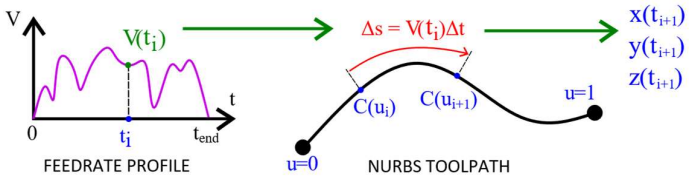


Figure 4. *Illustration of NURBS interpolation.*

$C(u_i)$, $C(u_{i+1})$ – curve positions at current and next interpolation points, $V(t_i)$ – current feedrate value, $x,y,z(t_{i+1})$ – next cartesian axis position values, t_i – current time step, u_i,u_{i+1} – current and next curve parameter values, Δs – desired arc-length increment, Δt – interpolation time step

Trapezoidal profiling implemented in LinuxCNC is not optimal for highly dynamic motion as the lack of jerk limitation can cause unwanted vibrations in the relatively light effector of the KEOPS-Delta machine. The authors developed a custom NURBS toolpath feedrate planning and interpolation module. A planar or spatial curve is interpolated based on a jerk-limited (s-curve) feedrate profile which is modified to take into account the curvature of the curve. The feedrate profile is generated by scanning the NURBS toolpath and computing a feedrate limiting function (FLF). This function returns maximum allowable feedrate which is the minimum value of maximum feedrate, feedrate limit based on a linearization of cartesian axis acceleration and jerk constraints and feedrate limit due to limitation of chord error. The chord error is the error caused by interpolation of a curved toopath by discrete points. The FLF is computed with the following equations [13]:

$$F_{clim} = \frac{2}{T}\sqrt{\rho^2 - (\rho - \varepsilon)^2}\,; \quad F_{alim} = \sqrt{\frac{A_{max}}{\kappa}}\,; \quad F_{jlim} = \sqrt[3]{\frac{J_{max}}{\kappa^2}} \tag{26}$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{\|C' \times C''\|}{\|C'\|^3} \tag{27}$$

$$FLF = \min\left(F_{max}, F_{clim}, F_{alim}, F_{jlim}\right) \tag{28}$$

where: ρ – curvature radius, κ – curvature, ε – maximum chord error, A_{max}, J_{max} – maximum acceleration and jerk, T – interpolation time, C', C'' – first and second derivative of the NURBS toolpath

This function is just an approximation of actual axis limits but allows to indicate critical points for which the feedrate achieves local minima. The S-Curve feedrate profile is then planned between these minima where the start and end feedrates are obtained from the FLF. Based on initial, maximum and end feedrates, maximum acceleration and jerk the distance covered by the profile is checked against the arc-length between feedrate critical points. If the distance is too large the maximum feedrate value is decreased by way of one-dimensional bisection search until the profile fits the distance. In order to handle actual axial limits the The s-curve generation algorithm adds another step that checks if the axial limits are violated. If so the profile acceleration or jerk are iteratively decreased until there is no axial violation. This method is described in detail in the authors' paper [14]. This method works well for cartesian machines however for machines with non-linear kinematics such as KEOPS-Delta the axis limitations cannot be guaranteed.

The main aim of the research, which will be performed on the presented station, is the development of computationally efficient feedrate optimization algorithms. These will minimize trajectory execution time taking account machine limits. These limits should include limitations of the machine axes such as maximum velocity, maximum drive current. Such a task is non-trivial and has been investigated for cartesian machines. It is even more complex for parallel kinematics machines due to inlcusion of non-linear forward and inverse kinematics transformation.

The s-curve feedrate planning method developed by the authors for limiting axial acceleration and jerk for planar high speed machines will be used as an initial guess. The generated s-curve feedrate profile will be converted to a B-Spline polynomial curve profile. The Particle Swarm Optimization algorithm will be used to adjust the initial feedrate profile. The authors developed a similar method for planar cartesian machines [15] which will be extended to handle non-linear kinematics of the Delta-KEOPS. The algorithms will be implemented in the machine as a user-space program, which will generate optimized velocity profile for the NURBS interpolator. The aim is to maximize the dynamics of the Delta-KEOPS machine while maintaining the linear axes within their limits of acceleration, jerk and error.

5. PRELIMINARY EXPERIMENTAL RESULTS

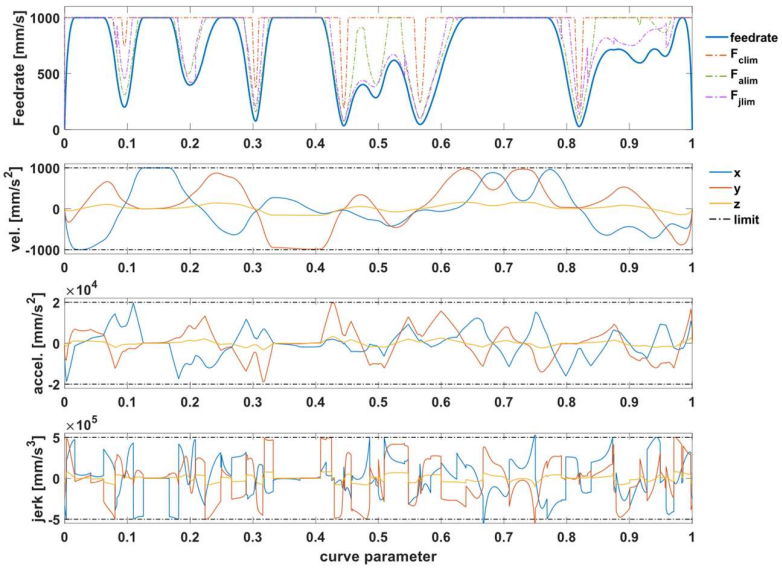


Figure 5. *Feedrate profile and cartesian axis velocity, acceleration and jerk generated for »bird« NURBS curve. Note that the minima of the feedrate profile correspond to the sharp corners on the curve.*

As described in the previous section, an s-curve feedrate profile was generated for the »bird« NURBS toolpath presented on Figure 3. The profile was generated with the velocity, acceleration and jerk limits set to 1000 mm/s, 10000 mm/s2 and $5*10^5$ mm/s^3 respectively. The chord error limit was set to 0.001 mm. The generated feedrate profile as well as axis velocity, acceleration and jerk profiles are presented on Figure 5. In can be seen that the feedrate generation algorithm generates the s-curve profiles so that it lies beneath the FLF. The algorithm limits the cartesian axis velocity, acceleration and jerk to the prescribed limits.

The feedrate profile shown above was used to interpolate the »bird« toolpath and generate position commands for the KEOPS-Delta machine. The interpolated positions were converted to linear axes position commands and run on the machine. Values of position, velocity, acceleration and jerk for each linear axis are shown in Figure 6. It can be seen that the individual values significantly violate the axial limits which are imposed on the cartesian axes. However the achieved values are still within the capabilities of the linear motors. This shows that the non-linear kinematics significantly influences the generated profiles. Utilization of optimization algorithms to generate a feedrate profile that does not violate the linear axis limits is necessary which will be the goal of further research.

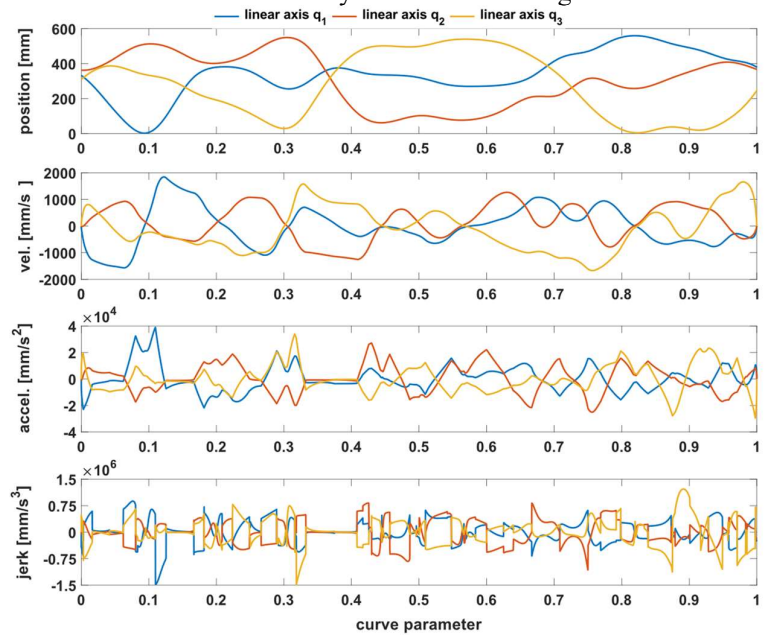


Figure 6. *Position, velocity, acceleration and jerk profiles for linear axes (after inverse kinematics*

6. CONCLUSION

The paper presents a control system for a parallel kinematics machine in the KEOPS-Delta configuration. Instead of commonly used linear belt drives or ballscrews the machine is driven by linear motors. The machine's PC-based control system utilizing the LinuxCNC control software, was described. The forward and inverse kinematic transformations, necessary for control of non-cartesian machines, was also presented. Further research goals which include development of constrained feedrate optimization algorithms are presented along with preliminary results. The presented research station with KEOPS-Delta parallel kinematics machine can achieve highly dynamic motion useful for high speed manufacturing.

7. LITERATURE

[1] Pierrot, F., Reynaud C., Fournier, A.: *DELTA: a simple and efficient parallel robot.* Robotica 8.2, pp. 105-109, 1990

[2] Bouri, M., Clavel, R.: *The linear delta: Developments and applications,* ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics),pp. 1–8, Munich, Germany, 7-9.06.2010

[3] Zeng, Q., Ehmann, K. F., Cao, J.: *Tri-pyramid Robot: Design and kinematic analysis of a 3-DOF translational parallel manipulator*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 30, No. 6, pp. 648-657, 2014.

[4] Jansen, D., Buttner, H.,: *Real-time Ethernet: the EtherCAT solution,* Computing and Control Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 16-21, 2004.

[5] Jo, Y. H., Choi, B. W.: *Performance Evaluation of Real-time Linux for an Industrial Real-time Platform,* International journal of advanced smart convergence, Vol. 11, No. 1, pp. 28-35, 2022.

[6] Paprocki, M., Erwinski, K.: *Synchronization of Electrical Drives via EtherCAT Fieldbus Communication Modules*, Energies, Vol. 15 No. 2, 604, 2022.

[7] IGH EtherCAT master for Linux, https://etherlab.org/en/ethercat/index.php, 09.2022

[8] Zhao H., Zhu L., Ding H.: *A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for cnc machining of short line segments*, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 65, pp. 88–98, 2013

[9] Mercy T., Jacquod N., Herzog R., Pipeleers G., *Spline-based trajectory generation for cnc machines*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 8, pp. 6098–6107, 2018

[10] Piegl L., Tiller W.: *The NURBS book,* Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 1997

[11] Erwinski, K., Paprocki, M., Karasek, G.: *Comparison of NURBS trajectory interpolation algorithms for high-speed motion control systems,* IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), pp. 527-533. Gliwice, Poland, IEEE, 25-29.04.2021

[12] Jia Z.-Y., Song D.-N., Ma J.-W., Hu G.-Q., Su W.-W., *A nurbs interpolator with constant speed at feedrate-sensitive regions under drive and contour-error constraints*, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 116, pp. 1–17, 2017

[13] Sun Y., Chen M., Jia J., Lee Y.-S., Guo D., *Jerk-limited feedrate scheduling and optimization for five-axis machining using new piecewise linear programming approach*, Science China Technological Sciences, Vol. 62, No. 7, pp. 1067–1081, 2019

[14] Erwinski, K., Wawrzak, A., Paprocki, M.: *Real-time jerk limited feedrate profiling and interpolation for linear motor multi-axis machines using NURBS toolpaths*, IEEE Transactions on Industrial Informatics (Early Access, 1.02.2022), doi: 10.1109/TII.2022.3147806.

[15] Erwinski, K., Szczepanski, R., Tarczewski, T.: *Nature inspired optimization of jerk limited feedrate profile for NURBS toolpaths in CNC machines*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1140, Modern Materials and Manufacturing (MMM 2021), 27-29.04.2021, Tallinn, Estonia.

Erwinski, K., Karasek, G., Živanović, S., Dimic, Z., Slavkovic, N.

UPRAVLJANJE U REALNOM VREMENU KEOPS-DELTA MAŠINOM SA PARALELNOM KINEMATIKOM BAZIRANO NA LINUXCNC I ETHERCAT-u

U ovom radu je predstavljena laboratorijska postavka za razvoj algoritama optimizacije trajektorije numerički upravljanih mašina alatki sa spegnutim osama. Laboratorijsku postavku čine DELTA mehanizam u KEOPS konfiguraciji sa linearnim osnaženim osama pogonjenih servo pogonima visokih performansi. Upravljanje mašinom je bazirano na LinuxCNC softverskom sistemu. Komunikacija pri upravljanju se vrši u realnom vremenu preko EtherCAT-a. U radu je takođe opisano proširenje LinuxCNC upravljačkog sistema sa NURBS interpolacijom i profilisanjem brzine pomoćnog kretanja pomoću s-krive. Dalja istraživanja će se odnositi na razvoj algoritama optimizacije trajektorije za mašine alatke sa paralelnom kinematikom.

Ključne reči: *paralelna kinematika, Linux, LinuxCNC, Delta, KEOPS*

Vasić, M.[1], Blagojević, M.[2], Nestorović, G.[3]

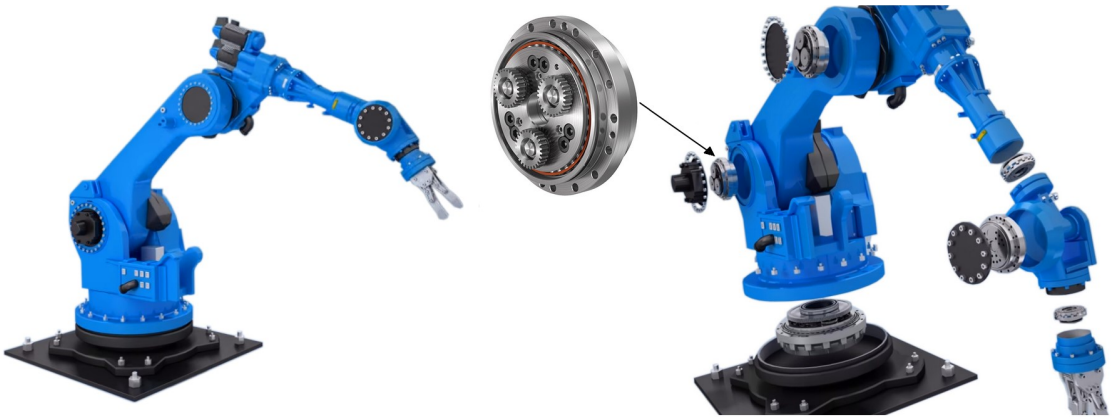
VISOKOPRECIZNI REDUKTORI ZA INDUSTRIJSKE ROBOTE

Rezime: *Industrija robota je u poslednjoj deceniji doživela pravu ekspanziju. Posledica ove ekspanzije je razvoj "pametnih fabrika" u kojima je proces proizvodnje potpuno automatizovan. Zahvaljujući toj činjenici, tržište reduktora sa velikim prenosnim odnosima, visokom preciznošću i kompaktnom konstrukcijom beleži veliki rast. Iako se industrijski roboti, kao složeni mehatronički sistemi, sastoje od velikog broja mehaničkih i električnih komponenti, oni sadrže i veliki broj visokopreciznih reduktora. Pored planetarnih i talasnih, u ovu grupu spadaju i cikloidni reduktori (cikloreduktori).*
Stoga, cilj ovog rada je uporedni pregled osnovnih karakteristika visokopreciznih reduktora koji se upotrebljavaju u industrijskim robotima.

Ključne reči: *industrijski roboti, karakteristike visokopreciznih reduktora, planetarni reduktori, talasni reduktori, cikloreduktori*

1. UVOD

Industrijski roboti imaju široku primenu u mnogim oblastima, a zahtevi za njihovim karakteristikama, kao što su velika brzina i visoka preciznost, postaju sve složeniji [1]. Iako se sastoje od velikog broja mehaničkih i električnih komponenti kao što su: kinematski parovi - zglobovi, pogonski motori, upravljački sistemi, senzori, radni organi za manipulaciju, zavarivanje, montažu, obradu rezanjem i drugi [2,3], veoma precizno složeno kretanje vrše zahvaljujući visokopreciznim reduktorima koji se nalaze u njihovim zglobovima (slika 1).



Slika 1. *Prikaz visokopreciznih reduktora u zglobovima Nabtesco industrijskog robota, [4]*

U zavisnosti od principa, načina prenosa snage i kretanja, visokoprecizni reduktori (u daljem tekstu VP reduktori) mogu se podeliti u tri osnovne grupe: planetarne, talasne i cikloidne [5,6]. U praktičnoj primeni veoma često se koriste i njihove međusobne kombinacije [2].

Koji će tip reduktora biti primenjen zavisi od mnogih faktora kao što su potrebni prenosni odnos, dimenzije, težina, obrtni moment, tačnost pozicioniranja, stepen iskorišćenja, cena i dr.

Planetarni reduktori predstavljaju najstariji tip VP reduktora. Do danas je predložen veliki broj njihovih koncepcija, ali nisu sve realizovane u praksi. Talasni reduktori predstavljaju relativno novi tip reduktora.

[1] asist. mr Milan Vasić, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Primenjene inženjerske nauke Požarevac, (mvasic@atssb.edu.rs)
[2] prof. dr Mirko Blagojević, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, (mirkob@kg.ac.rs)
[3] prof. dr Goran Nestorović, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Primenjene inženjerske nauke Požarevac, (gnestorovic@atssb.edu.rs)

Razvijeni su pedestih godina prošlog veka za potrebe vazduhoplovstva, a danas su prihvaćeni u svim oblastima industrije. Cikloreduktori su razvijeni tridestih godina prošlog veka kao posebna grupa planetarnih reduktora i imaju sve veću primenu u inženjerskoj praksi.

U okviru ovog rada opisana su tipična konstrukciona rešenja VP reduktora, a pored toga izvršena je i uporedna analiza njihovih osnovnih karakteristika.

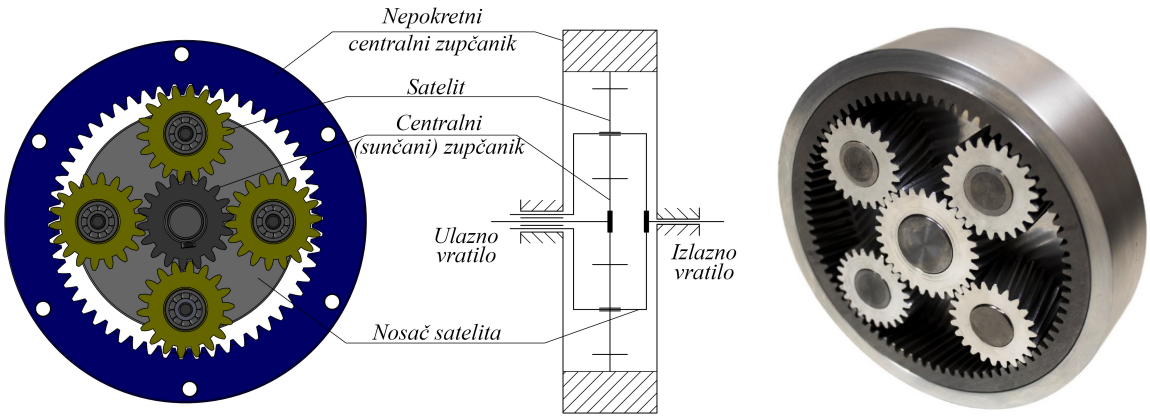
2. KONSTRUKCIONA REŠENJA VP REDUKTORA

2.1 Planetarni reduktori

Tipičan i široko rasprostranjeni jednostepeni planetarni reduktor prikazan je na slici 2. Pored ovog, u primeni su i drugi jednostepeni, kao i višestepeni planetarni reduktori sa različitim izvođenjima.

Prikazani planetarni reduktor sastoji se od centralnog (sunčanog) zupčanika sa evolventnim ozubljenjem koji je čvrsto povezan sa ulaznim vratilom, kao i od centralnog zupčanika sa unutrašnjim ozubljenjem, satelita i nosača koji je čvrsto povezan sa izlaznim vratilom.

Prilikom obrtanja ulaznog vratila, sunčani zupčanik spreže se sa satelitima koji se istovremeno sprežu i sa centralnim zupčanikom sa unutrašnjim ozubljenjem. Pri tome, sateliti vrše složeno kretanje, odnosno okreću se oko sopstvene ose i okreću se zajedno sa nosačem satelita.



Slika 2. *Tipična i široko rasprostranjena koncepcija jednostepenog planetarnog reduktora*

Prenosni odnos za prikazani planetarni reduktor, kod koga je centralni zupčanik sa unutrašnjim ozubljenjem nepokretan, može da se odredi na osnovu izraza [7]:

$$u_{PR} = \frac{z_b + z_a}{z_a} \tag{1}$$

gde su: z_b – broj zubaca centralnog zupčanika sa unutrašnjim ozubljenjem; z_a – broj zubaca sunčanog zupčanika (zupčanika sa spoljašnjim ozubljenjem).

Izrazi za prenosni odnos kada su drugi članovi nepokretni, kao i izrazi za druge koncepcije, izrazi za proračun obrtnih momenata i model za predviđanje vrednosti stepena iskorišćena detaljno su analizirani u literaturi [7].

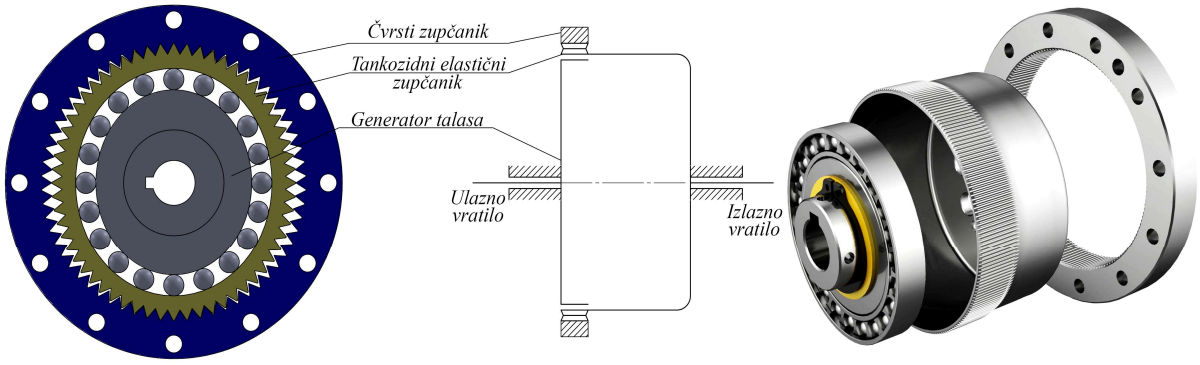
Uporedna analiza karakteristika najzastupljenijih planetarnih reduktora u industrijskim robotima prikazana je Tabelom 1.

Tabela 1. Karakteristike najzastupljenijih planetarnih reduktora u industrijskim robotima

	NIDEC-SHIMPO (2018) VRL 155 [8]	**NEUGART (2022) PLE 080** [9]	**WITTENSTEIN (2022) Alpha SP+075MF** [10]
Prenosni odnos	1:100 (dvostepeni)	1:100 (trostepeni)	1:100 (dvostepeni)
Ubrzanje / Nominalni obrtni moment	470/240 Nm	192/120 Nm	105/84 Nm
Težina	18 kg	3,1 kg	3 kg
Oblik	Ø155 × L159,5 mm	Ø80 × L168 mm	Ø95 × L120 mm
Stepen iskorišćenja	90 %	92 %	94 %
Max. ulazni broj obrtaja	4000 min^{-1}	7000 min^{-1}	8500 min^{-1}

2.2 Talasni reduktori

U osnovi, talasni reduktori sastoje se od tri vitalna elementa čije se ose međusobno poklapaju. To su: elastični zupčanik, čvrsti zupčanik i generator talasa (slika 3). Elastični zupčanik je netipičan mašinski element koji ima oblik tankozidnog cilindra. Na otvorenom kraju ima spoljašnje ozubljenje, a na drugom kraju je povezan sa izlaznim vratilom. Čvrsti zupčanik je kružnog oblika i ima unutrašnje ozubljenje. Najčešće je vezan za kućište i ne vrši nikakvo kretanje. Generator talasa, koji je elipsastog ili nekog drugog oblika, čvrsto je vezan za ulazno vratilo i radijalno deformiše elastični zupčanik, tako da se elastični i čvrsti zupčanik sprežu samo u oblasti većeg prečnika generatora talasa. Broj zubaca čvrstog zupčanika $\boldsymbol{z_c}$ je veći od broja zubaca elastičnog zupčanika $\boldsymbol{z_e}$. Najčešće ta razlika iznosi $\boldsymbol{z_c - z_e = 2}$.



Slika 3. *Tipična i široko rasprostranjena koncepcija jednostepenog talasnog reduktora*

Za prikazani talasni reduktor kod koga je čvrsti zupčanik sa unutrašnjim ozubljenjem nepokretan, generator talasa je pogonski, a tankozidni elastični zupčanik je vođeni član, pa prenosni odnos može da se odredi na osnovu izraza [11]:

$$u_{TR} = -\frac{z_e}{z_c - z_e} \tag{2}$$

gde su: z_e – broj zubaca tankozidnog elastičnog zupčanika; z_c – broj zubaca čvrstog zupčanika.

Prenosni odnos je negativan (-) jer se generator talasa okreće u suprotnom smeru od smera obrtanja elastičnog zupčanika.

Izrazi za prenosni odnos ostalih koncepcija talasnih reduktora, izrazi za proračun obrtnih momenata i model za predviđanje vrednosti stepena iskorišćena detaljno su analizirani u literaturi [11].

Uporedna analiza karakteristika najzastupljenijih talasnih reduktora u industrijskim robotima prikazana je Tabelom 2.

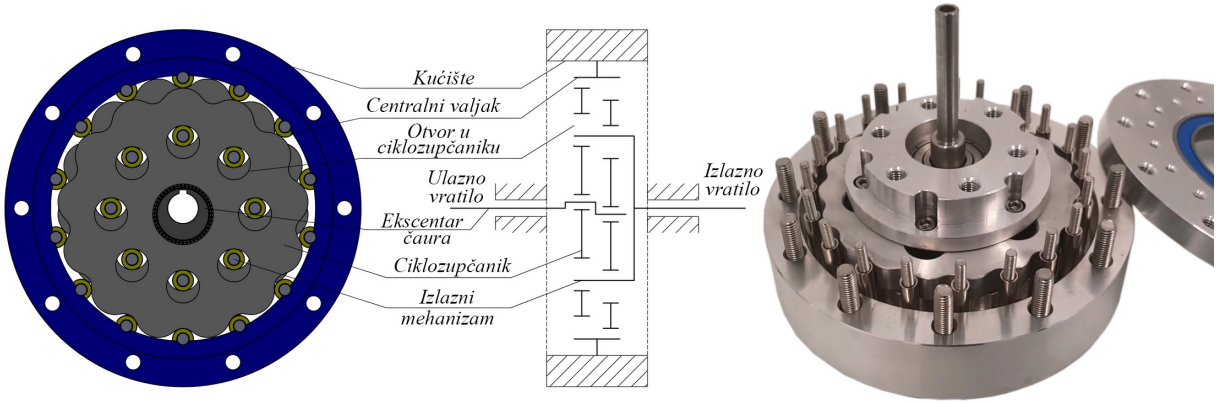
Tabela 2. Karakteristike najzastupljenijih talasnih reduktora u industrijskim robotima

	HARMONIC DRIVE (2014) CSD-25-160-2A [12]	**Harmonic Drive (2019) CSG-25-160-2UH-LW** [13]	**SUMITOMO (2020) E-CY-107-100** [14]
Prenosni odnos	1:100	1:100	1:100
Ubrzanje / Nominalni obrtni moment	123/47 Nm	204/87 Nm	157/67 Nm
Težina	0,24 kg	1,1 kg	1,6 kg
Oblik	Ø85 × L17 mm	Ø107 × L52 mm	Ø95 × L58 mm
Stepen iskorišćenja	75 %	84 %	70 %
Max. ulazni broj obrtaja	7500 min^{-1}	7500 min^{-1}	6500 min^{-1}

2.3 Cikloreduktori

Vitalni element cikloreduktora svakako je ciklozupčanik (zupčanik sa cikloidnim ozubljenjem) koji je preko ležaja oslonjen na ekscentar čauru. Prilikom obrtanja ulaznog vratila koje je čvrsto povezano sa ekscentar čaurom, ciklozupčanik vrši složeno kretanje i spreže se sa centralnim valjcima koji su raspoređeni po obodu nepokretnog centralnog zupčanika (slika 4). Kao rezultat toga, ciklozupčanik se okreće u suprotnom smeru od smera obrtanja ulaznog vratila, a ovo okretanje se prenosi na izlazne valjke koji prolaze kroz kružne otvore u ciklozupčaniku, a čiji je nosač čvrsto vezan za izlazno vratilo.

U praksi, uglavnom se koriste dva ciklozupčanika, međusobno zaokrenuta za ugao od 180° radi uravnoteženja inercijalnih sila. Broj obodnih centralnih valjaka $\boldsymbol{z_2}$ je kod većine koncepcija cikloreduktora za jedan veći od broja zubaca ciklozupčanika $\boldsymbol{z_1}$.



Slika 4. *Tipična i široko rasprostranjena koncepcija jednostepenog cikloreduktora*

Za prikazani cikloreduktor prenosni odnos može da se odredi na osnovu izraza [15]:

$$u_{CR} = -\frac{z_1}{z_2 - z_1} \tag{3}$$

gde su: z_1 – broj zubaca ciklozupčanika; z_2 – broj centralnih valjaka.

Prenosni odnos je negativan (-) jer se izlazno vratilo okreće u suprotnom smeru od smera obrtanja ulaznog vratila.

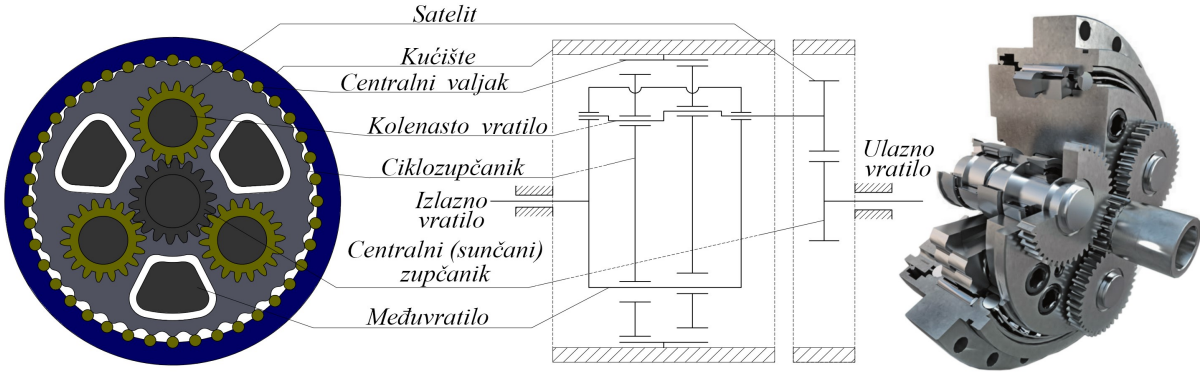
Izrazi za proračun obrtnih momenata detaljno su analizirani u literaturi [15], dok je jedan od najprihvatljivijih modela za predviđanje vrednosti stepena iskorišćenja predložen u radu [16].

U praktičnoj primeni najčešće se koristi kombinacija planetarnih i cikloidnih reduktora. Apsolutni lideri u proizvodnji takvih reduktora su Japanske kompanije *Nabtesco* i *Sumitomo,* a dvostepeni reduktor kompanije *Nabtesco* serije RV-N prikazan je na slici 5.

Prvi stepen prenosa predstavljaju planetarni evolventni zupčanici, dok drugi deo čine zupčanici sa cikloidnim ozubljenjem (slika 5).

Baš kao i kod klasičnih planetarnih reduktora, planetarni deo sastoji se od centralnog (sunčanog) zupčanika koji se spreže sa satelitima pri čemu se obrtno kretanje sa satelita prenosi na kolenasta vratila koja izazivaju ekscentrično kretanje dva ciklozupčanika međusobno zaokrenuta za ugao od 180°.

Ekscentričnim kretanjem, zubci ciklozupčanika sprežu se sa centralnim valjcima koji su raspoređeni po obodu nepomičnog dela kućišta. Kao rezultat toga, ciklozupčanik se okreće u suprotnom smeru od ulaznog vratila, a ovo okretanje, prenosi se na izlazna međuvratila, oblika zaobljenog trapeza, koja su zavrtnjevima pričvršćena za izlazni mehanizam.



Slika 5. *RV reduktor (Nabtesco), [4]*

Za prikazani RV reduktor, prenosni odnos može da se odredi na osnovu izraza [17]:

$$u_{CR} = 1 + \frac{z_g}{z_a} \cdot z_2 \tag{4}$$

gde su: z_g – broj zubaca satelita; z_a – broj zubaca sunčanog zupčanika; z_2 – broj centralnih valjaka.

Uporedna analiza karakteristika najzastupljenijih cikloreduktora u industrijskim robotima prikazana je Tabelom 3.

Tabela 3. Karakteristike najzastupljenijih cikloreduktora u industrijskim robotima

	SUMITOMO (2018) Fine CYCLO F2C-A15 [18]	**SUMITOMO (2018) Fine CYCLO F2C-T155** [18]	**SPINEA (2022) Twin Spin TS–110–119** [19]	**NABTESCO (2018) RV-25N** [17]
Prenosni odnos	1:89	1:118	1:119	1:107,66
Ubrzanje / Nominalni obrtni moment	612/245 Nm	244/122 Nm	417/167 Nm	612/245 Nm
Težina	3,8 kg	3,8 kg	4,8 kg	3,8 kg
Oblik	Ø126 × L60 mm	Ø126 × L68 mm	Ø110 × L62 mm	Ø133 × L62 mm
Stepen iskorišćenja	87 %	87 %	74 %	87 %
Max. ulazni broj obrtaja	5600 min^{-1}	8500 min^{-1}	4500 min^{-1}	-

3. UPOREDNA ANALIZA

Ako se izbor reduktora vrši na osnovu tačnosti pozicioniranja, prednost svakako imaju talasni i cikloreduktori [2]. Ali talasni i cikloreduktori, kao prenosnici snage novije generacije, zahtevaju veoma preciznu izradu, pogotovo kada su u pitanju njihovi specifični elementi, ciklozupčanik kod cikloreduktora i elastični zupčanik kod talasnog reduktora.

Ukoliko je potreban manji prenosni odnos (ispod 1:10), prednost imaju planetarni reduktori jer nude najbolju gustinu obrtnog momenta. Za ostvarivanje većih prenosnih odnosa, najčešće se primenjuju konstrukciona rešenja sa uzastopnim spajanjem. Na taj način formiraju se dvostepeni, trostepeni i višestepeni planetarni reduktori koji su velikih dužina [7], a skuplji su od ostalih VP reduktora [2]. Dakle, ukoliko je potreban veliki prenosni odnos (1:100), prednost imaju talasni i cikloreduktori jer su manjih dužina, a pritom su i jeftiniji.

Ako se izbor vrši na osnovu dimenzija, talasni i cikloreduktori imaju veći prečnik, ali i manju dužinu. Dužina planetarnih reduktora, kao što je već rečeno, drastično raste sa povećanjem broja stepeni prenosa, a što se tiče oblika, ponekad se izrađuju i sa kvadratnim kućištima koja se spajaju sa servomotorima [5].

Uporedna analiza ostalih karakteristika VP reduktora prikazana je u Tabeli 4.

Tabela 4. Uporedne karakteristike VP reduktora

PLANETARNI REDUKTORI	**TALASNI REDUKTORI**	**CIKLOREDUKTORI**
Mala tačnost	Velika tačnost	Velika tačnost
Srednji bočni zazor	Nulti bočni zazor	Mali bočni zazor
Mali prenosni odnos	Veliki prenosni odnos	Veliki prenosni odnos
Razvučena konstrukcija	Kompaktna i tanka konstrukcija	Kompaktna konstrukcija
Srednja težina	Mala težina	Srednja težina
Srednji stepen iskorišćenja	Srednji stepen iskorišćenja	Veliki stepen iskorišćenja
Niska cena (za jednostepene)	Visoka cena	Srednja cena
Srednja torziona krutost	Mala torziona krutost	Velika torziona krutost
Srednji obrtni moment	Srednji obrtni moment	Veliki obrtni moment
Prisustvo buke i vibracija	Miran i tih rad	Miran i tih rad
Laka instalacija i zamena	Kompleksna zamena	Kompleksna instalacija i zamena

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja tipični pregled karakteristika i različitih izvođenja VP reduktora i obezbeđuje korisne inženjerske smernice. Koji će tip reduktora biti primenjen u industrijskom robotu zavisi od tačnosti pozicioniranja, potrebnog prenosnog odnosa, dimenzija, težine, obrtnog momenta, stepena iskorišćenja, cene

i mnogih drugih karakteristika.

Ako se izbor reduktora sa velikim prenosnim odnosom vrši na osnovu njegovih dimenzija, tačnosti pozicioniranja i stepena iskorišćenja, prednost svakako imaju cikloreduktori i talasni reduktori.

Planetarni reduktor je ograničen veličinom prenosnog odnosa (obično je manji od 1:10) i potrebno je da ima više stepeni prenosa ako se traži veći prenosni odnos (npr. 1:100). Takođe, planetarni reduktori su nepovoljniji od cikloreduktura i talasnih reduktora kada je u pitanju bočni zazor i stepen iskorišćenja. Međutim, planetarni reduktori se koriste kada su ključni kriterijumi za izbor cena i nominalni obrtni moment, a traži se mali prenosni odnos.

5. LITERATURA

[1] Scheinman, V., McCarthy, J. M., Song, J. B.: *Mechanism and actuation,* Springer, Cham, 2016.

[2] Pham, A. D., Ahn, H. J.: *High Precision Reducers for Industrial Robots Driving 4th Industrial Revolution: State of Arts, Analysis, Design, Performance Evaluation and Perspective*, International journal of precision engineering and manufacturing-green technology, Vol. 5, No. 4, pp. 519-533, 2018.

[3] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G.: *Robotics - Modelling, Planning and Control*, Springer, London, 2009.

[4] NABTESCO, Precision Reduction Gear RV, N Series, 2018.

[5] García, P. L., Crispel, S., Saerens, E., Verstraten, T., Lefeber, D.: *Compact Gearboxes for Modern Robotics: A Review*, Journal Frontiers in Robotics and AI, Vol. 7, No. 103, pp. 1-20, 2020.

[6] Li, S.: *The latest design technologies for gear devices with great transmission ratios*, Journal Power Transmission Engineering, No. 12, pp. 70-76, 2014.

[7] Tanasijević, S., Vulić, A.: *Mehanički prenosnici - planetarni prenosnici, varijatori*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2006.

[8] NIDEC, Precision Gear Technology Catalog, 2018.

[9] NEUGART, Complete gearbox catalog, 2022.

[10] WITTENSTEIN, Alpha Advanced Line Product catalog, 2022.

[11] Vulić A., Tanasijević A.: *Planetarni i harmonijski prenosnici snage*, Mašinski fakultet, Niš,1994.

[12] HARMONIC DRIVE, Engineering Data CSD-2A Component Sets, 2014.

[13] HARMONIC DRIVE, Speed Reducers for Precision Motion Control, Reducer Catalog, 2019.

[14] SUMITOMO DRIVE TECHNOLOGIES, E CYCLO - High Precision Gearboxes Catalogue, 2020.

[15] Blagojević, M.: *Kinematička i dinamička analiza jednostepenog cikloreduktora*, Magistarska teza, Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu, 2003.

[16] Malhotra S. K., Parameswaran M. A.: *Analysis of a cycloid speed reducer*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, No. 6, pp. 491-499, 1983.

[17] SUMITOMO DRIVE TECHNOLOGIES, FINE CYCLO Catalogue, 2018.

[18] SPINEA, TwinSpin and DriveSpin Catalogue, 2022.

[19] Vasic, M., Matejić, M., Blagojević M.: *A comparatice calculation of cycloid drive efficiency*, 5th International scientific conference - COMETa, str. 259-266, Jahorina, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, 26-28 Novembar 2020.

Vasić, M., Blagojević, M., Nestorović, G.

HIGH PRECISION REDUCERS FOR INDUSTRIAL ROBOTS

Abstract: *The robot industry has experienced a real expansion in the last decade. One of the most significant results of this revolution is the development of "smart factories" in which the production process is fully automated. Thanks to this fact, the market of reducers with high transmission ratios, high precision and compact construction is experiencing great growth. Although industrial robots, as a complex mechatronic system, consist of a large number of mechanical and electrical components, they also contain a large number of high-precision reducers. In addition to planetary and harmonic, this group also includes cycloid reducers. Therefore, the aim of this paper is a comparative overview of the basic characteristics of high-precision reducers used in industrial robots.*

Key words: *industrial robots, characteristics of high-precision reducers, planetary reducers, harmonic reducers, cycloid reducers*

43. JUPITER konferencija
39. simpozijum
Beograd 2022
NU * ROBOTI * FTS

Dučić, N., Dragović, G., Jovičić, A., Stakić, A. [1)]

MODELOVANJE I SIMULACIJA UPRAVLJANJA POMOĆNIM KRETANJIMA KOD CNC SISTEMA UPOTREBOM SOFTVERSKOG PAKETA MATLAB/Simulink

Rezime

Sistem pomoćnih kretanja je jedan od najvažnijih mehatroničkih segmenata kod CNC mašina alatki. Zbog toga je od velikog značaja, u obrazovanju budućih inženjera, posebnu pažnju posvetiti njegovoj analizi kroz modelovanje njegovih komponenti i simulaciju njegovim upravljanjem. U okviru ovog rada je prezentovana edukativna laboratorijska postavka – simulator pomoćnih kretanja CNC mašina alatki, kao i modelovanje pogonskog sistema postavke u okviru softverskog paketa MATLAB/Simulink. Takođe, prezentovana je simulacija upravljanja izvršavanjem nekih programskih instrukcija G koda, kao i povezivanje Simulink modela sa mikrokontrolerom simulatora pomoćnih kretanja CNC mašina alatki.

Ključne reči: CNC sistemi, MATLAB/Simulink, Arduino, modelovanje, simulacija.

1. UVOD

CNC mašine alatke, kao tipični mehatronički sistemi, su dominantni i neizostavni činioci u proizvodnom mašinstvu, u mnogim granama industrije [1,2]. Kao i svaki mehatronički sistem, CNC mašine imaju svoj upravljački sistem koji je „mozak" automatizacije proizvodnje i njegova vrednost je oko 30% od ukupne vrednosti mašine alatke [3]. U industriji se često sreću CNC upravljački sistemi različitih renomiranih svetskih proizvođača kao što su Siemens, Fanuc ili HeidenHein, a koji su veoma skupi. Pored profesionalnih CNC mašina alatki, tržište „hobi" rešenja ovih mašina se sve više razvija [4,5].

U skladu sa tim od velikog značaja je, u obrazovanju budućih inženjera, posebnu pažnju posvetiti analizi arhitekture CNC mašina alatki, od mehaničkih komponenti, zatim pogonskih, senzorske tehnike do samog upravljanja. Ovaj rad ima za cilj da predstavi edukativnu postavku koja omogućuje studentima da se kroz softversku vizuelizaciju upravljanja i njegovu implementaciju na pomenutoj postavci bolje upoznaju sa CNC sistemima.

2. SIMULATOR POMOĆNIH KRETANJA CNC MAŠINA ALATKI

Simulator pomoćnih kretanja CNC mašina alatki razvijen je u okviru nastavnih aktivnosti na Fakultetu tehničkih nauka u Čačku, sa idejom da bude modularnog karaktera. Dakle, da se u zavisnosti od izbora izvršnog organa mašine može transformisati u desktop CNC glodalicu, 3D štampač, mašinu za obradu laserskim sečenjem, itd. CAD model simulatora pomoćnih kretanja sa obradnim motorom, što ga u celini čini desktop CNC glodalicom dat je na slici 1a, dok se na 1b, 1c, i 1d nalaze prikazi CAD modela X, Y, i Z ose, respektivno.

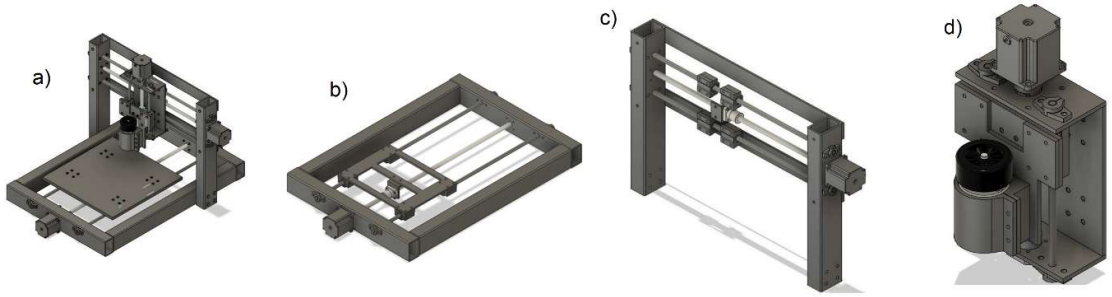
Na X osi se nalazi radni sto, a dužina maksimalnog hoda po pomenutoj osi je 300 mm. Pogonski sistem X ose je servo koračni motor NEMA23. Translatorno kretanje stola se realizuje upotrebom linearnih vođica i navojnog vretena (koraka 5 mm) sa navrtkom. Spojnicom je ostvarena veza navojnog vretena i rotora motora. Konstrukciju čini ram od aluminijumskih kutijastih profila dimenzije 60x40 mm.

Y osa suštinski se ne razlikuje u odnosu na X osu. Takođe, korišćeni su aluminijumski kutijasti profili 60x40 mm. Kao i kod X ose pogon je servo koračni motor NEMA23. Radni hod Y ose je 300 mm.

Z osa je predviđena da nosi obradni motor, ili neki drugi izvršni organ mašine, u zavisnosti od namene. Pogon ove ose je koračni motora NEMA17, a radni hod Z ose je 100 mm. Sve ostale komponente su identične

[1)] dr Nedeljko Dučić, vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (nedeljko.ducic@ftn.kg.ac.rs), Goran Dragović, dipl.inž.mehatron., (159-2018@ftn.edu.rs), Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, dr Aleksandar Jovičić, docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (aleksandar.jovicic@ftn.kg.ac.rs), MSc Aleksandra Stakić, asistent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (aleksandra.stakic@ftn.kg.ac.rs)

kao kod prethodnih osa, uz neophodno dimenziono prilagođavanje.



Slika 1. *a) CAD model desktop CNC glodalice, b) CAD model X ose, c) CAD model Y ose, d) CAD model Z ose*

Mašina se napaja iz AC/DC konvertera snage 500W, koje na izlazu daje 24VDC i taj se napon koristi za napajanje pogona, drajvera pogona i UJ, koja je u ovom slučaju Arduino Uno. Takođe, mašina ima integrisane granične prekidače i svestop taster, tzv. pečurku. Na slici 2. dat je izgled laboratorijskog simulatora pomoćnih kretanja kod CNC mašina alatki.

Slika 2. *Laboratorijski simulator pomoćnih kretanja kod CNC mašina alatki*

3. POGONSKI I UPRAVLJAČKI SISTEM X I Y OSE SIMULATORA

Kao što je već napomenuto pogonski sistem čine servo koračni motori NEMA23 (X i Y osa) i koračni motor NEMA17 (Z osa). U ovom radu akcenat će biti na modelovanju i simulaciji upravljanja X i Y osama, pa se karakteristike motora Z ose - NEMA17 neće analizirati. Servo koračni sistem X i Y ose NEMA23 omogućava postizanje veoma velikih rezolucija pozicioniranja, korišćenjem tehnike mikrostepinga, i uz pomoć inkrementalnog enkodera (rezolucije 4096), sa pouzdanošću može se povećati broj koraka sa 200 po obrtaju do 4000 po obrtaju što dovodi postizanje rezolucije od 25 μm do rezolucije 1,25 μm.

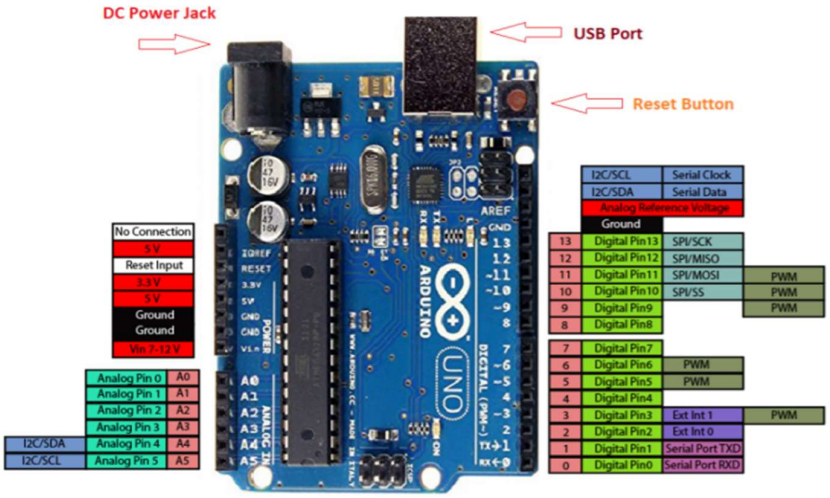
Slika 3. *Hibridni servo koračni motor NEMA23 sa drajverom [4]*

Za pogonski sistem NEMA23 koristi se drajver HBS57. Njegove osnovne karakteristike date su u tabeli 1 [6]. Drajver ima odštampane tablice na svojoj površini koje objašnjavaju podešavanje ograničavanja struje i mikrokoračanja pomoću mikroprekidača koji se nalaze sa strane.

Tabela 1. Karakteristike drajvera HBS57			
Parametri	minimalno	tipično	maksimalno
Struja po fazi	0 A	-	8 A
Napon napajanja	9 VDC	36 VCD	40VDC
Struja signala	7 mA	10 mA	16 mA
Frekvencija pulsa	0 kHz	-	200 kHz
Izolacija	500 MΩ	-	-
Mikrokoračanje / 1.8 °	200	-	4000

Upravljački sistem predstavlja mikrokontroler Arduino Uno na kome se nalazi CNC *shield* koji olakšava povezivanje drajvera sa pinovima mikrokontrolera Arduino Uno. U tabeli 2 nalaze se osnovne karakteristike kontrolera Arduino Uno, a na slici 4 dat je njegov prikaz.

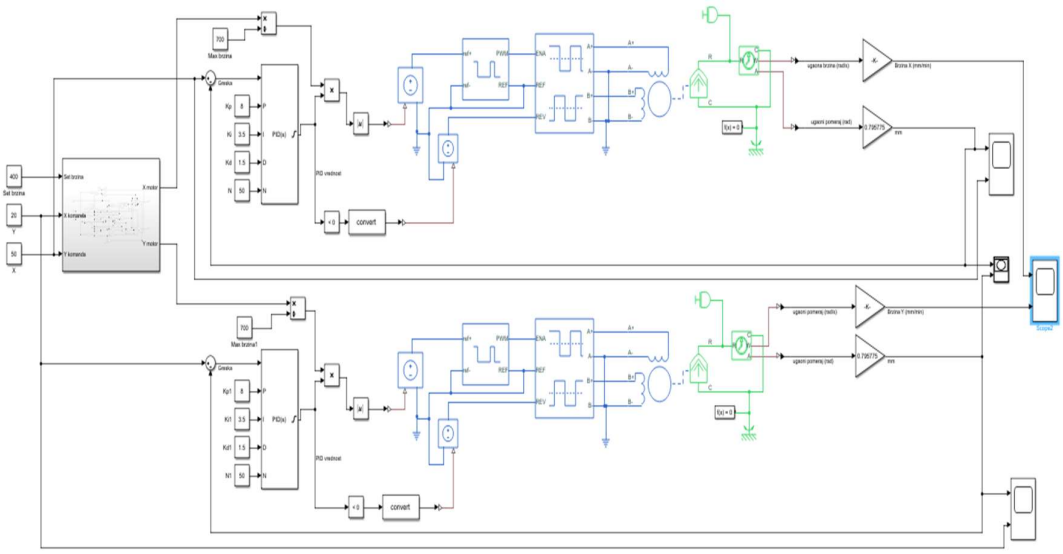
Tabela 2. Karakteristike Arduina Una	
Ulazni napon (preporučen)	7-12 VDC
Digitalni ulazi/izlazi	14
PWM digitalni ulazi/izlazi	6
Analogni ulazi	6
Struja po pinu (maksimalna)	20 mA
Fleš memorija	32 kB
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Frekvencija oscilatora	16 Mhz



Slika 4. *Izgled kontrolera Arduino Uno sa oznakama i funkcijama pinova*

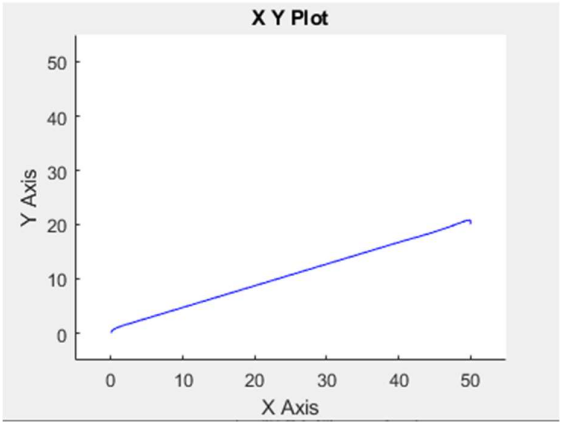
4. MODELOVANJE I SIMULACIJA UPRAVLJANJA

U okviru softverskog paketa MATLAB/Simulink izvršeno je modelovanje CNC pozicionog sistema za X i Y osu. Sve navedene pogonske i upravljačke komponente su predstavljene odgovarajućim blokovima, a njihove karakteristike su unete kao vrednosti u promenljive odgovarajućih blokova (Slika 5).



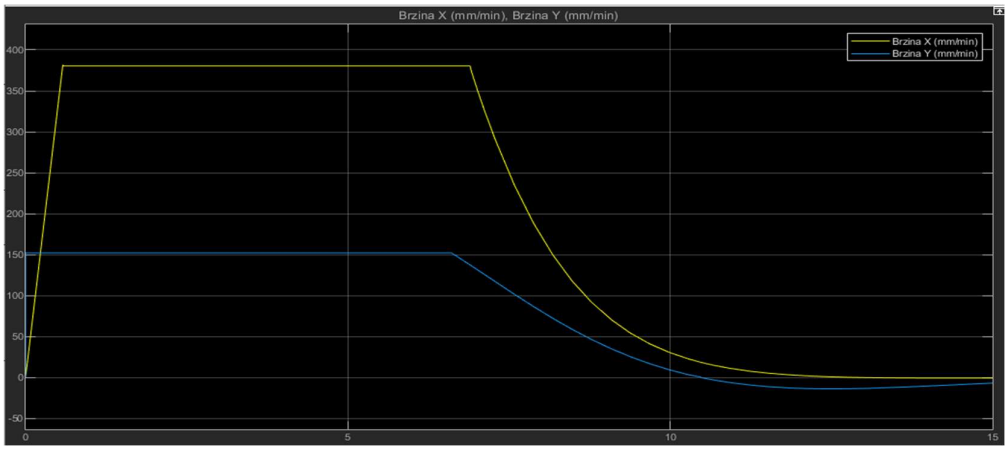
Slika 5. *Simulink model CNC pozicionog sistema za X i Y osu*

Kako su komponente za obe posmatrane ose identične to je i njihova Simulink interpretacija ista, pa se na slici 5 može primetiti da gornja i donja polovina slike imaju iste elemente. Blok „Controlled PWM voltage“ predstavlja mikrokontoler Arduino koji šalje impulse na „Stepper Motor Driver“ koji predstavlja drajver HBS57. Izlazi drajvera su vezani na faze A i B bloka „Stepper Motor“ koji predstavlja NEMA23 motor koji se nalazi na X i Y osi. Time je prikazana elektronska konekcija i upravljanje, označeno plavim linijama. Zelenim linijama su označene mehaničke veze. Na rotor motora vezan je blok „Inertia“ i „Ideal Rotational Motion Sensor“, koji predstavlja inerciju koju motor vidi sa strane rotora i senzor pozicije koji predstavlja enkoder, respektivno. Izlaz sa senzorskog bloka je pozicija u radijanima, pa jednostavnim množenjem sa konstantom 0,795775 (znajući da je korak navojnog vretena 5 mm i prenos sa rotora na navojno vreteno 1:1), prevodi se izlaz u milimetre. Takodje, na slici 5 uočljiv je i blok PID koji se odnosi na PID regulaciju, a korišćene konstante su P=8, I=3.5 i D=1.5, koje su dobijene naprednim softverskim podešavanjem navedenih konstanti. Ukoliko se napiše programska instrukcija G1 X50 Y20 F400, to praktično znači da će se radni sto, nakon njenog izvršenja, naći na udaljenosti 50 mm po X osi i 20 mm po Y osi od koordinatnog početka. Prikaz linearne interpolacije zadat navedenom programskom instrukcijom dat je na slici 6.



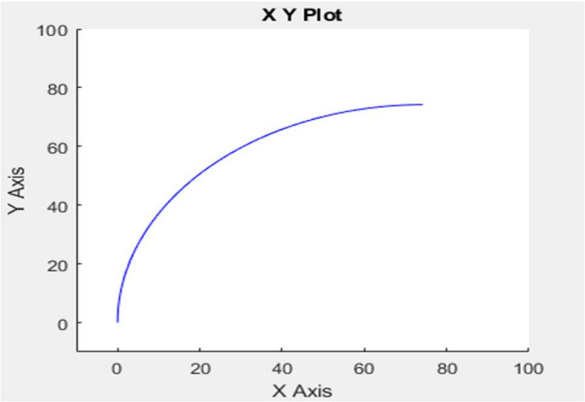
Slika 6. *Linerna interpolacija G1*

Profili brzina po X i Y osi dati su na slici 7, na kojoj se jasno vidi da je brzina po X osi značajno veća što je i logično obzirom na to da je udaljenost po X osi veća.

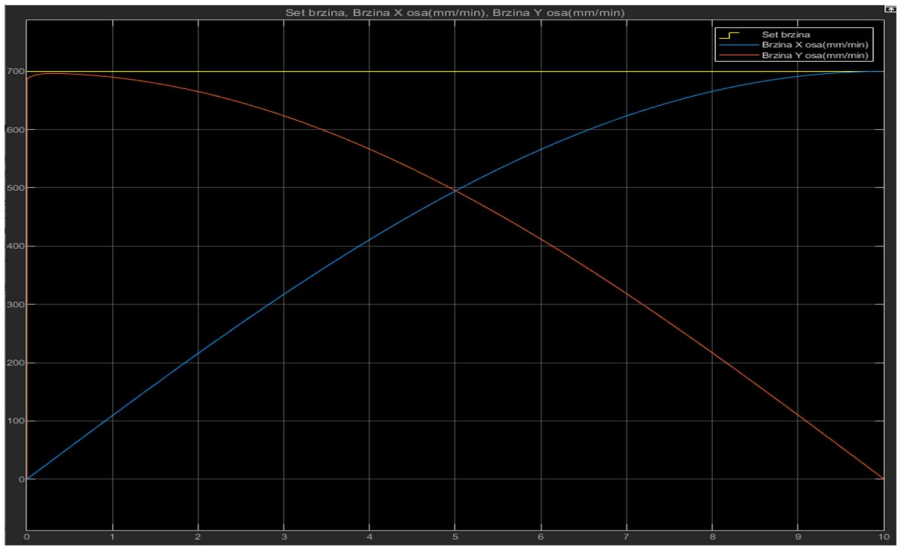


Slika 7. *Profil brzine dveju osa pri izvršenju programske instrukcije G1*

Takođe, moguće je softverski testirati i ponašanje sistema za različite vrste interpolacija, pa ukoliko se napiše programska instrukcije G2 X80 Y80 CR80 F700 čiji je prikaz dat na slici 8, dobijaju se profili brzina po dvema osama (X i Y) koji se značajno razlikuju u odnosu na lineranu interpolaciju. Brzine po osama prikazane na slici 9 proizvode uniformno kretanja radnog stola brzinom od 700 mm/min po kružnom luku radijusa 80 mm.



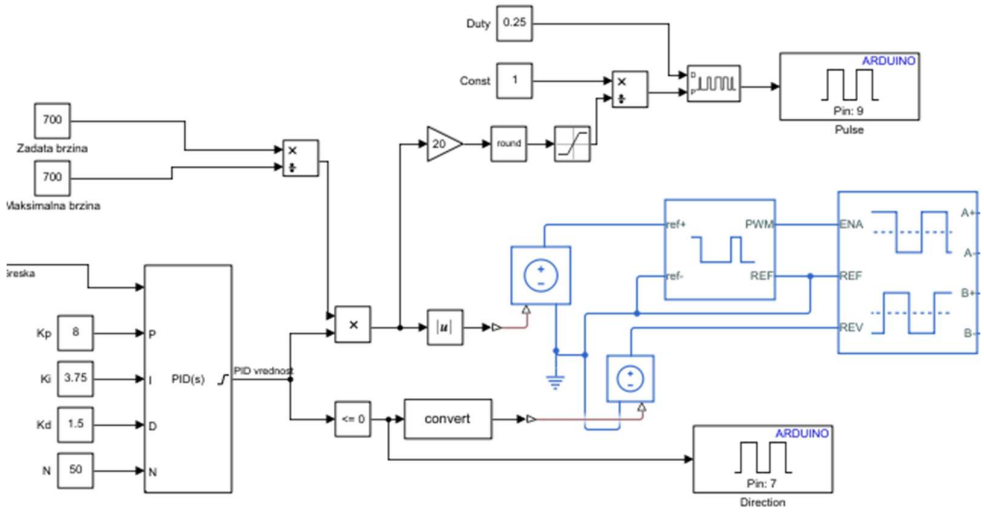
Slika 8. *Kružna interpolacija G2*



Slika 9. *Profil brzine dveju osa pri izvršenju programske instrukcije G2*

Pored simulacija upravljanja, sa velikim mogućnostima njegove vizuelizacije koja olakšava razumevanje uzročno-posledičnih veza kod CNC pozicionog sistema, u MATLAB/Simulink-u moguće je ugraditi Arduino

blok i na taj način upravljati simulatorom prikazanim na slici 2. Na slici 10. dat je prikaz povezivanja Simulink modela jedna ose na pinove Arduino mikrokontrolera.



Slika 10. *Povezivanje upravljanja na pinove Arduino kontrolera*

5. ZAKLJUČAK

Prezentovani MATLAB/Simulink modeli imaju izuzetno veliki značaj za obrazovanje budućih inženjera. Uz poznavanje softverskog paketa MATLAB/Simulink studenti su u mogućnosti da simuliraju rad CNC pozicionog sistema za različite instrukcije definisane kroz standardni G kod. Razvijeni modeli pružaju mogućnost da studenti uvide značaj PID regulacije u CNC sistemima, da podešavaju konstante PID regulacije standardnim tehnikama, ali i na neki od naprednijih načina kao što je fazi podešavanje PID konstanti. Posebna vrednost prezentovanih modela i edukativne postavke je što su pomoću Simulink Arduino blokova povezani i sve što se simulacijom u softveru demonstrira moguće je sprovesti i uživo u realnom vremenu na laboratorijskom simulatoru pomoćnih kretanja kod CNC mašina alatki.

10. LITERATURA

[1] Boral, P., Niesyporek, T., Gołębski, R.: *The welded CNC machine tool frame*, Machine Modelling and Simulations 2017 (MMS 2017), Vol. 157, pp. 1-8, 2018.

[2] Oczoś, K. E.: *Forum obrabiarek skrawających-przykłady nowych rozwiązań (Cz. I)*. Mechanik, Vol. 80(12), pp. 971-972, 2007.

[3] Suk,H. S., Seong, K. K., Dae, H., C., Stroud, I.: *Theory and Design of CNC Systems,* Springer Series in Advanced Manufacturing, ISSN 1860-5168,UK, 2008.

[4] Boral, P.: *The design of the CNC milling machine*, XXIII Polish-Slovak Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations (MMS 2018) Vol. 254, pp. 1-10, 2019.

[5] Hood-Daniel, P., Kelly, J.F.: *Build Your Own CNC Machine*, USA, ISBN-10 2009, 1430224894: .

[6] Arduino, https://www.arduino.cc , Jun 2022.

Dučić, N., Dragović, G., Jovičić, A., Stakić, A.

MODELING AND SIMULATION OF CONTROL OF AUXILIARY MOVEMENTS IN CNC SYSTEM USING MATLAB/Simulink SOFTWARE PACKAGE

Abstract: *The system of auxiliary movements is one of the most important mechatronic segments of CNC machine tools. That is why it is of great importance, in the education of future engineers, to pay special attention to its analysis through the modeling of its components and the simulation of its management. This paper presents an educational laboratory setup - a simulator of auxiliary movements of CNC machine tools, as well as modeling of drive system of the setup within the MATLAB/Simulink software package. Also, the simulation of managing the execution of some program instructions of G code was presented, as well as the connection of the Simulink model with the microcontroller of the simulator of auxiliary movements of CNC machine tools.*

Key words: *CNC systems, MATLAB/Simulink, Arduino, modeling, simulation.*

Rodić, D. [1)], **Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B., Aleksić, A.**

ANALIZA PROIZVODNOSTI KOD ELEKTROEROZIVNE OBRADE U DIELEKTRIKUMU SA POMEŠANIM PRAHOM[2)]

Rezime

Primena elektroerozivne obrade je uglavnom opravdana pri obradi delova specifične konstrukcije od teško obradljivih materijala. Međutim, današnja primena EDM (Electrical Discharge Machining) je ograničena zbog njenje relativno male proizvodnosti obrade. Moguće tehnološko unapređenje može se postići dodavanjem elektroprovodljivog praha u dielektrikum čime nastaje modifikovani proces uklanjanja materijala pod nazivom elektroerozivna obrada u tečnom dielektrikumu sa pomešanim prahom. Eksperimentalna istraživanja elektroerozivne obrade legure titanijuma sprovedena su prema Taguči planu. Analiza proizvodnosti obrade izvršena je preko statističke tehnike analize varijanse (ANOVA). Prema ANOVA analizi zanemarljiv uticaj na proizvodnost obrade imaju dužina impulsa, koeficijent delovanja impilsa i koncentracija grafitnog praha. Međutim, dodatnim eksperimentima utvrđeno je da sa dodavanjem grafitnog praha u koncentraciji 6 g/l za postavljene uslove obrade postiže se povećanje proizvodnosti obrade za približno 20%.

Ključne reči: PMEDM, proizvodnost obrade, grafitni prah, ANOVA

1. UVOD

Tokom vremena, istraživanja elektroerozivne obrade su intenzivirana i prvi naučni radovi iz elektroerozivne obrade pojavljuju se 1960-ih godina [1, 2]. Već tada je primećena prednost ove tehnologije u pogledu mogućnosti obrade teško obradljivih materijala [3]. Međutim, sa razvojem i usavršavanjem drugih postupaka obrade, primena EDM postaje ograničena sa stanovišta proizvodnosti obrade i kvaliteta obrađene površine. Sedamdesetih godina prošlog veka, tačnije 1967. godine, *Karafuzi* je izneo ideju o unapređenju procesa EDM [4]. Dokazao je da se dodavanjem aditiva u dielektrikum, može postići povećanje proizvodnosti obrade. Vođen time *Pal* 1971. godine [5] definiše osnove EDM u dielektrikumu sa pomešanim prahom (*eng. Powder Mixed Electrical Discharge Machining* - PMEDM), gde je sa dodavanjem grafitnog praha u razmeri 1,5 g/l došao do značajnog povećanja proizvodnosti obrade. Međutim, u prethodnom radu [5] nije spomenuta krupnoća zrna praha niti je izneto objašnjenje vezano za stepen povećanja proizvodnosti obrade. Shvativši ovu činjenicu autor *Jeswani* 1980. godine objavljuje istraživanje u kome jasno definiše uslove obrade i detaljno obrazlaže dobijene rezultate [6]. Pri sprovođenju eksperimenata upotrebio je grafitni prah krupnoće zrna 10 μm koji je pomešao sa kerozinom u razmeri 4 g/l. Analizom dobijenih rezultata najuočljivija zapažanja su povećanje proizvodnosti obrade do 60% i smanjenje trošenja alata do 15%.

Elektroprovodljiv prah koji se dodaje u tečni dielektrikum redukuje izolaciona svojstva dielektrikuma i uzrokuje povećanje radnog zazora između alata i obratka. Povećanje radnog zazora implicira efikasniju cirkulaciju dielektrikuma, tj. ispiranje radnog prostora između alata i obratka. Na taj način EDM postaje stabilna, čime se unapređuju tehnološke karakteristike procesa, kao što su povećana proizvodnost obrade i smanjena hrapavost obrađene površine, a takođe dolazi i do manjeg trošenja alata [7]. Na slici 1. dat je uporedni prikaz klasične (a) i modifikovane (b) EDM (PMEDM).

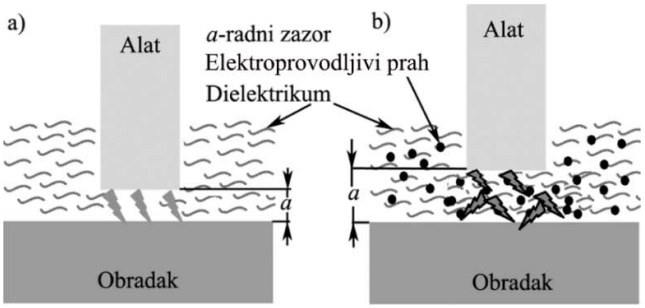
Prostor između alata i obratka, odnosno radni zazor, ispunjen je česticama elektroprovodljivog praha. Pod dejstvom napona jednosmerne struje, na najmanjem lokalnom rastojanju između površine alata i obratka, tj.

[1)] doc. dr Dragan Rodić(rodicdr@uns.ac.rs), prof. dr Marin Gostimirović (maring@uns.ac.rs), prof. dr Milenko Sekulić (milenkos@uns.ac.rs), vanr. prof. dr Borislav Savković (savkovic@uns.ac.rs), asistent master Anđelko Aleksić (andjelkoa@uns.ac.rs), Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo.

[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu 142-451-1772/2022-01/01: *Istraživanje inovativnog procesa elektroerozivne obrade legure titanijuma*, koji finansijski podržava *Pokrajinski sekretarijat za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost.*

na mestu najmanjeg otpora prolaska električne struje, obrazuje se jako elektromagnetno polje. U električnom polju dolazi do intenzivnog nagomilavanja čestica praha, čime se stvara efekat premošćavanja, gradeći pri tome svojevrstan elektroprovodljivi most, tj. takozvanu ″cik cak″ formu. Zbog povećanog efekta premošćavanja napon pražnjena i izolaciona svojstava dielektrikuma se smanjuju, slika 1 [8].

U isto vreme čestice praha menjaju svojstva kanala pražnjenja koji ujednačava raspoređivanje varničenja po česticama praha i time smanjuje gustinu struje. Na osnovu prethodno iznetog, zbog ove ravnomerne distribucije pražnjena dolazi do uniformne erozije, odnosno plitkih kratera na radnom predmetu, što dovodi do smanjenja hrapavosti obrađene površine, a samim tim i do povećanja tačnosti obrade [9].



Slika 1. *Uporedni prikaz klasične (a) i modifikovane (b) EDM (PMEDM)*

Razni tipovi elektroprovodljivog praha se mogu mešati sa tečnim dielektrikumom, među kojima se izdvajaju: aluminijum, grafit, silicijum, bakar, silicijum karbid i drugi. Koji se tipovi praha mogu koristiti sa tečnim dielektrikumom, kojih krupnoća zrna, u kojoj koncentraciji i kakav je njihov uticaj na performanse PMEDM procesa istraživao je manji broj istraživača.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

2.1 Opis eksperimentalnih ispitivanja

Za potrebe obrade materijala korišćena je elektroerozivna mašina za upuštanje sa punom elektrodom, proizvođača Agie Charmille oznake SP1-U. Mašina je opremljena sistemom za CNC upravljanje, gde minimalno pomeranje po sve tri ose iznosi 1 μm, čime se može postići vrlo visoka tačnost pozicioniranja alata u odnosu na obradak. Mašina je opremljena generatorom električnih impulsa jednosmerne struje, prividne snage 10 kVA, koji proizvodi maksimalnu struju pražnjenja od 50 A.

Dielektrikum *Ilocut EDM 180* proizvođača *Castrol* je korišćen tokom eksperimentalnih istraživanja. To je mineralno ulje niskog viskoziteta koje obezbeđuje uspešno ispiranje radnog prostora. Takođe je formulisano da obezbedi visok stepen uklanjanja materijala, nizak stepen habanja alata i dobar kvalitet obrađene površine.

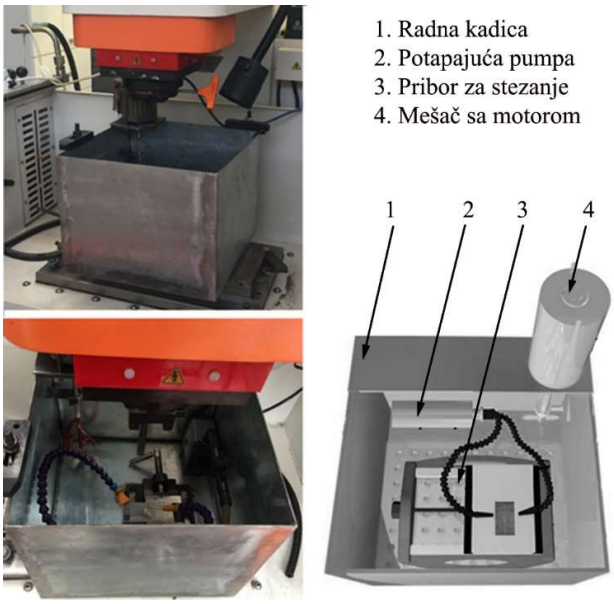
Aditivi poput grafitnog praha (*Asbury PM19*) i surfaktanta (*Tween 20* $C_{58}H_{114}O_{26}$) dodaju se u dielektrikum radi boljeg ispiranja zone obrade i izbegavanja aglomeracije čestica (skupljanje i gomilanje). Tokom postupka obrade, aditivi koji se dodaju u prostor obrade smanjuju izolaciona svojstva dielektrikuma, povećavajući na taj način radni zazor. Povećanje radnog zazora rezultira boljoj cirkulaciji dielektrikuma. Istovremeno, proces obrade postaje stabilniji, odnosno dolazi do poboljšanja izlaznih karakteristika procesa elektroerozivne obrade.

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena na leguri titanijuma $TiAl_6V_4$. Izabrana legura titanijuma zbog svojih izuzetnih karakteristika, kao što su visoka temperaturna i korozivna otpornost, našla je primenu u avio industriji, biomedicini i mnogim drugim granama tehnike. Zahvaljujući svojim inherentnim osobinama obradljivost ovog materijala sa ekonomskog gledišta nije pogodna. Za elektroerozivnu obradu legure titanijuma korišćen je alat od grafita oznake *Toyo Tanso TTK50.*

2.2 Postavka obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom

Prema dostupnoj literaturi postoje dva tipa sistema PMEDM: otvoreni i zatvoreni sistem. Kod otvorenog PMEDM procesa prisutan je standardni sistem cirkulacije dielektrikuma uz specijalne filtere. Smeša dielektrikuma, praha i produkata obrade prolazi kroz filter čiji je cilj da pročisti miksturu medijuma i obezbedi ponovnu upotrebu praha. Održavanje ovakvog sistema je veoma skupo pa se u svrhu eksperimentalnih istraživanja uglavnom koristi zatvoreni PMEDM sistem. Shodno prethodnoj konstataciji, za potrebe elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom, dizajnirana i izrađena je kadica sa elementima za pričvršćivanje i pozicioniranje obratka zatvorenog tipa, slika 2. Na ovaj način se sprečava prljanje elektroerozivne mašine grafitnim prahom što dovodi do minimizacije troškova. Dimenzije kadice su

330×330×330 mm, kapaciteta 20 litara. U ovakvom, prilagođenom sistemu potrebno je obezbediti pravilnu distribuciju praha, kao i ispiranje radnog prostora.



Slika 2. *Kadica sa elementima za pričvršćivanje i pozicioniranje obratka*

U kadicu je smeštena potapajuća pumpa protoka 1200 l/čas u cilju obezbeđenja ispiranja radnog prostora. Na gornju ivicu kadice postavljen je motor sa regulatorom broja obrtaja snage 500 W. Na osovinu motora pričvršćen je mešač koji ima ulogu da obezbedi pravilnu smešu praha i dielektrikuma**.**

2.3 Taguči plan pri PMEDM legure titanijuma

Kod eksperimentalnog ispitivanja tehnoloških karakteristika procesa PMEDM legure titanijuma izabrani su sledeći ulazni parametri obrade: struja pražnjenja. dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha. Parametri obrade i njihovi nivoi su prikazani u tabeli 1. U tabeli 2. je dat eksperimentalni plan prema Taguči ortogonalnom nizu $L_9(3^4)$. Ortogonalni niz se sastoji od četiri kolone (faktori) i devet redova (tačke eksperimenta).

Tabela 1. Parametri obrade i njihovi nivoi za Taguči plan pri PMEDM TiAl6V4

Parametri	**Oznaka**	**Jedinica**	**Nivoi**		
Struja pražnjenja	Ie	A	1.5	3.2	6
Dužina impulsa	ti	µs	32	75	180
Koeficijent delovanja impulsa	τ	%	30	50	70
Koncentracija grafitnog praha	GR	g/l	0	6	12

Tabela 2. Taguči ortogonalni niz $L_9(3^4)$ pri PMEDM $TiAl_6V_4$

Redni broj	**A**	**B**	**C**	**D**	I_e (A)	t_i (µs)	τ (%)	***GR (***g/l)
1.	1	1	1	1	1.5	32	30	0
2.	1	2	2	2	1.5	75	50	6
3.	1	3	3	3	1.5	180	70	12
4.	2	1	2	3	3.2	32	50	12
5.	2	2	3	1	3.2	75	70	0
6.	2	3	1	2	3.2	180	30	6
7.	3	1	3	2	6	32	70	6
8.	3	2	1	3	6	75	30	12
9.	3	3	2	1	6	180	50	0

2.4 Proizvodnost obrade

Proizvodnost obrade ili brzina uklanjanja materijala (*eng. Material Removal Rate - MRR*) pri elektroerozivnoj obradi se obično izražava količinom skinutog materijala u jedinici vremena (mm^3/min). Uglavnom zavisi od sledećih faktora: materijala obratka, parametara električnih impulsa, uslova ispiranja radnog prostora, materijala elektrode i dr.

Na osnovu literaturnih izvora primenjuje se nekoliko načina definisanja proizvodnosti kod EDM [10-12]. Jedan od načina je preko mase skinutog materijala u jedinici vremena, gde se pre i posle obrade vrši merenje obratka na analitičkoj vagi. Razlika dobijenih vrednosti predstavlja količinu uklonjenog materijala obratka.

Drugi način definisanja proizvodnosti obrade, a koji je primenjen i u ovom istraživanju, je preko zapremine skinutog materijala u jedinici vremena, dat jednačinom:

$$MRR = \frac{\text{Površina elektrode (mm}^2) * \text{Dubina erodiranja (mm)}}{\text{Vreme obrade (min)}} \quad \left[\frac{mm^3}{min}\right] \tag{1}$$

Dubina erodiranja je direktno očitavana sa displeja mašine alatke i posle svake obrade je proveravana komparatorom tačnosti ± 0.02 mm.

3. ANALIZA

Najčešće se analiza rezultata sprovodi preko statističke tehnike analize varijanse (ANOVA) bazirana na Taguči planu eksperimenta. Osnovni cilj ANOVA analize je procena relativnog značaja pojedinačno za svaki faktor posmatranog procesa. Analiza varijanse se uglavnom predstavlja preko statističkih tabela F-testa sa 95% poverenja i odzivnih grafika. U statističkoj tabeli figurišu: stepen slobode, suma kvadrata, varijacija, F-test i procentualno usešće pojedinih faktora. Za izradu statističkih tabela i odzivnih grafika upotrebljen je softver *Minitab*.

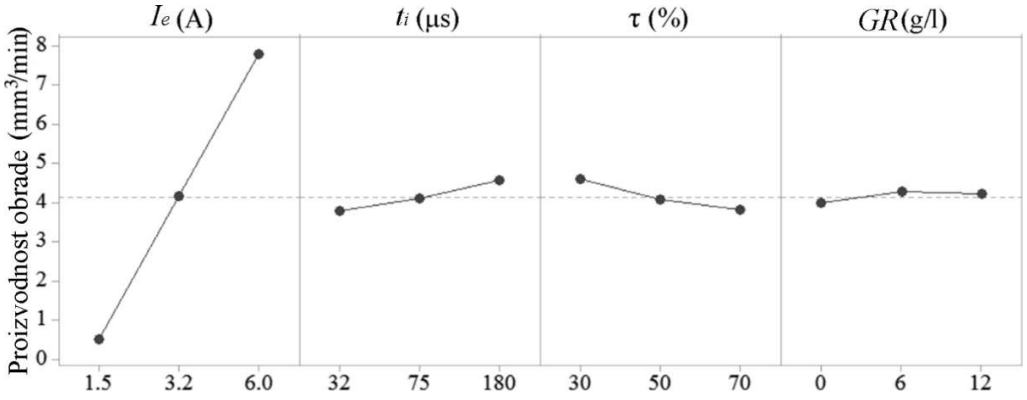
Uticaj ulaznih parametara, kao što su struja pražnjenja (faktor A), dužina impulsa (faktor B), koeficijent delovanja impulsa (faktor C) i koncentracija grafitnog praha (faktor D) na proizvodnost obrade PMEDM legure titanijuma, je analizirana i predstavljena u nastavku.

ANOVA analiza uticaja ulaznih parametara na proizvodnost obrade pri PMEDM legure titanijuma data je u redukovanoj tabeli 3. Procentualno učešće od 97.55% očekivano zauzima struja pražnjenja. Zanemarljiv uticaj na proizvodnost obrade imaju dužina impulsa, koeficijent delovanja impilsa i koncentracija grafitnog praha, koji su pridodati procentualnom učešću greške od 2.45%.

Tabela 3. Analiza varijanse za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$

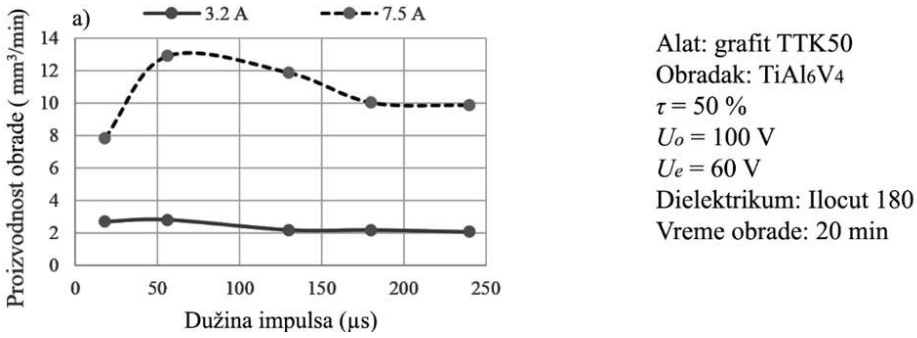
Faktor	Stepen Slobode	Suma kvadrata	Varijacija	F-test	Procenat %
A - I_e	2	79.643	39.8217	119.890	97.55
Greška	6	1.993	0.3322		2.45
Ukupno	8	81.636			

Na slici 3. prikazan je vizuelni uticaj ulaznih parametara PMEDM na proizvodnost obrade. Vidljivo je da najveći uticaj ima struja pražnjenja, dok ostali parametri nemaju značajan uticaj.



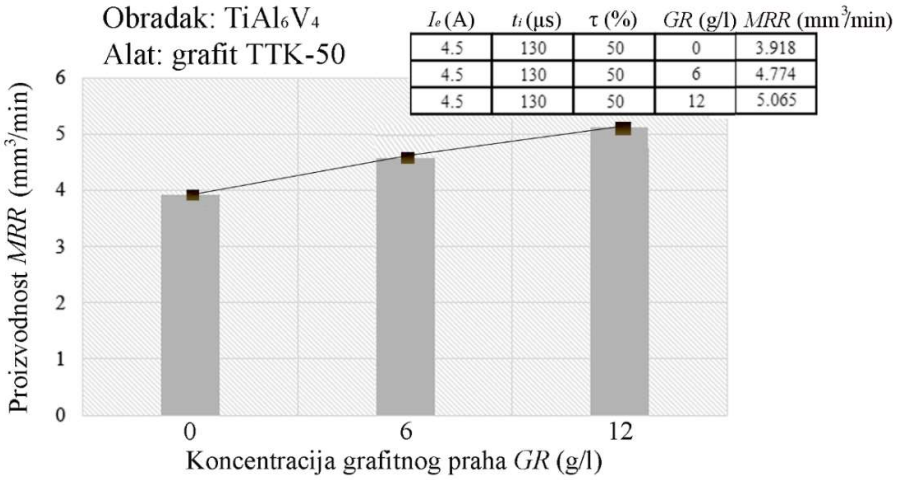
Slika 3. *Odzivni ANOVA grafik za MRR pri PMEDM $TiAl_6V_4$*

S druge strane, na osnovu preliminarnih eksperimentalnih ispitivanja prikazanih na slici 4.,dužina impulsa ima znatno veći uticaj pri struji pražnjenja većeg intenziteta. Vidljivo je da sa porastom dužine impulsa do 56 μs pri struji pražnjenja 7.5 A, dolazi do povećanja proizvodnosti obrade. Daljim povećanjem dužine impulsa (>56 μs) dolazi do pada proizvodnosti obrade. Ovo se objašnjava nekontrolisanim porastom količine skinutog materijala, što dovodi do zagušenja procesa i pada proizvodnosti obrade, slika 4. Do sličnih rezultata su došli i *Gostimirović* i dr.[10].



Slika 4. *Prikaz promene proizvodnosti EDM u zavisnosti od dužine impulsa*

Dodatnim eksperimentima ispitan je uticaj koncentracije grafitnog praha na proizvodnost elektroerozivne obrade legure titanijuma, slika 5. Dodavanjem grafitnog praha u koncentraciji 6 g/l za postavljene uslove obrade postiže se povećanje proizvodnosti obrade za približno 20%.



Slika 5. *Uticaj koncentracije grafitnog praha na MRR pri PMEDM TiAl6V4*

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja sprovedenih sa ciljem ispitivanja uticaja dodavanja grafitnog praha u dielektrikum pri elektroerozivnoj obradi legure titanijuma. Na osnovu Taguči metode, ANOVA analize i dodatnih eksperimenata, sprovedena je detaljna analiza uticaja ulaznih parametara, kao što su struja pražnjenja, dužina impulsa, koeficijent delovanja impulsa i koncentracija grafitnog praha na proizvodnost PMEDM legure titanijuma. Analizom rezultata elektroerozivne obrade legure titanijuma u dielektrikumu sa pomešanim prahom prikazano je da *Proces elektroerozivne obrade u dielektrikumu sa pomešanim prahom ostvaruje veću proizvodnost u odnosu na klasičnu elektroerozivnu obradu legure titanijuma.* Uticaj koncentracije grafitnog praha je bio najizraženiji pri struji pražnjenja 4.5 A, gde je povećanje proizvodnosti obrade iznosilo približno 20% (pri *GR* = 6 g/l).

Na kraju se sa sigurnošću može reći da rezultati istraživanja koji su predstavljeni u ovom radu omogućavaju bolje razumevanje postupka PMEDM što će doprineti njihovoj većoj konkurentnosti u industriji, koja je sada na strani klasičnog postupka elektroerozivne obrade. S obzirom da je PMEDM relativno novi postupak obrade,

koji još nije u potpunosti istraženi, svakako da postoji mogućnost daljeg kontinualnog poboljšanja i usavršavanja. Kroz istraživanja u okviru ovog rada otvorena su neka pitanja novih naučnih saznanja, koja se nameću kao pravci daljeg razvoja i buduće primene inovativnih metoda elektroerozivne obrade: (1) Ispitivanje procesa PMEDM legure titanijuma uzimajući u obzir veći broj i šire intervale ulaznih faktora, kao i istraživanja za različite dubine erodiranja, (2) Istražiti elektroerozivnu obradu legure titanijuma u dielektrikumu sa titanijumovim prahom i u dielektrikumu sa elektroneprovodljivim prahom, (3) Uticaj granulacije grafitnog praha može biti jedan od ulaznih faktora, koji bi mogao da utiče na izlazne performanse EDM savremenih inženjerskih materijala. Pored granulacije, oblik zrna grafitnog praha, takođe može biti značajan faktor.

6. LITERATURA

[1] Inoue K. Method of Electrical Discharge Machining. Tokyo, Japan: Nikkan Kogyo Shimbun Ltd; 1962.
[2] Livshits AL. Introduction, in: Electro-erosion Machining of Metals. London: Butterworth & Co.,; 1960.
[3] Lazarenko BI, Lazarenko NI. Technological Characteristics of Electrospark Machining of Current Conducting Materials. New York: Electrospark Machining of Metals Consultants Bureau; 1964.
[4] Karafuzi H, Suda K. Study of electrical discharge machining. Proc 1st All-India Machine Tool Design and Research Conf, Jadavpur 1967.
[5] Pal MN, Mishra PK, Bhattacharyya A. Optimization of circuit parameters of a relaxation circuit in EDM. Proc 4th All-India Machine Tool Design and Research Conf, Madras. 1970.
[6] Jeswani ML. Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. Wear. 1980;70(2):133-9.
[7] Klocke F, Lung D, Antonoglou G, Thomaidis D. The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies. Journal of Materials Processing Technology. 2004;149(1-3):191-7.
[8] Hu FQ, Cao FY, Song BY, Hou PJ, Zhang Y, Chen K, et al. Surface Properties of SiCp/Al Composite by Powder-Mixed EDM. Procedia CIRP. 2013;6:101-6.
[9] Kansal HK, Singh S, Kumar P. Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). Journal of Materials Processing Technology. 2007;184(1-3):32-41.
[10] Gostimirovic M, Kovac P, Sekulic M, Skoric B. Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM. Journal of Mechanical Science and Technology. 2012;26(1):173-9.
[11] Li L, Zhao L, Li ZY, Feng L, Bai X. Surface characteristics of Ti-6Al-4V by SiC abrasive-mixed EDM with magnetic stirring. Materials and Manufacturing Processes. 2016;32(1):83-6.
[12] Gostimirović M, Milikić D, Sekulić M. Osnove tehnologije obrade skidanjem materijala. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka; 2015.

Rodić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B., Aleksić, A.

ANALYSIS OF MATERIAL REMOVAL RATE IN POWDER MIXED ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Abstract: *The use of electrical discharge machining (EDM) is especially justified when machining parts with a special design made of materials that are difficult to machine. However, the current application of EDM is limited due to its relatively low machining productivity. A possible technological improvement can be achieved by adding electrically conductive powder to the dielectric, resulting in a modified material removal process called powder mixed electrical discharge machining. The experimental studies on the electroerosive machining of titanium alloys were carried out according to the Taguchi plan. The analysis of material removal rate was performed using the statistical technique of analysis of variance (ANOVA). According to the analysis of ANOVA, pulse duration, duty factor, and graphite powder concentration have negligible influence on machining productivity. However, additional experiments showed that the addition of graphite powder at a concentration of 6 g/l at the set machining conditions increased material removal rate by about 20%.*

Key words: *PMEDM, material removal rate, graphite powder, ANOVA*

Tešić, S. [1)], Zeljković, M. [2)], Tabaković, S. [3)], Čiča, Đ. [4)], Borojević, S[5)], Sredanović, B.[6)]

¶

EKSPERIMENTALNA ANALIZA I OPTIMIZACIJA TVRDOĆE OBRAĐENE POVRŠINE U KRIOGENIM I MQL USLOVIMA GLODANJA LOPTASTIM GLODALOM LEGURE TITANIJUMA Ti-6Al-4V[7)]

¶

Rezime

¶

U ovom radu se ispituje uticaj uslova obrade, brzine rezanja i brzine pomoćnog kretanja na tvrdoću obrađene površine pri glodanju loptastim glodalom superlegure titanijuma Ti-6Al-4V. Osnovni cilj ovog istraživanja je povećati tvrdoću obrađene površine nakon glodanja loptastim glodalom. Za postizanje ovog cilja korištene su tehnike analize i optimizacije. Za dobijanje rezulatata tvrdoće obrađene površine eksperimenti su izvedeni u uslovima kriogenog CO_2 hlađenja i MQL podmazivanja prema Tagučijevom L_{36} ortogonalnom nizu. Takođe, Taguči tehnika je korištena za optimizaciju ulaznih parametara. Odnos signal/šum je upotrebljen kako bi se identifikovali optimalni nivoi parametara rezanja za dobijanje najveće tvrdoće obrađene površine.

¶

Ključne reči: loptasto glodalo, tvrdoća obrađene površine, MQL, CRYO

¶

1. UVOD

¶

Legure titanijuma zbog svojih superiornih osobina imaju sve dominantniju funkcionalnu primjenu u različitim aplikacijama, a predviđa se da će upotreba ovih legura u narednim decenijama sve više rasti, posebno u biomedicini, avio, namjenskoj i automobilskoj industriji. Osobine koje legure titaijuma plasiraju u prvi plan primjene u ovim granama metalne industrije su njihova izvanredne mehaničke osobine kao što su otpornost na koroziju, izuzetan odnos čvrstoće i težine, otpornost na habanje i stabilnost pri različitim temperaturnim uslovima.

Zbog ovih osobina legure titanijuma spadaju u grupu teškoobradivih materijala te se prilikom njihove obrade javljaju veće tepmerature u zoni obrade, dolazi do intenzivnijeg habanja alata i većih otpora rezanja. Pomenuti problemi prilikom obrade legura titanijuma u velikoj mjeri mogu uticati na izlazne karakteristike procesa obrade što se ogleda u smanjenju kvaliteta obrađene površine, dužem vremenu obrade, pogoršanju ekonomičnosti obrade, te većoj potrošnji energije i većem uticaju na životnu sredinu. Zbog svega navedenog postoji širok spektar mogućnsti istraživanja na polju poboljšanja obradivosti legura titanijuma.

Jedna od najzastupljenijih legura titanijuma u biomedicini, namjenskoj i avio industriji, zbog svojih izuzetnih karakteristika je superlegura Ti-6Al-4V, te je na polju obradivosti ove superlegure urađeno i potrebno još uraditi mnogo istraživanja. Istraživanja obradivosti ove legure u različitim uslovima obrade, kao što je suva obrada, kriogeno hlađenje i minimalna količina SHP-a (MQL), gdje je posmatran njihov uticaj na izlazne karkateristike procesa obrade kao što su kvalitet obrađene površine, habanje alata, produktivnost i potošnja energije je izvšeno u istraživanjima [1 – 5]. Uticaj parametara obrade, brzine rezanja, širine rezanja i pomaka na hrapavost obrađene površine kod glodanja loptastim glodalom superlegure Ti-6Al-4V je u svom istraživanju uradio Mersni sa saradnicima [6]. Osim analize uticaja oni su izvršili i optimizaciju posmatranih parametara korištenjem Taguči metode optimizacije sa ciljem smanjenja hrapavosti obrađene površine. . Li i saradnici [7]

[1)] Saša Tešić, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (sasa.tesic@mf.unibl.org),
[2)] prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (milanz@uns.ac.rs),
[3)] prof. dr Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (tabak@uns.ac.rs)
[4)] prof. dr Đorđe Čiča, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (djordje.cica@mf.unibl.org)
[5)] prof. dr Stevo Borojević, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (stevo.borojevic@mf.unibl.org)
[6)] doc. dr Branislav Sredanović, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet (branislav.sredanovic@mf.unibl.org)
[7)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na naučnoistraživačkom projektu: Primjena savremenih metoda mašinske obrade pri izradi anatomski prilagođenih dijelova od teškoobradivih biomaterijala.

su izvršili analiziranje habanja i postojanost alata pri visokobrzinskom suvom glodanju superlegure Ti-6Al-4V za različite visoke brzine rezanja i različite brzine pomoćnog kretanja. Halil i Meric [8] su analizirali izlazne karaktersitike čeonog glodanja kao što su sile rezanja, oblik strugotine i kvalitet obrađene površine pri korištenju alata sa raztličitim prevlakama kod obrade superlegure Ti-6Al-4V. Oh i saradnici [9] su istraživali sile rezanja, produktivnost i energetsku efikasnost hibridnog – potpomognutog laserom trohoidalnog glodanja superlegure Ti-6Al-4V za različite ulazne parametre obrade.

S obzirom na područja primjene ove superlegure titanijuma, kao implementiranog proizvoda, od nje se očekuje da pored pomenutih osobina ima izraženu sposobnost otpornosti na habanje. Sposobnost odupiranja habanju je u direktnoj funkcionalnoj zavisnosti od površinkse tvrdoće. Sama površinska tvrdoća će zavisiti od tvrdoće materijala ali može zavisiti i od načina obrade te površine. Kod operacije obrade rezanjem ulazni parametri mogu uticati na ukupan kvalitet obrađene površina, a samim tim i na tvrdoću obrađene površine. Kummamkandath sa saradnicma [10] je izvršio analizu uticaja različitih brzina rezanja, brzina pomoćnog kretanja i uslova obrade kao što su CRYO, MQL i konvencionalna emulzija, na silu rezanja, temperaturu rezanja i zaostale napone. Osim toga izvršili su i ispitivanje njihovog uticaja na površinsku tvrdoću obrađenih površina čeonim glodanjem.

Na osnovu analize literature i pomenutih mogućih uticaja obrade na površinsku tvrdoću u ovom radu je analiziran uticaj ulaznih parametara obrade na tvrdoću obrađene površine loptastim glodalom. U pomenutoj operaciji obrade biće posmatrano kako uslovi obrade, odnosno vrsta SHP sredstva, brzina rezanja i brzina pomoćnog kretanja utiču na tvrdoću obrađene površine. Zbog svog smanjenog uticaja na životnu sredinu, izvršiće se posmatranje i analiza uticaja kriogenog hlađenja i MQL podmazivanja. Osim pomenute analize uticaja, a na osnovu ekperimentalnih rezultata, u radu će biti izvršena i optimizacija posmatranih ulaznih parametara obrade sa ciljem postizanja veće tvrdoće obrađene površine. Za potrebe ove analize i optimizacije izvedeno je 36 ekperimenata po Tagučijevom L36 planu eksperimenta. Takođe, za optimizaciju će biti korištena Tagučijeva metoda optimizacije.

2. EKSPERIMENTALNI RAD ISTRAŽIVANJA

¶

Kako je već naglašeno u prethodnom poglavlju, u ovom radu planiranje eksperimenta je izvršeno po Tagučijevom planu eksperimenta (DOE). Izabran je Tagučijev L_{36} ortogonalni niz, iz čega slijedi da su posmatrana tri kontrolna faktora i to jedan kategorički faktor na 2 nivoa i 2 numerička faktora na 3 nivoa, tabela 1. Uslovi hlađenja/podmazivanja su izabrani za kategorički faktor (faktor A), dok su brzina rezanja (faktor B) i brzina pomoćnog kretanja (faktor C) izabrani za numeričke faktore. Kod kategoričkog faktora, za dva različita uslova hlađenja/podmazivanja su korištena minimalna količina podmazivanja (MQL) i kriogeno CO_2 hlađenje (CRYO). Tri različite brzine rezanja (70, 90, 110 m/min) i tri različite brzine pomoćnog kretanja (0.07, 0.10, 0.13 mm/z) su izabrane za numeričke promjenjive.

Tabela 1. Faktori i nivoi variranja

FAKTOR	OZNAKA	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
Uslovi obrade	A	MQL	CRYO	
Brzina [m/min]	B	70	90	110
Pomak [mm/z]	C	0.07	0.10	0.13

Svi eksperimenti su izvedeni obradom superlegure titanijuma Ti-6Al-4V, koja ima široku upotrebu u biomedicinskoj, vojnoj i avio industriji. Hemijski sastav ove legure je prikazan u tabeli 2. U eksperimentima su korišteni pripremci dimenzija 62×41×12 mm.

Tabela 2. Hemijski sastav titanijumove legure Ti-6Al-4V

C	Fe	N_2	O_2	Al	V	H_2	Ti
≤0.08	<0.25	<0.05	<0.2	5.5-6.76	3.5-4.5	<0.0375	Balans

Eksperiment je izveden na vertikalnom obradnom centru DOOSAN NX 6500 II. Glavno vreteno obradnog centra raspolaže snagom od 22kW i brojem obrtaja do 20 000 o/min. Operacija obrade glodanjem je izvršena loptastim glodalom, prečnika 10mm sa dvije rezne ivice – DORMER S501. Alat je tokom obrade bio pod nagibom od 20 stepeni relativno u odnosu na svoj vertikalni položaj (*inclination angle* ζ=20°), tako da je u odnosu na površinu obrade zaklapao ugao od 70 stepeni.

Tvrdoća svakog uzorka je mjerena EMCOTEST DuraScan G5 uređajem za mjerenje tvrdoće. Na svakoj obrađenoj površini su izvršena po tri mjerenje tvrdoće, a za vrijednost tvrdoće je uzeta srednja vrijednost ta tri mjerenja. Dijagram toka rada ove eksperimentalne studije je prikazan na slici 1.

Slika 1. *Dijagram toka rada prikazanog istraživanja*

¶

3. ANALIZA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

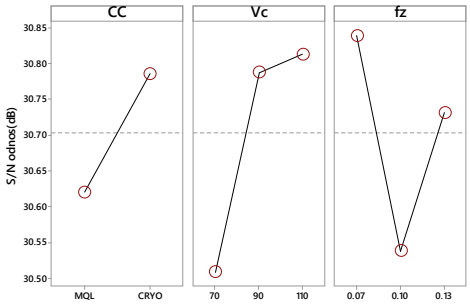
¶

Tvrdoća obrađenih površina je značajna za otpornost na habanje obrađenih površina koje su u stalnom kontaktu sa drugim površinama pri eksploataciji. Iz tih razloga primarni cilj ovog istraživanja je određivanje optimalnih nivoa korištenjem Taguči metode i na taj način analiza uticaja ulaznih parametara na tvrdoću obrađene površine. Optimizacija kontrolnih parametara je realizovana "*signal-to-noise*" (S/N) odnosom. Kako je funkcija cilja povećanje tvrdoće obrađene površine, S/N odnos je defnisan kategorijom "što veća vrijednost to bolja". Tabela 3 prikazuje cjelokupni plan eksperimenta, rezultate površinske tvrdoće i njihove odgovarajuće vrijednosti S/N odnosa.

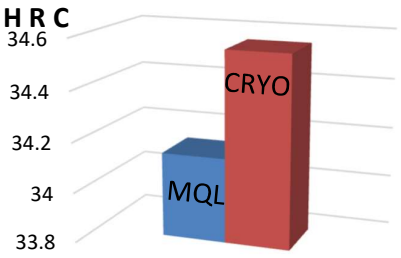
Tabela 2. Eksperimentalni podaci, tvrdoća i S/N odnos

No.	*CC*	v_c *[m/min]*	f_z *[mm/z]*	HRC 1	HRC 2	HRC 3	HRC srednje	S/N[dB]
1	MQL	70	0.07	36.60	40.00	40.80	36.60	30.8470
2	MQL	90	0.10	35.28	33.19	31.96	35.28	30.5055
3	MQL	110	0.13	33.85	34.29	35.06	33.85	30.6350
4	MQL	70	0.07	38.25	31.48	34.07	38.25	30.8470
5	MQL	90	0.10	32.20	34.18	34.62	32.20	30.5055
6	MQL	110	0.13	31.60	32.42	33.85	31.60	30.6350
7	MQL	70	0.07	32.20	34.73	33.41	32.20	30.8470
8	MQL	90	0.10	31.96	36.93	32.86	31.96	30.5055
9	MQL	110	0.13	31.60	33.63	36.93	31.60	30.6350
10	MQL	70	0.07	31.36	32.42	35.72	31.36	30.8470
11	MQL	90	0.10	28.64	34.95	35.50	28.64	30.5055
12	MQL	110	0.13	37.92	38.36	29.20	37.92	30.6350
13	MQL	70	0.10	35.06	32.97	35.28	35.06	30.2552
14	MQL	90	0.13	29.80	32.97	33.41	29.80	30.5753
15	MQL	110	0.07	38.36	37.04	35.83	38.36	30.9063
16	MQL	70	0.10	28.64	31.96	32.31	28.64	30.2552
17	MQL	90	0.13	32.53	36.16	38.80	32.53	30.5753
18	MQL	110	0.07	33.08	34.51	32.64	33.08	30.9063
19	CRYO	70	0.10	31.12	34.95	34.40	31.12	30.5219
20	CRYO	90	0.13	36.60	35.61	35.72	36.60	31.3034
21	CRYO	110	0.07	34.40	38.03	32.31	34.40	30.8369
22	CRYO	70	0.10	29.80	37.37	33.85	29.80	30.5219
23	CRYO	90	0.13	38.36	34.62	39.70	38.36	31.3034
24	CRYO	110	0.07	34.29	36.71	33.19	34.29	30.8369
25	CRYO	70	0.13	36.60	31.12	30.64	36.60	30.4123
26	CRYO	90	0.07	33.96	34.40	29.32	33.96	30.7644
27	CRYO	110	0.10	38.03	36.49	37.04	38.03	30.8727
28	CRYO	70	0.13	33.19	34.07	32.64	33.19	30.4123
29	CRYO	90	0.07	35.06	36.82	37.37	35.06	30.7644
30	CRYO	110	0.10	34.73	33.19	34.07	34.73	30.8727
31	CRYO	70	0.13	34.29	34.29	32.75	34.29	30.4123
32	CRYO	90	0.07	32.42	34.07	31.60	32.42	30.7644
33	CRYO	110	0.10	35.28	34.40	32.64	35.28	30.8727

34	CRYO	70	0.13	30.04	31.12	37.26	30.04	30.4123
35	CRYO	90	0.07	36.93	38.69	36.05	36.93	30.7644
36	CRYO	110	0.10	33.08	35.61	35.83	33.08	30.8727



Slika 3. *S/N odziv za tvrdoću površine*



Slika 4. *Srednja vrijednost tvrdoće za MQL i CRYO uslove obrade*

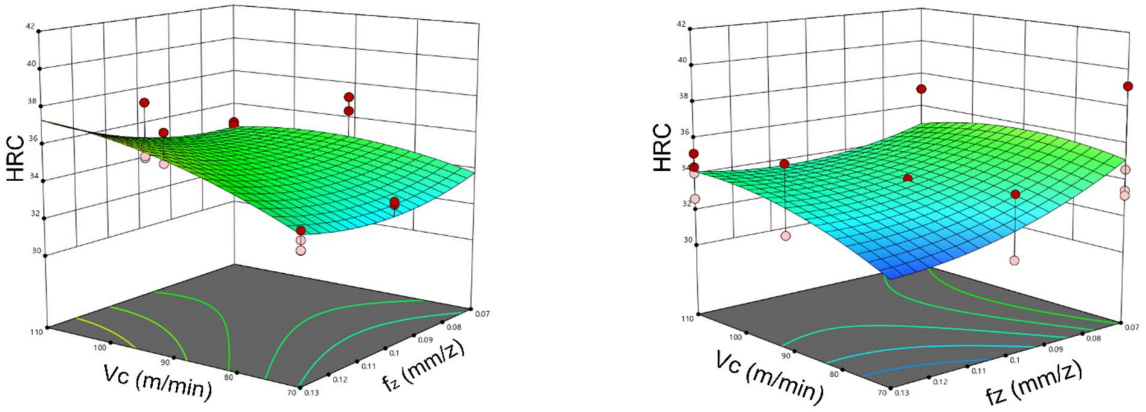
Kod analize tvrdoće obrađene površine potrebno je izvršiti analizu uticaja načina hlađenja i podmazivanja, brzine rezanja i pomaka. S obzirom da je za otpornost obrađenih površina na habanje potrebna veća tvrdoća obrađenih površina, jasno se zaključuje da se funkcija cilja mora postaviti kao: "što veća vrijednost to bolja" (*Larger-the-better*). S/N odziv za svaki uticajni faktor je prikazan u tabeli 3 i na dijagramu sa slike 3.

Tabela 3. S/N odziv na postojanost alata

Nivo	CC	Brzina rezanja [m/min]	Pomak [mm/z]
1	30.62	30.51	30.84
2	30.79	30.79	30.54
3		30.81	30.73
Razlika	0.16	0.30	0.30
Rang	3	1	2

Iz analize S/N odnosa lako se može utvrditi koji faktor od poređena tri faktora ima najveći uticaj na tvrdoću obrađene površine loptastim glodanjem superlegure titanijuma Ti-6Al-4V. Iz tabele 3, na osnovu ranga uticaja, i slike 3 i 5 se dobija da najveći uticaj na tvrdoću obrađene površine ima brzina rezanja. Sa druge strane, najmanji uticaj imaju uslovi obrade. Dakle, najveća faktorna zavisnost za postojanost alata je za S/N sa najvećim nagibom grafikona. Međutim, iako je uticaj načina i hlađenja i podmazivanja najmanji od posmatranih faktora, sa slike 3, 4 i 5 se jasno vidi da taj uticaj postoji u da se veća tvrdoća dobija korištenjem CRYO hlađenja nego sa MQL podmazivanjem.

Iz tebele 3 i grafikona sa slike 3 i 5, takođe se vide i optimalne režime obrade u okviru ponuđenih nivoa faktora, s obzirom na kriterijum za funkciju cilja "što veća vrijednost to bolja". Optimalna kombinacija izabranih faktora je CRYO hlađenje, brzina na nivou 3 i pomak na nivou 1.



a) b)

Slika 5. *Response surface dijagrami – uticaj parametara rezanja na tvrdoću; a)MQL, b)CRYO*

4. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj uslova rezanja, brzine rezanja i pomaka po zubu na tvrdoću obrađene površine pri loptastom glodanju superlegure titanijuma Ti-6Al-4V. Eksperiment je izveden po Tagučijevom L36 ortogonalnom nizu. Tagučijeve tehnike su korištene u procesu analize uticaja i pronlaženja optimalnih parametara. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Na osnovu S/N analize optimalni parametri za postizanje maksimalne tvrdoće obrađene površine su CRYO hlađenje, brzina rezanja od 110 m/min, i pomak po zubu od 0.07 mm/z (A2B3C1).
- Posmatrani parametri imaju uticaj na tvrdoću obrađene površine, ali taj uticaj nije veliki.
- Iako uslovi hlađenja i podmazivanja u maloj mjeri utiču na tvrdoću obrađene površine,veća tvrdoća se dobije sa CRYO hlađenjem.
- Kod obrade površina loptastim glodalom posmatrani parametri nemaju veliki uticaj zbog valovitosti obrađene površine (*Scalop-a*) koji na površini nastaje zbog samog oblika alata. Ovaj uticaj bi bio značajniji pri drugim obradama glodanjem te je u budućnosti potrebno izvršiti te analize.

5. LITERATURA

[1] Rottela G., Dillon Jr.O.W., Umbrello D., Serrineri L., Jawahir I.S.: *The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy,* Int J Adv Manuf Technol, vol. 71, pp. 47-55, 2014. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5477-9

[2] Jamil, M., Khan, A.M., Hegab, H. et al.: *Effects of hybrid Al2O3-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti–6Al–4V*, Int J Adv Manuf Technol, vol 102, pp. 3895–3909, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03485-9

[3] Masoudi, S., Esfahani, M.J., Jafarian, F. et al.: *Comparison the Effect of MQL, Wet and Dry Turning on Surface Topography, Cylindricity Tolerance and Sustainability,* Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., 2019. https://doi.org/10.1007/s40684-019-00042-3

[4] Tesic, S., Cica, D., Borojevic, S. et al.: *Optimization and Prediction of Specific Energy Consumption in Ball-End Milling of Ti-6Al-4V Alloy Under MQL and Cryogenic Cooling/Lubrication Conditions*, Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., 2022. https://doi.org/10.1007/s40684-021-00413-9

[5] Celis, P., Vazquez, E., Soria-Hernández, C.G. et al.: *Evaluation of Ball End Micromilling for Ti6Al4V ELI Microneedles Using a Nanoadditive Under MQL Condition,* Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., 2021. https://doi.org/10.1007/s40684-021-00383-y

[6] Mersni W., Boujelbebe M., Ben Salem S., Alghamdi A-S.: *Optimization of the surface roughness in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using the Taguchi Method,* Procedia Manufacturing, vol. 20, pp. 271-276, 2018. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.040

[7] Li A., Zhao J., Lou H., Pei Z., Wang Z.: *Progressive tool failure in high-speed dry milling of Ti-6Al-4V alloy with coated carbide tools*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 58, No. 5-8, pp. 465-478, 2012. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3408-1

[8] Halil C., Meric K.: *The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 50, pp. 304-312, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.02.012

[9] Oh, NS., Woo, WS. & Lee, CM.: *A study on the machining characteristics and energy efficiency of Ti-6Al-4V in laser-assisted trochoidal milling,* Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. vol. 5, pp. 37–45, 2018. https://doi.org/10.1007/s40684-018-0004-y

[10] Kummamkandath, A., Duchosal, A., Morandeau, A. et al.*: Mechanical and Thermal Load Effects of Novel MWFs Delivery Method in Milling of Ti–6Al–4V*, Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., vol. 9, pp. 443–457, 2022. https://doi.org/10.1007/s40684-020-00288-2

Tešić, S., Zeljković, M., Tabaković, S., Čiča, Đ., Borojević, S., Sredanović, B.

¶

EXPERIMENTAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE HARDNESS MACHINED SURFACE IN BALL-END MILLING OF Ti-6Al-4V ALLOY UNDER CRYO AND MQL CUTING CONDITIONS

¶

Abstract: *The present study explores the influence of three cutting parameters, namely, cooling/lubrication conditions, cutting speed and feed rate, on the hardness of the machined surface at ball-end end milling of Ti6-Al4-V. The main goal*

of this study is to increase the hardness of the machined surface the ball-end end milling process. To achieve this goal, techniques such as analysis and optimization were used. In order to measure the hardness of the machined surface, experiments were carried out in MQL and cryogenic CO_2 conditions according to Taguchi's L36 orthogonal array. Also, the Taguchi method was used to optimize the input cutting parameters. The signal-to-noise ratio was applied to find the optimal levels of the cutting parameters to get the bigest value hardness of the machined surface.

Vasilić, G.[1)], Živanović, S.[2)], Milutinović, M.[1)], Dimić, Z.[3)]

KINEMATIKA KOMPLEKSNE VIŠEOSNE I VIŠEVRETENE MAŠINE ALATKE NAMENjENE ZA PROCES OBRADE GLODANjEM [4)]

Rezime

U okviru ovog rada je prikazana analiza jedne višeosne i viševretene mašine alatke namenjene za proces obrade glodanjem. Prema svojoj konfiguraciji, razmatrana mašina alatka se može okarakterisati kao glodalica horizontalno-vertikalnog tipa što je svrstava u grupu multifunkcionalnih mašina alatki. Mašina alatka se prema više kriterijuma može okarakterisati kao mašina alatka rekonfigurabilnog tipa i u zavisnosti od potreba se može konfigurisati za 3-osnu, 4-osnu ili 5-osnu obradu glodanjem. Konfiguracija mašine alatke poseduje dva nezavisna dvoosna rekonfigurabilna paralelna mehanizma što samu mašinu alatku svrstava u grupu kompleksnih mašina alatki.

Ključne reči: Kinematski problemi, paralelni mehanizmi, kompleksna mašina alatka, rekonfigurabilna mašina alatka

1. UVOD

Zbog potrebe da se različiti obradni procesi unaprede, mašine alatke kao deo obradnog sistema u velikoj meri utiču na sam obradni proces i iz tog razloga su predmet mnogih istraživanja. Istraživanja u oblasti mašina alatki imaju za cilj da se poboljšaju karakteristike obradnog procesa kao što su: tačnost izrađenog dela, brzina obrade, produktivnost, ekonomičnost itd. Da bi se ispunili navedeni ciljevi, istraživanja su se odvijala u različitim pravcima. Tako su u naučnim radovima [1]-[3] razmatrani principi projektovanja i gradnje rekonfigurabilnih mašina alatka i rekonfugurabilnih obradnih sistema koji se brzom i lakom promenom konfiguracije mogu prilagoditi trenutnim potrebama u proizvodnom procesu. Kako je navedeno u naučnom radu [1], jedan rekonfigurabilni proizvodni sistem se pri samom projektovanju dizajnira za brzu promenu svoje strukture na ekonomski isplativ način a sama promena strukture obuhvata promenu i hardverskog i softverskog dela sistema [3]. Neke od mnogih rekonfigurabilnih mašina alatki su prikazane u naučnim radovima [4],[5]. Jedan od pravaca istraživanja mašina alatki su mehanizmi mašina alatki, pri čemu se zbog prednosti koje poseduju pažnja posvećuje mašinama alatkama zasnovanih na potpuno paralelnim mehanizmima kao i hibridnim mehanizmima [6]-[8] koji predstavljaju kombinaciju tradicionalnih serijskih i paralelnih mehanizama. Važno je napomenuti da se u okviru grupe hibridnih mehanizama u sve većoj meri izučavaju mehanizmi čija je konfiguracija sadrži dva ili više paralelnih mehanizama koji su međusobno serijski povezani [9]-[11]. U velikoj meri, namena mašine alatke uslovljava polazne kriterijume za prethodno navedene pravce istraživanja. Tako, mašine alatke sa hibridnim mehanizmom [6]-[8] su namenjene za proces obrade glodanjem. U naučnim radovima [12],[13] su predloženi industrijski roboti sa serijskim mehanizmom namenjeni za sečenje penastih materijala usijanom žicom dok su u naučnim radovima [10] i [14] analizirani manipulatori zasnovani na paralelnim mehanizmima.

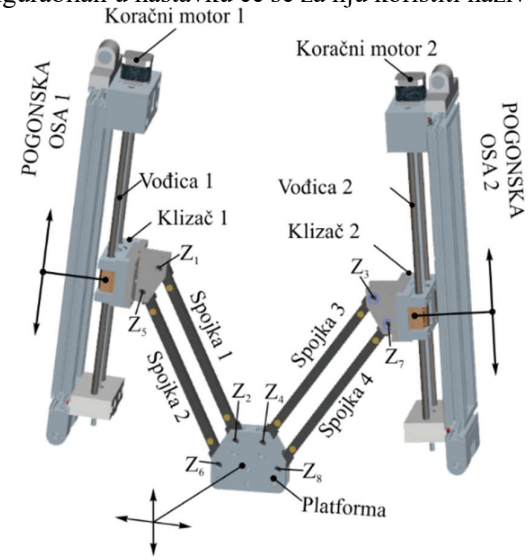
Mašina alatka koju autori predlažu u ovom radu je zasnovana na rekonfigurabilnom dvoosnom mehanizmu

[1)] Goran Vasilić, dipl.inž.maš. (gvasilic@atssb.edu.rs), dr Milan Milutinović (mmilutinovic@atssb.edu.rs), Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Odsek za saobraćaj, mašinstvo i inženjerstvo zaštite
[2)] prof. dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (szivanovic@mas.bg.ac.rs)
[3)] dr Zoran Dimić, Lola institut (zoran.dimić@li.rs)
[4)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrisana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „ Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema ", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god.

sa paralelnom kinematikom MOMA [15]-[18]. Predložena mašina alatka je u stvari nadgradnja već analizirane rekonfigurabilne višeosne mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja penastih materijala žicom [19]-[21]. Pošto predloženu mašinu alatku čine dva nezavisna rekonfigurabilna dvoosna paralelna mehanizma i kako je namenjena za različite procese obrade, sama mašina alatka se može okarakterisati kao kompleksna višenamenska mašina alatka [22]. Konfiguracija mašine alatke koja se razmatra u ovom naučnom radu je namenjena za proces obrade glodanjem a prema orijentaciji glavnih vretena mašine alatke, prema trenutnim potrebama može raditi ili kao horizontalna glodalica ili kao vertikalna glodalica. Iz tog razloga, predložena konfiguracija kompleksne mašine alatke nosi naziv MOMA HV-Mill [23].

2. OPIS VIŠEOSNE MAŠINE ALATKE

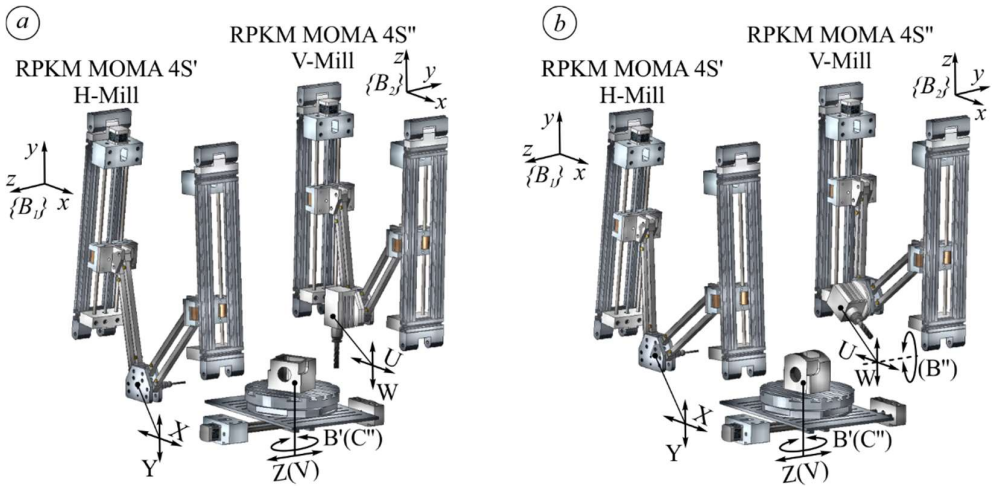
Kao što je već rečeno, višeosna mašina alatka MOMA HV-MILL sadrži dva nezavisna ravanska dvoosna rekonfigurabilna mehanizma. Za razliku od ranije analiziranih mašina alatki [19]-[21] zasnovanih na mehanizmu MOMA [15]-[18], mašina alatka MOMA HV-MILL sadrži proširene konfiguracije mehanizma MOMA kako bi se obradni procesi za koje je namenjena mogli realizovati. CAD model proširene konfiguracije dvoosnog rekonfigurabilnog mehanizma MOMA je prikazan na slici 1. Upotrebljene proširene konfiguracije mehanizma MOMA poseduju fizičke platforme za koje su obrtnim neosnaženim zglobnim vezama, vezane po četiri spojke svojim jednim krajem (Z_2, Z_4, Z_6 i Z_8). Svaki par spojki je svojim drugim krajem vezan za klizač jedne pogonske ose koji se može kretati duž vođica (Z_1, Z_3, Z_5 i Z_7). Obrtno kretanje koračnih motora se prenosi na zavojno vreteno koje svoje obrtno kretanje transformiše u translatorno kretanje klizača duž vođica. Pošto je za proširenu konfiguraciju ravanskog paralelnog mehanizma MOMA karakteristično da poseduje četiri spojke, a mehanizam je i dalje rekonfigurabilan u nastavku će se za nju koristiti naziv RPKM MOMA 4S.



Slika 1. *CAD model proširene konfiguracije dvoosnog rekonfigurabilnog mehanizma RPKM MOMA 4S*

Konfigurisanjem mehanizma na opisani način je omogućeno da se kretanjem klizača duž vođica, platforma mehanizma kreće u dva pravca pri čemu je u istom trenutku onemogućeno bilo kakvo njeno obrtanje te se na platformu mehanizma može postaviti glavno vreteno tako da osa vretena bude ili upravna na ravan mehanizma ili da leži u ravni mehanizma. Ugledajući se na osnovnu konfiguraciju dvoosnog mehanizma sa paralelnom kinematikom, prilikom projektovanja proširene konfiguracije MOMA je zadržana mogućnost brze promene orijentacije pogonskih osa kao i mogućnost brze promene spojki mehanizma. Samim tim se i proširena konfiguracija mehanizma može svrstati u grupu rekonfigurabilnih mehanizama čija se konfiguracija može brzo i lako prilagoditi trenutnim potrebama. Proširena konfiguracija doosnog ravanskog mehanizma sa paralelnom kinematikom pruža mogućnost da se sama konfiguracija može koristi za gradnju glodalice ili horizontalnog ili vertikalnog tipa. Prilikom gradnje višeosne i viševretene mašine alatke su korištena dva dvoosna mehanizma MOMA proširene konfiguracije pri čemu upotrebljeni mehanizmi svojim platformama nose glavna vretena različite orijentacije kako je i prikazano na slici 2. Kako je predviđeno, tokom procesa obrade je aktivan samo jedan od dva paralelna mehanizma odnosno predložena mašina alatka bi tokom procesa obrade radila ili kao horizontalna ili kao vertikalna glodalica. Glavni razlog za analizu i gradnju ovakve mašine alatke je taj da se prilikom izrade delova složene geometrije izbegne višestruko baziranje i stezanje pripremka čime se kroz pripremno vreme skraćuje vreme izrade dela. Osim smanjenja vremena izrade, smanjivanja broja baziranja i

stezanja, umanjuju se i greške izrade dela. Takođe, predloženi koncept višeosne i viševretene mašine alatke je osnova za buduća istraživanja koja će biti usmerena ka razvoju mašine alatke namenjene za realizaciju istovremenih, sinhronizovanih procesa obrade [24],[25].

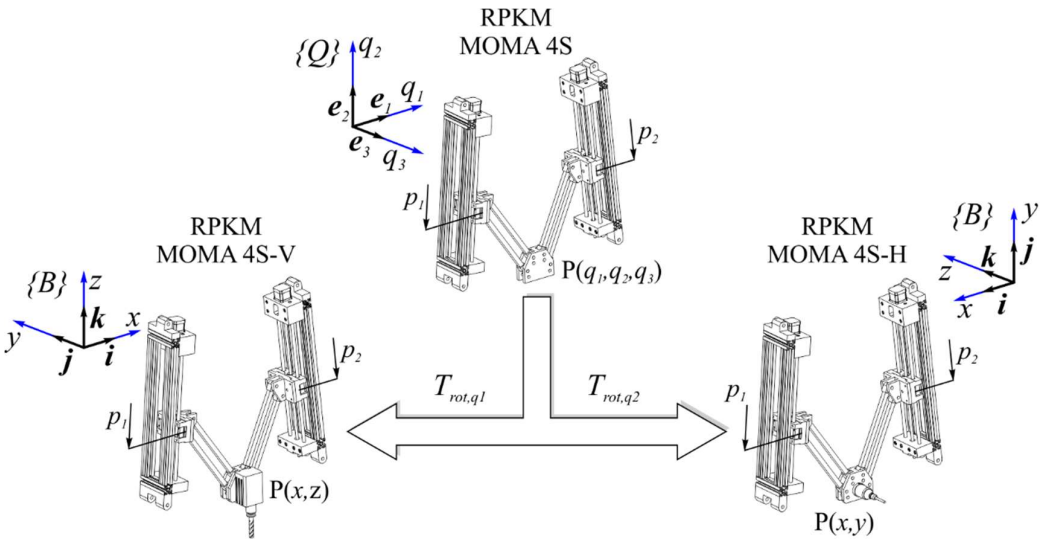


Slika 2. *CAD modeli višeosne mašine alatke MOMA HV-Mill: a)Mašina alatka sa šest stepeni slobode; b)Mašina alatka sa sedam stepeni slobode - preuzeto i dorađeno [23]*

Na slici 2. su prikazane samo dve od velikog broja mogućih konfiguracija mašine alatke MOMA HV-Mill. Da bi bilo moguće realizovati proces obrade glodanjem bilo kojim od dva upotrebljena paralelna mehanizma, uvedena je i treća pogonska osa koja je upravna pravce kretanja platformi. Poštujući konvenciju o pravcima i smerovima osa CNC mašina alatki definisanu standardom ISO-6983 [26], u slučaju rada mehaniszma RPKM MOMA 4S' treća osa nosi oznaku „*Z*“ dok u slučaju rada mehanizma RPKM MOMA 4S" treća osa nosi oznaku „*V*“. Na ovaj način su ispunjeni minimalni uslovi za realizovanje procesa obrade glodanjem. Obe konfiguracije mašine alatke prikazane na slikama 2.a i 2.b poseduju i obrtni sto kojim se obradak može obrtati oko vertikalne ose. Bez obzira što je u pitanju jedna pogonska osa, dodeljene su joj dve oznake jer u slučaju rada mehanizma RPKM MOMA 4S' obradak vrši obrtanje oko ose „*Y*“ dok u slučaju rada mehanizma RPKM MOMA 4S" obradak vrši obrtanje oko ose „*Z*“ pa su joj iz tog razloga i dodeljene oznake B' i C". Oznake u eksponentu pogonske ose govore za koji mehanizam RPKM MOMA 4S je vezano obrtno kretanje obradka što je od značaja za rešavanje kinematskih problema. Mehanizmu RPKM MOMA 4S", na slici 2.b je dodata još jedna obrtna osa B" kojom se menja orijentacija alata u odnosu na obradak. Praktično, na ovaj način mehanizam RPKM MOMA 4S" postaje ravanski troosni hibridni mehanizam. Uz translatornu osu „*V*“ i obrtnu osu C", dobija se petoosna hibridna mašina alatka.

3. KINEMATSKI MODEL RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA 4S

Rešavanje kinematskih problema kompleksne višeosne i viševretene mašine alatke MOMA HV-Mill se zasniva na rešavanju kinematskih problema upotrebljenih dvoosnih ravanskih paralelnih mehanizama MOMA 4S. Konačna rešenja kinematskih problema višeosne i viševretene mašine alatke MOMA HV-Mill se dobijaju kombinovanjem rešenja kinematskih problema ravanskih mehanizama sa rešenjima serijski dodatih pogonskih osa. Izuzimajući veličine koje se koriste za rekonfigurisanje mehanizama (orijentacija pogonskih osa i dužine spojki), prema opisu kompleksne višeosne viševretene mašine alatke i kako je prikazano na slici 2, u pogledu geometrije upotrebljeni mehanizmi su isti. Jedina razlika između upotrebljenih mehanizama se ogleda u pravcima i smerovima osa koordinatnih sistema. Da bi se postupak rešavanja kinematskih problema ravanskih paralelnih mehanizama RPKM MOMA 4S pojednostavio, polazne jednačine za rešavanje kinematskih problema se posmatraju u nepokretnom koordinatnom sistemu *{Q}* sa osama q_1, q_2 i q_3 čiji su pravci i smerovi određeni jediničnim vektorima $\boldsymbol{e}_1$, $\boldsymbol{e}_2$ i $\boldsymbol{e}_3$ (slika 3). Ovakvim pristupom, koordinate platforme mehanizma su izražene generalisanim koordinatama q_i ($i=1$-3) koje ujedno predstavljaju spoljašnje koordinate ravanskog paralelnog mehanizma. Rešavanjem kinematskih problema se unutrašnje koordinate mehanizma p_1 i p_2 dovode u vezu sa spoljašnjim koordinatama q_1, q_2 i q_3. Pošto su upotrebljeni paralelni mehanizmi dvoosni, rešavanjem kinematskih problema paralelnog mehanizma RPKM MOMA 4S, jedna od spoljašnjih koordinata q_i će imati konstantnu vrednost i neće imati uticaja na preostale spoljašnje koordinate kao ni na unutrašnje koordinate p_1 i p_2.



Slika 3. *MOMA 4S – Transformacije koordinatnih sistema*

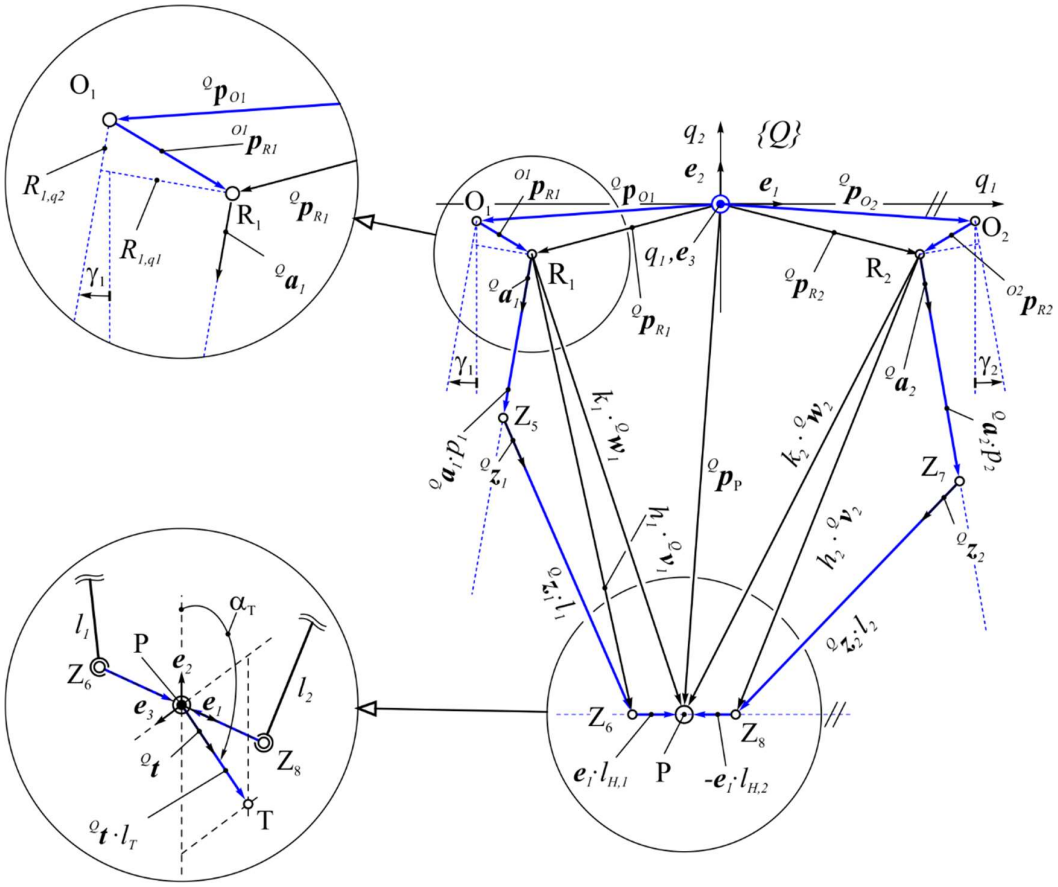
Rotacijama koordinatnog sistema *{Q}* oko odgovarajućih ose q_i, dobijaju se novi nepokretni koordinatni sistemi *{B}* sa pravcima i smerovima osa definisane standardom ISO-6983 [26]. Rotacije koordinatnog sistema *{Q}* u koordinatne sisteme koji odgovaraju konfiguracijama mehanizma RPKM MOMA 4S-V i RPKM MOMA 4S-H sa slike 2 su opisane matricama transformacije date jednačinama (1) i (2), respektivno.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = T_{rot,q1} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ -e_3 \\ e_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = T_{rot,q2} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e_1 \\ e_2 \\ -e_3 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Kinematski model proširene konfiguracije ravanskog paralelnog mehanizma MOMA 4S u koordinatnom sistemu *{Q}* je prikazan na slici 4. Veličine prikazane na slici 4 predstavljaju:

- P - Tačka na platformi mehanizma koja se koristi pri rešavanju kinematskih problema;
- R_i - Referentne tačke mehanizma u kojima su vrednosti unutrašnjih koordinata p_i=0;
- O_i - Tačka oko koje je može rotirati pogonska osa pri rekonfigurisanju mehanizma;
- Z_i - Zglobne veze;
- ${}^{Q}\boldsymbol{p}_P$ - Vektor koji definiše pozicija tačke P u koordinatnom sistemu *{Q}*;
- ${}^{Q}\boldsymbol{p}_{Ri}$ - Vektori položaja referentnih tačaka R_i u koordinatnom sistemu *{Q};*
- ${}^{Q}\boldsymbol{p}_{Oi}$ - Vektori položaja tačaka O_i u koordinatnom sistemu *{Q};*
- $k_i \cdot {}^{Q}\boldsymbol{w}_i$ - Vektori koji definišu pozicije tačke *P* u odnosu na referentne tečke R_i*;*
- $h_i \cdot {}^{Q}\boldsymbol{v}_i$ - Vektori koji definišu pozicije zglobnih veza Z_i u odnosu na referentne tečke R_i*;*
- p_i - Unutrašnje koordinate mehanizma;
- ${}^{Q}\boldsymbol{a}_i$ - Jedinični vektori koji su određeni orijentacijama pogonskih osa;
- ${}^{Q}\boldsymbol{z}_i$ - Jedinični vektori određeni orijentacijom spojki mehanizma;
- ${}^{Q}\boldsymbol{a}_i \cdot p_i$ - Vektori unutrašnjih koordinata;
- ${}^{Q}\boldsymbol{z}_i \cdot l_i$ - Vektori određeni dužinama spojki;
- $\boldsymbol{e}_1 \cdot l_{Hi}$ - Vektori kojima je određena pozicija tačke P u odnosu na zglobne veze Z_i;
- ${}^{Q}\boldsymbol{t} \cdot l_T$ - Vektori kojim je definisana pozicija vrha alata u odnosu na tačku P;
- α_T - Ugao kojim je definisana orijentacija alata.



Slika 4. *Kinematski model ravanskog paralelnog mehanizma MOMA 4S - preuzeto i dorađeno [23]*

Na osnovu slike 4 se mogu napisati vektorske jednačine [3] i predstavljaju polazne jednačine za rešavanje kinematskih problema proširene konfiguracije ravanskog paralelnog mehanizma RPKM MOMA 4S.

$$p_i^2 - 2p_i\left({}^{Q}\boldsymbol{a}_i \cdot h_i\, {}^{Q}\boldsymbol{v}_i\right) + \left(h_i\, {}^{Q}\boldsymbol{v}_i\right)^2 - l_i^2 = 0 \tag{3}$$

Sređivanjem vektorskih jednačina [3], dobijaju se dve implicitne jednačine [4] u kojoj figurišu unutrašnje koordinate mehanizma p_i, projekcije jediničnih vektora $\boldsymbol{a}_i$ na ose q_1 i q_2 koordinatnog sistema $\{Q\}$ ($a_{q1,i}$ i $a_{q2,i}$) određene uglovima $\alpha_i=3\pi/2+\gamma_i$, veličine koje definišu poziciju vrha alata u odnosu na tačku P (l_T, α_T), poziciju tačke P u odnosu na zglobne veze Z_6 i Z_8 ($l_{1,H}$ i $l_{2,H}$) i dužine spojki l_1 i l_2.

$$\begin{aligned}
&p_1^2 - 2p_1\left[a_{q1,1}\left(q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H}\right) + a_{q2,1}\left(q_{2,R1} - q_{2,T} + l_{T,q2}\right)\right] + \\
&+\left(q_{1,R1} - q_{1,T} + l_{1,H}\right)^2 + \left(q_{2,R1} - q_{2,T} + l_{T,q2}\right)^2 - l_1^2 = 0 \\
&p_2^2 - 2p_2\left[a_{q1,2}\left(q_{1,R2} - q_{1,T} + l_{2,H}\right) + a_{q2,2}\left(q_{2,R2} - q_{2,T} + l_{T,q2}\right)\right] + \\
&+\left(q_{1,R2} - q_{1,T} + l_{2,H}\right)^2 + \left(q_{2,R2} - q_{2,T} + l_{T,q2}\right)^2 - l_2^2 = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

U prethodnim jednačinama takođe figurišu koordinate referentnih tačaka R_i u koordinatnom sistemu $\{Q\}$ ($q_{1,Ri}$ i $q_{2,Ri}$). Pošto su referentne tačke R_i izmeštene u odnosu na nepokretne tačke O_i oko kojih se vrši obrtanje pogonske ose prilikom rekonfigurisanja, koordinate tačaka R_i nisu iste za konfiguracije čije se orijentacije pogonskih osa razlikuju. Da bi jednačine [4] bile potpuno generalizovane i da bi važile za svaku konfiguraciju mehanizma, uvode se dodatne jednačine [5] koje prema kinematskom modelu mehanizme sa slike 4 daju vezu između referentnih tačaka R_i i O_i preko ugla orijentacije pogonske ose γ_i.

$${}^{Q}\boldsymbol{p}_{Ri} = {}^{Q}\boldsymbol{p}_{Oi} + \begin{bmatrix} cos(\gamma_i) & -sin(\gamma_i) \\ sin(\gamma_i) & cos(\gamma_i) \end{bmatrix} \cdot {}^{Oi}\boldsymbol{p}_{Ri} = \begin{bmatrix} q_{1,Oi} \\ q_{2,Oi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cos(\gamma_i) & -sin(\gamma_i) \\ sin(\gamma_i) & cos(\gamma_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{q1,i} \\ R_{q2,i,} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1,Ri} \\ q_{2,Ri} \end{bmatrix} \tag{5}$$

4. KINEMATSKI PROBLEMI VIŠEOSNE MAŠINE ALATKE MOMA HV-MILL

Rešavanje kinematskih problema kompleksne višeosne i viševretene mašine alatke MOMA HV-Mill se može podeliti u dva dela. Prvi deo čini rešavanje kinematskih problema mašine alatke koja se sastoji isključivo od translatornih pogonskih osa. Drugačije rečeno, rešenja kinematskih problema se dobijaju rešavanjem jednačina (4) po unutrašnjim koordinatama p_i za inverzni ili rešavanje jednačina (4) po spoljašnjim koordinatama $\boldsymbol{q_i}$ za direktni kinematski problem. U ovom slučaju mašina alatka poseduje pet stepeni slobode i to po dva stepena slobode od dva upotrebljena mehanizma RPKM MOMA 4S i još jedan stepen slobode kojim je omogućeno kretanje obratka duž ose "*z*". Drugim delom rešenja kinematskih problema se obuhvata i kinematika obrtnih osa mašine alatke. Prethodno izvedene jednačine koje predstavljaju rešenja kinematskih problema mašine alatke sa isključivo translatornim osama se proširuju dodatnim članovima kojima se opisuje promena pozicije vrha alata u odnosu na obradak usled promene orijentacije alata ili obratka.

4.1 Rešenje kinematskih problema translatornih pogonskih osa

Jednačine izvedene u prethodnom poglavlju su generalizovane i važe za svaku konfiguraciju ravanskog paralelnog mehanizma RPKM MOMA 4S uz uvrštene odgovarajuće geometrijske parametre mehanizma. Rešavanjem jednačine (4) po unutrašnjim koordinatama p_i se dobijaju rešenja inverznih kinematskih problema (IKP) upotrebljenih mehanizama RPKM MOMA 4S. Rešenja IKP-a su data jednačinama (6) dok su jednačinama (7) date upotrebljene smene. Uz indeks *„i"* koji govori o kojoj pogonskoj osi se radi i može imati vrednosti *i=1,2,3,4* u jednačinama (6) i (7) figuriše eksponent *„j"* koji može imati vrednosti *j=1,2* i govori na koji od dva upotrebljena mehanizma RPKM MOMA 4S se odnose jednačine.

$$p_i = -b_i \pm \sqrt{b_i^2 - c_i} \tag{6}$$

$$\begin{gathered} b_i = 2\left[a_{q1,i}\left(q_{1,Ri} - {}^{j}q_{1,T} + {}^{j}l_{1,H}\right) + a_{q2,i}\left(q_{2,Ri} - {}^{j}q_{2,T} - {}^{j}l_{T,q2}\right)\right] \\ c_i = \left(q_{1,Ri} - {}^{j}q_{1,T} + {}^{j}l_{1,H}\right)^2 + \left(q_{2,Ri} - {}^{j}q_{2,T} - {}^{j}l_{T,q2}\right)^2 - l_i^2 \end{gathered} \tag{7}$$

Na isti način, rešavanjem jednačina (4) po spoljašnjim koordinatama q_i (*i=1,2,3,4*) se dobijaju rešenja direktnog kinematskog problema kompleksne višeosne i viševretene mašine alatke. Rešenja su data jednačinama (9) do koji se dolazi korišćenjem uvedenih smena datih jednačinama (8).

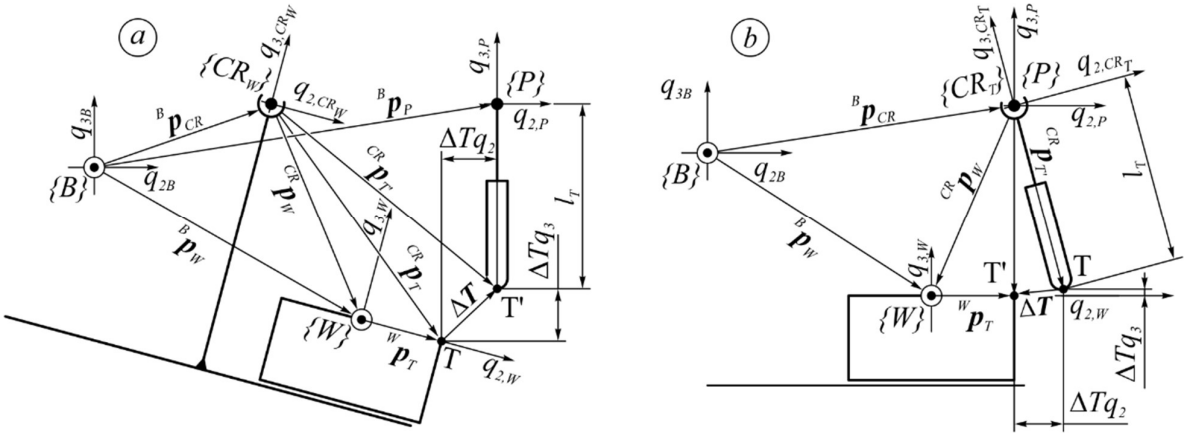
$$\begin{gathered} {}^{j}v_1 = q_{1,R1} + l_{1,H} \quad {}^{j}v_2 = q_{2,R1} - l_{T,q2} \\ {}^{j}v_3 = 2({}^{j}v_1 + p_1 a_{q1,1}) \quad {}^{j}v_4 = 2({}^{j}v_2 + p_1 a_{q2,1}) \\ {}^{j}v_5 = p_1^2 + {}^{j}v_1^2 + {}^{j}v_2^2 - l_1^2 + 2p_1({}^{j}v_1 \cdot a_{q1,1} + {}^{j}v_2 \cdot a_{q2,1}) \\ {}^{j}v_6 = q_{1,R2} - l_{2,H} \quad {}^{j}v_7 = q_{2,R2} - l_{T,q2} \\ {}^{j}v_8 = 2({}^{j}v_6 + p_2 a_{q1,2}) \quad {}^{j}v_9 = 2({}^{j}v_7 + p_2 a_{q2,2}) \\ {}^{j}v_{10} = p_2^2 + {}^{j}v_6^2 + {}^{j}v_7^2 - l_2^2 + 2p_2({}^{j}v_6 \cdot a_{q1,2} + {}^{j}v_7 \cdot a_{q2,2}) \\ {}^{j}v_{11} = ({}^{j}v_{10} - {}^{j}v_5) : ({}^{j}v_8 - {}^{j}v_3) \quad {}^{j}v_{12} = ({}^{j}v_9 - {}^{j}v_4) : ({}^{j}v_8 - {}^{j}v_3) \quad {}^{j}v_{13} = {}^{j}v_{12}^2 + 1 \\ {}^{j}v_{14} = -({}^{j}v_4 + 2\,{}^{j}v_{12}\,{}^{j}v_{11} - {}^{j}v_{12}\,{}^{j}v_3) \quad {}^{j}v_{15} = {}^{j}v_4 + {}^{j}v_{11}^2 - {}^{j}v_{11}\,{}^{j}v_3 \end{gathered} \tag{8}$$

$$\begin{gathered} {}^{j}q_{2,T} = -\left({}^{j}v_{14}^2 \pm \sqrt{{}^{j}v_{14}^2 - 4\,{}^{j}v_{13}\,{}^{j}v_{15}}\right) : \left(2 \cdot {}^{j}v_{13}\right) \\ {}^{j}q_{1,T} = {}^{j}v_{11} - {}^{j}q_{2,T}\,{}^{j}v_{12} \end{gathered} \tag{9}$$

Kao što se može videti, rešenja kinematskih problema su data u generalisanim unutrašnjim koordinatama a do konačnih rešenja kinematskih problema se dolazi tranformacijom generalizovanih q_i koordinata u koordinate *x*, *y*, *z*, *u* i *v* primenom matrica transformacije kako je prikazano jednačinama (1) i (2).

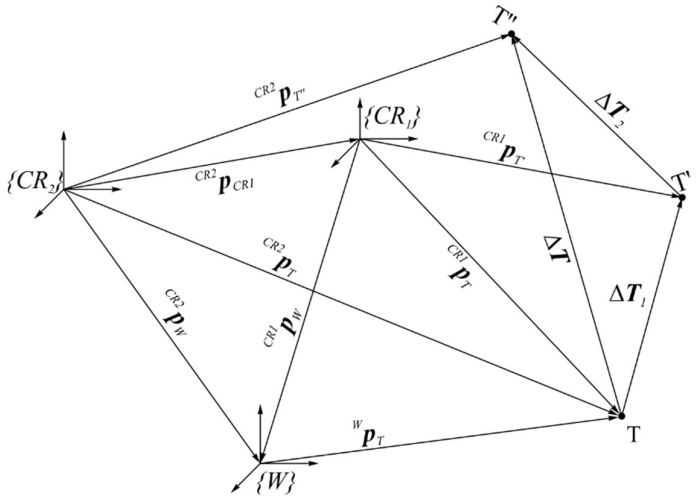
4.2 Rešenje kinematskih problema obrtnih pogonskih osa

Kao što je već rečeno, usled rotacije obratka (slika 5.a) ili alata tokom pobrade (slika 5.b), dolazi do promene pozicije vrha alata u odnosu na obradak. Na slici 5, vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ predstavlja odstupanje programirane pozicije vrha alata od tačke u kojoj vrh alata mora da se nađe nakon obrtanja obratka ili alata.



Slika 5. *Kinematika obrtne ose mašine alatke - preuzeto i dorađeno [23]*

Prema slici 5, vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ zavisi od: i)pozicije centra rotacije obratka ili alata ${}^{B}\boldsymbol{p}_{CR}$ u nepokretnom koordinatnom sistemu *{B}* u kome su i rešavani kinematski problemi translatornih pogonskih osa; ii)pozicije koordinatnog sistema obratka {W} u odnosu na centar rotacije - ${}^{CR}\boldsymbol{p}_{W}$; iii)koordinata programiranih tačaka u koordinatnom sistemu obratka - ${}^{W}\boldsymbol{p}_{T}$. Obrtanjem obratka ili alata oko jedne ose koja prolazi kroz centar rotacije *CR*, u ovom slučaju oko ose q_{1B}, formira se vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ koji ima projekcije na preostale dve ose (q_{2B} i q_{3B}) i nose oznake ΔT_{q2} i ΔT_{q3}. Za ispravno realizovanje procesa obrade, neophodno je kompenzovati vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ uvrštavanjem vrednosti projekcija ΔT_{q2} i ΔT_{q3} u jednačine kinematskih problema translatornih pogonskih osa. Ista situacija se javlja i u slučaju dve obrtne ose s' tom razlikom da u tom slučaju postoje dva centra rotacije (za svaku obrnu osu po jedan) i tada vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ ima projekcije na tri ose nepokretnog koordinatnog sistema *{B}*. Prema slici 6, vektor $\Delta\boldsymbol{T}$ čine dva vektora ($\Delta\boldsymbol{T}_1$ i $\Delta\boldsymbol{T}_2$) a njegove projekcije na tri ose su određene jednačinom (10) u kojoj figurišu matrice transformacije T_{q1} i T_{q2} a oblik im je isti kao kod transformacija koordinata primenom Ojlerovih uglova. Napominje se da matrice transformacije T_{q1} i T_{q2} nisu u nikakvoj vezi sa matricama transformacije sa početka $T_{rot,q1}$ i $T_{rot,q2}$. Naime, u matricama transformacije T_{q1} i T_{q2} figurišu unutrašnje koordinate kojima se definišu obrtna kretanja tokom procesa obrade (u zavisnosti od konfiguracije mehanizma mogu biti A,B ili C) dok u matricama transformacije $T_{rot,q1}$ i $T_{rot,q2}$ figurišu uglovi kojima se polazni koordinatni sistem *{Q}* transformiše u koordinatni sistem *{B}* sa pravcima i smerovima osa koordinatnog sistema koji odgovaraju konfiguraciji mašine alatke.



Slika 6. *Kinematski model dve obrtne pogonske ose - preuzeto i dorađeno [23]*

$$\Delta T = T_{q2} \cdot \left(T_{q1} \cdot \left({}^{CR1}\boldsymbol{p}_W + {}^{W}\boldsymbol{p}_T\right) + {}^{CR2}\boldsymbol{p}_{CR1}\right) - \left({}^{CR2}\boldsymbol{p}_{CR1} + {}^{CR1}\boldsymbol{p}_W + {}^{W}\boldsymbol{p}_T\right) =$$
$$= \left(T_{q2} \cdot T_{q1} - I\right) \cdot \left({}^{CR1}\boldsymbol{p}_W + {}^{W}\boldsymbol{p}_T\right) + \left(T_{q2} - I\right) \cdot {}^{CR2}\boldsymbol{p}_{CR1} = [\Delta T_{q1} \quad \Delta T_{q2} \quad \Delta T_{q3}]^T \tag{10}$$

U jednačini (10), *I* predstavlja 3×3 jediničnu matricu a konačna rešenja inverznog kinematskog problema petoosne mašine alatke se mogu predstaviti matričnom jednačinom (11). Matrična jednačina (11) se odnosi samo na jedan od dva upotrebljena paralelna mehanizma RPKM MOMA 4S što i govori pred-eksponent "*j*" na oznakama unutrašnjih koordinata. Uvrštavanjem odgovarajućih geometrijskih parametara u jednačine (6) do (10) u matričnu jednačinu (11) i upotrebom odgovarajućih transformacija (jednačine (1) i (2)), dobijaju se dve grupe jednačina, pri čemu se svaka od dve formirane grupe jednačina odnosi na po jedan paralelna mehanizma RPKM MOMA 4S. Dobijene jednačine se dalje koriste za formiranje upravljanja kompleksnom višeosnom i viševretenom mašinom MOMA HV-Mill.

$$\begin{bmatrix} {}^{j}p_1 \\ {}^{j}p_2 \\ {}^{j}p_3 \\ {}^{j}p_4 \\ {}^{j}p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{j}p_{1,tr} \\ {}^{j}p_{2,tr} \\ {}^{j}p_{3,tr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta T_{q1} \\ \Delta T_{q2} \\ \Delta T_{q3} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

9. ZAKLJUČAK

U okviru ovoga rada je predložen koncept jedne kompleksne višeosne mašine alatke čiju osnovu čine dva dvoosna ravanska paralelna mehanizma i jedna dodatna translatorna osa koja je ujedno i zajednička osa upotrebljenih paralelnih mehanizama. Kompleksna višeosna i viševretena mašina alatka je namenjena za realizaciju procesa obrade glodanjem i to kao horizontalna ili kao vertikalna glodalica. Za realizaciju procesa obrade jednim za navedene tipove glodalice se koristi po jedan od dva upotrebljena paralelna mehanizma. Za tako konfigurisan hardver mašine alatke, izvedene su generalizovane jednačine kinematskih problema koje uz odgovarajuće transformacije važe za oba upotrebljena paralelna mehanizma. Pošto je predložena mašina alatka proširiva i mogu joj se pridodati i obrtne ose, prikazan je način na koji se jednačine koje predstavljaju rešenja kinematskih problema mašine alatke sa samo translatornim osama proširuju proširuju kako bi se mogla realizovati višeosna obrada.

Prikazana kinematska analiza kao i dobijeni rezultati predstavljaju polaznu tačku za fizičku realizaciju predložene mašine, dodatne neophodne analize i formiranje upravljanja za predloženi koncept mašine alatke. Dobijeni rezultati će poslužiti i za analizu kompleksne višeosne i viševretene mašine alatke slične konfiguracije ali koja će biti u mogućnosti da istovremeno vrši obradu i kao horizontalna i kao vertikalna glodalica istovremenim radom oba upotrebljena paralelna mehanizma.

10. LITERATURA

[1] Koren, Y.: *Reconfigurable Manufacturing System*. In: Chatti, S., Laperrière, L., Reinhart, G., Tolio, T. (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering, ISBN: 978-3-662-53120-4, pp. 1417–1423, Springer, Berlin, Heidelberg. 2019. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4_6629

[2] Koren, I., Moshe, S.: *Design of reconfigurable manufacturing systems*. Journal of Manufacturing System, Vol.29(4): pp.130–141, 2010. DOI:10.1016/j.jmsy.2011.01.001

[3] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F. Moriwaki, T., Pitschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H.: *Reconfigurable manufacturing systems*. CIRP Annals, Vol.48(2): pp.527–540, 1999. DOI:10.1016/S0007-8506(07)63232-6

[4] Moon, Y.: *Reconfigurable Machine Tool Design.* Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-29397-3_7

[5] Katz, R.: *Design principles of reconfigurable machines*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume, Vol.34, pp.430–439 (2007). DOI:10.1007/s00170-006-0615-2

[6] Wu, J., Wang, J., Li, T., Wang, L.: *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(3): pp.413–420, 2007. DOI:10.1007/s00170-006-0605-4

[7] Wu, J., Wang, J., Li, T., Wang, L.: *Analysis and Application of a 2-DOF Planar Parallel Mechanism,* Journal of Mechanical Design, Vol.129(4): pp.434–437, 2006. DOI:10.1115/1.2437800

[8] Wu, J., Li, T., Liu, X., Wang, L.: *Optimal kinematic design of a 2-DOF planar parallel manipulator,* Tsinghua science and technology, Vol.12(3): pp.269–275, 2007. DOI:10.1016/S1007-214(07)70040-8
[9] Romdhane, L.: *Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator*. Mechanism and Machine Theory, Vol.34(7): pp.1037–1055, 1999. ISSN 0094-114X. DOI:10.1016/S0094-114X(98)00079-2
[10] X.Z. Zheng, H.Z. Bin, Y.G. Luo: *Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.23: pp.925–930, 2004. DOI:10.1007/s00170-003-1782-z
[11] Yi Lu, Zhuohong Dai: *Dynamics model of redundant hybrid manipulators connected in series by three or more different parallel manipulators with linear active legs*. Mechanism and Machine Theory, Vol.103, pp.222–235, 2016. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.003
[12] Søndergaard A., et al.: Robotic hot-blade cutting, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design, Springer, Cham, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-26378-6_11
[13] Lee S.H., Ahn D.G., Yang D.Y.: Calculation and verification of rotation angle of a four-axis hotwire cutter for transfer-type variable lamination man- ufacturing using expandable polystyrene foam, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 22, pp. 175–183, 2003. DOI: 10.1007/s00170-002-1456-2
[14] Huang T., Li Z., Li M., et al.: Conceptual design and dimensional syntesis of a novel 2-dof translational parallel robot for pick-and-place operations, ASME Journal of Mechanical Design Vol. 126, No. 3, pp. 449–455, 2004. DOI: 10.1115/1.1711822
[15] Vasilić, G. Živanović, S., Kokotović, B., Dimić, Z.: *Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 7, pp. 3407-3421, 2019. DOI: 10.1007/s12206-019-0636-z
[16] Vasilić, G. Živanović, S.: *Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatornim zglobovima*, TEHNIKA – Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Vol. 71, No. 1, pp. 57-63, 2016. DOI: 10.5937/tehnika1601057V
[17] Vasilić, G., Živanović, S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*, 40. Jupiter konferencija, 36. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-893-2, str. 3.47-3.54, Univerzitet u Beogradu,Mašinski fakultet, Beograd, Maj 2016.
[18] Vasilić G., Živanović S., Kokotović B., Glavonjić M.: *Optimizacija dužina spojki dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma - MOMA*, 39. JUPITER konferenencija, 35. simpozijum NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.28-3.35, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
[19] Vasilić, G. Živanović, S.: *Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 149, No. 2, pp. 103833, 2020. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833
[20] Vasilić, G., Živanović, S.: *Uticaj rezolucije ravanskog paralelnog mehanizma na tačnost kompleksne mašine alatke za proces obrade sečenja žicom*, 42. Jupiter konferencija, 38. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-6060-055-6, str. 3.106-3.115, Univerzitet u Beogradu,Mašinski fakultet, Beograd, 2020.
[21] Vasilić, G., Živanović, S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog četvoroosnog mehanizma sa hibridnom kinematikom sa proces obrade sečenja žicom*, 41. Jupiter konferencija, 37. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-978-6, str. 3.45-3.53, Univerzitet u Beogradu,Mašinski fakultet, Beograd, Jun 2018.
[22] Moriwaki, T.: *Multi-functional machine tool*, CIRP Annals, Vol.57, No.2, pp.736-749, 2008. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004
[23] Vasilić, G.: *Koncepcijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki*, Doktorska disertacija, Univerzitet u beogradu, mašinski fakultet (u postupku odbrane)
[24] Ozdoganlar, OB., Endres, WJ.: *Parallel-Process (Simultaneous) Machining and its Stability*, Proceedings of the ASME 1999 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing Science and Engineering. Nashville, Tennessee, USA. November 14–19, 1999. pp. 361-368. ASME. DOI: 10.1115/IMECE1999-0693
[25] Brecher, C., Epple, A., Neus, S., Fey, M.: *Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.95, pp.13-19, 2015. DOI: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2015.05.003
[26] 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.

Vasilić, G., Živanović, S., Milutinović M., Dimić, Z.

KINEMATICS OF COMPLEX MULTI-AXIS AND MULTI-SPINDLE MACHINE TOOL INTENDED FOR THE MILLING PROCESS

Abstract: *This paper presents an analysis of a multi-axis and multi-spindle machine tool intended for the milling process. According to its configuration, the considered machine tool can be characterized as a horizontal-vertical type milling machine, which places it in the group of multifunctional machine tools. According to several criteria, the machine tool can be characterized as a reconfigurable type machine tool and, depending on the needs, can be configured for 3-axis, 4-axis or 5-axis milling. The configuration of the machine tool has two independent two-axis reconfigurable parallel mechanisms, which puts the machine tool itself in the group of complex machine tools.*

Key words: *Kinematics problems, parallel mechanisms, complex machine tool, reconfigurable machine tool*

Knežev, M., Živković, A. Štrbac, B., Hadžistević, M., Mlađenović, C., Marinković, D. [1)]

OPTIMIZACIJA KOLIČINE PROTOKA RASHLADNOG SREDSTVA ZA HLAĐENJE KUĆIŠTA MOTOR-VRETENA [2)]

Rezime

U ovom radu je predstavljen postupak pronalaženja optimalne zavisnosti na bazi centralno kompozitnog dizajna, između ulaznih parametara tj. faktora (broj obrtaja, protok, broj kapi i vrsta hlađenja) i izlaznih parametara (temperature na karakterističnim mestima). Centralno kompozitni dizajn, ima mogućnost optimizacije parametara, gde funkcija cilja može da bude minimum, maksimum ili konkretna vrednost. U nastavku će biti prikazan postupak optimizacije za temperaturu T_1 koja se odnosi na temperaturu u zoni prednjeg uležištenja motor-vretena.

Ključne reči: motor-vreteno, optimizacija, centralno kompozitni plan, metodologija odzivne površine

1. UVOD

Eksploatacione karakteristike mašina alatki kao što su: tačnost, kojom je definisan kvalitet radnog predmeta; proizvodnost, kojom je definisana brzina rada i ekonomičnost, kojom je definisana brzina vraćanja investicija; zavise od ponašanjem odgovarajućih vitalnih sklopova. Jedna od glavnih komponenti mašine alatke koja utiče na tačnost i produktivnost obrade je glavno vreteno odnosno motor-vreteno. Integrisani sklop motor-vretena već se naveliko koristi kod glavnih vretena mašina alatki [1].

Metodologija odzivne površine *(Response surface methodology - RSM)* je široko korišćena matematička i statistička metoda za modeliranje i analizu procesa u kome na odgovor utiču različite promenljive [2], a cilj ove metode je optimizacija odziva [3]. Parametri koji utiču na proces nazivaju se zavisno promenljive, dok se odgovori nazivaju zavisne varijable [4].

Teorijska istraživanja i paralelna ispitivanja modelovanjem toplotno-mehaničkog ponašanja visokobrzinskih motor-vretena pokazala su da postoji potreba da se eksperimentalnim istraživanjem, uz moguće modifikacije ulaznih veličina, istraže uticaji nekih aproksimacija na realnost rezultata.

Eksperimenti su prirodni deo inženjeringa i naučnog procesa tokom donošenja odluka. Pretpostavimo na primer, da mašinski inženjer istražuje efekat različitih tehnoloških proces za proizvodnju vratila na čvrstoću. Eksperiment bi se sastojao od test uzoraka vratila koristeći svaki predložen tehnološki proces i zatim merenje čvrstoće svakog uzorka. Podaci ovog eksperimenta mogu se koristiti za određivanje koji tehnološki proces treba da se koristi da pruži maksimalnu srednju vrednost čvrstoće [5].

U inženjerskom domenu, tehnike projektovanja zasnovane na statistici i eksperimentima su posebno korisne za poboljšanje performansi postojećeg ili novog procesa. Većina procesa može biti opisana u smislu nekoliko kontrolisanih faktora, kao što su temperatura, pritisak i režimi rezanja. Korišćenjem dizajna eksperimenta, inženjeri mogu odrediti koji podskup faktora ima najveći uticaj na performanse procesa.

Rezultati takvog eksperimenta mogu dovesti do:

- Poboljšanja prinosa procesa.
- Smanjenja varijabilnosti u procesu i bližoj konfornosti nominalnim ili ciljanim zahtevima.

[1)] Miloš Knežev, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka (knezev@uns.ac.rs), prof. dr Aleksandar Živković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (acoz@uns.ac.rs) doc. dr Branko Štrbac, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (strbacb@uns.ac.rs), Miodrag Hadžistević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (miodrags@uns.ac.rs), dr Cvijetin Mlađenović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, (mladja@uns.ac.rs), Dejan Marinković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka (dejan.marinkovic@uns.ac.rs)

[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR451-03-68/2020-14/200156: Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

- Smanjenje vremena razvoja i projektovanja.
- Smanjenje troškova sa stanovišta vremena angažovanosti inženjera.

Ne tako davno, istraživanja toplotno-mehaničkog ponašanja motor (glavnih) vretena uglavnom su se zasnivala na proučavanju uticaja režima obrade na dobijanje što boljeg kvaliteta površine uz niže troškove i smanjeno habanje alata i potrošnju energije. Međutim, jedan od najvažnijih ciljeva istraživanja koja se danas sprovode jeste čistija proizvodnja, odnosno primena „ekološki prihvatljivijih“ tehnologija.

2. METOD OPTIMIZACIJE, MINITAB RSM

2.1 Uvod

Optimizacija odziva se koristi radi identifikacije, kombinacije i podešavanja ulaznih promenljivih koje zajedno optimizuju jedan odziv ili skup odziva. Zajednička optimizacija mora da zadovolji zahteve za sve odzive u skupu, što se meri kompozitnom poželjnošću (*Composite desirability*). Softver *Minitab* omogućava određivanje optimalnog rešenja, na osnovu kojeg se interpretira dijagram, gde optimalno rešenje služi kao polazna tačka. Ovaj dijagram optimizacije omogućava interaktivno podešavanje ulazne promenljive da bi se izvršila analiza osetljivosti i eventualno poboljšalo početno rešenje.

Proces optimizacije u ovom radu uključuje postavljanje podataka dobijenih kao rezultat konverzije iz *Minitab* softvera, na osnovu centralno kompozitnog plana eksperimenta.

Od 1950. godine uvedene su eksperimentalne metode projektovanja u hemijskoj industriji; kasnije, 1980-ih, postali su široko korišćeni u oblastima CAD-a, kompjuterski potpomognutog projektovanja, modeliranja i primene u mašinskoj industriji [6]. U oblasti inženjerstva, studije dizajna eksperimenta su izveli Morison, 1957. godine, Zelen, 1959. godine i Hicelberger, 1967. godine [7]. U smislu predloženog cilja, postoje tri metode projektovanja: metoda uporednog cilja, metoda skrining objektiva i metoda odzivne površine [8]. Od tri navedene, u nastavku će biti reči samo o metodi odzivne površine.

2.2 Metoda odzivne površine

Metoda odzivne površine, omogućava procenu interakcije i kvadratnih efekata, dajući sliku očekivanog oblika odgovora. Ovaj metod se koristi u situacijama kao što su opisano u [8]:

- identifikovanje osetljivih tačaka unutar procesa;
- racionalizacija i optimizacija procesa;
- postizanje robusnih procesa, na koje ne utiču spoljni faktori.

Jedan tip eksperimenta koji koristi ovu metodu za više od 2-4 faktora je *Box-Wilson Central Composite Design.* Ovaj eksperiment pomaže u postizanju dizajna koristeći frakcionu ili punu faktorijalnu kombinaciju sa žarišnim tačkama, koji se upotpunjuju grupom koja se zove "zvezdane tačke" koje omogućavaju procenu luka, zakrivljenosti [8].

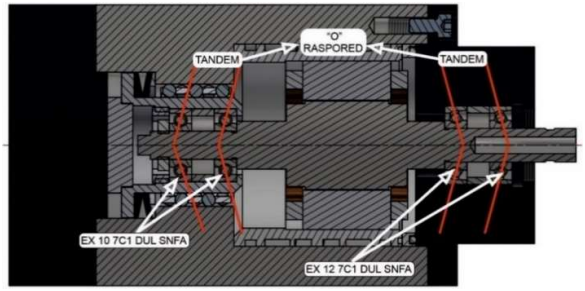
2.3 Realizacija eksperimenta

Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena da bi se ispitalo toplotno-mehaničko ponašanje visokobrzinskog motor-vretena. Tehnologija obrade visokobrzinskim motor-vretenima zahteva nekoliko pratećih sistema. Pravilno testiranje se može obaviti samo sa namenskim postrojenjima. Da bi eksperimenti uspešno bili realizovani, potrebno je blagovremeno planiranje eksperimenata. Tako da su deo izrade ovog rada bili projektovanje i izrada specijalnog eksperimentalnog štanda, sa svim neophodnim dodatnim sistemima i uređajima za pomenuto ispitivanje motor-vretena. Eksperimentalni štand je projektovan kao modularni sistem, stoga se može koristiti za eksperimente na različitim motor-vretenima. Konkretno, projektovani eksperimentalni štand je predviđen za ispitivanje toplotnog i mehaničkog ponašanja.

Eksperimentalni štand je smešten u okviru Laboratorije za mašine alatke, dimenzije poda prostorije 5x6 [m], a visina plafona 4 [m]. Prostorija je opremljena sledećim instalacijama: dovod vazduha pod pritiskom od 8 [bar], električne instalacije 230 - 400 [V], dovod vode temperature 18 [°C], protoka 2 [l/min], dok je temperatura okoline kontrolisana i varira ±1[°C].

Ispitivanja su vršena na visokobrzinskom motor-vretenu GMN TSSV 100-90000 sa maksimalnim brojem

obrtaja n=90000 [o/min], snage P=3 [kW], 2-polni AC induktivni elektro motor, maksimalno U=220 [V] po fazi na maksimalnoj frekvenciji, srednji prečnik prednjeg ležaja 20 [mm]. Hlađenje i podmazivanje ulje-vazduh (pritisak dovoda vazduha 0.5 [bar]) se vrši, ubrizgavanje ulja Ql=187,2 – 283,6 [ml/min] za sve ležaje istovremeno. Kroz žleb oko statora protiče ulje ili voda sa protokom čiji opseg iznosi Qk=4 - 6 [l/min]. Motor-vreteno je uležišteno sa dva para visoko preciznih ležaja sa kosim dodirom, prednje uležištenje sa EX 12 7C1 DUL SNFA dok je zadnje sa EX 10 7C1 DUL SNFA, montiranih u „tandem“ po rasporedu, tako da celokupno uležištenje čini „O“ raspored (Slika 1). Ugao kontakta kod oba ležaja je 15 [°].



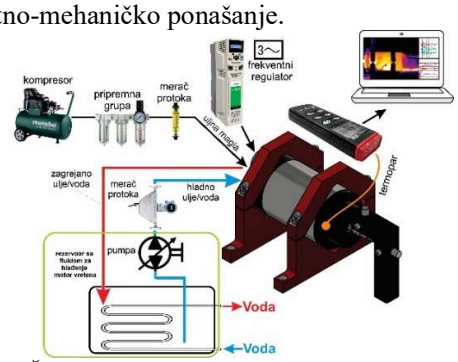
Slika 1. *Poprečni presek motor-vretena GMN TSSV 100-90000*

Statistički softver Minitab 17 je primenjen za postavku i analizu eksperimentalnih rezultata. Korišćen je delimično randomiziran centralno kompozitni plan. Randomiziranjem eksperimenta, opservacije (ili greške) su nezavisno raspoređene slučajne promenjive, a neki uticaj nepoželjnih faktora je sveden na minimum [9]. Delimično randomiziran je iz razloga što kategorički faktor (vrsta hlađenja) nije mogao da se randomizira, tako da je posebno odrađen randomiziran eksperiment za „ ulje“ a posebno za „vodu“. Ovako definisan eksperiment je podeljen u dva bloka. Uloga blokova je da smanje ili eliminišu varijabilnost uzrokovanu faktorima smetnji koji mogu uticati na odgovor, ali ne utiču direktno, kao faktor dizajna. Tokom eksperimenta je korišćena ista oprema sa istim rukovaocem; merenje odziva je sprovela ista osoba, a primenjena je isto motor-vreteno tako da nije bilo potrebe za daljim blokiranjem. U tabeli 1 su prikazani razmatrani faktori i njima pripadajući nivoi.

Tabela 1. *Prikazani razmatrani faktori i njima pripadajući nivoi.*

Naziv	Faktor	Jedinica	Nizak nivo	Srednji nivo	Visok nivo
			-1	0	+1
Broj obrtaja	n		4000	55000	70000
Protok ulja za hlađenje kućišta	Q_k	o/min	4	5	6
Protok ulja za hlađenje ležaja	Q_l	l/min	187,2	235,2	283,6
Hlađenje/podmazivanje	H	ml/h	Ulje		Voda

Plan eksperimenta sa izlaznim rezultatima prikazan je u tabeli 2. Za ovaj eksperiment je napravljeno šest ponavljanja središnjoj u tački, za svaki nivo kategoričkog faktora, odnosno, dve replike za svaki nivo kategoričkog faktora u svakom bloku. Za centralnu tačku u projektu se primenjuju standardni uslovi rada. U koloni T_l prikazani su rezultati izmerenih temperatura (odziva) za sprovedene eksperimente za jednu izmerenu vrednost. Na slici 2 je prikazana postavka eksperimenta za merenje temperature, gde se takođe vidi pozicija merenja temperature pomoću termopara. Odabrana pozicija na motor vretenu, je zona prednjeg uležištenja, koja ujedno najviše utiče na toplotno-mehaničko ponašanje.



Slika 2 *Šematski prikaz pozicije merenja temerature*

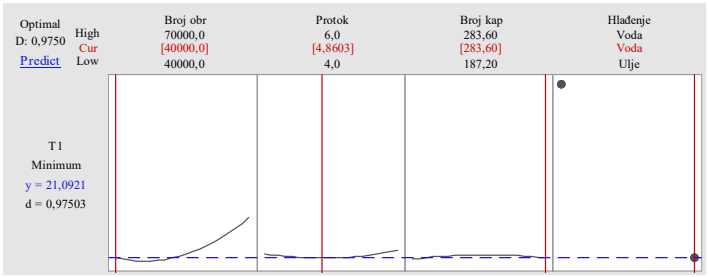
Tabela 2 *Plan eksperimenta sa izlaznim rezultatima*

Randomiziran red	*Red. br.*	*Blok*	*n [o/min]*	Q_k *[l/min]*	Q_l *[ml/h]*	*H*	T_l *[°C]*
28	*1*	*2*	*55000*	*6*	*235,2*	*Ulje*	*31.3*
27	*2*	*2*	*55000*	*4*	*235,2*	*Ulje*	*30.9*
34	*3*	*2*	*70000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*23.5*
31	*4*	*2*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
39	*5*	*2*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
37	*6*	*2*	*55000*	*5*	*187,2*	*Voda*	*21.7*
26	*7*	*2*	*70000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*34.5*
40	*8*	*2*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
25	*9*	*2*	*40000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*29.8*
35	*10*	*2*	*55000*	*4*	*235,2*	*Voda*	*22.0*
32	*11*	*2*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
38	*12*	*2*	*55000*	*5*	*283,6*	*Voda*	*21.2*
33	*13*	*2*	*40000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*20.7*
36	*14*	*2*	*55000*	*6*	*235,2*	*Voda*	*21.9*
30	*15*	*2*	*55000*	*5*	*283,6*	*Ulje*	*31.9*
29	*16*	*2*	*55000*	*5*	*187,2*	*Ulje*	*29.4*
3	*17*	*1*	*40000*	*6*	*187,2*	*Ulje*	*28.3*
16	*18*	*1*	*70000*	*6*	*187,2*	*Voda*	*25.8*
15	*19*	*1*	*40000*	*6*	*187,2*	*Voda*	*22.2*
19	*20*	*1*	*40000*	*6*	*283,6*	*Voda*	*21.8*
5	*21*	*1*	*40000*	*4*	*283,6*	*Ulje*	*30.3*
17	*22*	*1*	*40000*	*4*	*283,6*	*Voda*	*21.4*
4	*23*	*1*	*70000*	*6*	*187,2*	*Ulje*	*36.4*
8	*24*	*1*	*70000*	*6*	*283,6*	*Ulje*	*35.8*
20	*25*	*1*	*70000*	*6*	*283,6*	*Voda*	*24.1*
10	*26*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
13	*27*	*1*	*40000*	*4*	*187,2*	*Voda*	*21.3*
1	*28*	*1*	*40000*	*4*	*187,2*	*Ulje*	*29.3*
6	*29*	*1*	*70000*	*4*	*283,6*	*Ulje*	*35.8*
24	*30*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
23	*31*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
12	*32*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
11	*33*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
22	*34*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
9	*35*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Ulje*	*31.9*
7	*36*	*1*	*40000*	*6*	*283,6*	*Ulje*	*29.6*
18	*37*	*1*	*70000*	*4*	*283,6*	*Voda*	*23.5*
2	*38*	*1*	*70000*	*4*	*187,2*	*Ulje*	*36.2*
21	*39*	*1*	*55000*	*5*	*235,2*	*Voda*	*21.8*
14	*40*	*1*	*70000*	*4*	*187,2*	*Voda*	*24.2*

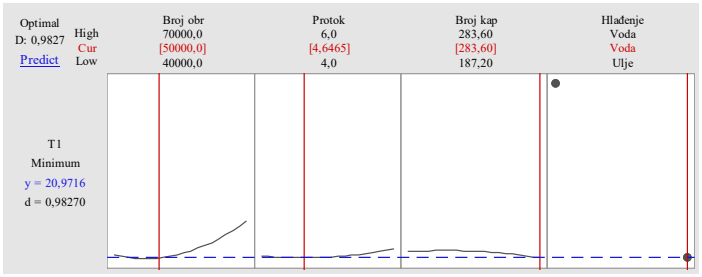
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Tokom eksperimenta maksimalna temperatura je iznosila T_{1max}=38,1 [°C], a minimalna T_{1min}=21,2 [°C]. Optimizacija će biti sprovedena tako da funkcija cilja odnosno temperatura T_1 ima minimalnu moguću vrednost, pri različitim brojevima obrtaja. Vrednosti brojeva obrtaja za koje je izvršena optimizacija je 40000, 50000, 60000 i 70000 [o/min]. Što se tiče ostalih faktora, protok ulja za hlađenje ležaja zadržava konstantnu maksimalnu vrednost Q_l=283,6 [ml/min], sredstvo za hlađenje kućišta je voda, dok su za protok ulja za hlađenje kućišta definisane granice od Q_k=4 do 6 [l/min].

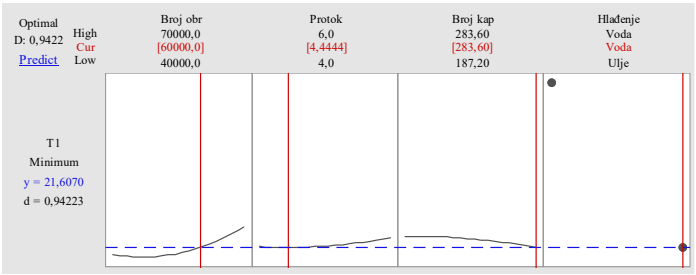
Prvi slučaj tj. za minimalni broj obrtaja n=40000 [o/min] dobijena minimalna temperatura T_{1min}=21,09 [°C], a optimalna vrednost protoka za hlađenje kućišta je Q_k=4,8603 [l/min], (Slika 3). U drugom slučaju tj. za n=50000 [o/min], minimalna temperatura T_{1min}=20,97 [°C], optimalna vrednost protoka za hlađenje kućišta je Q_k=4,6465 [l/min], (Slika 4). Kada je reč o broju obrtaja n=60000 [o/min], tada je T_{1min}=21,60 [°C], a Q_k=4,4444 [l/min], (Slika 5). Pri maksimalnom broju obrtaja od n=70000 [o/min], T_{1min}=22,99 [°C], a Q_k=4,2251 [l/min], (Slika 6). Rezultati pokazuju da se sa povećanjem broja obrtaja, smanjuje potrebna količina protoka rashladnog fluida za hlađenje kućišta. Stoga se za buduća istraživanja planira drugi opseg vrednosti protoka.



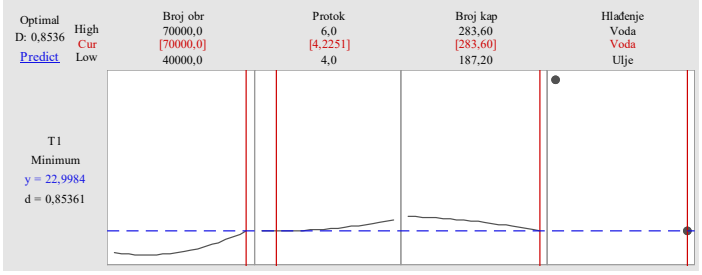
Slika 3. Optimizacija parametara, funkcija cilja T_{1min}, n=40000 [o/min]



Slika 4. Optimizacija parametara, funkcija cilja $T1_{min}$, n=50000 [o/min]



Slika 5. Optimizacija parametara, funkcija cilja T_{1min}, n=60000 [o/min]



Slika 6. Optimizacija parametara, funkcija cilja T_{1min}, n=70000 [o/min]

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirana zavisnost između ulaznih parametara neophodnih za eksploataciju motor-vretena i izlaznih parametara (odziva) korišćenjem centralno kompozitnog plana eksperimenta. Nakon čega je urađena optimizacija, sa ciljem pronalaženja optimalne vrednosti protoka za hlađenje statora, iz definisanog opsega. Na kaju se može doneti zaključak, da se za razmatrane brojeve obrtaja u opsegu od 40000 [o/min] do 70000 [o/min] optimalne vrednosti protoka kreću od oko 4,5 [l/min]. U tim uslovima će temperatura na prednjem uležištenju biti održavana priblizno konstatnom tokom ekspalatacionih uslova.

6. LITERATURA

[1] A. Zivkovic, M. Zeljkovic, C. Mladjenovic, S. Tabakovic, Z. Milojevic, and M. Hadzistevic, "A study of thermal behavior of the machine tool spindle," *Therm. Sci.*, vol. 23, no. 3 Part B, pp. 2117–2130, 2019, doi: 10.2298/TSCI180129118Z.

[2] M. N. Braimah, A. N. Anozie, and O. J. Odejobi, "Utilization of Response Surface Methodology (RSM) in the Optimization of Crude Oil Refinery Process, New Port-Harcourt Refinery, Nigeria," *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 2458–9403, 2016, [Online]. Available: www.jmest.org.

[3] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. Second edition. New York : Wiley, [1984] ©1984.

[4] B. Koç and F. Kaymak Ertekin, "Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları," *Gıda Teknol. Derneği*, vol. 35, no. 1, pp. 63–70, 2010.

[5] B. Štrbac, B. Ačko, S. Havrlišan, I. Matin, B. Savković, and M. Hadžistević, "Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments," *Measurement*, vol. 158, p. 107692, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107692.

[6] L. Hedges, *Basic experimental design*. Northwestern University, 2008.

[7] S. Bisgaard, "The early years of designed experiments in industry: Case study references and some historical anecdotes," 1991.

[8] T. Leuca, M. Novac, B. Stanciu, A. Burcă, and M. Codrean, "Using Minitab-Box Benken Software to Optimize the Induction Heating Process," *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 73–76, 2014.

[9] C. Jin, B. Wu, and Y. Hu, "Heat generation modeling of ball bearing based on internal load distribution," *Tribol. Int.*, vol. 45, no. 1, pp. 8–15, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.triboint.2011.08.019.

Knežev, M., Živković, A. Štrbac, B., Hadžistević, M., Mlađenović, C., Marinković, D.

COOLANT FLOW QUANTITY OPTIMIZATION FOR COOLING THE MOTOR-SPINDLE HOUSING

Abstract: *This paper presents the procedure for finding the optimal dependency based on the central composite design, between the input parameters, i.e. factors (number of revolutions, flow rate, number of drops and type of cooling) and output parameters (temperatures in characteristic places). Centrally composite design, has the possibility of parameter optimization. where the objective function can be minimum, maximum or a specific value. In the following, the optimization procedure for temperature T1, which refers to the motor-spindle front bearing zone, will be presented.*

Key words: *motor-spindle, optimization, central composite design, response surface method*

43. JUPITER konferencija
39. simpozijum
Beograd 2022
NU * ROBOTI * FTS

Milan Milutinović[1)], Saša Živanović [2)], Goran Vasilić [1)], Branko Kokotović [2)], Nikola Slavković [2)], Zoran Dimić [3)]

STRATEGIJA 3+2 OSNE OBRADE NA NOVOJ BRUSILICI ZA IZRADU PROFILNIH KOTURASTIH GLODALA

Rezime

Rezni alati predstavljaju važan segment u finalnoj obradi drveta. Rezni alati svojom složenom geometrijom omogućuju da se, u jednom prolazu, naprave složene površine na izratku koje su ranijih godina mogle da se kreiraju u više prolaza, korišćenjem manje složenih alata, uz obavezno prisustvo vrlo iskusnih operatera na mašinama. Izrada profilnih koturastih glodala pored konvencionalnih mašina alatki zahteva i petoosnu CNC brusilicu koja profiliše sečivo alata koje je složenog oblika. U ovom radu posebna pažnja posvećena je strategiji 3+2 osne obrade na novoj CNC brusilici uzimajući u obzir činjenicu da je na istoj napravljen veliki broj profilnih koturastih glodala čime je potvrđena industrijska primena nove CNC brusilice i uspostavljene tehnologije.

Ključne reči: CNC 3+2 osna brusilica, koturasta glodala, profil sečiva

1. UVOD

Izrada profilnih koturastih glodala pored konvencionalnih mašina alatki (univerzalnog struga, glodalice, brusilice...) zahteva i petoosnu CNC brusilicu koja profiliše sečivo alata koje je složenog oblika. U pitanju je mašina alatka sa vrlo složenom kinematikom i sa visokom cenom koštanja [1].

Na osnovu analizirane kinematike brušenja na standardnim petoosnim CNC brusilicama (proizvodjača Schneeberger-Sirius sa konfiguracijom *A'OXYZC*) [2] i [3] a na osnovu predhodno razvijene i verifikovane tehnologija 3+2 osnog brušenja na klasičnom horizontalnom obradnom centru napravljena je nova CNC bruslilica za 3+2 osnu obradu profilnih koturastih i vretenastih glodala,[2].

U ovom radu posebna pažnja posvećena je strategiji 3+2 osne obrade na novoj CNC brusilici uzimajući u obzir činjenicu da je na istoj napravljen veliki broj profilnih koturastih glodala [2] čime je potvrđena industrijska primena nove CNC brusilice i uspostavljene tehnologije.

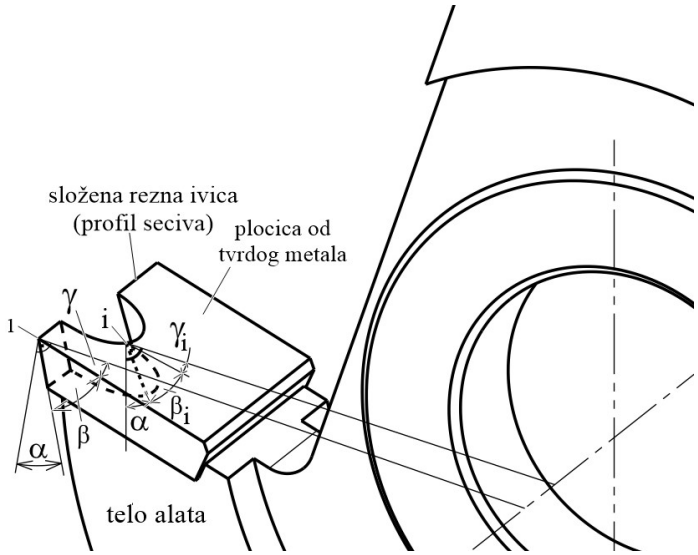
Program koji se piše za operaciju 3+2 osnog brušenja ima standardnu sintaksu kao i bilo koji program (G-kod) s tim da u programu isključivo figuriše linearna prostorna interpolacija. To znači da se svaki složeni profil praktično diskretizuje sa pravolinijskim segmentima.

2. GEOMETRIJA PROFILNIH KOTURASTIH GLODALA

Rezni alati predstavljaju važan segment u finalnoj obradi drveta. Rezni alati svojom složenom geometrijom omogućuju da se, u jednom prolazu, naprave složene površine na izratku koje su ranijih godina mogle da se kreiraju u više prolaza, korišćenjem manje složenih alata, uz obavezno prisustvo vrlo iskusnih operatera na mašinama [3],[4].

[1)] dr Milan Milutinović, Akademija Tehničkih Strukovnih Studija Beograd, mmilutinovic@atssb.edu.rs
[2)] dr Saša Živanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, szivanovic@mas.bg.ac.rs
[1)] Goran Vasilić, dipl.maš.inž, Akademija Tehničkih Strukovnih Studija Beograd, gvasilic@atssb.edu.rs
[2)] dr Branko Kokotović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, bkokotovic@mas.bg.ac.rs
[2)] dr Nikola Slavković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, nslavkovic@mas.bg.ac.rs
[3)] dr Zoran Dimić, LOLA institut, zoran.dimic@li.rs

Složeni profili koje glodala treba da ostvare uz postizanje željene tačnosti, kvaliteta obrade i produktivnosti podrazumevaju i složenu reznu geometriju (promenljiv grudni ugao γ u svakoj tački profila glodala, konstantan leđni ugao α, postojanje grudno aksijalnog ugla γ_a i podbrušenja. Na slici 1 prikazana je geometrija profilnih koturastih glodala.

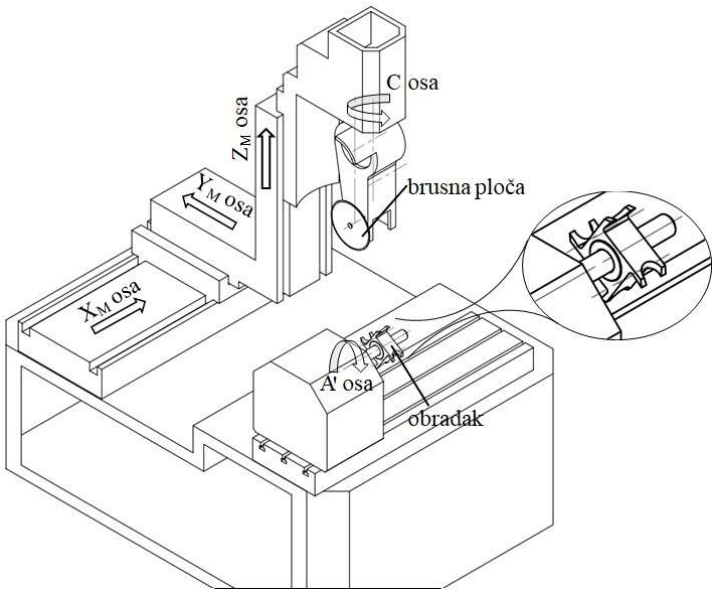


Slika 1. *Geometrija profilnog koturastog glodala*

Nominalne preporučene vrednosti grudnog ugla γ, leđnog ugla α u tački jedan profila sečiva za obradu drveta su: $\gamma = 22^{\circ}, \alpha = 15^{\circ}$. Sa slike 1 može se videti da se u tački i profila vrednost grudnog ugla γ_i povećala (zbog promene dubine profila sečiva glodala) samim tim se vrednost ugla klina β_i smanjila dok je leđni ugao α_i ostao konstantan. Na ovaj način se dobija idealno glatka leđna površina alata, [5].

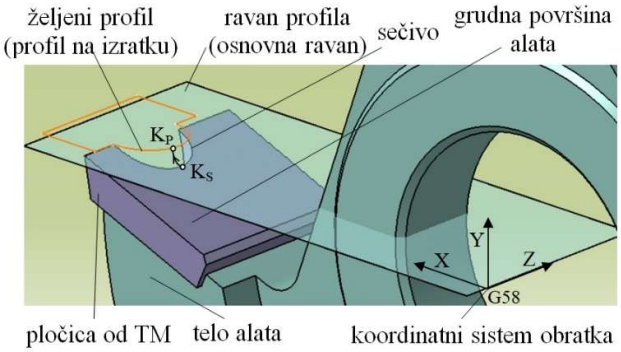
3. METOD FORMIRANJA OBRAĐENE POVRŠINE

Složena rezna ivica profilnog koturastog glodala-profila dobija se brušenjem. Uobičajena industrijska mašina alatka koja je namenjena za ovu operaciju je petoosna CNC brusilica, strukture *A'OXYZC* , čija je konfiguracija prikazana na silci 2.



Slika 2*. Petoosna CNC bruslica, Schneeberger-Sirius, konfiguracija A'OXYZC*

Profilno koturasto glodalo obrtanjem oko svoje ose forimira konačan profil u tzv. ravni profila koja za glodalo predstavlja osnovnu ravan, slika 3.

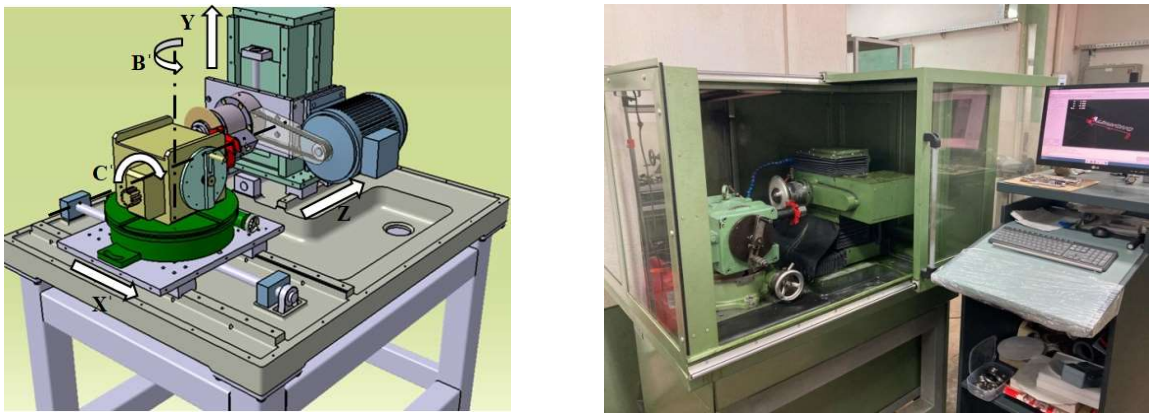


Slika 3. *Način formiranja zeljenog proila na izratku*

Tačka sečiva Ks, koja se nalazi u ravni grudne površine, obrtanjem glodala oko svoje ose prolazi kroz odgovarajuću tačku profila Kp u ravni profila. Suština pristupa izrade profilnih glodala na petoosnoj brusilici je da kinematika rezanja (metod formiranja površine) profilnim koturastim glodalom bude i osnova za kinematiku brušenja. Naime, s obzirom da tačke sečiva Ksi, koje se nalaze u ravni grudne površine, pri rotaciji glodala moraju da prođu kroz tačke profila Kpi u osnovnoj ravni to je logično da se i tačke kontakta brusne ploče i tačke sečiva koje se formiraju ostvaruju u osnovnoj ravni rotacijom glodala (zuba) – radnog predmeta. Ovo znači da se sečivo na neki način rotacijom glodala stalno "podvlači" ispod brusne ploče. Izrada složene rezne ivice-profila izvodi se pomoću dijamantske brusne ploče sa metalnom vezom.

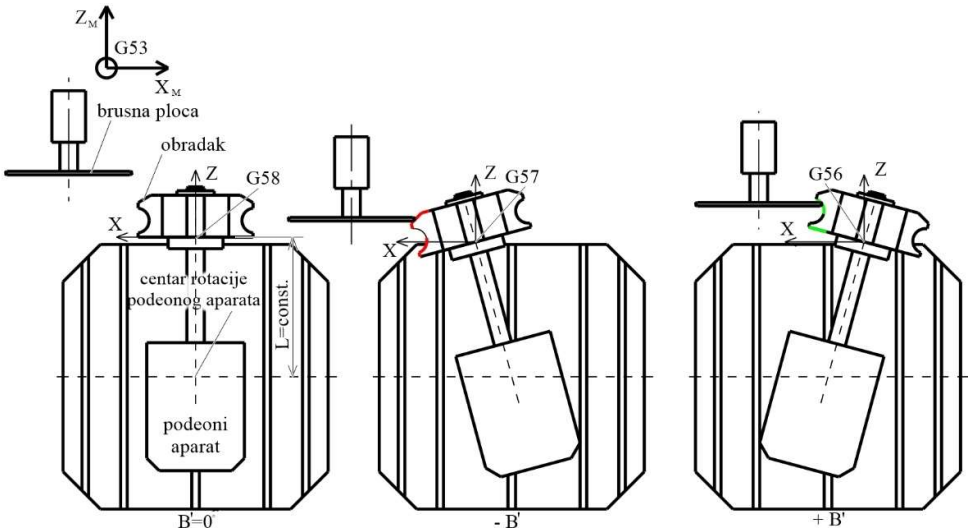
4. NOVA CNC BRUSILICA ZA 3+2 OSNO BRUŠENJE

Uzimajući u obzir da je verifikovan nov koncept 3+2 osnog brušenja na horizontalnom obradnom centru i da je napravljeno profilno koturasto glodalo [1], nedostatke prilikom upotrebe obradnog centra za operaciju 3+2 osnog brušenja, kao i male vrednosti otpora rezanja razvijen je koncept nove CNC brusilice – PROFILATOR 100 čiji su model i prototip prikazani na slici 4 [2].



Slika 4. Model i prototip nove CNC brusilice za 3+2 osno brušenje Profilator 100

U pitanju je brusilica koja ima 3 CNC traslatorne ose *X'YZ* i dodatne dve pozicione ose koje se pogone ručno B'C'. Osa *X'* postavljena je asimetrično u osnosu na osu glavnog vretena. Više je postavljena u desnu stranu gledano od obratka ka stubu mašine tako da se mogu obradjivati alati velikog prečnika i do 300 mm. Ose pozicioniranja B'C' služe za pozicioniranje obratka (koturastog glodala) pre početka zahvata brušenja. Osa B' obezbedjuje rotaciju obratka oko Y ose zato što su vrlo često u pitanju složene konfiguracije profila koturastog glodala koje zahtevaju da se obezbedi podbrušenje u svim tačkama profila sečiva pa je neophodno da se obradak zakrene za ugao ±B' što je jedan od nezaobilaznih faktora pri strategiji obrade, slika 5.

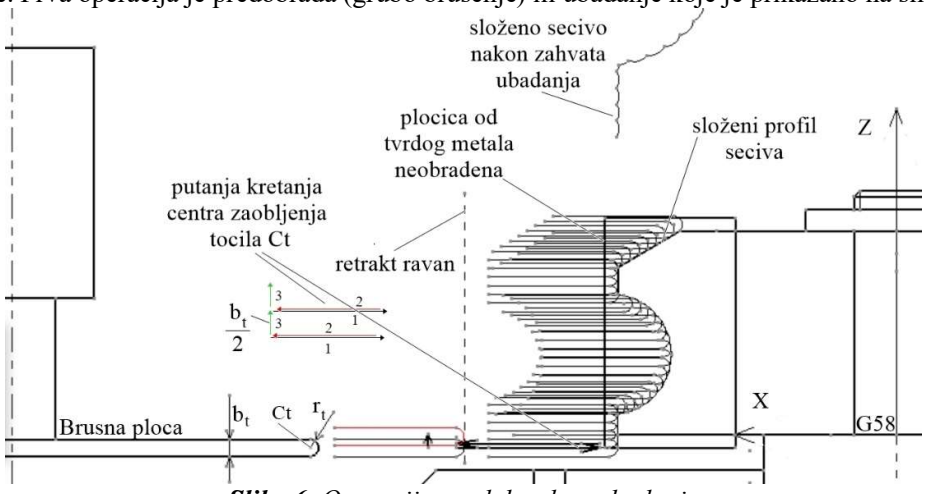


***Slika 5**. Završna obrada složenog profila koturastog glodala i obezbeđivanje podbrušenja u svakoj tački profila sečiva rotacijom obratka za ugao ±B'*

Sa slike 5 vidi se da se obrada brušenjem može vršiti u tri pozicije. U nekim slučajevima nije neophodno da se zakreće podeoni aparat i obrada se može vršiti u pozicicji B'=0° . U većini slučajeva, zbog konfiguracije profila sečiva, obrada se mora vršiti u polozicijama ±B' kako bi brusna ploča mogla da priđe svakoj tački profila i obezbedi podbrušenje i konstantan leđni ugao tako da se nakon obrade dobija gladak profil po celoj leđnoj površini bez ikakvih stepenastih prelaza u tačkama gde se sustiču segmenti profilnog sečiva. Važno je napomenuti da se rotacijom obratka za ugao ±B' ne menja orijentacija koordinatnog sistema obratka i da je neophodno izvršiti rotaciju koordinata tačaka porofila sečiva za ugao ±B' u koordinatnim sistemima obratka G56 i G57. Za odredjivanje koordinata nultih tačaka obratka neopodno je vrlo precizno odrediti rastojanje od centra rotacije podeonog aparata odnosno obrtnog stola do početka profila glodala, mera L koja je konstantna. Osa C' kao poziciona osa obezbeđuje da se nakon finog brušenja odnosno izrade jednog zuba rotacijom oko Z ose dovede u poziciju za obradu naredni zub. Pozicione ose B'C' predstavljaju respektivno jedan okretni sto na koga je montiran klasičan podeoni aparat sa diferencijalnim deljenjem. Podeoni aparat koji obezbeđuje osu C' na sebi ima brušen i nitriran trn na koga se bazira I steže predmet obrade u ovom slučaju koturasto glodalo.

4.1 Operacije brušenja na novoj CNC brusilici

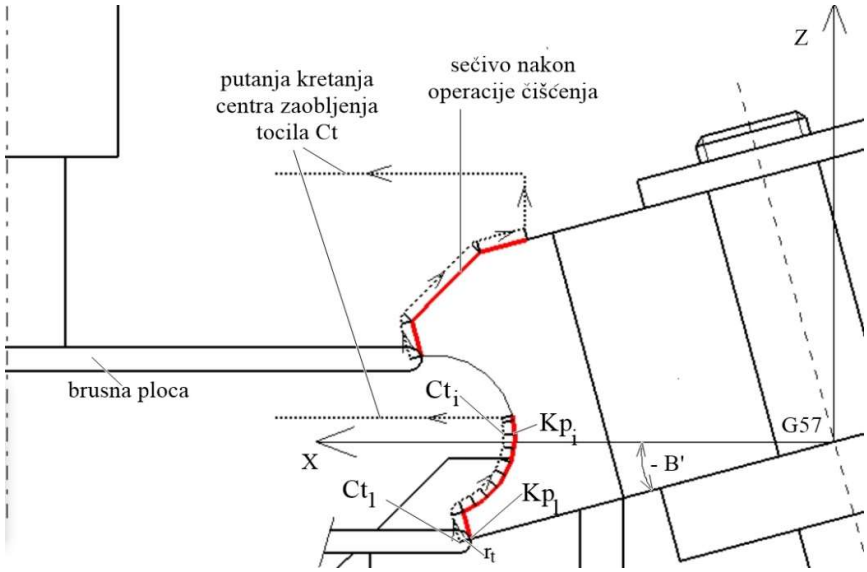
Složeno sečivo na koturastom glodalu na novoj CNC brusilici za 3+2 osno brušenje može se realizovati u dve operacije. Prva operacija je predobrada (grubo brušenje) ili ubadanje koje je prikazano na slici 6.



***Slika 6**. Operacija predobrade – ubadanje*

Operacija ubadanja počinje prilazom centra tocila Ct od retakt ravni do prve tačke prfila sečiva duž X' ose zatim odmicanje tocila do sigurnosne (retract) ravni (takođe duž X' ose) zatim se centar tocila pomera duž Z

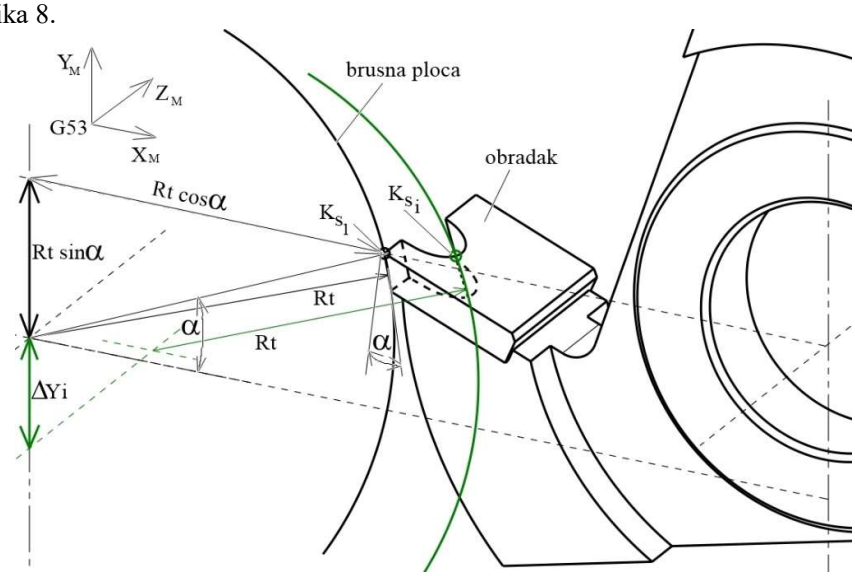
ose za polovinu širine tocila bt/2 i dalje se obrada nastavlja sukcesivno za svaku disretizovanu tačku profila sečiva. Nakon završetka operacija ubadanja dobija se 'kreslasta' leđna površina kao što je prikazano na slici 7. Naredna operacija treba da obezbedi završnu obradu - čišćenje koja uklanja 'kresle' iz prethodne operacije ubadanja, slika 7.



***Slika 7**. Operacija završne obrade – čišćenje profila*

Napominje se da se program za operacije ubadanja i čišćenja (G-kod) piše za koordinate centra tačaka tocila C_{ti} koristeći isključivo linarnu prostornu interpolaciju što znači da je svaki složen profil koturastog glodala diskretizovan pravolinijskim segmentima.

Kao što je već rečeno i pokazano na slici 8 u svakoj tački profila sečiva K_{si} postoji konstantan leđni ugao α_i. Kako se tačka 1 profila sečiva K_{s1} nalazi u osnovnoj ravni (ili ravni kreiranja profila) ujedno se i poklapa sa tačkom K_{p1} u njoj se obezbeđuje leđni ugao na taj način tako što tocilo ide naniže duž Y_M ose za vrednost $Y_{ct1}= R_t \sin\alpha$, slika 8.



***Slika 8**. Način obezbeđivanja konstantnog leđnog ugla u svakoj tački sečiva koturastog glodala*

U tački sečiva K_{si} vrednost grudnog ugla je veća nego u tački K_{s1} pa se zbog održavanja konstantnog leđnog ugla α u toj tački tocilo mora spustiti po Y_M osi za $Y_{cti}= R_t \sin\alpha+\Delta Y_i$. Koordinata centara tocila Y_{cti}, u opštem slučaju za tačku koja ne pripada osnovnoj ravni, određuje se iz uslova rotacije A' ose na petoosnoj CNC brusilici. Postavljena strategija 3+2 osne obrade na novoj brusilici Profilator 100 verifikovana je uspešnom izradom nekoliko glodala u realnom materijalu (pločice od tvrdog metala), slika 9.

Slika 9. *Primeri napravljenih koturastih profilnih glodala na novoj 3+2 osnoj CNC brusilici Profilator 100*

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu objašnjena je strategija 3+2 osne obrade na novoj bruslici za izradu profilnih koturastih glodala koja je verifikovana izradom većeg broja profilnih glodala u realnom materijalu. Uspostavljena strategija obrade na novoj CNC 3+2 osonoj brusilici pokazala se da u potpunosti odgovara industrijskoj proizvodnji profilnih koturastih glodala poput CNC 5 osnih brusilica renomiranih svetskih proizvođača kao što su Schneeberger i Volmer.

6. LITERATURA

[1] Milutinović, M., Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N.: *Tehnologija izrade profilnih koturastih glodala 3+2 osnim brušewem na horizontalnom obradnom centru*, Tehnika-Mašinstvo 72 , pp. 321-327, 2022 (3), DOI: 10.5937/tehnika2203321M

[2] Milutinović, M., Dimić, Z., Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N.: *Development of a new CNC grinding machine for 3+2-axis grinding of the profile rotary milling cutter*, Scientific Technical Review, 2022, (potvrda o prihvaćenom radu br 07/50-64)

[3] Pjević, M., Mladenović, G., Puzović, R., Tanović, Lj.: Primena CAD/CAM sistema u projektovanju i izradi profilnih kružnih strugarskih noževa, *39.Jupiter konferencija,* Zbornik radova, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, str.2.31-2.36., 2014.

[4] Milutinović, M., Tanović, Lj.: *Metodologija projektovanja prizmatičnih profilnih noževa*, *36. JUPITER konferencija*, Zbornik radova, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, str. 2.51-2.57, 2010.

[5] Rabah, M., A Practical and Optimal Approach to CNC Programmingfor Five-Axis Grinding of the End-Mill Flutes, Doctoral thesis, Concordia University, Montreal Canada, 2011.

Milan Milutinović, Saša Živanović, Goran Vasilić, Branko Kokotović, Nikola Slavković, Zoran Dimić

3+2 AXIS MACHINING STRATEGY ON THE NEW GRINDING MACHINE FOR MANUFACTURING PROFILE MILLING CUTTERS

Abstract: *Cutting tools represent an important segment in the final processing of wood. Cutting tools, with their complex geometry, make it possible to create, in one pass, complex surfaces on the workpiece that in earlier years could be created in several passes, using less complex tools, with the mandatory presence of very experienced machine operators. The production of profile milling cutters, in addition to conventional machine tools, also requires a five-axis CNC grinder that profiles the tool blade, which has a complex shape.*
In this work, special attention is paid to the strategy of 3+2 axis machining on the new CNC grinder, taking into account the fact that a large number of profile milling cutters were made on it, which confirmed the industrial application of the new CNC grinder and the established technology.

Key words: *CNC 3+2 axis grinder, rotary milling cutters, profile blade*

Baralić, J., [1] **Nedić, B.**

SPECIFIČNA ENERGIJA OBRADE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM [2]

Rezime

Obrada abrazivnim vodenim mlazom je veoma složen proces obrade i ima mnogo parametara za ocenu efikasnosti ovog procesa. Specifična energija, definisana kao energija koja je potrebna za uklanjanje jedne jedinice zapremine materijala koji se obrađuje je jedan od tih parametara. Kod obrade abrazivnim vodenim mlazom se ne može naći puno podataka o vrednostima, kao ni o načinu proračuna specifične energije. U ovom radu je prikazan postupak proračuna specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom. Na osnovu prikazanog modela, izvršen je proračun specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom za konkretan primer obrade X5CrNi18-10. Dobijene vrednosti specifične energije rezanja za ovaj čelik su veće nego pri obradi aluminijuma abrazivnim vodenim mlazom. Takođe, vrednosti su veće nego pri obradi sličnih materijala brušenjem. Rad veličine proračunate specifične energije rezanja je isti kao kod pomenutih primera.

Ključne reči: specifična energija, obrada abrazivnim vodenim mlazom

1. UVOD

Specifična energija nekog procesa obrade je jedan od najvažnijih parametara koji opisuju taj process. Najčešće se definiše kao odnos između utrošene energije koja se koristi u operaciji obrade i zapremine uklonjenog materijala. Na specifičnu energiju utiče vrsta obrade koja se primenjuje, brzina rezanja, dubina rezanja i dr. Specifična energija rezanja se obično koristi za proračun energetske efikasnosti u procesu obrade [1]. Pregledom literature, uočeno je da postoji veoma malo radova koji se bave energijom ili specifičnom energijom abrazivnog vodenog mlaza.

Osnovni mehanizam obrade kod obrade abrazivnim vodenim mlazom je erozija materijala abrazivnim česticama. Ovo je i mehanizam obrade kod brušenja, pa je očekivano da vrednosti specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom budu slične kao vrednosti specifične energije brušenja. Vrednosti specifične energije brušenja su znatno više u poređenju sa drugim postupcima obrade. Pretpostavka je da će specifična energija obrade abrazivnim vodenim mlazom imati veće vrednosti nego kod obrade brušenjem (zbog specifičnosti postupka obrade).

Paul i dr. [2] i Hoogstrate i dr. [3] su analizirali energiju abrazivnog vodenog mlaza. Paul i dr. [2] su utvrdili matematičke modele za energiju udara jedne abrazivne čestice (nesferične sa oštrim reznim ivicama) pod bilo kojim uglom udara. Ovaj matematički model važi samo za obradu krtih materijala. Hoogstrate i dr. [3] su utvrdili da postoji optimalan protok abraziva, iznad kojeg je prenos energije sa vodenog mlaza na abrazine čestice. Janković i dr. [4] su u svom istraživanju vršili eksperimentalno ispitivanje obrade Al legure abrazivnim vodenim mlazom. Na osnovu eksperimenata, razvili su matematički model za procenu specifične energije sečenja u funkciji različitih parametara procesa.

2. OBRADA ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

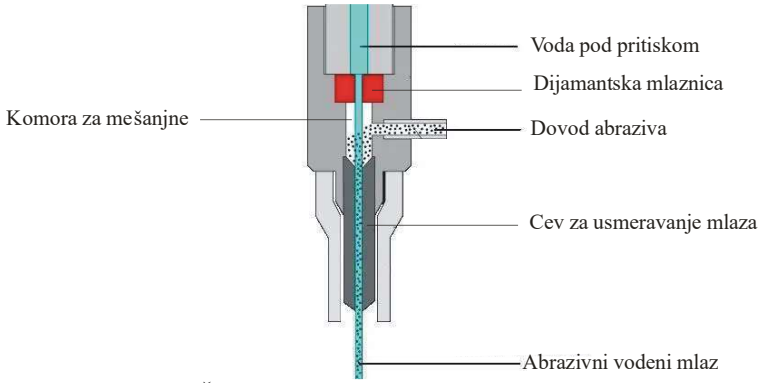
Obrada abrazivnim vodenim mlazom je nekonvencionalni postupak obrade koji se sve više koristi. Primena ovog postupka obrade je dosta široka i može se koristiti za obradu gotovo svih materijala. Prednosti obrade

[1] dr Jelena Baralić, Univerzitet u Krtagujevcu, Fakultet tehničkih nauka, (jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs), prof. dr Bogdan Nedić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, nedic@kg.ac.rs)

[2] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu 451-03-68/2022-14/200132, koji finansijski podržava MPNTR

abrazivnim vodenim mlazom još više dolaze do izražaja kada je u pitanju sečenje tankih pločastih materijala i folija složenih 2D kontura.

Na slici 1. je šematski prikazana obrada abrazivnim vodenim mlazom. Pumpa visokog pritiska (multiplikator) obezbeđuje potreban pritisak vode. Voda pod pritiskom se dalje usmerava na dijamantsku mlaznicu prečnika do (slika 1). U mlaznici se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju vodenog mlaza. Voda u obliku mlaza malog prečnika velikom brzinom stiže do komore za mešanje gde se meša sa abrazivnim česticama. U komori za mešanje kinetička energija vodenog mlaza se prenosi na abrazivne čestice nakon čega se mešavina vode i abrazivnih čestica šalje u cev za usmeravanje mlaza. Na ovaj način se formira abrazivni vodeni mlaz spreman za mašinsku obradu materijala.



***Slika 1**. Šema obrade abrazivnim vodenim mlazom*

3. SPECIFIČNA ENERGIJA OBRADE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

Kod svih obrada sa uklanjanjem viška materijala, energija koja se utroši za uklanjanje jedne jedinice zapremine materijala koji se obrađuje se naziva specifična energija obrade – E_c. Specifična energija neke obrade se može predstaviti sledećim izrazom:

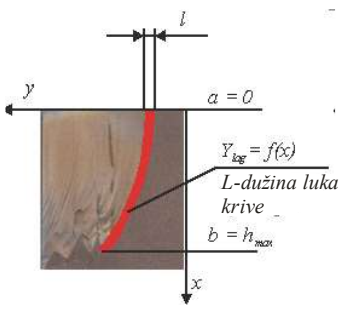
$$E_c = \frac{F \cdot L}{V} \tag{1}$$

gde V predstavlja zapreminu uklonjenog materijala, F je sila kojom se deluje na predmet obrade, a L je dužina na kojoj ta sila deluje. Obzirom da je obrada abrazivnim vodenim mlazom, obrada sa uklanjanjem – erodiranjem materijala, vrlo slična obradi brušenjem, ovakav izraz za proračun specifične energije se može primeniti i za ovu obradu.

Energija abrazivnog vodenog mlaza koja se iskoristi za obradu, odnosno sečenje materijala je proporcionalna zapremini materijala koji se ukloni iz zone rezanja procesom erozije. Ova zapremina se, dalje, može izraziti na osnovu dužine prednje linije reza, debljine sloja uklonjenog materijala i srednje širine reza:

$$V = L \cdot l \cdot W_{sr} \tag{2}$$

U izrazu (2) L je dužina krive $Y_{lag} = f(x)$ od ulaska abrazivnog vodenog mlaza u predmet obrade do maksimalne dubine prodiranja abrazivnog vodenog mlaza u predmet obrade, slika 2, odnosno dužina prednje linije reza, W_{sr} srednja širina reza a l put koji rezna glava pređe u jednoj sekundi.



***Slika 2**. Uzorak koji nije rasečen do kraja sa karakterističnim parametrima*

Dužina krive L se može odrediti na osnovu izraza:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + \left(f'_{(x)}\right)^2}\, dx \tag{3}$$

Dužina l , odnosno put koji rezna glava pređe u jednoj sekundi iznosi:

$$l = v_c \cdot t \tag{4}$$

Energija abrazivnog vodenog mlaza koja je potrebna za rasecanje materijala određene debljine, E_{pot}, odnosno, za uklanjanje određene zapremine materijala V, se može predstaviti i kao:

$$E_{pot} = V \cdot E_c \ , \tag{5}$$

gde je E_c specifična energija obrade, odnosno, energija potrebna da se rezanjem odvoji jedinica zapremine materijala koji se obrađuje, a V zapremina materijala koji se uklanja. Da bi se došlo do potpunog razdvajanja pri sečenju abrazivnim vodenim mlazom, razlika između energije na ulazu i energije koja je potrebna za obradu mora biti veća od specifične energije, odnosno:

$$E_{awj} - E_{pot} \geq E_c \tag{6}$$

Izraz za kinetičku energiju abrazivnog vodenog mlaza se može predstaviti kao:

$$E_{awj} = \alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{p}{\rho_w} \cdot t \tag{7}$$

Kada se izrazi (5) i (6) uvrste u izraz (7), dobija se konačan izraz za specifičnu energiju obrade abrazivnim vodenim mlazom:

$$\alpha^2 \cdot \varphi^2 \cdot \frac{m_w + m_a}{\left(1 + \frac{m_a}{m_w}\right)^2} \cdot \frac{p}{\rho_w} \cdot t \frac{1}{V} \geq E_c \tag{8}$$

gde su α i φ bezdimenzioni koeficijenti.

4. PRORAČUN SPECIFIČNE ENERGIJE OBRADE ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM

Da bi se odredila specifična energija obrade abrazivnim vodenim mlazom za materijal X5CrNi18-10, posmatrani su uzorci koji nisu rasečeni do kraja, slika 3. Materijal debljine 30 mm je rasecan sa različitim vrednostima radnog pritiska, da bi se dobio uzorak koji nije rasečen potpuno. Parametri procesa obrade su bili sledeći:

- Materijal predmeta obrade – X5CrNi 18–10
- Prečnik dijamantske mlaznice – d_o = 0.3mm
- Prečnik cevi za usmeravanje mlaza– d_f = 1.02 mm
- Rastojanje rezne glave od predmeta obrade – x_0 = 3 mm
- Debljina predmeta obrade – s=30 mm
- Brzina rezne glave v_c = 35 mm/min
- Protok abraziva m_a = 400 g/min
- Abraziv – *garnet* #80

p_1 = 413 MPa p_2 = 335 MPa p_3 = 290 MPa p_4 = 245 MPa p_5 = 205 MPa

***Slika 3**. Izgled uzoraka za različite radne pritiske* [5]

Mašina na kojoj su vršena istraživanja je PTV 3.8/60.

Uzorak koji nije bio rasečen do kraja je dobijen pri obradi sa radnim pritiskom od 205 Mpa. Na ovakvom uzorku je određena zapremina uklonjenog materijala i za režime rezanja pri obradi ovog uzorka izračunata energija abrazivnog vodenog mlaza.

Za zadate uslove obrade abrazivnim vodenim mlazom parametri su imali sledeće vrednosti: $\alpha = 0.6$, $\varphi = 0.83$. Ostali parametri koji se javljaju u formuli za kinetičku energiju abrazivnog vodenog mlaza su: ρw gustina vode koja je na pritisku $p = 205$ MPa je 1088 kg/m^3, a m_w protok vode. Protok vode za mašinu na kojoj su eksperimenti vršeni je bio podešen na $m_w = 2$ l/min. Vremenski interval za koji je vršen proračun je $t = 1$ s.

Da bi se odredila zapremina uklonjenog materijala, prvo je bilo potrebno odrediti dužinu prednje linije reza do dubine do koje je izvršeno rasecanje, *L,* slika 2.

Polazeći od izraza da je:

$$f_{(x)} = f_{(h)} = Y_{lag} \tag{9}$$

i od opšteg empirijskog izraza [5] (10):

$$f_{(h)} = Y_{lag} = 132.3607 \cdot h^{1.687} \cdot p^{-1.4297} \cdot {m_a}^{-0.691} \cdot {v_c}^{0.9274} \text{ [6]} \tag{10}$$

za konkretne vrednosti režima rezanja $p = 205$ MPa, $v_c = 35$ mm/min i $m_a = 400$ g/min, izraz (10) se može predstaviti u sledećem obliku:

$$f_{(x)} = 0.02838 \cdot x^{1.687} \tag{11}$$

Zamenom u formulu (3) dobija se:

$$L = 27.68mm.$$

Put koji rezna glava pređe u jednoj sekundi, na osnovu izraza (4) i zamenom vrenosti $t = 1$ s, dobija se da je pređeni put jednak:

$$l = 0.583mm.$$

Srednja širina reza je srednja vrednost širine reza na ulazu abrazivnog vodenog mlaza u materijal koji se obrađuje i širine reza na izlazu abrazivnog vodenog mlaza iz materijala koji se obrađuje.

$$W_{sr} = \frac{W_g + W_d}{2} \tag{12}$$

Širina reza na ulazu abrazivnog vodenog mlaza u materijal koji se obrađuje je data izrazom (13):

$$W_g = 1.044 + p \cdot 2.237 \cdot 10^{-4} \text{ [5]} \tag{13}$$

Širina reza na izlazu abrazivnog vodenog mlaza iz materijala koji se obrađuje je data izrazom (14):

$$W_d = 1.341 - 0.0052 \cdot p + 9.76 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 \text{ [5]} \tag{14}$$

Zamenom vrednosti za $p = 205$ MPa, dobija se da je:

$$W_{sr} = 0.888mm.$$

Zamenom svih dobijenih vrednosti u formulu (2) dobija se zapremina uklonjenog materijala:

$$V = 14.33mm^3.$$

Energija abrazivnog vodenog mlaza se izračunava na osnovu formule (7). Zamenom svih vrednosti u ovu formulu dobija se da je:

$$E_{awj} = 1298.02J.$$

Kada se u izrazu (8) zamene vrednosti za zapreminu uklonjenog materijala i energiju abrazivnog vodenog mlaza, dobija se specifična energija obrade abrazivnom vodenim mlazom:

$$E_c = 90.58 \frac{J}{mm^3}.$$

5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bavi proračunom specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom. Cilj istraživanja je bio da se definiše specifična energija abrazivnog vodenog mlaza u funkciji parametara procesa obrade i da se formira model za izračunavanje potrebne energije abrazivnog vodenog mlaza, u uslovima kada se rezna glava kreće i pri obradi definisanog materijala. Na osnovu zakona o očuvanju energije i matematičkog modela za definisanje oblika prednje linije reza, izveden je izraz za izračunavanje specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom. Obrada abrazivnim vodenim mlazom može predstaviti kao obrada višesečnim krutim alatom, slično kao kod obrade brušenjem, kombinovanjem ranije stečenih znanja iz klasične obrade rezanjem i obrade abrazivnim vodenim mlazom, kao i novonastalih modela, razvijen je ovaj model.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja, prikazani u ovom radu, pokazuju da parametri procesa obrade abrazivnim vodenim mlazom direktno utiču na vrednost specifične energije obrade. Takođe, specifična energija obrade abrazivnim vodenim mlazom je karakteristika materijala koji se obrađuje pa vrednost specifične energije koja je data u ovom radu važi samo za materijal X5CrNi 18–10.

U literature se mogu naći podaci za specifičnu energiju obrade brušenjem čelika, koji imaju vrednosti do 70 J/mm3. Vrednost specifične energiju obrade abrazivnim vodenim mlazom, dobijena na način prikazan u ovom radu je 90.58 J/mm3. Ovo ukazuje da je predloženi model za proračun specifične energije obrade abrazivnim vodenim mlazom dosta dobar i da se može koristiti za proračun specifične energije i za obradu drugih materijala.

6. LITERATURA

[1] Balogun, V. A., Mativenga, P. T.: *Impact of un-deformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes*, Journal of Cleaner Production, No. 69, pp.260–268, 2014.

[2] Paul, S., Hoogstrate, A. M., Van Luttervelt, C. A., Kals, H. J. J.: *Energy Partitioning in Elasto-Plastic Impact by Sharp Abrasive Particles in the Abrasive Water Jet Machining of Brittle Materials*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 73, No. 1-3, pp. 200-205, 1998.

[3] Hoogstrate, A. M., Susuzlu, T., Karpuschewski, B.: *High Performance Cutting with Abrasive Waterjets Beyond 400 MPa*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, No. 55, Vol. 1, pp.339-342, 2006.

[4] Janković, P., Madić, M., Petković, D., Radovanović, M.: *Analysis and Modeling of the Effects of Process Parameters on Specific Cutting Energy in Abrasive Water Jet Cutting,* THERMAL SCIENCE, Vol. 22, Suppl. 5, pp.S1459-S1470, 2018.

[5] Baralić, J., Nedić, B., Radovanović, M., Janković, P.: *Machinability of Materials by Abrasive Water Jet Cutting*, Univesity of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, 2015.

[6] Radovanović, M.: *Multi-Objective Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Using MOGA*, Procedia Manufacturing, Vol. 47, pp.781–787, 2020

[7] Kalpakjian, S.: *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, 2009.

[8] Momber, A. W., Kovacević, R.: *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer-Verlag London Limited, 1998.

Baralić, J., Nedić, B.

SPECIFIC CUTTING ENERGY IN ABRASIVE WATER JET MACHINING

Abstract: *Abrasive water jet machining is a very complex machining process and there are many parameters for evaluating the efficiency of this process. Specific energy, defined as the energy required to remove one unit volume of the material being machining, is one of those parameters. When machining with an abrasive water jet, not much data can be found about the values, as well as on the method of calculating the specific energy. This paper presents the procedure for calculating the specific energy of abrasive water jet machining. Based on the presented model, the specific energy of abrasive water jet machining was calculated for a specific example of X5CrNi18-10. The obtained values of the specific cutting energy for this steel are higher than thosw when machinig aluminum with an abrasive water jet. Also, the values are higher than those when machining similar materials by grinding. The order of magnitude of the calculated specific cutting energy is the same as in the mentioned examples.*

Key words: *specific energy, abrasive water jet machining*

Vorkapić, N. [1)], Maletić, J. [2)], Nešovanović, Lj. [2)], Živanović, S. [1)], Pjević, M.[1)]

EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA SA EKSPERIMENTIMA OBIMNOG GLODANJA[2)]

Rezime

U radu je predstavljena eksperimentalna metoda za identifikaciju specifičnih sila rezanja, koja se bazira na procesu glodanja za tri različite vrste materijala. Jedan od bitnih pokazatelja tačnosti izrađenih delova i kvaliteta obrađene površine, pored režima rezanja, jesu sile rezanja koje u toku tog procesa postoje. Pojačani režimi rezanja, a samim tim i veće sile, mogu dovesti do oštećenja alata ili obratka. Da bi se ti neželjeni efekti predupredili, vrše se empirijski proračuni sila rezanja na osnovu specifičnih sila rezanja, koje se mogu određivati eksperimentalnim putem. Kako vrednosti specifičnih sila zavise od materijala alata i obratka, kao i geometrije alata korišćenog u procesu merenja, dobijaju se različite vrednosti izmerenih podataka. Vrednosti specifičnih sila se mogu iskoristiti u istraživačke svrhe pri konfigurisanju savremenih tehnoloških sistema za obradu materijala rezanjem podržanim mehatronskim sistemima za nadzor. Razmatrani vid unapređenja konfigurisanja tehnoloških sistema ima za cilj praćenje pojedinih parametara procesa u realnom vremenu i održavanje njihovih vrednosti konstantnim, ili optimizaciju programirane putanje alata.

Ključne reči: *specifične sile rezanja, virtuelni obradni sistem, predikcija sila*

1. UVOD

Unapređenje korišćenja složenih i skupih resursa u savremenoj tehnologiji obrade metala rezanjem svojevremeno je dovelo do koncepta virtuelnog obradnog sistema sa idejom da faze projektovanja tehnologije budu podržane simulacionim okruženjem koje će obezbediti pouzdane predikcije najvažnijih efekata obrade, kao i optimizaciju elemenata režima obrade. Kao i u nešto novijem konceptu digitalnih blizanaca, u sferi tehnologije obrade, kamen temeljac za najrazličitije procedure unutar ovakvog simulacionog okruženja predstavljaju pouzdani modeli statike i dinamike elemenata obradnog sistema, sila rezanja i hrapavosti obrađene površine. Ovaj rad se bavi silama rezanja, kao neizostavnom pratiocu obrade rezanjem, a koje su uzrok brojnih neželjenih pojava, od grešaka mera i oblika obrađenih površina, usled elastičnih deformacija elemenata obradnog sistema, preko povećane potrošnje energije do ubrzane degradacije alata i njegovog loma.

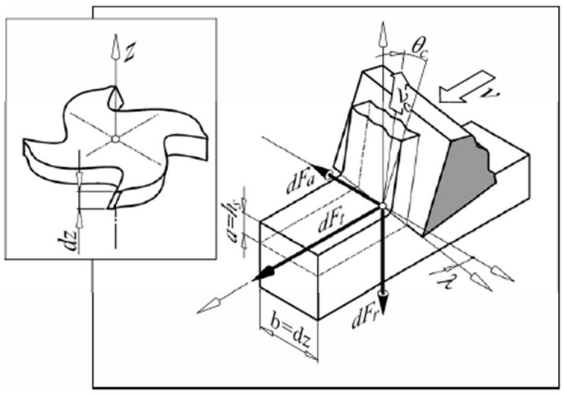
Procedure predikovanja komponenata sila glodanja duž programirane putanje u simulacionom okruženju su dobro poznate[1, 2]. Istina je, s druge strane, da one nisu implementirane u komercijalno dostupne CAD/CAM sisteme, već su verifikovane kroz radove različitih naučnoistraživačkih institucija. Ograničenje za primenu ovih procedura je nedostatak dovoljno široke baze podataka sa takozvanim specifičnim silama rezanja za enormno veliki broj kombinacija materijala obratka, rezne geometrije i materijala alata, kakvi se mogu naći u realnim proizvodnim uslovima.

Osim pomenutog predikovanja komponenata sile rezanja duž programirane putanje, poznavanje ovih specifičnih sila je preduslov za naredni korak optimizacije procesa, kroz proceduru adaptacije brzine pomoćnog kretanja duž putanje, a sa ciljem održavanja konstantnom izabrane komponente sile.

2. SPECIFIČNE SILE REZANJA

[1)] Nikola Vorkapić, (nvorkapic@mas.bg.ac.rs), prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo.
[2)] Julija Maletić, (julija.maletic@li.rs), Ljubomir Nešovanović, (ljubomir.nesovanovic@li.rs), Lola Institut, Beograd.
[23)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrisana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „ Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema ", koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god.

Većina reznih alata se odlikuje manje ili više složenom reznom geometrijom. U različitim procedurama predikovanja sila glodanja polazi se od sila koje deluju na maloj dužini sečiva. Na toj maloj dužini, bez obzira na oblik glavnog sečiva, može se smarati da je sečivo pravolinijsko i da se svodi na model kosog rezanja sa tri komponenete sile, pokazane na slici 1.



Slika 1. *Sile rezanja na elementarnoj dužini glavnog sečiva pri kosom rezanju[2].*

Modeli specifičnih sila rezanja korišćeni u najvećem broju literaturnih izvora se mogu svrstati na dva osnovna tipa, koji povezuju silu rezanja ili njenu određenu komponentu (*j*) sa površinom poprečnog preseka nerezane strugotine (*dA*) i eventualno sa elementarnom dužinom (d*L*) sečiva u zahvatu.

Jedan od njih je Kienzleov model, oblika:

$$dF = K_c \cdot dA = K_c \cdot h \cdot dL$$

gde je sa h označena debljina nerezane strugotine.

Veza sile i debljine strugotine je u osnovi nelinearna, što opisuje izraz za izračunavanje K_c:

$$K_c = K_{c,1}\, h^{-m_c}$$

Baze podataka sa vrednostima konstanti $K_{c,1}$[N/mm^2] i eksponenta m_c, za vrlo širok asortiman najrazličitijih materijala obradaka su dostupne i obično ih nude renomirani proizvođači reznih alata [7]. U praksi se ovaj model najčešće primenjuje za glavni otpor rezanja. Stoga se upotrebna vrednost modela sa takvim raspoloživim parametrima svodi uglavnom na procenu potrebne snage motora glavnog kretanja za određeni režim obrade. Vrednosti parametara $K_{c,1}$ i m_c se daju za određene uglove rezne geometrije (npr. za nulti grudni ugao). Izvesno približenje realnim uslovima se ostvaruje korekcionim članom koji uzima u obzir stvarnu vrednost grudnog ugla:

$$K_c = K_{c,1} \cdot h^{-m_c} \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$$

U različitim modulima za predikovanje i optimizaciju procesa obrade od značaja je, vrlo često, potrebno poznavanje svih komponenata koje deluju na elementarni deo sečiva, kako bi se za određene uslove obrade, njihovom integracijom, izračunale komponente otpora rezanja koje deluju na alat kao celinu. Komponente sile rezanja, u tangentnom, radijalnom i aksijalnom pravcu, na maloj dužini glavnog sečiva, koje se može smatrati pravolinijskim se često daju kao linearne funkcije:

$$\begin{aligned} dF_t &= K_{tc} h_c dz + K_{te}\, dz \\ dF_r &= K_{rc} h_c dz + K_{re}\, dz \\ dF_a &= K_{ac} h_c dz + K_{ae}\, dz \end{aligned} \qquad (1)$$

U brojnim radovima [3-7] je ilustrovan vrlo dobar kvalitet predikcija sila glodanja, koji se zasniva na ovakvim modelima specifičnih sila rezanja i simulacije punog obrta glodala sa reznom geometrijom diskretizovanom u obliku diskova male debljine.

Dva su pristupa u eksperimentalnoj identifikaciji specifičnih sila rezanja za potrebe predikovanja sila glodanja. U literaturi [2] je opisan postupak, koji se svodi na ekspermente sa merenjem dveju komponenata sile pri ortogonalnom rezanju (obrada struganjem) za razmatrani par materijala alata i obratka. Ovi podaci, uz merenja kojima se određuje faktor sabijanja strugotine, dopuštaju da se kroz poznate transformacije, preko izračunatog ugla smicanja, dođe do specifičnih sila kosog rezanja, što je po pravilu slučaj kod obimnog glodanja.

Za očekivati je da drugi pristup, koji se zasniva na eksperimentima sa glodanjem za razmatrani par materijala alata i obratka, određeni grudni i leđni ugao i ugao zavojnice zuba, rezultuje pouzdanijim identifikovanim specifičnim silama rezanja.

Ovde bi trebalo naglasiti odnos područja primene identifikovanih specifičnih sila rezanja. Pristup koji se bazira na merenjima sile pri ortogonalnom rezanju je svakako univerzalan. Pomenute transformacije ortogonalnog u koso rezanje su primenjive na elementarno sečivo bilo kog alata (noža, burgije, glodala) za razmatrani par materijala alata i obratka. Odlika ovakvog pristupa je, dakle, ekstremno mali obim eksperimenata. Drugi pristup se odlikuje znatno ograničenijim područjem primene. Identifikovane specifične sile (iako verovatno, pouzdanije) važiće za određeni par materiajala alata i obratka i za reznu geometriju određenog tipa glodala (grudni i leđni ugao i ugao zavojnice žljebova). Identifikovani parametri će biti primenjivi za bilo koji nazivni prečnik i broj zuba glodala razmatranog tipa i najrazličitije režime obrade.

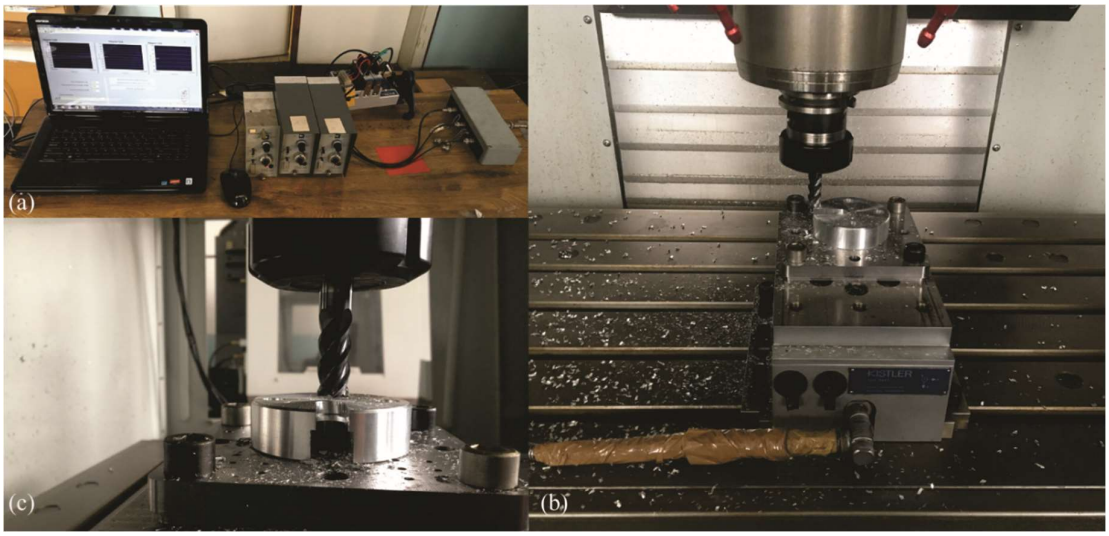
3. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA

Primeri eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja, opisane u ovom radu, odnose se na tri izabrana materijala obratka, relativno česta u proizvodnoj praksi, a za potrebe predikovanja sila glodanja glodalima od tvrdog metala. Primenjena metodologija je opisana u [1, 2].

Potrebni eksperiment se svodi na merenje tri međusobno upravne komponenete sile glodanja pri maloj dubini, sa širinom glodanja jednakoj njegovom prečniku. Merenja se ponavljaju za različite brzine programiranog pomoćnog kretanja, sa ciljem da se ostvari varijacija koraka po zubu s_z, u smislenom opsegu. Tokom uzastopnih merenja sila jedini parametar koji se menja je upravo korak po zubu. U svakoj fazi ovakvog eksperimenta se prave vremensku zapisi signala komponentnih sila glodanja, pomoću sistema za akviziciju podataka.

3.1 Detalji eksperimenta

Eksperimenti sa obradom glodanjem su vršeni na troosnoj glodalici HAAS VF3. Izabrana mašina ima mali broj radnih sati, što predstavlja neku vrstu garancije da je zazor u ležajima glavnog vretena zanemarljiv i da promena preseka strugotine pri obrtanju alata neće odstupati od nominalne, sinusoidalne. Na slici 2 prikazana je eksperimentalna postavka sa detaljima obradnog sistema, trokomponentnim dinamometrom, pojačivačima, sistemom za akviziciju podataka i računarom sa instaliranim softverom za DAQ.



Slika 2. *Eksperimentalna postavka za izvođenje eksperimenata*

Na slici 2a prikazan je sistem za akviziciju podataka. Korišćena su tri pojačivača, za svaku od komponenti sile rezanja po jedan, duž tri međusobno upravna pravca. U USB kućište sa četri slota cDAQ-9174 postavljen je četvorokanalni analogni ulazni modul NI 9125 sa simultanim uzorkovanjem, koji vrši A/D konverziju pojačanog signala. Tako konvertovan signal zapisuje se u odgovarajuću datoteku na računaru (vremenski zapis) . Softver koji je korišćen pri akviziciji podataka je LabView 12.0. Na slici 2b prikazan je trokomponentni dinamometar KISTLER 5112, na kojem se nalazi odgovarajuća prihvatna ploča za različite

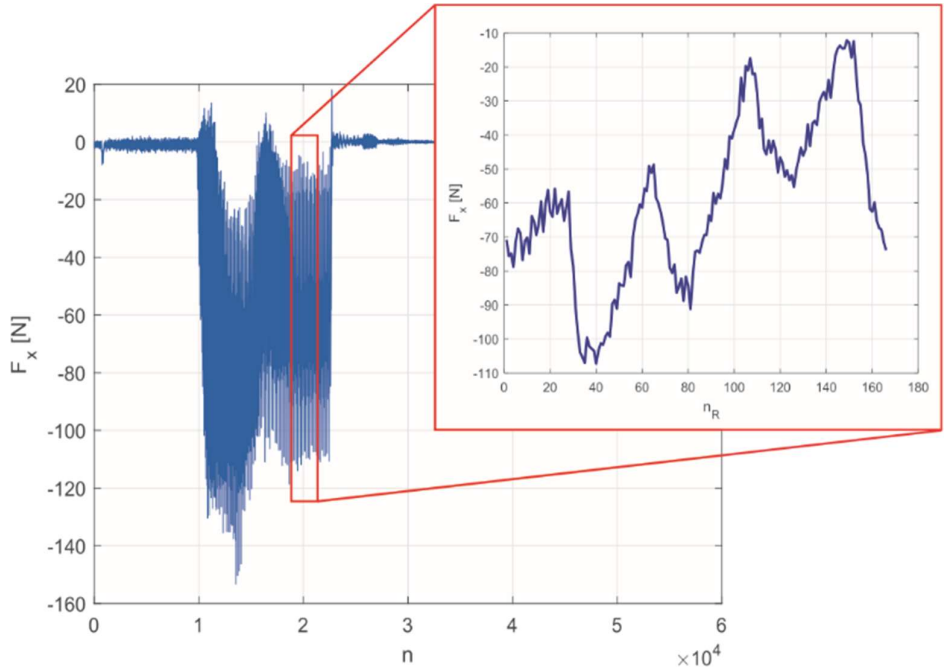
oblike pripremaka. Pripremak je u ovom slučaju cilindričnog oblika, prečnika 50 mm i visine 20mm.

Formiranje vremenskih zapisa je rađeno za niz eksperimenata za tri mateijala obratka: legura aluminujima ENAW 7075-T6, zatim legura ENAW 6028, pri čijoj obradi je korišćeno vretenasto glodalo sa četri zuba od tvrdog metala za obradu aluminijuma, nazivnog prečnika 16mm, proizvođača ATORN. Treći materijal koji je obrađen je čelik EN 42CrMo4, u poboljšanom stanju. Pri njegovoj obradi korišćeno je vretenasto glodalo sa tri zuba od tvrdog metala za obradu čelika, nazivnog prečnika 16mm, istog proizvođača. Na slici 2c predstavljen je položaj alata u odnosu na obradak pri zauzimanju odgovarajuće dubine.

Posebna pažnja je potrebna pri planiranju obrade. Ideja da se koristi tanka ploča, pričvršćena za dinamometar, nije dobra jer će svakako doći do povlačenja ovakvog pripremka (u pravcu ose Z) zbog zavojnih zuba glodala, kao posledica rastojanja zone rezanja i tačaka u kojima je pripremak stegnut. Za očekivati je da se u tom slučaju jave i naglašene vibracije obrtaka. Umesto toga, korišćen je kompaktan prizmatičan pripremak sa uzdužnim žljebom prema dinamometru. Pre svakog merenja se aktivira jednostavan program, koji formira kratak žljeb sa gornje strane obratka (nešto širi od glodala, na način da preostala debljina materijala do donjeg žljeba bude jednaka planiranoj dubini glodanja u esperimentu. Lamela koja se obrađuje je tada sa minimalnim prepustom u odnosu na osnovni materijal. Njena dužina se planira tako da je sa programiranom brzinom pomoćnog kretanja u eksperimentu moguće napraviti vremenski zapis za nekoliko punih obrta alata u stacionarnom režimu glodanja.

Na slici 3 je pokazan tipičan oblik vremenskog zapisa komponente sile glodanja u ovakvim eksperimentima. Četiri pika koja se mogu uočiti posledica su ulaska i izlaska u zahvat četiri zuba glodala kojim je vršena obrada. Neujednačenost vrednosti sile na ovim pikovima je posledica radijalnog bacanja glodala sa držačem u glavnom vretenu mašine.

Frekvencija odabiranja pri AD konverziji je u toku izvođenja eksperimenata podešena na $f_s = 5500\frac{S}{s}$, što je pri programiranim brojevima obrta glavnog vretena rezultovalo brojem od 180 odabiraka po jednom obrtu glavnog vretena.



Slika 3. *Primer vremenskog zapisa trenutnih sila glodanja duž X pravca*

3.2 Obrada vremenskih zapisa i identifikacija specifičnih sila

Metodologija, opisana u [1, 2, 7], podrazumeva dva koraka u postupku obrade vremenskih zapisa komponenata sile glodanja u seriji eksperimenata za jedan par materijala alata i obratka i varirane vrednosti koraka po zubu.

Prvi korak je osrednjavanje vrednosti komponenata sile glodanja na celom broju obrtaja glavnog vretena. U tabeli 1 su pokazane osrednjene vrednosti komponenata sile, za primer niza eksperimenata pri obradi materijala ENAW7075-T6

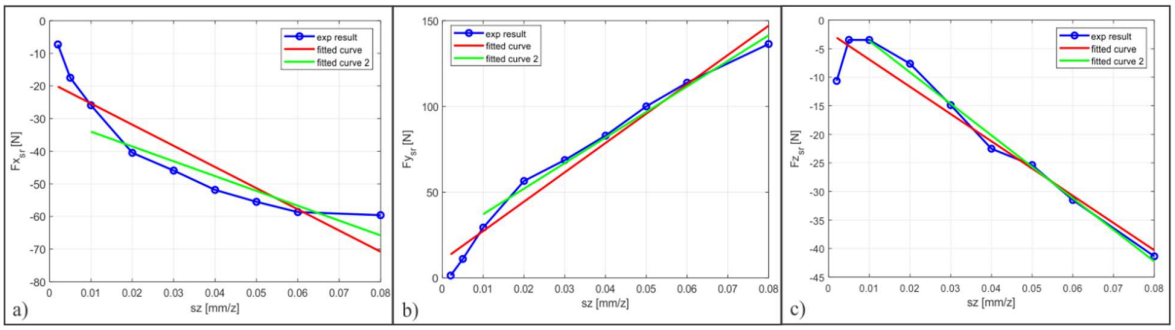
Tabela 1. *Osrednjene vrednosti komponenata sile glodanja iz eksperimenata sa* ENAW7075-T6

S_z / F_{isr}	0,002	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
F_{xsr}	-7,293	-17,494	-25,916	-40,483	-45,928	-51,844	-55,488	-58,645	-59,587
F_{ysr}	1,416	11,093	29,384	56,515	68,722	82,959	99,994	113,817	136,362
F_{zsr}	-10,647	-3,467	-3,479	-7,634	-14,893	-22,519	-25,383	-31,503	-41,361

Matrična struktura sadržana u tabeli 1 je dovoljna da se može obaviti drugi korak procedure, a to je izdvajanje parametara linearne aproksimacije, koja povezuje $F_{j,sr}$ i s_z (j=x,y,z).

$$F_{x,sr} = \underline{F}_{x.e} + \underline{F}_{x.c} \cdot s_z$$
$$F_{y,sr} = \underline{F}_{y,e} + \underline{F}_{y.c} \cdot s_z \qquad (2)$$
$$F_{z,sr} = \underline{F}_{z.e} + \underline{F}_{z.c} \cdot s_z$$

U tu svrhu je korišćena funkcija *polyfit* Matlab-a (aproksimacija polimomom prvog stepena). U konkretnom slučaju su razmatrana dva slučaja ove aproksimacije, što je ilustrovano slikom 4.



Slika 4. *Aproksimacija srednjih vrednosti komponenti sila glodanja iz niza eksperimenata*

U jednom slučaju (crvena linija) su aproksimacijom obuhvaćene vrednosti osrednjenih sila glodanja za sve vrednosti koraka po zubu iz tabele 1. U drugom slučaju (zelena linija) su za fitovanje iskorišćene vrednosti uz izuzetak tačaka koje odgovaraju koracima po zubu ispod 0.01mm/z. U nastavku su zadržani parametri pravih (koeficijent pravca i odsečak na ordinatnoj osi) iz drugog pomenutog slučaja. Ovo je učinjeno sa obrazloženjem da će takav linearan model u simulaciji sila glodanja rezultovati većim predikovanim vrednostima, što je svakakao na strani sigurnosti. Za vrednosti izdvojene iz esperimenata pri obradi ENAW7075-T6 parametri ovih linearnih modela su pokazani u tabeli 2.

Tabela 2. *Parametri linearnih modela osrednjenih komponenata sile glodanja*

$\underline{F}_{Xc}$ [N]	$\underline{F}_{Xe}$ [N]	$\underline{F}_{Yc}$ [N]	$\underline{F}_{Ye}$ [N]	$\underline{F}_{Zc}$ [N]	$\underline{F}_{Ze}$ [N]
-648,461	*-18,8995*	*1709,4*	*10,285*	*-477,065*	*-2,133*

Treći korak pomenute metodologije je izračunavanje 6 vrednosti specifičnih sila rezanja:

$$K_{tc} = \frac{4 \cdot \underline{F}_{Yc}}{z \cdot a} \quad , K_{te} = \frac{\pi \cdot \underline{F}_{Ye}}{z \cdot a}$$
$$K_{rc} = \frac{-4 \cdot \underline{F}_{Xc}}{z \cdot a} \quad , K_{re} = \frac{\pi \cdot \underline{F}_{Xe}}{z \cdot a} \qquad (4)$$
$$K_{ac} = \frac{\pi \cdot \underline{F}_{Zc}}{z \cdot a} \quad , K_{ae} = \frac{2 \cdot \underline{F}_{Ze}}{z \cdot a}$$

Na osnovu izraza 4 [1] i koeficijenata datih u tabeli 2, određene su vrednosti specifičnih sila rezanja za materijal ENAW7075-T6 i predstavljene u tabeli 3. Pored njih, u tabeli su date i vrednosti koeficijenata za ostala dva materijala, ENAW6026 i EN 42CrMo4, za koje je obavljen niz eksperimenata sa varijacijom koraka po zubu.

Tabela 3. *Identifikovane specifične sile rezanja za razmatrane materijale obratka*

Materijal	K_{tc} [N]	K_{te} [N]	K_{rc} [N]	K_{re} [N]	K_{ac} [N]	K_{ae} [N]
ENAW 7075-T6	*1139,6*	*5,3854*	*432,3072*	*9,8958*	*-249,79*	*-0,7111*
ENAW 6026	*815,651*	*10,897*	*323,015*	*9,565*	*-194,225*	*1,635*
EN 42CrMo4	*2421,8*	*8,461*	*842,931*	*4,928*	*-4,441,694*	*-0,628*

5. ZAKLJUČAK

U radu su pokazane faze pripreme i izvođenja eksperimenata sa obimnim glodanjem i naknadna obrada vremenskih zapisa sa ciljem identifikacije specifičnih sila rezanja za tri materijala obratka. Korišćena je metodologija koja je poznata u literaturi, a koja polazi od linearnog modela zavisnosti komponentnih sila rezanja od debljine strugotine. Težnja je istraživačkog tima da kroz dalji rad formira dovoljno veliku bazu podataka sa vrednostima specifičnih sila rezanja za materijale obradaka, koji se sa velikom frekvencijom pojavljuju u realnom proizvodnom okruženju.

Deo rezultata koji je dobijen u prvoj fazi obrade vremenskih zapisa, u ovom radu, podstiče na razmišljanje da se pokuša sa razvojem nelinearnog modela komponentnih sila, što suštinski menja algoritam identifikacije specifičnih sila rezanja.

6. LITERATURA

[1] Kokotović, B., Vorkapić, N., Feedrate Optimization for 2.5D Milling Operations, FME Transactions (2019), Volume 47, No 3., pp. 613-623, doi: 10.5937/fmet1903613K, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Production Engineering, Belgrade, jun 2019.

[2] Kokotović, B., Obrada glodanjem u virtuelnom obradnom sistemu, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd 2013.

[3] Ko, Jeong Hoon, Won-Soo Yun, Dong-Woo Cho, and Kornel F Ehmann. 2002. "Development of a virtual machining system, part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction." Review of. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42 (15):1595-605.

[4] Budak E. Altintas Y., Armarego E.J.A., Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data May 1996Journal of Manufacturing Science and Engineering 118(2)

[5] Altintas, Yusuf, Christian Brecher, Manfred Weck, and S Witt. 2005. "Virtual machine tool." Review of. CIRP annals 54 (2):115-38

[6] E. Budak Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 12–13, October 2006, Pages 1478-1488

[7] Y. Altintas, S. Engin, Generalized modeling of mechanics and dynamics of milling cutters, Annals of the CIRP 50 (2001) 25–30.

[8] Technical Guide-Materials ISO, Sandvik-Coromant

Vorkapić, N. 1), Maletić, J. 2), Nešovanović, Lj. 2), Živanović, S. 1), Pjević, M.)

EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF SPECIFIC CUTTING FORCES WITH EXPERIMENTAL MILLING

Abstract: The paper presents an experimental method for identifying specific cutting forces based on the milling process for three different types of materials. One of the crucial indicators of the accuracy of the manufactured parts and the quality of the processed surface, in addition to the cutting mode, are the cutting forces that exist during the process. Increased cutting modes, and therefore higher forces, can damage the tool or workpiece. In order to prevent these unwanted effects, empirical calculations of cutting forces are performed based on specific cutting forces, which can be determined experimentally. As the values of specific forces depend on the material of the tool and workpiece and the tool's geometry used in the measurement process, different values of the measured data are obtained. The values of specific forces can be used for research purposes when configuring modern technological systems for processing materials by cutting, which are supported by mechatronic systems for monitoring the processing process. The main goal is to monitor specific parameters of the process in real-time, maintaining them constantly or optimizing the programmed path of the tool.

Key words: *specific cutting forces, virtual machining system, force prediction*

Dimić, Z., Pavlović D., Živanović, S., Furtula, M., Đurković, M. [1)]

DINAMIČKI REKONFIGURABILNI UPRAVLJAČKI SISTEM SA PROMENLJIVIM TOKOM IZVRŠAVANJA KINEMATIČKOG ALGORITMA [2)]

Rezime

U radu je predstavljen sistem upravljanja otvorene arhitekture koji je implementiran na troosnoj glodalici za obradu drveta koja može raditi i u vertikalnoj i u horizontalnoj konfiguraciji, kao i upravljanje preko digitalnog dvojnika. Razvoj sistema upravljanja putem digitalnog dvojnika motivisan je istraživačkim i edukacionim zahtevima. Razmatrani CNC sistem za obradu drveta je podržan od ekvivalentne virtuelne mašine u sistemu upravljanja kao digitalni dvojnik. Konfigurisana virtuelna mašina se koristi za simulaciju obrade i verifikaciju sistema upravljanja. Prikazan je jedan test predmet koji je obrađen u vertikalnoj i horizontalnoj konfiguraciji da bi se potvrdila efikasnost razvijenih sistema upravljanja koji su zasnovani na LinuxCNC-u.

Ključne reči: Rekonfigurabilne mašine alatke, CNC za obradu drveta, LinuxCNC, Digitalni dvojnik.

1. UVOD

U odnosu na skupe mehaničke komponente mašina alatki, kao što su noseća struktura, linearne i rotacione vođice, servo pogoni, hidraulični sistemi i sl., čiji eksploatacioni vek može biti jako dug, upravljački sistemi, kao hardverske i softverske komponente, nakon nekoliko godina korišćenja ostaju bez podrške svojih proizvođača i odgovarajućih unapređenja, postajući inferiorni u odnosu na moderne sisteme. Kao posledica, mašine koje su, sa stanovišta mehanike i pogona, u vrlo dobrom stanju, zbog zastarelog upravljanja su manje produktivne. S druge strane, komercijalno dostupna, nova upravljačka jedinica može imati višu cenu od trenutne tržišne vrednosti mašine za koju je potrebna kao zamena ili unapređenje.

Razvoj i konfigurisanje upravljačkig sistema za mašine koje se eksploatišu i savremenoj industriji, pa shodno tome i u visokoškolskim ustanovama, mora pratiti trendove koji su povezani za različitim naprednim inicijativama, kao što su kibernetsko-fizički sistemi (*CPS - **C**yber-**P**hysical **S**ystems*) pod paradigmom Industrije 4.0 [1], internet inteligentnih objekata (*IoT - **I**nternet **o**f **T**hings*) [2], računarstvo u oblaku (C*C - **C**loud **C**omputing*) [3] i digitalni dvojnik mašine [4]. Primarni trendovi digitalizacije u prerađivačkoj industriji su povećanje efikasnosti, produktivnosti i kvaliteta prozvoda, dok je u oblasti edukacije akcenat stavljen na kvalitetno obrazovanje u svetlu novih trendova i tehnologija.

Kao rešenje za modernizaciju postojećih mašina alatki, koje odgovara savremenim trendovima digitalizacije u svetskim okvirima, u radu je predstavljen upravljački sistem, razvijen na bazi softverskih alata (*LinuxCNC*) i hardvera otvorene arhitekture (*PC* arhitektura), primenom metoda virtuelnog projektovanja [5-6], što uz razvoj digitalnog dvojnika mašine predstavlja značajan doprinos u oblasti razvoja upravljanja mašina alatki. Rekonfigurabilnost mašine alatke, opisane u radu, navela je autore na razvoj dinamički rekonfigurabilnog sistema upravljanje sa kinematičkim algoritmom sa promenljivim tokom izvršavanja na zahtev korisnika.

[1)] dr Zoran Dimić, (zoran.dimic@li.rs), dr Dragan Pavlović, (dragan.pavlovic@mas.bg.ac.rs), Lola institut, Beograd, dr Saša Živanović, redovni profesor, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dr Mladen Furtula, vanredni profesor, (mladen.furtula@sfb.bg.ac.rs), dr Marija Đurković, vanredni profesor, (marija.djurkovic@sfb.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.

[2)] U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekata koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god i ugovoru ev. br. 451-03-68/2022-14/ 200066 od 4.2.2022.

Strategija „virtuelnog puštanja u rad“ uz tehnologiju „digitalnog dvojnika“ predstavlja glavni doprinos u oblasti razvoja sistema upravljanja. Rad je organizovan u celine : uvod, virtuelno projektovanje upravljačkog sistema mašine, rekonfigurabilnost mašine alatke i upravljačkog sistema i eksperimentalna verifikacija. U završnom koraku, digitalni i upravljački sistemi su verifikovani kroz eksperimente.

2. VIRTUELNO PROJEKTOVANJE UPRAVLJAČKOG SISTEMA MAŠINE ALATKE

Razvoj softverski orijentisanog *CNC*-a otvorene arhitekture na *Linux/RTLinux* u osnovi donosi višestruke prednosti u odnosu na ekvivalentne *Windows* sisteme. Između zajedničkih zahteva koji se danas postavljaju pred softverske sisteme otvorene arhitekture, a koji treba da karakterišu i softverski orijentisani *CNC* na *Linux*-u, ističu se:

1. Robusna, pouzdana arhitektura;
2. Upravljanje otkazom, ograničenje prostiranja greške na jedan proces;
3. Dostupnost komunikacionih protokola, alata i drajvera;
4. Podrška za izabranu procesorsku arhitekturu;
5. Različitost opcija i pripadajućih alata za izabranu distribuciju *real-time Linux* operativnog sistema;
6. Standardan *API* (*application programming interface*) koji omogućava jednostavan transfer razvijenog softvera na *embedded* sisteme.

Deo aktivnosti Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju SAD-a, poznatijeg kao *NIST (National Institute of Standards and Technology)*, odnosi se na razvoj mernih metoda i standarda za inteligentne upravljačke sisteme u proizvodnji. Kao rezultat dugogodišnjeg istraživanja u ovoj oblasti, *NIST* je promovisao *RCS (Real-time Control System)* softversku biblioteku, koja danas predstavlja standardnu, referentnu osnovu za razvoj inteligentnih upravljačkih sistema. *RCS* biblioteka je evoluirala tokom godina i rezultirala razvojem brojnih upravljačkih aplikacija, uključujući i *Enhanced Machine Controller* poznatiji kao EMC, danas poznat kao *LinuxCNC* ili *Machinekit*, zavisno od hardvera za koji je namenjen. *LinuxCNC*, odnosno *Machinekit*, nudi *real-time* upravljački softver otvorene arhitekture, koji se uz korisničke modifikacije i nadgradnje može iskoristiti za upravljanje najrazličitijih mašina alatki i robota. Neprocenjiv rad i iskustvo koji su godinama ulagani u *RCS* i *EMC*, daju više nego dobru tehnološku osnovu za razvoj spostvenog sistema upravljanja.

Softverski orijentisani *CNC* je idealno rešenje koje u potpunosti zadovoljava zahteve otvorene arhitekture. Sa dramatičnim napretkom *PC* hardverske i softverske tehnologije, jezgro *CNC* sistema, kao najzahtevniji modul po pitanju angažovanja procesora, može biti softverski realizovano na *PC* računaru uz podršku operativnog sistema *Linux* sa *real-time* ekstenzijom. Na pomenuti način se hardverski orijentisano upravljanje transformiše u softverski orijentisani sistem. Glavna ideja softverski orijentisanog *CNC* sistema je realizacija softvera, koji u potpunosti zadovoljava zahteve danas postavljene pred upravljkačke sisteme mašina alatki. Sa druge strane, softverski sistem koncipiran na način da omogući laku integraciju sa postojećim *PC* hardverskim i softverskim tehnologijama u cilju ostvarivanja fleksibilnosti i lakog unapređenja, kako softvera, tako i hardvera. Interpolator putanje, servo petlje, *PLC* kao i drugi *real-time* kontrolni sistemi mašine alatke, su softverski realizovani i izvršavaju se na *PC* hardverskoj platformi, što u mnogome redukuje cenu uprvaljačke jedinice i njeno održavanje u periodu eksploatacije, a povećava produktivnost mašine alatke.

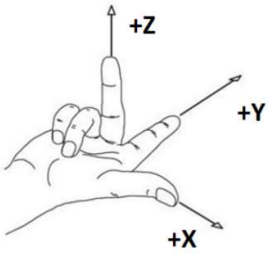
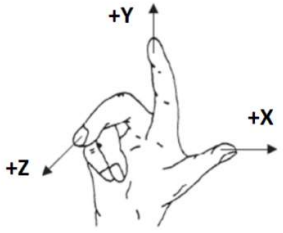
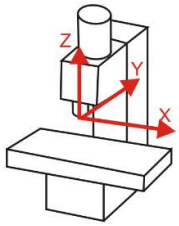
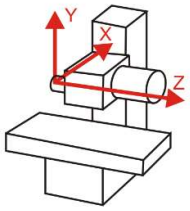
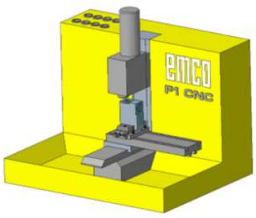
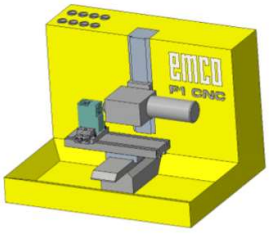
U radu su predstavljeni razvoj i implementacija upravljačkog sistema na bazi softvera i hardvera otvorene arhitekture u cilju revitalizacije mašine alatke za obradu drveta *EMCO F1 CNC*, slika 1, koja može da vrši obradu kao vertikalna ili horizontalna glodalica, u zavisnosti od položaja glavnog vretena.

Razvojem je verifikovana metoda virtuelnog projektovanja, bez negativnih implikacija na realnu mašinu uz povećanje efikasnosti i produktivnosti razvojnog tima. Potreba za zamenom upravljačke jedinice na glodalici *EMCO F1-CNC* nastala je kao posledica gubitka konfiguracionih parametara na postojećem upravljačkom sistemu. Opcija ugradnje jednog od komercijalno dostupnih upravljačkih sistema, poput *SIEMENS*-a, *HEIDENHAIN*-a i drugih, nije predstavljala prihvatljivo rešenje zbog visoke cene. Potreba za jeftinim upravljačkim sistemom, koji ima mogućnosti implementacije kinematičkih funkcija, kao i mogućnost kastomizacije korisničkog interfejsa, ukazala je na razvoj softverski orijentisanog *CNC*-a na bazi *LinuxCNC* softverskih alata i *PC* hardvera otvorene arhitekture.

Slika 1. *CNC mašina za obradu drveta EMCO F1CNC*

2.1 Opis mašine i njeno stanje pre revitalizacije upravljanja

EMCO F1 je troosna CNC glodalica koja može da vrši obradu kao vertikalna ili horizontalna glodalica. Inicijalno, kao što je prikazano na slici 1, mašina je u konfiguraciji vertikalne glodalice. Manuelnim zakretanjem motornog vretena oko Y ose za -90°, mašina se rekonfiguriše u horizontalnu glodalicu, slika 2 Mogućnost promene konfiguracije mašine inicirala razvoj dinamički rekonfigurabilnog upravljačkog sistema, koji omogučava promenu konfiguracije tokom izvršavanja programa obrade bez potrebe za ponovnom inicijalizacijom i repozicioniranjem radnog predmeta.

Tip mašine	Eukaciona troosna vertikalna/horizontalna mašina alatka EMCO F1 CNC	
Konfiguracija	Vertikalna	Horizontanal
Koordinatni sistemi		
Konfiguracija mašine sa prikazom koordinatnih sistema		
Hodovi X / Y / Z osa	200 mm / 100 mm / 200 mm	
Uprošćeni CAD virtuelni modeli mašine za potrebe simulacije		

Slika 2. *Prikaz konfiguracija glodalice EMCO F1-CNC, vertikalna i horizontalna konfiguracija*

2.2 Opis izvedenog stanja revitalizovane mašine

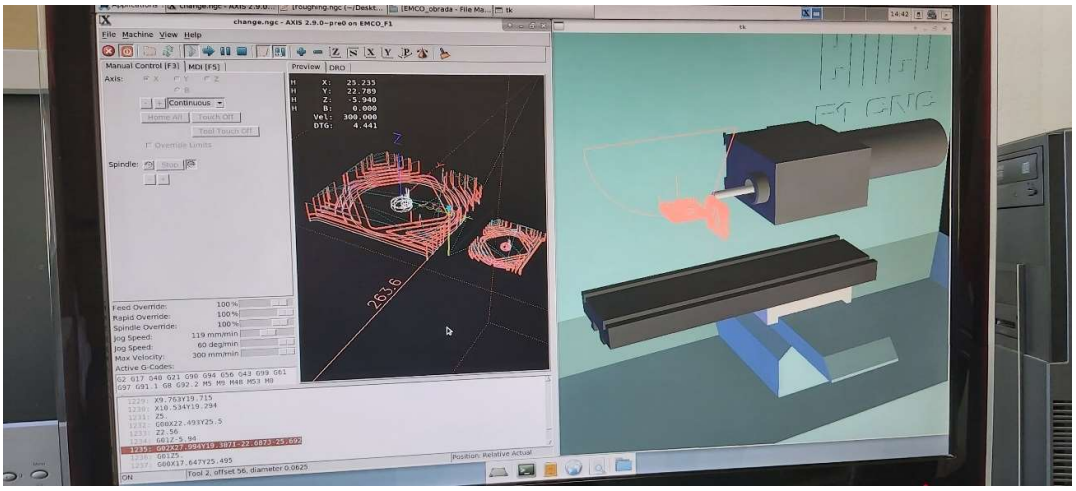
Izuzev upravljačkog sistema, svi pogonski sklopovi na mašini su bili ispravni. Specifični zahtevi koje je korisnik postavio pred razvojno-istraživački tim su bili sledeći:

- Za programiranje mašine se planira upotreba standardnih *CAD/CAM* sistema uz poštovanje konvencija za mašine alatke o označavanju i smerovima osa;
- Zbog mogućnosti rekonfigurisanja mašine, neophodno je razviti virtuelno okruženje za simulaciju tehnoloških programa, otkrivanje i eliminaciju kolizija mašine sa radnim predmetom;
- Korisnički interfejs učiniti intuitivnim sa svim funkcijama za bezbedno upravljanje mašinom.

Implementacija virtuelne mašine u sistem upravljanja otvorene arhitekture (*LinuxCNC*), kao digitalnog blizanca, omogućava razvoj projektovanje i testiranje upravljačkog sistema u *OpenGL 3D* okruženju. Virtuelna mašina omogućava efikasnu verifikaciju programa *G*-koda, što uključuje sledeće:

- Vizuelno otkrivanje kolizija između pokretnih delova mašine kao i kolizija alata sa radnim predmetom i steznim priborom;
- Proveru da li mašina može da izvrši programiranu putanju alata u okvirima ograničenja koja se odnose na dužine hodova osa, kao i ograničenja maksimalnih brzina i ubrzanja.

Konfigurisanje virtuelne mašine kao digitalnog blizanca vrši se korišćenjem programskog jezika *Python*, koji omogućava modeliranje grafičkih primitiva mašine i integraciju razvijenih virtuelnih mašina alatki direktno u sistem upravljanja razvijen na bazi *LinuxCNC*-a. Osnova za konfigurisanje virtuelne mašine integrisane sa sistemom upravljanja, je bio virtuelni model mašine kompletiran u okruženju PTC Creo, a koji je pokazan na slici 2. Sve komponente modela mašine su pripremljene u STL formatu, koji se može uključiti u programsko okruženje Python jezika gde je i konfigurisana virtuelna mašina koja se integriše u sistem upravljanja, prema proceduri koja je pokazana u radovima [7] i [8]. Na slici 3 je pokazana virtuelna mašina integrisana sa grafičkim korisničkim interfejsom AXIS, gde se može videti uspešna simulacija rada mašine u obe konfiguracije, vertikalnoj i horizontalnoj.



Slika 3. *AXIS korisnički interfejs upravljačkog sistema sa integrisanim digitalnim dvojnikom mašine alatke.*

S obzirom na činjenicu da mašina ima dve konfiguracije, u kinematičkoj datoteci je bilo neophodno implementirati promenu toka izvršavanja kinematičkih algoritama u funkciji zadate orijentacije. Pored podataka o dužini i prečniku alata, kinematičkim funkcijama se posredstvom HAL-a (***H**ardware **A**bstraction **L**ayer*) iz tabele alata prosleđuje i podatak o zahtevanoj orijentaciji glavnog vretena. Tokom obrade, kada se zahteva manuelna izmena alata, u zavisnosti od potrebe, izmena alata je praćena i zakretanjem glavnog vretena. Tokom procedure program obrade je pauziran funkciom M6 praćenom brojem alata iz tabele alata i ponovo se pokreće kada operater posredstvom grafičkog interfejsa potvrdi da je obavio zahtevanu operaciju.

Konfigurisanje *LinuxCNC* softvera za upravljanje mašinom alatkom za obradu drveta, podrazumeva sledeću proceduru **Error! Reference source not found.**:

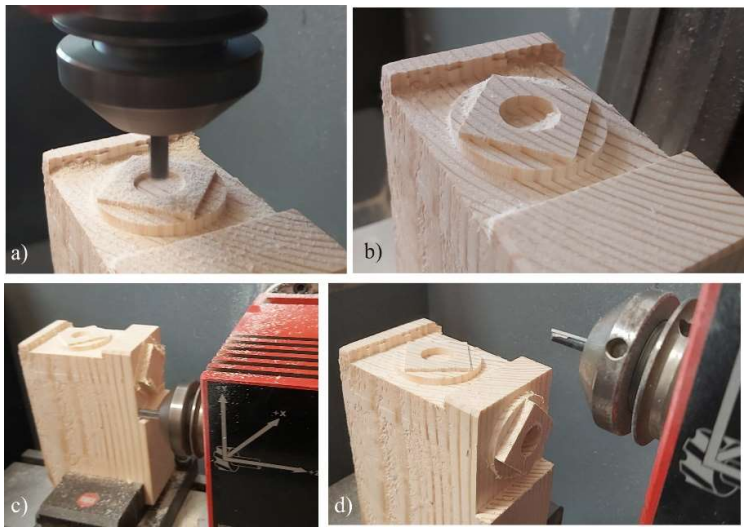
1. Kreiranje direktorijuma koji sadrži sve konfiguracione datoteke mašine;
2. Kreiranje konfiguracione (**.ini*) datoteke koja sadrži osnovne parametre mašine: opsege svih osa, maksimalne brzine i ubrzanja svih pojedinačnih osa, parametre za rad sistema u realnom vremenu itd.;

3. Kreiranje konfiguracionih (**.hal*) datoteka sa informacijama koje se odnose na kontrolu kretanja realne i virtuelne mašine;
4. Konfigurisanje hardvera upravljačkog sistema u smislu implementacije odgovarajućih interfejsa ka aktuatirima sa pripadajućim drajverima;
5. Implementacija i konfigurisanje virtuelne mašine alatke u okviru *LinuxCNC* sistema pomoću alata dostupnih u *OpenGL-Python 3D* okruženju.

3. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Primarni cilj izvedenih eksperimenata je da testiraju mogućnost razvijenog upravljačkog sistema otvorene arhitekture baziranog na LinuxCNC-u za upravljanje predmetnom mašinom. Ideja je bila da se demonstrira upotrebljivost digitalnog dvojnika za simulaciju obrade i online praćenje procesa obrade, mogućnost dinamičkog rekonfigurisanja upravljačkog sistema, odnosno obrada vertikalnom i horizontalnom konfiguracijim mašine u jednom tehnološkom programu. Pri tome je značaj verifikacije programa na digitalnom dvojniku mašine vrlo značajan, zbog provere same mogućnosti obrade i korektnog postavljanja i baziranja pripremka, tako da je obrada moguća sa raspoloživim hodovima osa mašine.

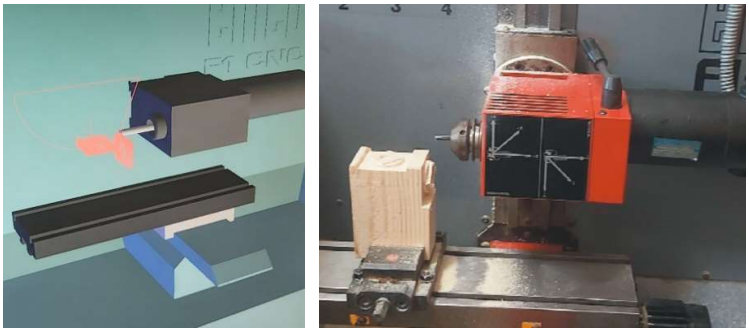
3.1 Testiranje mašine tokom obrade



***Slika 4**. Obrada probnih delova za obe konfiguracije mašine*

Verifikacija razvijenog sistema upravljanja otovorene arhitekture je izvršena obradom test probnog radnog predmeta, po uzoru na slične delove za ispitivanje radne tačnosti numerički upravljanih mašina alatki. Test radni predmet je specijalno konstruisan, tako da zadovolji granice radnog prostora obe konfiguracije mašine. Na slici 4 prikazana je obrada radnog predmeta u vertikalnoj i horizontalnoj konfiguraciji mašine, pri čemu je verifikovana mogućnost dinamičke rekonfigurabilnosti. Program obrade je sadržavao potprograme za obradu radnog predmeta u vertikalnoj i horizontalnoj konfiguraciji, razdvojene instrukcijom M6 za izmenu alata koji u tabeli alata sadrži podatak o orijentaciji alata B= -90°. Nakon izmene alata i manuelnog zakretanja motornog vretena za -90°, operater je potvrdivši da je operaciju završio signalizirao kinematičkom modulu da izvrši promenu toka izvršavanja, odnosno pređe sa vertikalnog na horizontalni kinematički algoritam.

3.2 Verifikacija kontrole digitalnog dvojnika



***Slika 5**. Digitalni dvojnik i realna mašina upravljani istim upravljačkim signalima*

Digitalni dvojnik mašine je iskorišćen za primenu nove metodologije „virtuelnog projektovanja“ upravljačkog sistema mašine alatke. Tokom razvoja mašine, implementiran je digitalni dvojnik kao egzaktna virtuelna kopija realne mašine u kinematičkom smislu. Kinematičke funkcije za rekonfigurabilnu mašinu su razvijene i testirane bez korišćena realne mašine.

Kompletna validacija funkcija

razvijenog upravljačkog sistema je omogućena integracijom svih razvijenih softverskih funkcija i hardverskih modula sa realnom mašinom alatkom. Pri testiranju, realna mašina i njen digitalni dvojnik prate tok istog programa obrade, pri čemu se realna i virtuelne ose kreću simultano u realnom vremenu kontrolisane istim upravljačkim signalima, slika 5.

4. ZAKLJUČAK

Najbitniji rezultati koji su predstavljeni u radu su: promenljiv tok izvršavanja kinematičkog algoritma mašine, dinamički rekonfigurabilan upravljački sistem i digitalni dvojnik. Razvijeni upravljački sistem predstalja nisko-budžetno brzo rešenje u slučajevima kada se javlja potreba za retrofitom, modernizacijom starih *CNC* mašina alatki. Otvorena arhitektura primenjenog softverskog sistema omogućava razvoj i implementaciju složenih kinematičkih funkcija za najrazličitije mašine alatke. U radu je predstavljena mogućnost primene digitalnog dvojnika u svrhu „virtuelnog projektovanja", odnosno validacije funkcija upravljanja. Predmetna mašina se koristi za istraživanja i edukaciju na Šumarskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu.

7. LITERATURA

[1] Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., and Stankovic, J.: *Cyber-physical systems: The next computing revolution,* Proceedings of the 47th ACM/IEEE, Design Automation Conference (DAC), str.731-736, Anaheim, CA, 13-18 June 2010; DOI: 10.1145/1837274.1837461.

[2] Dervojeda, K., Rouwmaat, E., Probst, L., and Frideres, L.: *Internet of Things: Smart Machines and Tools,* Business Innovation Observatory, European Commission, Brussels, Belgium, 2015; Contract No 190/PP/ENT/CIP/12/C/N03C01.

[3] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J.: *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, German Academy of Science and Engineering, Munich, Germany, 2013.

[4] Liu, C., and Xu, X.: *Cyber-physical machine tool - The era of machine tool 4.0*, Procedia CIRP 63, str.70-75, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.078.

[5] Hoffmann, P., Schumann, R., Maksoud, T. M. A., and Premier, G. C.: *Virtual commissioning of manufacturing systems: a review and new approaches for simplification,* Proceedings of the 24th European Conference on Modelling and Simulation, str. 175-181, 1-4 Jun, Kuala Lumpur, Malaysia.

[6] Lee, C. G., and Park, S. C.: *Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems*, Journal of Computational Design and Engineering 1(3), str. 213-222, 2014; DOI: 10.7315/JCDE.2014.021.

[7] Rakic, A., Zivanovic, S., Dimic, Z., Knezevic, M.: *Digital Twin Control of Multi-Axis Wood CNC Machining Center Based on LinuxCNC,* BIORESOURCES, vol. 16 br. 1, str. 1115-1130, 2021.

[8] Zivanovic, S., Dimic, Z., Rakic, A., Slavkovic, N., Kokotovic, B., Manasijevic, S.: *Programming methodology for multi-axis CNC woodworking machining center for advanced manufacturing based on STEP-NC,* Wood Material Science & Engineering, 2022; DOI:10.1080/17480272.2022.2057816

Dimić, Z., Pavlović D., Živanović, S., Furtula, M., Đurković, M.

DYNAMIC RECONFIGURABLE CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE FLOW OF EXECUTION OF KINEMATIC ALGORITHM

***Abstract**: The paper presents an open architecture control system implemented on a 3-axis CNC woodworking milling machine that can work in both vertical and horizontal configurations, as well as control over digital twin. The development of a control system through a digital twin is motivated by research and educational requirements. The considered CNC woodworking system is supported by an equivalent virtual machine in the control system as a digital twin. A configured virtual machine is used to simulate processing and verification of the control system. One test object is shown, which was processed in vertical and horizontal configuration to verify the effectiveness of the developed control systems based on LinuxCNC.*

Key words: *Reconfigurable machine tools, CNC woodworking milling machine, LinuxCNC, Digital twin.*

43. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

45. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA

Beograd, oktobar 2022.

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA

PRODUCTION CONTROL IN METALWORKING INDUSTRY

Karabegović, I., Husak, E., Karabegović, E., Mahmić, M.
ULOGA ROBOTSKE TEHNOLOGIJE I UTICAJ INDUSTRIJE 4.0 U FUNDAMETALNOJ TRANSPORMACIJI POSLOVNIH MODELA I PROCESA 4.1

Srećković, M., Janićijević, M., Jevtić, S., Ratković Kovačević, N., Malović, M.
KVANTNI GENERATORI U TEORIJI I PRAKSI 2022..... 4.10

Jovanović, R. J.
PROJEKTOVANJE PROIZVODNOG CIKLUSA SLOŽENOG PROIZVODA PRIMENOM TEHNIKA MREŽNOG PLANIRANJA 4.17

← NAZAD

43. JUPITER konferencija

Beograd 2022

45. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA

Karabegović, I.,[1] Husak, E.,[2] Karabegović, E.,[3] Mahmić, M.,[4]

ULOGA ROBOTSKE TEHNOLOGIJE I UTICAJ INDUSTRIJE 4.0 U FUNDAMETALNOJ TRANSPORMACIJI POSLOVNIH MODELA I PROCESA

Rezime

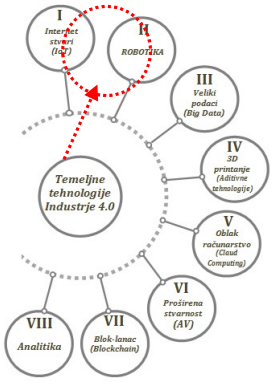
Poznato je Industrija 4.0 i njen fundamentalne tehnologije imaju ogroman uticaj u fundametalnoj transformaciji poslovnih modela i proizvodnih procesa, a to ćemo pokazati sa konkretnim primjerima u samom radu. Industrija 4.0 (koja se prvi put spominje 2011.godine na sajmu u Hanoveru) simbolizira dolazeću četrvrtu industrijsku revoluciji (kja je 2016.godine zvanično proglašena na svjetskom WEF) u kojoj imamo sve prisutniju mobilnost, premoštavanje digitalnog i fizičkog okruženja, konvergencije IT-ja i OT-ja, a sve implementacijom temeljnjih tehnologija četvrte industrijske revolucije. Kompanije implementirajući temeljne tehnologije Industrije 4.0 kao što su:3D štampanje, robotika, senzori, umjetna inteligencija (AI), internet stvari (IoT), veliki podaci, lanac blokova (blockchain), oblak (cloud),5G, dronovi, nanotehnologija, itd. modu da povećati svoju konkurentnost, a misli se na: bolju koordinaciju sa kupcima, bolji kvalitet proizvoda, smanjenje troškova proizvodnje i bolju usklađenost sa specifikacijama kupca ili regulatornim zahtjevima. Ubrzani razvoj senzorske tehnologije i robotske tehnplogije koje su informaciono komunikacionim tehnologijama dovede do inerakcije između ljudi, robota i samih mašina. U radu je dat analiza implementacije industrijskih robota u proizvodne procese u svijetu, kao i uticaj na smanjenje vremena izrade, smanjenje potrošnje energije pri izradi, smanjenje materijala za izradu proizvoda, smanjenje konačne cijene proizvoda - a konačnica je biti konkurentan na globalnom svjetskom tržištu

Ključne riječi:*Industrija 4.0,industrijski robot, servisni robot,proizvodni proces, konkurentnost*

1.UVOD

Poznato je da se sam termin Industrija 4.0 već široko koristi, a vezan je za različite proizvodne koncepte. Industrju 4.0 sa tehnološke perspektive treba shvatiti kao sve viću digitaliziju i automatiraciju proizvodnih procesa, odnosno proizvodnog okruženja i dizajn digitalnog lanca vrijednosti od proizvoda do kupca. Neki autori Industriju 4.0 nazivaju nova disruptivna tehnologija, a neizbježana je jer se svijet danas nalazi u svjetlu dinamične ere, a ona mijenja sam način proizvodnih procesa koji su trenutno u većini kompanija implementirani [1,2,4,5,20]. Koncept Industrije 4.0 definiraju mnoge tehnologije , nabrojimo neke koje su bazne, bez koji i ne bi bilo Industrije 4.0, a to su: internet stvari (IoT), veliki podaci (Big Data), robotika i automatizacija, računarstvo u "oblaku" (Cloud Computing), 3D štampanje, pametni senzori, radiofrekventna identifikacija (RFID), virtuelna i proširena stvarnost (AR), umjetna inteligencija (AI), napredni bezbjednosni sistemi, Cyber-Physical Sistemi (CPS), itd kao što pokazuje slika 1. [3].

Cyber-Physical Sistemi (CPS), Internet stvari (IoT), veštačka inteligencija (AI), aditivna proizvodnja, računarstvo u oblaku (Cloud Computing), i druge navedene tehnologije se zatim kombinuju da bi se konstruisale dinamične, u realnom vremenu optimizirane i samoorganizirajuće mreže vrijednosti među proizvodnim procesima i kompanijama, a sve nabojane komponente su neophodne za implementaciju Industrije 4.0.[1,2,8-13].



Slika 1. *Šematski prikaz dijela baznih tehnologija koje predstavljaju temelj Industrije 4.0*

[1] prof.dr Isak Karabegović, Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Bistrik 7., 71ooo Sarajevo (isak1910@hotmail.com)
[2] prof.dr Ermin Husak, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, ,77ooo Bihać,BiH (eminhusak@yahoo.com)
[3] prof.dr Edina Karabegović, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, 77ooo Bihać, BiH (edin-karabeg@hotmail.com)
[4] prof.dr Mehmed Mahmić, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, 77ooo Bihać,BiH (mmahmic@gmail.com)

. U narednom periodu zbog globalne konkurencije dolazi do implementacije Industrije 4.0 tako da će proizvodni sistemi doživjeti transformaciju i povećati svoje granice u pravcu:

- globalizacija – međusobno povezani lanci snabdjevanja, a samo tržište je po cijelom svijetu na svim kontinentima, a složenost upravljnja je u porastu;
- prilagođavanje – kupac je sve zahtjevniji i sam proizvod želi da se proizvod prilagodi njegovim specifičnim zahtjevima;
- fleksibilna automatizacije – instaliranje industrijskih i servisnih robota, prelazak sa ktute automatizacije na fleksibilnu, a starija je i radna snaga (npr. u Japanu, Zapadnoj Evropi, Rusiji i Kini) jer se prosječna starost radnika u proizvodnim procesima povećava, što ima za posljedicu otežano izvođenje zadataka i samim tim dobija se manja efikasnost;
- postali smo informaciono društvo u povezanom svijetu - novo ideje se brzo šire, ubrzavajući razvoj novih proizvoda, procesa i poslovnih modela, i stvaranje velike potražnje proizvoda koje je teško obezbijediti;
- u svijetu je u porastu populacija i srednja klasa – a sami demografski trendovi postiču rastuću potražnju za određenim proizvodima (kao što su automobili u Kini);
- održivi razvoj – prioritet postaje energetska efikasnost, smanjenje otpada i odgovorno korištenje prirodnih resursa.

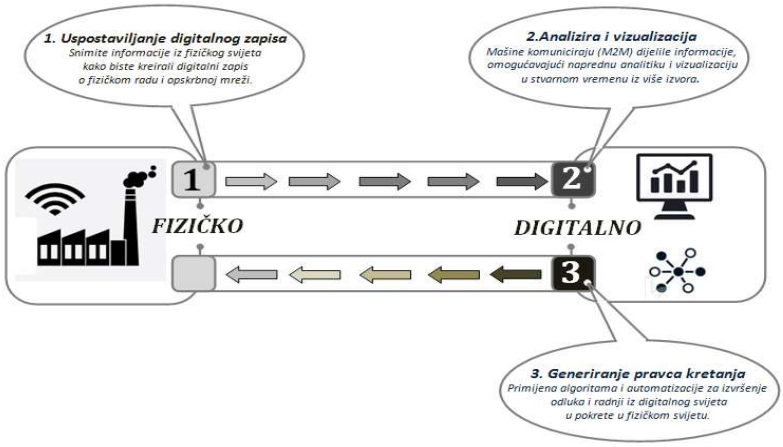
Da bi smo udovoljili i obezbijedili prethodno nabrojane činjenice neophodno je:

- svaki fizički proces koji je moguće automatizirati neophodno ga je fleksibilno automatizirati;
- u samom proizvodnom procesu što se može informisati, potrebno je informatizirati da se u svakom trenutku ima informacija, a isto tako da je kupac može imati;
- implementirati pamatne senzore i digitalne aplikacije i uređaje koji mogu biti od koristi za potunu informaciju, nadzor, kontrolu i distrubutivno donošenje odluka.

Navedene bazne tehnologije Industrije 4.0 i Kibernetičko-fizički sistemi su osnova Industrije 4.0, oni povezuju fizičke objekte, prostore i mašine, prikupljaju i analiziraju podatke i na osnovu njih donose odluke. Možemo da kažemo da koncept Industrije 4.0 uključuje i proširuje digitalno povezivanje u kontekstu fizičkog svijeta digitalnih poduzeća, to pokreće fizički postupak proizvodnje, preformansi i distribucije u neprekidnom ciklusu. Ovaj neprekidni ciklus je poznat pod nazivom fizičko-digitalna-fiziča petlja kao što pokazuje slika 2.

Kao što slika 2. pokazuje neophorno je snimati informacije pomoću senzora (u novije vrijeme se koriste pametni senzori) o fizičkom svijetu da bi smo kreirali digitalni zapis o fizičkom svijetu. Unutar proizvodnog procesa mašine sa mašinom komunicira (M2M) i međusobno dijele informacije, a to nam omogućuje analiziranje i vizualizaciju samog proizvodnog procesa odnosno fizičkog svijete. Posjedovanjem svih informacija o fizičkom svijetu u mogućnosti smo da generiramo pravce kretanja.

Korištenjam razvijenih algoritama možemo automatizovano do donosimo odluke, drugim rječima poduzimanje radnji iz digitalnog svijeta vršimo pokrete u fizičkom svijetu. Ako gledamo sa tehnološke strane Industrija 4.0 treba shvatiti kao sve veću digitalizaciju i automatizaciju proizvodnih procesa, kao i dizajn digitalnog lanca vrijednosti između proizvoda, radnog okruženja i samoih kupaca [6,7,8].



Slika 2. *Grafički prikaz fizičko-digitalno-fizičke (PDP) petlje*

Za implementaciju Industrije 4.0 postoje ključni preduslovi koje neophodno napravite [20]:

- vertikalna integracija i umrežavanje proizvodnih sistema, sa ciljem osiguranja inteligentno i integrirano proizvodno okruženje sve zahvaljujući integraciji ICT infromaciono komunikacionoj tehnologiji i njenoj konzistenciji unutar kompanije, od područja razvoja preko proizvodnog procesa, logistike do same prodaje;
- horizontalna integracija tako što će se obezbijediti umrežavanje informacioni tehnologija, procesa i sami tokova podataka među samim kompanijama, dobavljačima, poslovnim partnerima na način da se promovira intenzivna saradanja koja je zasnovana na partnerstvu unutar lanca vrijednosti;
- u okviru procesa kompletnog lanca vrijednosti neophodna je kontinuirana i digitalna integracija inženjeringa, i na taj način da se omogući visoki stepen dizajna krajnjih proizvoda koji su orjentisani prema samom kupcu, a cilj je da se na taj način omogući ušteda vlastiti troškova u samoj kompaniji.

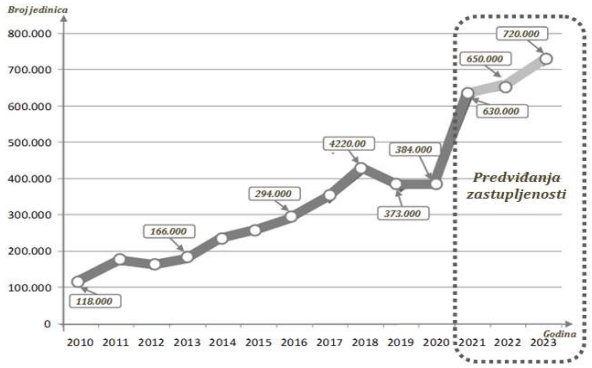
Implementacijom Industrije 4.0 se zamljenjuje tradicionalna struktura, koja se zasnivala na centralizovanim mehanizmima kaka je u pitanje donošenje odluka i ograničenja pojedinačnih koraka tamo gdje se stvara dodata vrijednost, sa novom strukturom,

odnosno fleksibilnim proizvodnim sistemima koji imaju mogućnos rekonfiguracije, koji su interaktivni, kolaborativni i inteligentni, a donošenje odluka je spušteno na niže razine.

2. ULOGA ROBOTSKE TEHNOLOGIJE U IMPLEMENTACIJI INDUSTRIJE 4.0

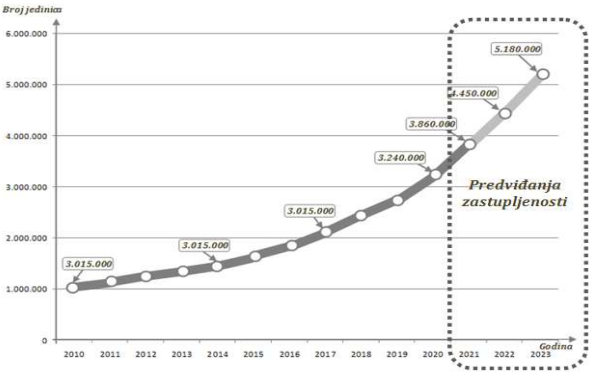
2.1 Trend implementacije industrijskih robota u svijetu

Na osnovu slike 1. u bazne tehnologije Industrije 4.0 je robotska tehnologija i automatizacije, a razlog je vrlo jasan jer bez robotske tehnologije nema implementacije Industrije 4.0. Robotska tehnologija je zaslužna za automatizaciju proizvodnih procesa. Automatizacija proizvodni procesa počinje u doba treće industrijeske revolucije 60.godina prošlog stoljeća, sa uvođenje prvi industrijskih robota u proizvodne procese. Da bismo dobili potpunu sliku o ulozi robotske tehnologije u implementaciji Industrije 4.0 napravljena je analiza implementacije industrijskih robota u proizvodnim procesima u svijetu u posljednjih deset godina. Primjene industrijskih robota na godišnjem industrijama prikazana je na slici 3., a podatke smo preuzeli od Međunarodna federacija robotike (IFR) Ekonomska komisija Ujedinjenih Nacija za Evropa (UNECE) i Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj (OECD) [22-31] Analizom dijagrama zastupljenosti industrijskih robota u svijetu u periodu 2010-2020. godina, koji je prikazan na slici 3., dolazimo do zaključka da se zastupljenost robota u industriji kontinuirano povečava iz godine u godinu. U 2010.godini implementirano je oko 118.000 jedinica industrijski robota, za osam gosina implementacija se povećala na oko 422.000 jedinica robota u 2018.godini, što predstavlja zastupljenost 3,5 puta veću za samo osam godina. Poznato je da je u Svijet u 2019 godini počela pandemija virusa CORONA-19 što se odrazilo na zastupljenost industrijskih robota, tako da je u 2019.godini zastupljenost iznosila 373.000 jedinica robota, a isto tako i 2020.godine zastupljenost je iznosila 384.000 jedinica robota.



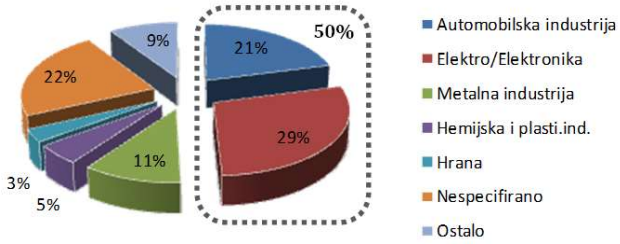
Slika 3.*Dijagram zastupljenost robota u industriji u svijetu na godišnjem nivou u periodu 2010-2020, i predviđanjima zatupljenosti do 2023.godine[22-31]*

Zastupljenost industrijskih robota za vrijeme pandemije CORONA-19 je smanjena za oko 10%. Nakon pandemije CORONA-19 dolazi do oporavka proizvodnje i samim tim i povećanja zastupljenosti, tako da su predviđanja Međunarodne federacije robotike (IFR) da će se zastupljenost povećavati svake godine, a u 2023 godini očekuje se zastupljenost oko 720.000 jedinica industrijskih robota. Interesantno je vidjeti prent primjene industrijski robota u svijetu na ukupnom nivo u posljednjim godinama, tako da je ukupni trend primejne industrijskih robota prikazan na dijagramu 4.



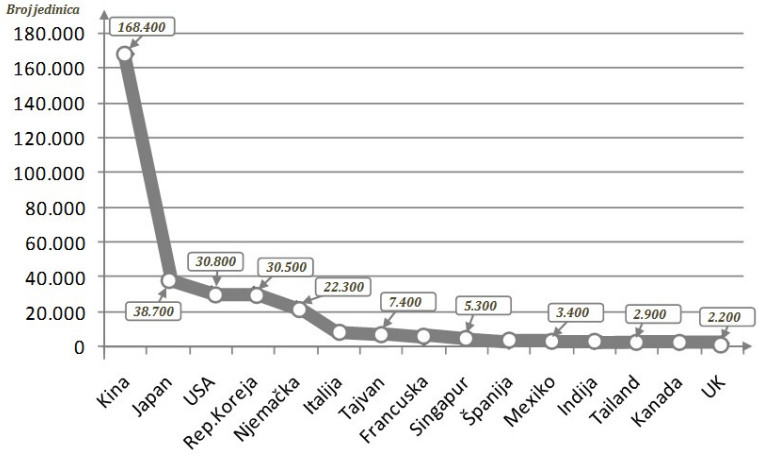
Slika 4. *Dijagram ukupne zastupljenost robota u industriji u svijetu u periodu 2010-2020, i predviđanja ukupne zatupljenosti do 2023.godine[22-31]*

Na osnovu dijagrama prikazanog na slici 4. zaključujemo da se kontinuirano povećava zastupljenost robota u industriji u svijetu svake godine. U 2010.godini u svijetu u proizvodnim procesima industrije je ukupno bilo zastupljeno oko 3.015.000 jedinica industrijskih robota, a za osam godina došlo je do povećanja tako da je u 2018.godini zastupljenst isti iznosila 3.240.000 jedinica robota. Predviđanja Međunarodne federacije robotike (IFR) da će se ukupna zastupljenost sve više povećavati svake godine i u 2023.godini dostići na oko 5.180.000 jedinica industrijskih robota. Možemo da zaključimo da se od 2016. Godine više povećava ukupna zastupljenost industrijski robota u prozvodnim procesima, trend zastupljnosti prelazi u eksponencijalnu funkciju (slika 4.), a razlog tome je upravo implementacija Industrije 4.0, gdje kompanije u svijetu žele zadržati visoko mjesto na globalnoj konkurenciji u svijetu. Interesantno je vidjeti u kojim granama industrije je najviša zastupljenost industrijskih robota u svijetu, na šta nak odgovor daje dijagram prikazan na slici 5. za 2020.godimu.



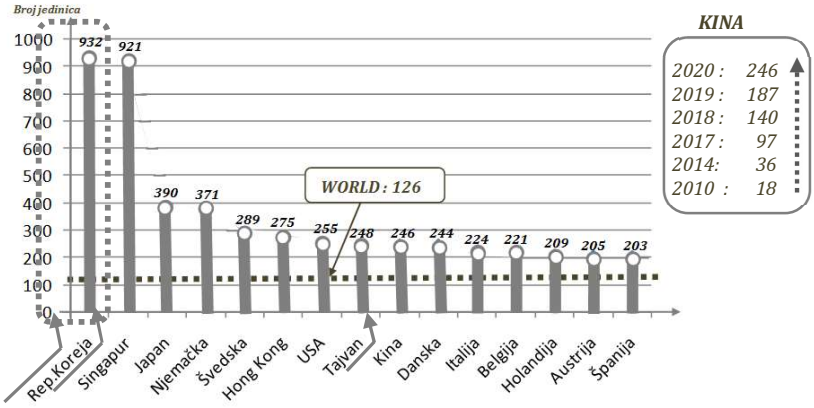
Slika 5. *Dijagraam procentualna zaspupljenost industrijskig robota u svijetu u industrijskim granama za 2020.godinu [22]*

Dijagram na slici 5. prikazan ukazuje nam na dvije industrije u kojima preovladava zastupljenost industrijskih robota u 2020.godini, a to su elektro/elektonička industrija u kojoj je oko 109.000 jedinica robota, odnosno 29% zatupljeno robota od ukupne zastupljenosti u 2020.godini, na drugom mjestu je automobilska industrija u kojoj je oko 80.000 jedinica robota, odnosno 20,8% zastupljeno robota za istu godinu. U ove dvije industrije skupa se implementira 49,8% implementira industrijskih robota u svijetu, odnosno mož se konstatovati da ove dvije industrije imaju oko 50% zatupljenosti industrijskih robota u svijetu. Na trećem mjestu je metalna industrija sa oko 11% , kada spojimo automobilsku i metalnu industriju imamo zastupljenost industrijskih robota u svijetu oko 31,2% što predstavlja najveću zastupljenost industrijskih robota u svijetu. Ovakav je trend zastupljenosti industrijskih robota po industrijama u svijeti i očekivan iz dva razloga. Prvi razlog je što su ove dvije industrije automobiska/metalna i elektro/elektronička nalaze u razvijenim zemljama, većina proizvodnih procesa se automatizira, imaju velike konkurentne i bore se za svoju poziciju na tržištu. Drugi razlog što ove industrije ulazu u istraživanje i razvoj i implementiraju inovacije i patente u proizvodne procese, a u posljednjim godinama ubrzano rade na implementaciji Industrije 4.0 u svojim proizvodnim procesima, a cilj je isti biti konkurentan na globalnom tržištu. Trend zastupljenosti industrijskih robota u petnaest top zemalja u svijetu u 2020.godini prikazan je na slici 6.



Slika 6. *Dijagram zastupljenosti industrijskih robota u petmaest top zemalja u svijetu u 2020.godini[22]*

Analizom dijagrama prikazanog na slici 6. uočavamo da je je ispred svih na prvom mjestu zemlja Kina koja u kojoj je primjena u 2020.godini iznosila oko 168.400 jedinica industrijskih robota, na drugom mjestu je Japan sa primjenom oko 38.700 jedinica industrijskih robota. Grupa zemalja USA, Republika Koreja i Njemačka u 2020.godini su implementirale oko 30.000- 22.000 jedinica robota zavisno od zemlje kao što pokazuje slika 6. Kod ostale grupe deset zemalja koje predstavljaju top zemlje primjene robota u svijetu u 2020.godini implementacija se kreće oko 7.400- 2.200 jedinica industrijskih robota, Italija je na čelu sa primjenjenih oko 7.400 jedinica robota, a Uk je na petnaestom mjestu sa oko 2.200 jedinica primjenjenjih robota.Jako je interesantno vidjeti u kojim zemljama u svijetu zastupljenost industrijskih robota u proizvodnim peocesima najveća, a tu informaciju dobijamo na osnovu gustuće industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnim procesima. Analizu smo preuzeli od Međunarodne federacije robotike (IFR) za 2020.godinu i prikazali je na slici 7. Na osnovu dijagrama gustoće industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u industriji slika 6. zaključujemo da je svjetski prosjek u 2020. godini iznosio 126 jedinica robota. Prikazano je petnaest top zemalja čiji je prosjek veći od svjetskog, i vidimo da na prvom i drugom mjestu se izdvajaju dvije zemlje: Republika Koreja sa najvećim gustićom jedinica robota 932 na 10.000 zaposlenih radnika u industriji, Singapur sa gustinom 921 jedinica robota. Ove dvije zemlje se naizmjećno izmjenjuju u vođstvu. Poslije ove dvije zemlje ostali trinaest top zemalja poredati od veće gustine industrijskih robota ka manjoj gustini je: Japan 390, Njemačka 371, Švedska 289, Hong Kong 275, USA 255, Tajvan 248, Kina 246, Danska 244, Italija 224, Belgija 221, Holandija 209, Austrija 205 i Španija 203. Ovdje moramo izdvojiti Kinu koja samo prije nekoliko godina je bila ispod svjetskog prosjeka po gustini industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u industriji, na primjer gustina industrijskih robota je iznosila 18 na 10.000 zaposlenih u 2010.godini , gdje je svjetski prosjek gustine robota iznosio 51.

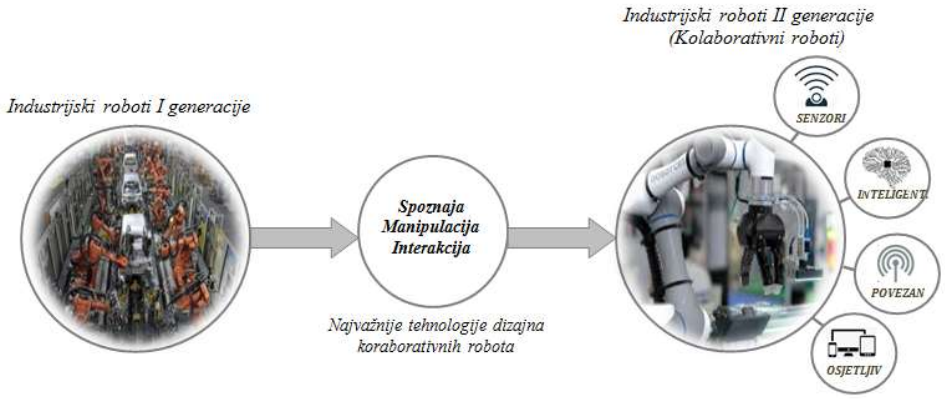


Slika 7. *Dijagram gustoće industrijskh robota u industriji na 10.000 zaposlenih radnika u petnaest top zemalja u svijetu za 2020 godinu [22]*

U posljednjim godinama Kina je prva u svijetu po implementaciji industrijskih robota u proizvodne procese, a prešla je svjetski prosjek gustine robota u posljednjim godinama, tako da je u 2020.godini gustina robota u Kini iznosila 246, što je veće od svjetskog prosjeka gustine za 95,2%. Ovakav trend rasta gustine robota na 10.000 zaposlenih u industriji je očekivan iz razloga što je cijena rada u Kini kontinuirano povećava tako da kompanije idu u automatizaciju proizvodnih procesa. Drugi razlog je što je Vlada Kine usvojila strategiju „Made in China 2025“ koji trenutno implementira, a po strategiji do 2025.godine želi da bude tehnološki najrazvijenija zemlja u Svijetu.

2.2. Trend implementacije industrijskih robota II generacije-kolaborativnih robota u svijetu

Kao što je poznato industrijski roboti razvijaju se od 60.godina prošlog vijeka, i koriste se sve do danas. Moramo ih ograđivati sa posebnim pregredama da se zaštiti radni prostor, jer su programirani na izvršavanje zadataka i postoji mogućnost da oštete radika ako se nađe u njihovom radnom prostoru. To je automatizaciju činilo skupljom, krutom i nefleksibilnom. Razvoj novih tehnologija kao što su: informaciono-komunikacione tehnologije, senzorska tehnologija, robotska tehnologija razvijeni su industrijski roboti II generacije pod nazivom kolaborativni roboti. Kobaleritvi roboti u robotskoj industriji trenutno predtavljaju top temu istraživanja u svijetu, a cilj je da radnici mogu bezbjedno skupa da rade sa robotima, koji će pomagati ljudima u izvršavanju njihovi dnevnih poslova, ali bez ikakvog rizika [14-21]. Moramo napomenuti da koleborativni roboti nisu predviđeni da u potpunosti zamjene radnike, nego da rade skupa sa radnikom i da se uklone ograde u proizvodnim procesima, koje trenutno postoje kojima su ograđeni industrijski roboti prve generacije. U samo radu čovjek može izvodi različita polja rada, vrlo kompleksne operacije i analitičke zadatke, dok kolaboratvni robot je jednostavan za rad, obavlja monotone ponavljajuće operacije, može da rukuje opasnom materijom, kao i da podiže teške premete, a različitosti radnika i robota su prikazane na slici 8. Primjene kolaborativnih robota ime velike prednosti u odnosu na industrijske robote i generacije, smanjenje radne površine za izvođenje zadataka, imajuveliku osjetljivost jer ima ugrađene napredne senzore kao što su senzore integralne sile i obrtnog momenta, kao i senzore vizualne koji obezbjeđuju siguran radni prostor i zaštitne zone, bezbjedno otkrivanje sudara, kao i nadzor sigurne sile, itd. Kolaborativni robot se lako može programirati za upotrebu obavljanja različitih zadataka što mu daje veći fleksibilnost [32-34].



Slika 8. *Razvoj industrijskh robota II generacije-kolaborativni robota, tehnologije dizajna i njihove sposobnosti [34]*

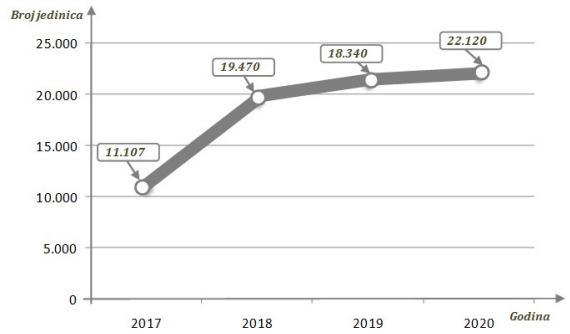
Industrijski roboti II generacije-kolaborativni roboti imaju i specifične prednosti u odnosu na robote I generacje, nabrojati ćemo samo nekoliko kao:

- Industrijski roboti II generacije- kolaborativni roboti se odlikuju jednostvnšću za rukovanje,
- Industrijski roboti II generacije- kolaborativni roboti rade skupa sa radnicima i sigurni su za rad sa radnicima,

- Implementacijom industrijskih robota II generacije-kolaborativnih robota omogućujemo znatno poboljšavaju preformanse pri podjeli izvođenja operacija između radnika i robota,
- Možemo sa njihovom implementacijom ne-ergonomske radne stanice značajno poboljšati,
- Njihovom implementacijom u proizvodnim procesima imamo mogućnost raznih nivoa automatizacije,

tako da možemo zadatke djelimično automatizirati u onim slučajevima kada je potpuna automatizacija suviše kompleksna ili nije ekonomična,

- Industrijski roboti II generacije- kolaborativni roboti imaju najznačajniju ulogu u Industrija 4.0, što otvara buduće perspektive u globalnoj proizvodnji,
- Smanjenje životnog ciklusa proizvoda i povećanje raznovrsnosti proizvoda zahtevaju fleksibilnost automatizacija, što će imati za posljedicu povećanja primjene kolaborativnih robota, ali pojednostavljenja - pripremljene za korišćenje aplikacija su sve popularnije, tako da će kupci imati za posljedicu povećanje primjene kolaborativnih robota u malim i srednjim preduzećima.

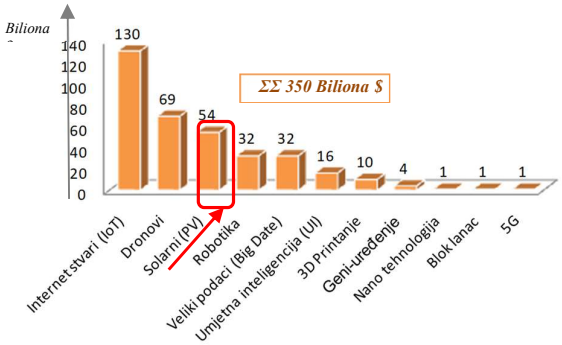


Slika 9. *Zastupljenost industrijskih robota II generacije- kolaborativnih robota u svijetu u periodu 2017-2020 godine [22-25]*

Osnov implementacija "Industrije 4.0" je robotska tehnologija, odnosno implenentacija industrijski roboti II generacije-kolaborativni roboti u proizvosne procese. Da bi kompanija bila konkurentna na globalnom tržištu neminovno je da ide u pravcu implementacije "Industrije 4.0" što će imati za posljedicu povećanja primjene kolaborativni robota. Prilikom primjene kolaborativnih robota kompanije imaju slijedeće motive: smanjenje operativnih troškova, smanjienje kapitalnih troškova, poboljšanje kvaliteta proizvoda i konzistentnosti, poboljšati kvalitet rada za radnike, poštujući pravila o zdravlju i bezbednosti, povećanje stope proizvodnje, povećanje fleksibilnosti u proizvodnji proizvoda, ušteda prostora, itd. Trend implementacije industrijskih robota II generacije- kolaborativnih robota u posljednje četiri godine prikazana je na slici 9. Trend zastupljenosti industrijskih robota II generacije- kolaborativnih robota u posljednih četiri godina je rastući. Na osnovu slike 9. zaključujemo da je u 2017.godini primjenjeno oko 11.000 jedinica kolaborativnih robota, svake godine je u porastu tako da je u 2020.godini primjenjeno oko 22.000 jedinica kolaborativih robota. Sama implementacija Industrije 4.0 i razvoj novih tehnologija predviđa se i očekivati je da će u budućnosti trend primjene kolaborativnih robota imati rastući trend.

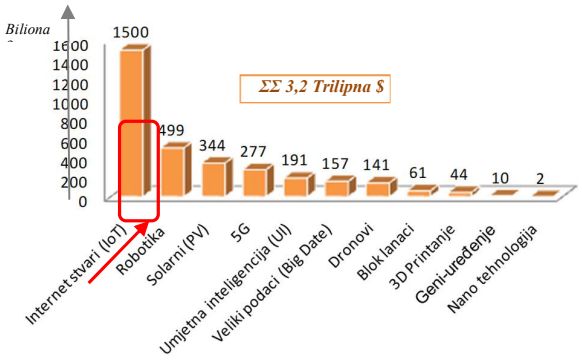
2.3. Robotska tehnologija kao bazna tehnologija Industrije 4.

Samom implementacijom Industrije 4.0, odnosno navedenih baznih tehnologija (koje smo prikazali na slici 1.) kompanije povećavaju fleksibilnost proizvodnih procesa, upravo je to ono što danas traži globalno tržište, povećava se sam kvalitet proizvoda i produktivnost, a isto tako navedene tehnologije omogućuju praćenje vijeka proizvoda sve do njegove reciklaže. Bazne tehnologije Industrije 4.0 na tržištu 2018.godine u svijetu su ostvarile oko 350 milijardi dolara kao što pokazuje slika 10. Na prvom mjestu je Internet stvari (IoT) tehnologija koja je ostvarila na pržištu oko 130 milijardi dolara, dok je robotika kao tehnologija na četvrtom mjestu sa ostvaranom vrijednošću oko 32 milijardi dolara.



Slika 10. *Vrijednosti koje su ostvarile bazne tehnologije Industrije 4.0 na svjetskom tržištu u 2018.godine*

Svake godine tržište navedenih tehnologija se uvećava, a prema [34] predviđanja su da će u 2025. godini iznositi kao na slici 11.



***Slika 11**. Previđene vrijednosti koje će ostvarile bazne tehnologije Industrije 4.0 na svjetskom tržištu u 2025.godine*

Previđene vrijednosti koje će ostvarile bazne tehnologije Industrije 4.0 na svjetskom tržištu u 2025.godine iznosi oko 3,2 triliona dolara. Vidimo da je na prvom mjestu opet Internet stvari (IoT) tehnologija koja će ostvarila na pržištu oko 1.500 milijardi dolara, dok je robotika kao tehnologija na čdrugom mjestu koja če ostvariti vrijednost oko 499 milijardi dolara. Robotska tehnologija na osnovu uvida njene vrijednosti na tržištu vidimo da postaje jedna od vodećih tehnologija Industrije 4.0 i bez nje nema implementacije Industrije 4.0.

3. ZAKLJUČAK

Dolazimo do zaključka da Industrija 4.0 koristi snagu ljudskog mozga, spaja informacionim tehnologijama industrijske aktivnosti tako da je to njena glavna komponenta. Implementacijom Industrije 4.0 moramo ostvariti da savremeni proizvodni sistemi moraju biti fleksibilni/agilni, integrisani, reaktivni, i isplativi istovremeno kako bi industrijskim kompanijama omogućili da ostanu globalno konkurentne u globalnoj konkurenciji. Od velikog broja temeljnijih tehnologija (preko 40 po nekim autorima) Industrije 4.0 izdvojimo one osnovne: internet stvari (IoT), Industrijski internet (IioT), pohrana podataka u oblaku, robotika, automatizacija, inteligentni senzori, 3D printanje, radio frekventna indentifikacija (RFID), kognitivno računarstvo, umjetna inteligencija, itd. Sajber fizički sistem (CPS) i Internet stvari (IoT) tehnologije omogućuju veće mogućnosti za širu i otvoreniju integraciju u kompaniji koja obuhvata tri nivoa integracije: horizontalna integracija, vertikalna integracija i treći nivo integracije može se kazati s kraja na kraj integraciju proizvodnje. Trend implementacije industrijskih robota u svijetu u posljednjih deset godina je u porastu kao što pokazuju slike 3 i slika 4., a nastaviti će se povećanjem primjene robota u idućim godinama upravo zahvaljujući implementaciji Industrije 4.0. Dvije industrije su u svijetu vodeće po primjeni industrijskih robota i to elektro/elektronička industrija i automobilska industrije koje su u 2020.godini 50% primjenilo industrijskih robota. Na prvom mjestu po primjeni je zemlja Kina sa oko 168.400 jedinica robota. Kina je u posljednim godinama uvjek prva u svijetu po implementaciji robota, a razlog za to je:

- cijena radne snage u Kini je u posljednjim godinama u porastu, te se mnoge komapanije odlučuju za automatizaciju,
- Vlada Kine implementacija strategije pod nazivom „Made in China 2025“ gdje želi da postane do 2025.godine tehnološki najrazvijenija zemlja u svijetu, i
- Kina je prva u svijetu po proizvodnji automobila gdje se najviše industrijski roboti koriste.

Analizom gustoći robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnim procesima izdvojiti dvije zemlje u svijetu to su Republika Koreja i Singapur koje su vodeće zemlje u svijetu, gdje je na prvom mjestu Reublika Koreja sa 932 gustinom robota i Singapur sa 921 gustinom robota dok je svjetski prosjek 126 gustine robota, što znači da u ove dvije zemlje proizvodni procesi najviše automatizirani. Najveći napredak je imala zemlja Kina koja je u 2010.godini imala 18 gustinu robota na 10.000 zaposleni radnika u industriji isod svjetskog prosjeka, a 2020.godini tren rasta na 246 gustina robota što je iznad svjetskog prosjeka.Posljednje četiri godine dolazi do trenda rasta primjene industrijskih robota II generacije-kolaborativni robota, sa predpostavkom da će trend u budućnosti rasti a razloga je implementacija Industrije 4.0. Robotska tehnologija je bazna tehnologija u Industriji 4.0, a na to nas upućuje i istraživanja koja pokazuju da se vrijednost koje će ostvarile robotska tehnologija kao bazne tehnologije Industrije 4.0 na svjetskom tržištu u 2025.godine, a taj iznos je oko 499 milijardi dolara.Robotska tehnologija ima svijetlu budućnost u narednim godinama.

4. LITERATURA

[1] Karabegović, I.,Kovačević, A., Banjanović-Mehmedović,L.,Dašić,P.:Integrating Industry 4.0 in Busniess and Manufacturing, IGI Global,Hershey, PA, USA, (2020) https://www.igi-global.com/book/handbook-research-integrating-industry-business/237834

[2] Schwab, K.: The Fourth Industrial Revolution, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, (2016)

[3] Karabegović Isak, Karabegović Edina, Mahmić Mehmed, Husak Ermin, The Implementation of Industry 4.0 by Using Industrial and Service Robots in the Production Processes**,** Chapter 1. Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing, IGI Global, USA, pp.1-30, (2020), DOI: 10.4018/978-1-7998-2725-2.ch001
[4] Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Michalos, G., Georgoulias, K.: Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook**,** Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, pp.451–462(2009) http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM1241
[5] Karabegović Isak and Karabegović E., **The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0,***International Journal of Robotics and Automation Technology*,Vol.6., 40-46, (2019) (https://www.zealpress.com/;
[6] Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013) Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the INDUSTRIE 4.0 Working Group, Vol. 4.
[7] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H-G.(2014) Industry 4.0, Follow Journal, Business & Information Systems Engineering 6(4) pp.249-242; DOI 10.1007/s12599-014-0334-4 (2014)
[8] Wang, K.: Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) system—Industry 4.0 scenario. WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 113, pp.259–268 (2016) www.witpress.com,doi:10.2495/IWAMA150301
[9] Muller, J.M., Buliga, O., Voigt, K.I.: Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change, Vol.132,Iss.C, pp.2–7 (2018) DOI: 10.1016/j.techfore.2017.12.019
[10] Isak Karabegović The Role of Industrial and Service Robots in Fourth Industrial Revolution with Focus on China ,Journal of Engineering and Architecture ,Vol. 5, No. 2, pp. 110-117 , (2017) DOI: 10.15640/jea.v5n2a9 URL: https://doi.org/10.15640/jea.v5n2a9
[11] Edina Karabegovic, Isak Karabegovic, Edit Hadzalic (2012),Industrial Robot Application Trend in World's Metal Industry *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics,* , 23(4), 368-378 ,http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.23.4.2567
[12] Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In Proceedings of the IEEE 2016, 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, USA, pp. 3928–3937 (2016), http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2016.488
[13] Thoben, K.D.; Wiesner, S.; Wuest, T. Industrie 4.0 and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. International Journal Automation Technology , Vol.11, pp.4–16 (2017) https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004
[14] Karabegović,I.: The Role of Industrial and Service Robots in the Fourt Industrial Revolution, ACTE Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering,University Politehnica Timisoara,Tome XI, Fascicule 2. April 2018. Hunedoara,Romania, pp.11-16 (2018) http://acta.fih.upt.ro/pdf/2018-2/ACTA-2018-2-01.pdf
[15] Karabegović. I., Karabegović, E**.,** Mahmić, M., Husak, E.: The application of service robots for logistics in manufacturing processes, Advances in Production Engineering & Management, Vol. 10. No. 4. 2015,Maribor, Slovenia, EU, pp. 185-194 (2015)https://www.apem-journal.org/Archives/2015/APEM10-4_185-194.pdf
[16] Karabegović, I., Karabegović , E., Mahmić, M., Husak, E.: Implementation of Industry 4.0 and Industrial Robots in Production Processes In: Isak Karabegović (eds) New Technologies,Development and Application II 2019. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Nature Switzerland AG 76, pp.96-102 (2020)
[17] Karabegović, I., Husak, E.: Industry 4.0 based on Industrial and Service Robots with Application in China, Journal Mobility and Vehicle,44(4), pp.59-71 (2018)
[18] Karabegović, I.: The Role of Industrial and Service Robots in Fourth Industrial Revolution with Focus on China,Journal of Engineering and Architecture, 5(2), pp.110-117 (2017)
[19] Mićič, V.:Industry 4.0 Development Conditions in the Republic of Serbia,Journal facta Universitatis, Economcs and Organization,Vol.17.,No 2. pp.97-112 (2020) https://doi.org/10.22190/FUEO191112008M
[20] Ostrgaard, E.: Collaborative Robot Technology and Applications, International Collaborative Robots, Workshop, Columbia, (2015)
[21] Karabegović I.,Husak E.,Predrag D.:The Role of Service Robots in Industry 4.0 - Smart Automation of Transport,International Scientific Journal Industry 4.0, Vo.4. Iss.6. pp.290.292 (2019)https://stumejournals.com/journals/i4/2019/6/290
[22] World Robotics 2020,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2020) https://ifr.org/
[23] World Robotics 2019,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2019) https://ifr.org/
[24] World Robotics 2018,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2018) https://ifr.org/
[25] World Robotics 2017,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2017) https://ifr.org/
[26] World Robotics 2016,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2016) https://ifr.org/
[27] World Robotics 2015,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2015) https://ifr.org/

[28] World Robotics 2014,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2014) https://ifr.org/
[29] World Robotics 2012,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2012) https://ifr.org/
[30] World Robotics 2011,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2011) https://ifr.org/
[31] World Robotics 2010,Industrial Robots, Service Robots, The International Federation of Robotics, Statistical Department, Frankfurt am Main, Germany ,(2010) https://ifr.org/
[32] Chukalov, K. Horizontal and vertical integration, as a requirement for cyber-physical systems in the context of industry 4.0. Industry 4.0, 2(4), pp.155-157 (2017)
[33] Collaborative Robot Safety,https://www.robots.com/articles/collaborative-robot- safety [Accesed: 04.07.2022]
[34] Karabegović Isak, Karabegović Edina, Mahmić Mehmed, Husak Ermin, The Implementation of Industry 4.0 in the Function of Application of Industrial and Service Robots in Production Processes, International Scientific Conference, Application of Industriy 4.0 on Opportunity for a New Step Forward in All Industrial Branches, 14 April, 2022, Special Editons, Volume CCII, Department of Technical Sciences, Volume 20, ANU B&H, pp.103-117; DOI:10.5644/PI2022.202.24; https://www.anubih.ba/images/news/PDF/20220526_Aplikacija_industrije_4.pdf

Karabegović, I.,[1] Husak, E.,[2] Karabegović, E.,[3] Mahmić,M.,[4]

THE ROLE OF ROBOTIC TECHNOLOGY AND THE INFLUENCE OF INDUSTRY 4.0 IN FUNDAMETAL TRANSMISSION OF BUSINESS MODELS AND PROCESSES

Abstract: *It is known that Industry 4.0 and its fundamental technologies have a huge impact on the fundamental transformation of business models and production processes, and we will show this with concrete examples in the paper itself. Industry 4.0 (first mentioned in 2011 at the Hanover Fair) symbolizes the coming fourth industrial revolution (which was officially proclaimed at the WEF in 2016) in which we have increasing mobility, bridging the digital and physical environment, IT/OT convergence, all by implementing the core technologies of the fourth industrial revolution. Companies implementing the core technologies of Industry 4.0 such as: 3D printing, robotics, sensors, artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), big data, blockchain, cloud, 5G, drones, nanotechnology, etc. to be able to increase its competitiveness which means: better coordination with customers, better product quality, reduced production costs and better compliance with customer specifications or regulatory requirements. The accelerated development of sensor technology and robotic technologies that are information and communication technologies has led to interaction between humans, robots and machines themselves. The paper analyzes the implementation of industrial robots in production processes in the world, as well as the impact on reducing production time, reducing energy consumption in production, reducing product materials, reducing the final price of products - and ultimately be competitive in the global market.*
Keywords: *Industry 4.0, industrial robot, service robot, production process, competitiveness.*

Srećković, M., Janićijević, M., Jevtić, S., Ratković Kovačević, N., Malović, M. [1]

QUANTUM GENERATORS IN THEORY AND PRACTICE 2022

Abstract

The application of lasers/quantum generators for various purposes (toys/pacifiers, heavy/rocket industry/Space) has changed the millennium, and the trend is growing.In terms of education, doctorates (laser stations/design (SFRJ, Serbia)) have been arriving since the first days. Today there is no precision in the definition: new, started a long time ago; it is stated that lasers are in all areas of life (medicine, defense, mass media). It is basically the interaction of materials and lasing or facts/circumstancesthat lead/or don't to laser damage.Applications have gone far: theoretical, experimental; commercial "leads" no longer state that the process is based on a laser. The work will be limited to several areas (more exotic/potentially newer types of pumping, description of parameters). The interaction is looked at: through experiment, simulation through the case of scattering and temperature distribution and by choosing an area, where a deeper understanding is needed in this broad issue.

Key words: lasers, *characterization of materials, quantum generators, pumping, laser material*

1. MODELING OF INTERACTION AND DEPENDENCIES OF PROCESSING QUALITY

There are several types of laser-material interaction models. In the broadest sense of the topics, the processes of scattering, absorption and reflection are also considered, but most often it is about: thermal model, similarity model, models that take into account the recoil processes (which are important for aviation, but also corrosion). Regardless of these application directions, there are cases in which the material constants do not change much (such as thermodynamic, optical, but also mechanical and other important properties). Some models start from macroscopic approaches and some go to microstructural approaches, with atomic and molecular sizes appearing in the models [1] – [13].

The second group of approaches was based on the following equation type

$$A(selected\ \text{int}eraction\ output\ size) = B_1^{n_1}\ B_2^{n_2} \ldots B_m^{n_m} \tag{1}$$

where A is the final state of the material that has been processed, or some working pa rameter, and B_i^k are the selected key parameters related to the selected mode of operation of the quantum generator, i.e.: power, pulsed or CW operations, processing time, etc. Such approaches are related to the equation array with several terms of the productucts B_i with exponential dependencies and their support based on experimental data from certain processing: cutting, drilling, welding, soldering, glazing, surface structuring, lattice. One of the modern laser applications is related to Carbon Nanotubes - CNTs preparation and deposition, as well as nano materials and ablation processes, Fig. 1. One example of those equations is:

$$P = k\ \delta^x\ s^y\ V^z \tag{2}$$

[1)] Professor PhD Milesa Srećković, University of Belgrade, School of Electrical Enginerring, (esreckov@etf.bg.ac.rs), PhD Milovan Janićijević, University of Belgrade, School of Electrical Enginerring, Metalac A. D., Gornji Milanovac, (milovjani@gmail.com), Professor of Vocational studies, PhD Sanja Jevtić, Academy of Technical and Art Applied Studies Belgrade, Department School of Railway transport, (sanja.jevtic@vzs.edu.rs), Professor of Vocational studies PhD Nada Ratković Kovačević, The Academy of Applied Technical Studies Belgrade, Department of Computer-Mechanical Engineering, (nratkovickovacevic@atssb.edu.rs), Assistant Research Professor PhD Miodrag Malović, University of Belgrade, Innovation Centre, Faculty of Technology and Metallurgy, (mmalovic@tmf.bg.ac.rs)

where: k - constant depending on the material (Table 1.), P – power, δ - thickness, V – cutting speed, and s – cut width.

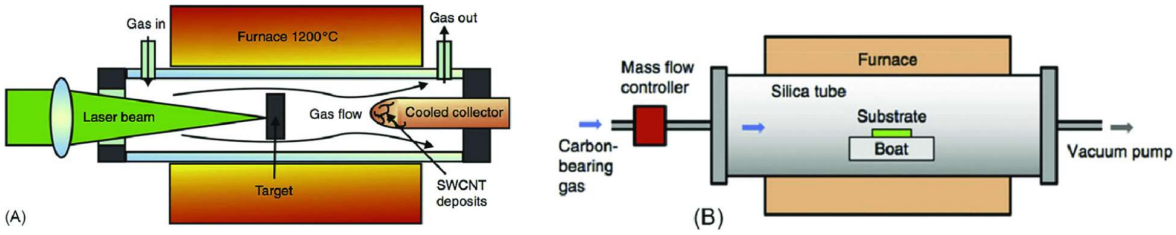


Figure 1. *(A) Laser ablation method of CNT perpetration. (B) Chemical vapor deposition technique for CNT preparation;* From: [12] https://www.researchgate.net/profile/Sayan-Dutta-5/publication/340273384/figure/fig2/AS:874732543041543@1585563898995/A-Laser-ablation-method-of-CNT-perpetration-B-Chemical-vapor-deposition-technique_W640.jpg

Table 1. The values of coefficient of processing-k for selected materials [2]

Materials	*Coefficient of processing - k*
Glass	442
Iron, mild and stainless steel	390
Rubber	340
Plastic (various kinds)	307
Wood	300
Plexiglas	297
PVC	294

Searching for relations with other properties, which are not in the foreground in case of destructive mechanisms, separation and joining of materials, various approaches that started with selected processing parameters: drilling depth and diameter, have been reduced to relatively simple dependencies, for practical applications that are related to approximations of different models. Formulas for diameter and depth of holes are related to the laser parameters and thermodynamic parameters of the material.

$$d(\tau) = 2\left[\frac{3P_S \cdot \tau \cdot tg\varphi}{\pi(L_b + 2L_m)}\right]^{\frac{1}{3}}, \qquad h(\tau) = \left[\frac{3P_S \cdot \tau}{\pi(L_b + 2L_m)\cdot tg^2\varphi}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

for $h(\tau) >> r_f$, where: L_b – specific volumetric heat of vaporization, as $L_b = c_b\rho$, L_m – specific volumetric heat of melting, as $L_m = c_m\rho$. Also, specific volumetric heat of disintegration, as:

$$L_d \approx \frac{(L_b + 2L_m)}{3} \tag{4}$$

Practical formulas are also related to the material parameters of destruction, which are related to the data from formulas and dependencies for Rayleigh scattering and anisotropy. Some models for biotissue are similar to thermal equation but with new terms and under the biothermal title. If treating induced optical breakdown in the tissue occures, some new modulations of theory should be included. The laser technique in various manner have significant biomedical applications and precise surgical procedures modelling include different/ or only modulation terms. Equations include aqua performances and in eyes plasma phenomena. When taste is related to transparent biological cells, nonlinear absorption occurs, as well as LIBS, changes in concentration of electrons. Rate equations describe the growth of concentration in biological tissue exposed to fs pulses. Accurate models before Keldysh and ADK theory existed. After the spark, the material becomes electrically conductive. The plasma in the eye cuts the intraocular tissue [6]. As a measure of destruction, there is the expression obtained from Rayleigh scattering and depolarisations monitoring, and description of scattering as

a part of density, concentration and anisotropic material fluctuations, i.e. the term proportional to R_{an} defines destructuve processes [3].

For the purposes of analysis of possible processes through interactions in Table 2 will be presented some processes and corresponding time intervals.

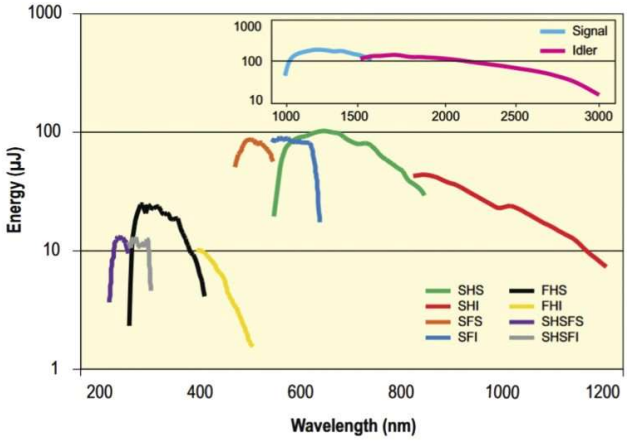


Figure 2. *Wavelength tuning afforded by nonlinear frequency conversion. A single pump λ = 800 nm is from an amplified fs laser. SHS, SHI – second harmonic signal and second harmonic idler, SFS, SFI – sums frequency signal and idler; FHS, FHI – fourth harmonic signal and idler, SHSFS, SHSFI – second harmonic of sum frequency signal and idler; From:* https://www.newport.com/n/laser-wavelength-tuning

Table 2. Phenomena and time in interaction laser material

Phenomena in interaction	Time
Photoionisation in laser-material int.	After 1 fs
Photoionisation (tunneling/ multiphot.)	After 50 fs
Quascade ionisation	After 100 fs
Electron thermalisation	After 1 ps
Termal difusion	After 1 ns
Photochemical processes (Chem. react., phase transitions)	After 1 ns

2. CRITICAL PHENOMENA AND PREDICTION OF MATERIAL BEHAVIOR

For the determination of critical parameters, there are various criteria with different degree of reliability, (with adopted theoretical definitions of critical phenomena in the narrow sense) such as: critical temperature, pressure, volume, etc. The problems are reaching experimental conditions for materials in which these parameters are very difficult to achieve (low or high temperatures and pressures). In this regard, the role of laser is to accept established connections from the theory of critical phenomena, where liquids are measured, and conclusions analog to the ones used for solid bodies and for magnetic materials as well [5]. In a broader sense, we strive for other extended approaches, where the application of lasers in measurement transfers many mechanical measurements into the optical world. The other side of these approaches includes the connection between acoustic phenomena and lasers as: generation of acoustic processes and applications, determination with the dispersion of materials through the possibility of measurement. Classic speed of sound is related to the limit values of mechanical measurements (low frequencies). High frequency measurements of acoustical values (covered by the theory) i.e. hypersound are messured by Brillouin (Mandelstamm Brillouin scattering methods).

2.1 Determination of stresses / residual stresses

Fracture theory has been greatly developed for years and many pages of literature have been devoted to it, not counting the introduction, catastrophes and theories related to large catastrophic fractures. Part of

experimental science was taken over by holographic and tomographic techniques, in addition to basic approaches related to photoelasticity, interference and diffraction processes in general. It is also present in medical applications, for implant modeling and organization of test chambers with clamps or other, to achieve appropriate situations in real processes, in cases of human and veterinary medicines. A special task is laser beam produced stresses in material. For certain positions of implants in organism in vivo (or solid tissue - teeth), it is relatively easy, but for tomography and access to the oral cavity, "acrobatics" are often needed for both the patient and the doctor. Another large area has entered into constructions (Vukotić), transmission lines, tunnels and many others. In particular, the field of seismology had and still has significant successes from soil testing and monitoring earthquakes with classical methods as well as their interpretation by transferring them to holographic data, calculations and theory. Here too, the use of CW lasers differs from the use of ultrashort pulses, such as occurred after the first Q switch pulses.

More recent applications are related to Raman scattering and laser linewidth comparisons under various loads; thus the case of semiconductors with carbon and other materials already have solid experimental confirmation. Attempts to tie ourselves to the Mendeleev system and give formulas for depth or diameter and the protruding place in the periodic system of elements failed partially because in each of the 7 elements there was some that *jumped* out of the established quasi regularity. Connections with parameters of viscosity, moduls of elasticity, etc., exist including surface tension phenomena.

The inclusion of non-linear behavior of materials with high intensities is particularly important, so with that in mind, the initial database of materials was used, and their inclusion in models of the selected type is forthcoming. In all of this, the question polarization remains unanswered and it requires special analyses with different models. In the area of high beam intensity, the specific material will not be recognized. Models that seek to state that the semiconductor will behave as metallic or dielectric, depending on the parameters of the stimulated system (action time, associated electric field and its relationship with internal fields in the solid material) are also of interest. There would be a separate discussion and analysis about the materials in the fiber state, but the experiments and development of final models (or ones built into the part of construction), already were based long time ago on the optical fibers. Fiber optical sensors provide data ranging from the state of tension in the material, to counting the daily difference in the number of vehicles that pass on the defined road section etc. In the second part of the paper, some of the cases of interaction with the selected type, the cases of scattering as well as some of the cases will be shown.

2.2 Some chosen unconventional laser types or other uncommon types

We do not answer the question which laser *today* has the highest power, because answers on the Internet will always be inconclusive, and even if we select one, it will be only the one most powerful in a particular category. The issue of the possibility of tuned wavelengths has long been resolved for many types, Tab. 3. The issue of basic beam and harmonics means of transformations from IR to visible and UV ranges, have long been developed. It has a wide area of applications, starting from cultural heritage, to medical and other metrological needs, i.e. obtaining frequency chains in metrological comparisons.

Some of the rare types of lasers are: quantum well, spin flip, fiber laser, polymer laser, white laser, hollow cathode laser, lasers with solar pump, lasers with exotic particle pump, as well as nuclear radiation pump. Fiber lasers are compared with CO_2 lasers and vanadate laser, etc. New kind of laser uses tiny particle clumps to generate light. [15]

3. SOME SIMULATIONS AND RESULTS OF LASER-MATERIAL INTERACTION

In Figs 3. some damages are presented. In Figs. 4. some predictions of laser damage, in general, in various materials as in [4] are considered: damage probability vs. energy density, provoked real damages. Figs. 5. have shown some simulation of the time and temperature distribution for various materials and operating conditions [9] – [11].

4. CONCLUSION

In recalling today's possibilities of lasers, we wanted to present the complexity, or great simplification, of methods used in laser technology, in the multitude of developed, everyday or rare laser applications.

Approaches change over time and when we talk about the advantage of one or another method from energy, metrological, philosophical or mass media application changes, but in all areas, laser technology has its place. Whether in a given case, after an evaluation, the type which will be chosen the first or not at all depends on many real situations (price, speed, reaction speed, robustness), but in a large swarm of laser types and over the years of work and new proposals, one can always find something that can certainly play a positive role in everyday life, in exploring the depth of the Earth, for going to the Cosmos, and looking for a way out for the Earth if (we will not mention it now) one thinks how far in advance one should think only about the Earth (willingly or not).

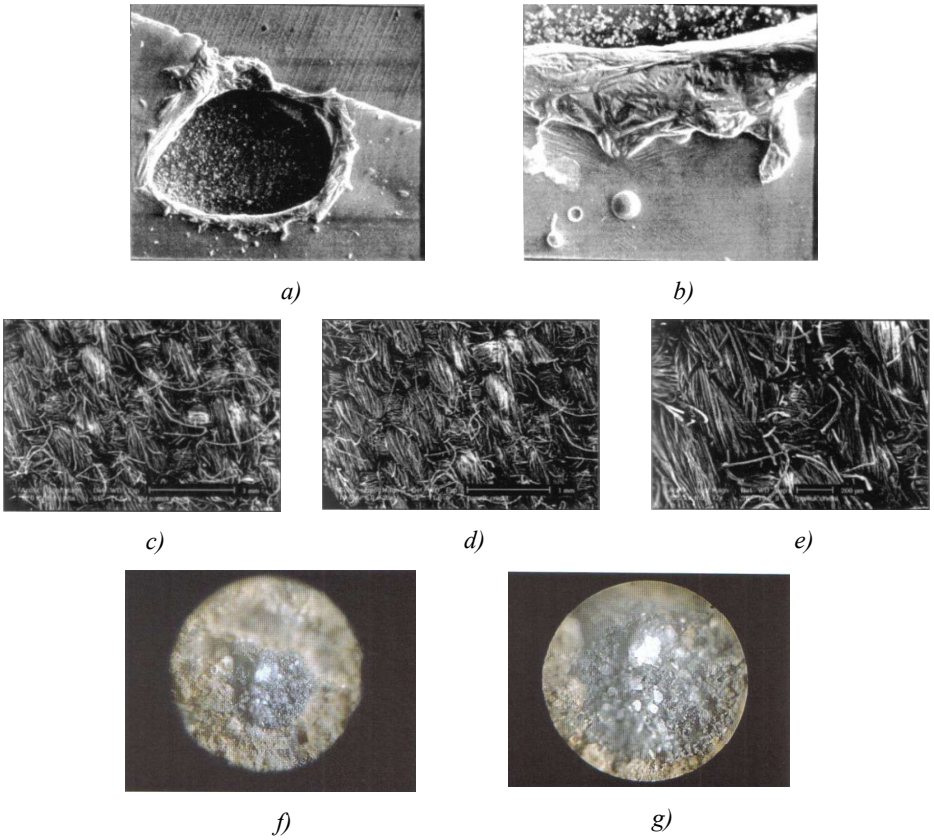


Figure 3. *Chosen laser damages: a), b) amorh materials: 52%Ti-48%Cu Ruby Laser, E = 0.3 J; c), d), e) Red cotton textile treated by Nd^{3+}:YAG laser, E = 35 mJ, τ = 20 ns, 10 pulses; f), g) Some ceramics from Pločnik treated with laser (Sample 1 Crater 3);* From: [9] – [11]

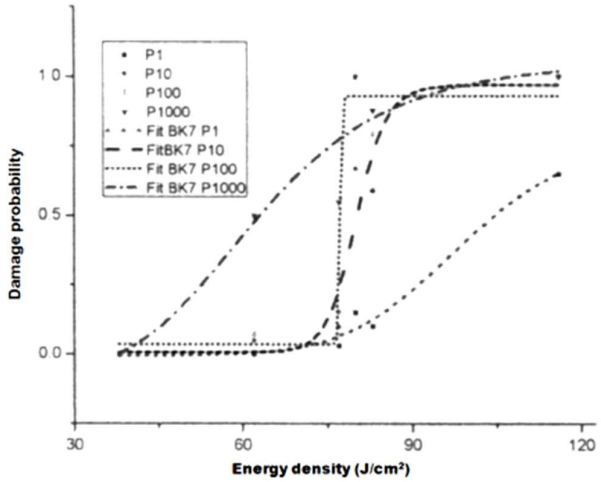


Figure 4. *Prediction of laser damage considered as damage probability vs. energy density*

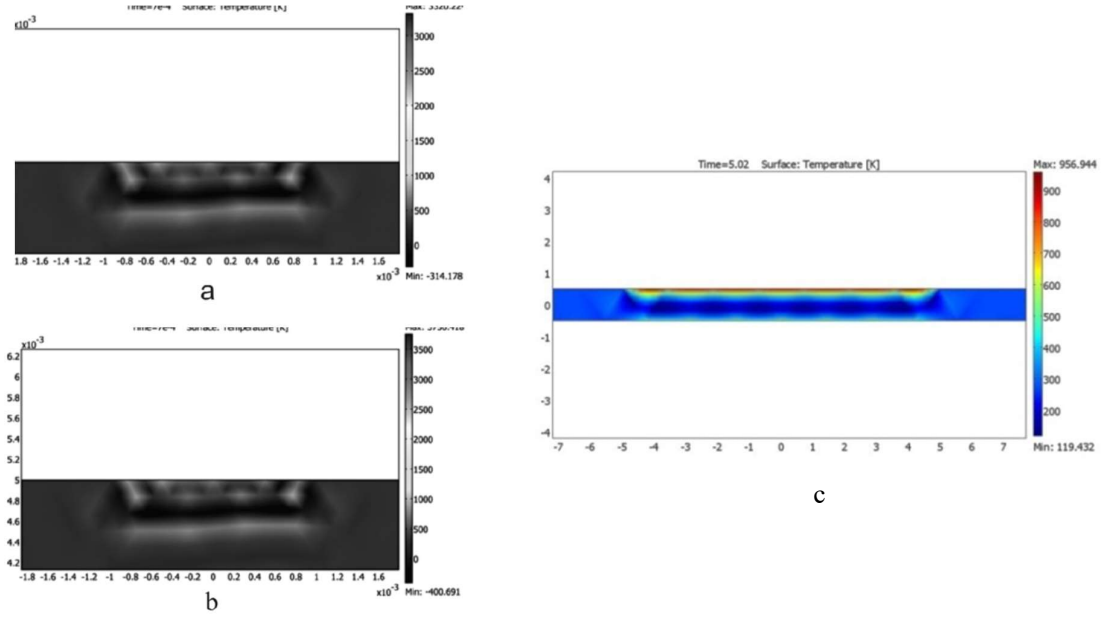


Figure 5. *a), b) Wavelength 1.064 µm, power 0.35 kW, or 0.4 kW, Energy density 112 J/cm^2 or 128 J/cm^2, Pulse duration 0.7 ms; c) The influence of 5 pulses of the alexandrite laser to P7295-2; simulation obtained by COMSOL Multiphysics 3.5 program;* From: [7], [8]

The authors acknowledge the support of the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, contract no 451-03068/2022-14/200287, as well as Eng. Srđan Milanović for professional assistance

10. REFERENCES

[1] Srećković, M. and Žižić, O.: *Some Considerations related to Optoelectronics, Quantum electronics*, Optics, Solid State Physics and Acoustics, Condensed matter, Skopje,1990.

[2] a) Belić, I.: *Modularni industrijski kompleks MILK za operacije obrade materijala*, PhD Thesis, University of Belgrade, Faculty of Mecanical Engineering, Belgrade, 1990.
b) Belić, I.: Optics and Laser Technology, Vol.19, december 1987.

[3] Srećković, M., Ostojić, S., Đokić, B., Zarubica, V., Kovačević, A., and Nešić, M.: *Scattering, reflection, transmission in theory and practice: the estimations of nonlinear and ultrafast phenomena*, Atti de la Fondazione Giorgio Ronchi, ISSN:0391-2051, Vol. LXV 13 Iss. 4, pp.543-555, 2010.

[4] Srećković, M., Kovačević, A., Milosavljević, A., Ostojić, S., Jevtić, S. i Knežević, D.: *Energetika, kvantna elektronika, nelinearna optika i laserska tehnika*, Energija, ekologija, ekonomija, No. 5, 2009/2010., pp. 005–017, 03548651.

[5] Srećković, M., Latinović, Z., Janićijević, A. et al. *Defining the Critical Parameters of Materials Using Lasers*, Savremeni materijali, Banja Luka, pp. 33-62, 2013.

[6] Petrovic, V. and Delibašić, H.: *Improved Treatment of the Photoionization Process in the Laser Induced Optical Breakdown in the Laser Tissue*, *U.P.B. Sci. Bull., Ser. A*, Vol. 81, No. 4, pp- 287-300, 2019.

[7] Janićijević, M., Srećković, M., Kaluđerović, B.: *Predviđanje vremenskog odziva ugljeničnog materijala ozračenog Nd3+:YAG laserom*, Tehnika, Novi materijali, Vol. 19, No. 4, pp.1-4, 2010. https://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0354-230010040001J

[8] Janićijević, M., Srećković, M., Kaluđerović, B., Dinulović, M., Karastojković, Z., Jovanić, P., and Kovačević, Z.: *Evaluation of Laser Beam of Laser beam Interaction*, Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, Vol. 21, No. 1-1, pp. 63−69, 2015. http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=1451-93721400006J#.YzDHJXZBzIU

[9] Srećković, M., Vulićević, Lj., Tomić, Ž., and Rajković, V.: *Guide of Laser Damages on the Surface of Some Modern Materials*, Monograph, ISBN 621.375.826(0758), University of Kragujevac, Technical Faculty Čačak, Čačak, 2004.

[10] Srećković, M., Polić, S., Bugarinović, A., i Svoboda, V.: *Laser i problemi konzervacije kulturne baštine*, CIK i Regionalni centar za talente Beograd 2, Beograd, 2016.
[11] Srećković, M., Kaluđerović, B., Janićijević, M.: *Interaction and Diagnostics of carbon materials with lasers*, (in Serbian), DC Grafički centar, Belgrade, 2015.
[12] Dutta, S. D., Patel, D. K., and Lim, Ki-T.: *Carbon nanotube-based nanohybrids for agricultural and biological applications,* Chapter in *Multifunctional Hybrid Nanomaterials for Sustainable Agri-food and Ecosystems,* Elsevier Inc., United States, DOI: 10.1016/B978-0-12-821354-4.00021-2, pp. 505-535, 2020. https://www.researchgate.net/publication/340273384_Carbon_nanotube-based_nanohybrids_for_agricultural_and_biological_applications
[13] Bobitski, Ya. V., Gotra, Z. Yu., Demkovich, I. V., and Semerak, M. M.: *Numerical Calculation Op Thermal Processes in Laser Processing Op Semiconductor Materials*, Proceedings of EPM '89: 3rd International Conference on Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials, edited by Karl Hohmuth and Edgar Richter, Berlin, Boston: De Gruyter, 2022, pp. 569-571. Dresden, GDR, September 4. – 8. 1989. https://doi.org/10.1515/9783112575666-158
[14] Otsuka, K.: *Self-Mixing Thin-Slice Solid-State Laser Metrology*, Sensors, DOI: 10.3390/s110202195, Vol. 11, No. 2, pp. 2195-2245, 2011. https://www.researchgate.net/publication/221818262 https://www.researchgate.net/publication/221818262_Self-Mixing_Thin-Slice_Solid-State_Laser_Metrology
[15] https://www.newscientist.com

Srećković, M., Janićijević, M., Jevtić, S., Ratković Kovačević, N., Malović, M.[2)]

KVANTNI GENERATORI U TEORIJI I PRAKSI 2022[3)]

Rezime

Primena lasera/kvantnih generatora u najrazličitije svrhe, promenila je milenijum, a trend raste (igračke/cucle, teška/raketna industrija/Kosmos). Edukaciono, od prvih dana stižu doktorati (laserske stanice/dizajn (SFRJ, Srbija)). Danas nema preciznosti u definiciji: novo, početo odavno; konstatuje se da su laseri u svim porama života (medicine, odbrane, mass media). U osnovi je interakcija materijala i lasinga ili činjenica koje dovode/ili ne, do laser damage.Primene su otišle daleko: teorijski, eksperimentalno; komercijalne ,,vode" više i ne konstatuju da se proces bazira na laseru. Rad će se zadržati na nekoliko oblasti (egzotičniji/potencijalno noviji tipovi pumpanja, deskripcija parametara). Interakcija se sagledava: kroz eksperiment, simulacija kroz slučaj rasejanja i raspodele temperature i izborom oblasti, gde treba dublje shvatanje u ovoj širokoj problematici.

Ključne reči:laseri, karakterizacija materijala, kvantni generatori, obrada,pumpanje.

[2)] prof. dr Milesa Srećković, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, (esreckov@etf.bg.ac.rs), dr Milovan Janićijević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Metalac A. D., Gornji Milanovac, (milovjani@gmail.com), prof. struk. stud. dr Sanja Jevtić, Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, Odsek Visoka železnička škola, (sanja.jevtic@vzs.edu.rs), prof. struk. stud. dr Nada Ratković Kovačević, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Odsek Kompjutersko-mašinsko inženjerstvo, (nratkovickovacevic@atssb.edu.rs), naučni saradnikdr Miodrag Malović, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tenološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, (mmalovic@tmf.bg.ac.rs)

43. JUPITER konferencija

Beograd 2022

45. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI PRERADE METALA

Jovanović, R. J. [1)]

PROJEKTOVANJE PROIZVODNOG CIKLUSA SLOŽENOG PROIZVODA PRIMENOM TEHNIKA MREŽNOG PLANIRANJA

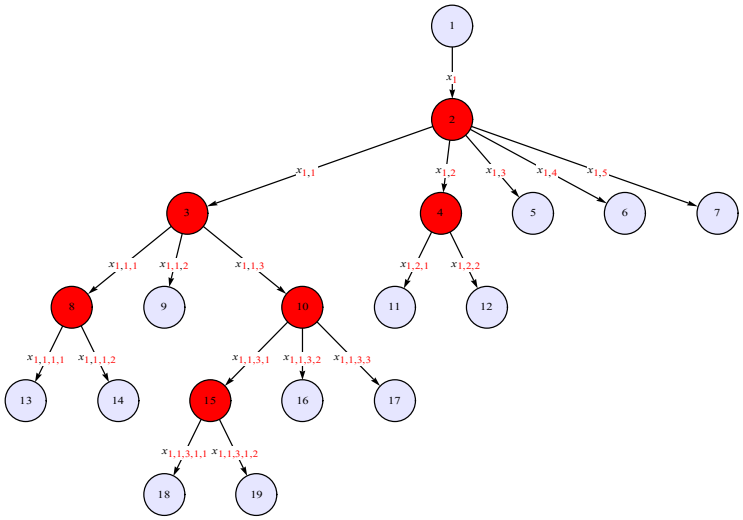
Rezime

Rezime: U radu je prikazana metodologija projektovanja proizvodnog ciklusa složenog proizvoda koja se bazira na procesu transformacije njegovog grafa tehnološke strukture u mrežu. Na primeru složenog proizvoda, koji se nalazi u proizvodnom programu Kompanije „Sloboda“ Čačak, projektovan je proizvodni ciklus primenom tehnika mrežnog planiranja, kao što su CPM, PERT i PDM. Posebna pažnja je posvećena proizvodnim fazama koje su uslovljene, odnosno, koje čine karakteristični put u grafu tehnološke strukture složenog proizvoda.

Ključne reči: projektovanje, proizvodni ciklus, složen proizvod, tehnike mrežnog planiranja

1. UVOD

Za razliku od tehnološkog ciklusa koji obuhvata samo determinističke aktivnosti projektovane tehnološkim postupkom, stvarno trajanje ciklusa proizvodnje obuhvata i stohastičke aktivnosti (gubitke) u ciklusu, koje predstavljaju neminovnost u procesu proizvodnje. Sa aspekta upravljanja proizvodnjom, u cilju skraćenja proizvodnog ciklusa (PC), aktuelne su projektovane vrednosti trajanja ciklusa proizvoda i pripadajućih delova. Različite pristupe problematici proračuna tehnološkog i projektovanog ciklusa kao i opisu strukture složenog proizvoda možemo naći u radovima [1-9]. Projektovanje proizvodnih ciklusa je cikličan proces sa težnjom da projektovane vrednosti teže optimalnim uz respektovanje realnih proizvodnih uslova i ograničenja. Pre nego što se pristupi projektovanju PC-a potrebno je obezbediti tehnološku dokumentaciju, teorijsku osnovu i informatičku podršku, [1]. U radu je projektovan proizvodni ciklus protivavionskog metka 20*mm* sa vežbovnim projektilom (VG-D24), koji se nalazi u proizvodnom programu Kompanije „Sloboda“ Čačak. Proizvod se sastoji od osam elemenata, četiri dela iz kooperacije, tri spoja, jednog podsklopa i jednog sklopa. Struktura složenog proizvoda prikazana je orijentisanom grafom tehnološke strukture (GTS), slika 1, koji je jednoznačno definisan pomoću skupa X_1 proizvodnih faza, relacija (1).



Slika 1. *Orijentisan graf tehnološke strukture VG-D24*

[1)] dr Jelena R. Jovanović, prof., Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, (jelena.jovanovic@ftn.kg.ac.rs)

$$X_1 = \{x_1, x_{1.1}, x_{1.2}, x_{1.3}, x_{1.4}, x_{1.5}, x_{1.1.1}, x_{1.1.2}, x_{1.1.3}, x_{1.2.1}, x_{1.2.2}, x_{1.1.1.1}, x_{1.1.1.2}, x_{1.1.3.1}, x_{1.1.3.2}, x_{1.1.3.3}, x_{1.1.3.1.1}, x_{1.1.3.1.2}\} \quad (1)$$

Graf ima izgled uređenog korenskog stabla u kome grane grafa predstavljaju istovremeno i tehnološke procese koji su čvorovima grafa povezani tako da čine logičku višenivovsku hijerarhijsku strukturu orijentisanu od prvog ka poslednjem nivou, [1].

Projektovanje ciklusa složenog proizvoda (SP) zasniva se na grafu tehnološke strukture, organizaciji procesa proizvodnje, koja maksimalno uvažava realne uslove u kojima se odvijaju reprodukcioni tokovi, i adekvatnoj metodologiji projektovanja, počev od tehnoloških operacija (TO), preko proizvodnih faza (PF), pa zaključno sa karakterističnim putevima u grafu. Projektovanje PC-a SP-a moguće je realizovati na tri načina, [1].

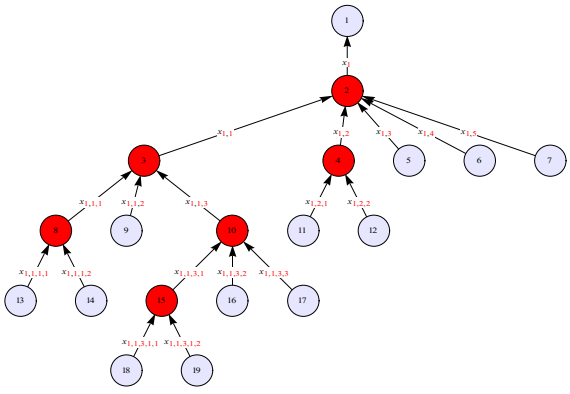
Prvi način se zasniva na suprotno orijentisanom grafu i specijalizovanom softverskom rešenju koje je bazirano na analizi ciklusa PF-a u okviru karakterističnih puteva u grafu. Može se kontatovati da elementarne PF-e (elementi, delovi) imaju samo jednu težinu, dok složene PF-e (završna montaža, sklopovi, spojevi, podsklopovi) imaju više težina (ukoliko ima preklapanja između PF-a) u zavisnosti od broja karakterističnih puteva kojima pripadaju. Na primer PF-a x_1 (završna montaža) učestvuje u definisanju 12 karakterističnih puteva a x_{11} u 7 i isto toliko imaju težinskih elemenata. Vrednosti težinskih elemenata zavise od usvojenih i projektovanih parametara u okviru karakterističnih puteva grafa koji je suprotno orijentisan od grafa tehnološke strukture SP-a na slici 1.

Drugi način se zasniva na procesu transformacije grafa tehnološke strukture SP-a u gantove dijagrame i primeni odgovarajućih softverskih rešenja, za upravljanje proizvodnim procesima, baziranih na ovoj metodologiji. Gantovi dijagrami su najčešće korišćena tehnika za projektovanje PC-a i utvrđivanje kritičnih (najdužih) puteva u grafu SP-a i odgovarajućih vremenskih rezervi. Osnovu za crtanje gantovih dijagrama predstavlja skup PF-a rastavljenih u unutrašnjim čvorovima neorijentisanog grafa.

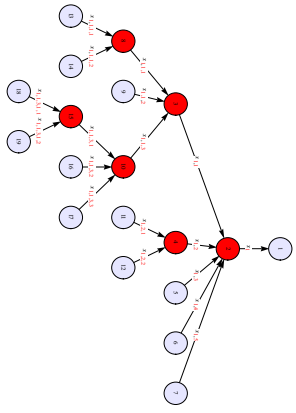
Treći način projektovanja PC-a SP-a zasniva se na procesu transformacije suprotno orijentisanog grafa tehnološke strukture u mrežu i primeni tehnika mrežnog planiranja (TMP) kao što su: metoda kritičnog puta CPM (*Critical Path Method*), tehnika za ocenu i reviziju projekta PERT (*Project Evaluation and Review Technique*) i PDM (*Precedence Diagramming Method*).

2. TRANSFORMACIJA GTS U MREŽU

Za upravljanje proizvodnjom složenih proizvoda može se koristi i suprotno orijentisan graf tehnološke strukture (slika 2) od grafa tehnološke strukture (slika 1). Transformacijom ovog grafa u skup zavisnih aktivnosti, spojenih događajima, stvara se osnova za primenu mrežnih grafova i projektnog pristupa u oblasti upravljanja proizvodnim ciklusima.



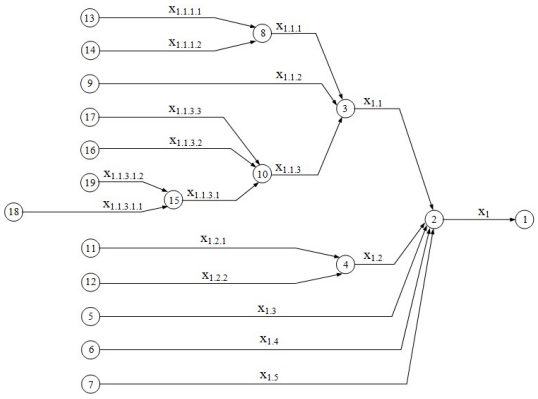
Slika 2. *Suprotno orijentisan graf tehnološke strukture SP VG-D24*



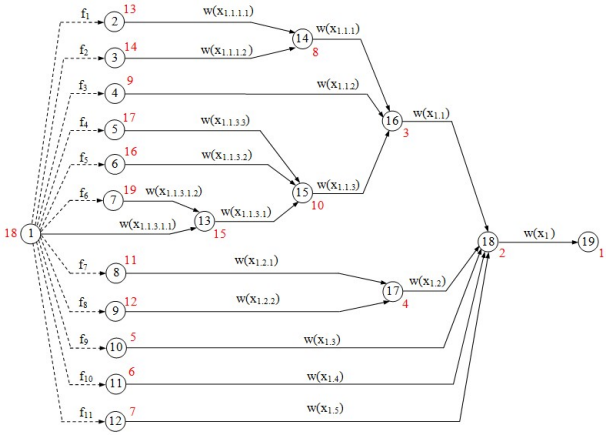
Slika 3. *Suprotno orijentisan graf SP VG-D24 rotiran za 90° udesno*

Transformacija suprotno orijentisanog grafa (slika 2) u mrežu izvodi se na sledeći način. Prvo se graf zarotirati za 90° u desno (slika 3) a zatim se svi spoljašnji čvorovi, osim jednog, grupišu u okviru predzadnjeg nivoa grafa posmatrano u odnosu na početni čvor "1", slika 4. Izdvojen spoljašnji čvor "18" prikazan je sam na poslednjem nivou rotiranog grafa, u odnosu na početni čvor, i nalazi se na kritičnom putu jer zadovoljava unapred zadate kriterijume koji se odnose na rešavanje ekstremnih puteva u mreži. Ako se izdvojen spoljašnji

čvor spoji fiktivnim aktivnostima (f_1 - f_{11}) sa ostalim spoljašnjim čvorovima u grafu, grane grafa transformišu u aktivnosti a čvorovi u događaje, dobiće se graf SP u obliku mreže, slika 5. Aktivnostima u mreži dodeljene su odgovarajuće težine ($w_{i,j,k}$).



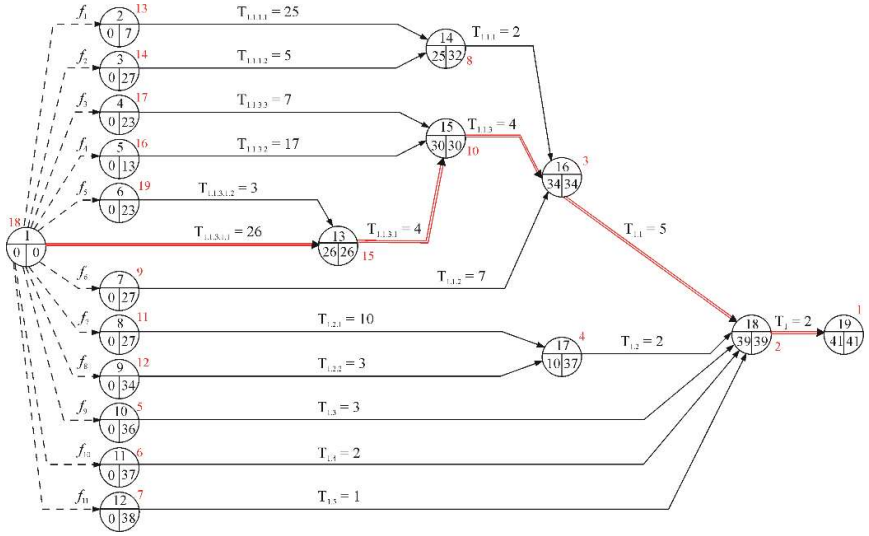
Slika 4. *Suprotno orijentisan graf SP sa grupisanim spoljašnjim čvorovima*



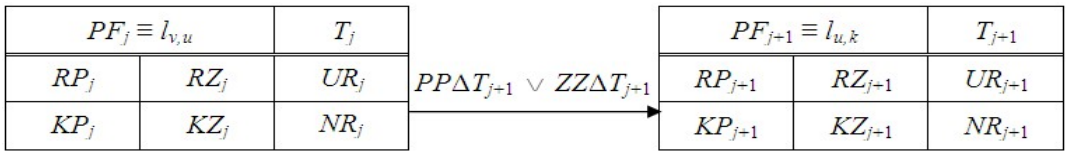
Slika 5. *Graf SP VG-D24 prikazan u obliku mreže*

3. PRIMENA TEHNIKA MREŽNOG PLANIRANJA

Kao što je već napomenuto u uvodu treći način projektovanja PC-a SP-a zasniva se na procesu transformacije suprotno orijentisanog grafa tehnološke strukture u mrežu (slika 5) i primeni tehnika mrežnog planiranja. Graf u obliku mreže koji je prikazan na slici 5 može se iskoristiti za primenu *CPM* i *PERT* tehnike, jer se čvorovi grafa mogu transformisati u događaje a grane grafa u aktivnosti. Ukoliko nema preklapanja između proizvodni faza tada se mogu koristiti metode *CPM* i *PERT* za projektovanje PC-a SP-a jer su težine proizvodnih faza identične sa njegovim trajanjem, slika 6.



Slika 6. *Primena CPM-a za projektovanje PC-a SP-a*



Slika 7*. Elementi mrežnog dijagrama zasnovanog na PD tehnici planiranja*

PDM otklanja jedan od glavnih nedostataka metoda *CPM* i *PERT* koji se ogleda u nemogućnosti ili otežanom načinu primene ukoliko ima preklapanja između proizvodni faza. Elementi mrežnog dijagrama zasnovanog na *PD* tehnici planiranja prikazani su na slici 7. Oznake na slici 7 i u relacijama (2-10): PF_{j+1}, $l_{u,k}$ – posmatrana

(j+1) aktivnost (PF-a) na karakterističnom putu grafa SP-a; PF_j, $l_{v,u}$ – prethodna (j) aktivnost (PF-a) na karakterističnom putu grafa SP-a; T_{j+1}, T_j – trajanje posmatrane i prethodne aktivnosti; RP_{j+1}, RP_j – najraniji počeci posmatrane (j+1) i prethodne (j) aktivnosti; RZ_{j+1}, RZ_j – najraniji završeci posmatrane (j+1) i prethodne (j) aktivnosti; KP_{j+1}, KP_j – najkasniji počeci posmatrane (j+1) i prethodne (j) aktivnosti; KZ_{j+1}, KZ_j – najkasniji završeci posmatrane (j+1) i prethodne (j) aktivnosti; UR_{j+1}, UR_j – ukupne vremenske rezerve; NR_{j+1}, NR_j – nezavisne vremenske rezerve; $PP\Delta T_{j+1}$ – tip veze koji uslovljava početak posmatrane aktivnosti (j+1) u odnosu na početak prethodne (j), za vrednost ΔT_{j+1}; $ZZ\Delta T_{j+1}$ - tip veze koji definiše završetak posmatrane aktivnosti u odnosu na završetak prethodne, za vrednost ΔT_{j+1}; $P_{v,1}$ - karakteristični put u grafu SP-a; $N_{v,1}$ – broj nivoa u okviru karakter. puteva u graftu; $V^{(p)}$ – skup početnih čvorova; $V^{(u)}$ – skup unutrašnjih čvorova; $V^{(z)}$ – skup završnih čvorova; $d^-(u)$ - polustepen ulazećih grana čvora u; $d^+(u)$ - polustepen izlazećih grana čvora u.

Algoritam za crtanje i proračun mreže SP-a u *PD* tehnici:

1. Na osnovu suprotno orijentisanog grafa tehnološke strukture SP-a, karakterističnih puteva u grafu i odgovarajućih vremenskih rezervi Δr_{j+1} potrebno je formirati matricu uslovljenosti proizvodnih faza (tabela 1). Tip veze, u zavisnosti od trajanja susednih PF-a i usvojene (projektovane) vrednosti međufaznih gubitaka ΔT_{j+1}, opisan je pomoću relacije (2).

$$\left(\left(P_{v,1} \wedge N_{v,1}\right) \Rightarrow j = \overline{1, N_{v,1}} \middle| v \in V^{(p)}\right) \wedge T_{j+1} > T_j \Rightarrow PP\Delta T_{j+1} \vee$$
$$\left(\left(P_{v,1} \wedge N_{v,1}\right) \Rightarrow j = \overline{1, N_{v,1}} \middle| v \in V^{(p)}\right) \wedge T_{j+1} \le T_j \Rightarrow ZZ\Delta T_{j+1} \qquad (2)$$

Tabela 1. Matrica uslovljenosti proizvodnih faza složenog proizvoda

Prethodna aktivnost (j) \ Posmatrana aktivnost (j+1)	$x_{1.1.3.1.1}$	$x_{1.1.3.1.2}$	$x_{1.1.1.1}$	$x_{1.1.1.2}$	$x_{1.1.3.1}$	$x_{1.1.3.2}$	$x_{1.1.3.3}$	$x_{1.1.1}$	$x_{1.1.2}$	$x_{1.1.3}$	$x_{1.2.1}$	$x_{1.2.2}$	$x_{1.1}$	$x_{1.2}$	$x_{1.3}$	$x_{1.4}$	$x_{1.5}$	x_1	
$x_{1.1.3.1.1}$	-				*ZZ*1														26
$x_{1.1.3.1.2}$		-			*PP*1														3
$x_{1.1.1.1}$			-					*ZZ*1											25
$x_{1.1.1.2}$				-				*ZZ*1											5
$x_{1.1.3.1}$					-					*ZZ*1									4
$x_{1.1.3.2}$						-				*ZZ*1									17
$x_{1.1.3.3}$							-			*ZZ*1									7
$x_{1.1.1}$								-					*PP*1						2
$x_{1.1.2}$									-				*ZZ*1						7
$x_{1.1.3}$										-			*PP*1						4
$x_{1.2.1}$											-			*ZZ*1					10
$x_{1.2.2}$												-		*ZZ*1					3
$x_{1.1}$													-					*ZZ*1	5
$x_{1.2}$														-				*ZZ*1	2
$x_{1.3}$															-			*ZZ*1	3
$x_{1.4}$																-		*ZZ*1	2
$x_{1.5}$																	-	*PP*1	1
x_1																		-	2
	26	3	25	5	4	17	7	2	7	4	10	3	5	2	3	2	1	2	T_j

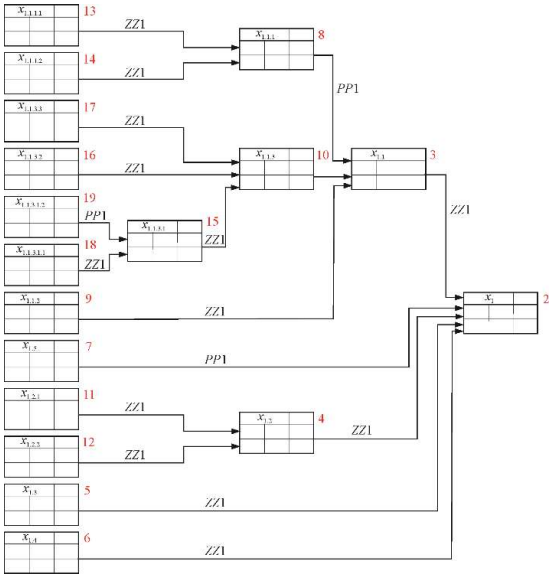
2. Formirati mrežu za primenu *PD* tehnike (slika 8). Mreža se formira na osnovu suprotno orijentisanog grafa SP-a na taj način što se PF-e prikazuju kao aktivnosti u obliku pravougaonika ne remeteći međusobne veze koje su definisane pomoću čvorova grafa.
3. Na osnovu formula (3)-(10) izvršiti odgovarajuće proračune i popuniti mrežni dijagram (slika 9).

Pomoću relacije (3) definisani su najraniji počeci i završeci elementarnih proizvodni faza (EPF), a pomoću relacije (4) najraniji počeci i završeci složenih proizvodnih faza (SPF) ukoliko posmatranu PF-u uslovljava samo jedna prethodna ($d^-(u)=1$). Ukoliko posmatranu PF-u uslovljava više PF-a ($d^-(u)>1$) tada se najkasniji počeci i završeci SPF-a definišu pomoću relacije (5). Najkasniji početak i završetak SPF-e koja se nalazi na poslednjem nivou ($N_{v,1}$) definisani su pomoću relacije (6). Najkasniji počeci i završeci ostalih PF-a definišu se pomoću relacija (7) i (8).

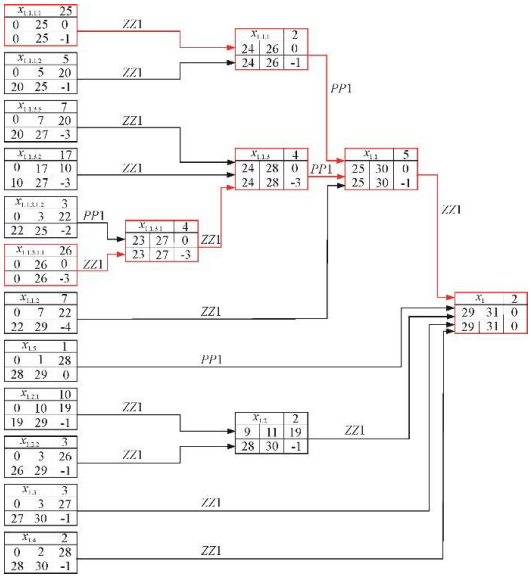
Ukupna vremenska rezerva (*UR*) uzima nenegativne vrednosti i ukazuje na maksimalno dozvoljeno pomeranje u procesu proizvodnje, unapred ili unazad. Ako je $UR_j = 0$ tada je proizvodna faza PF_j kritična. Proračun se vrši pomoću formule (9) na osnovu najkasnijih i najranijih završetaka, slika 9.

Nezavisna vremenska rezerva (*NR,* Δr_{j+1}) definiše preklapanje između susednih PF-a. Računa se pomoću formule (10) pri čemu može da bude negativna, pozitivna ili nula. Ukoliko uzima negativne vrednosti ($NR_j <$ 0) tada postoji preklapanje između posmatrane (PF_{j+1}) i prethodne (PF_j) proizvodne faze. Ako je $NR_j = 0$ tada

se završetak proizvodnje prethodne poklapa sa početkom proizvodnje naredne PF-e. Ako je $NR_j > 0$ tada postoji zazor između početka proizvodnje posmatrane PF-e u odnosu na završetak proizvodnje prethodne, slika 9.



***Slika 8**. Polazna mreža za primenu PD tehnike*



***Slika 9.** Projektovanje PC-a SP-a korišćenjem PDM –a*

$$PF_j \equiv l_{v,u}\left|\left(v \in V^{(p)} \wedge u \in V^{(u)}\right) \Rightarrow \left(RP_j = 0 \wedge RZ_j = T_j\right)\right| j = 1 \tag{3}$$

$$PF_j \equiv l_{u,k}\left|\left(u \in V^{(u)} \wedge k \in \left\{V^{(u)} \bigcup V^{(z)}\right\}\right) \Rightarrow j \in \left\{\overline{2, N_{v,1}}\middle| v \in V^{(p)}\right\} \wedge d^-(u) = 1 \Rightarrow\right.$$
$$\left(RP_{j+1} = RP_j + \Delta T_{j+1} \wedge RZ_{j+1} = RP_{j+1} + T_{j+1}\right)\left|PP\Delta T_{j+1} \vee\right.$$
$$\left(RZ_{j+1} = RZ_j + \Delta T_{j+1} \wedge RP_{j+1} = RZ_{j+1} - T_{j+1}\right)\left|ZZ\Delta T_{j+1}\right. \tag{4}$$

$$PF_j \equiv l_{u,k}\left|\left(u \in V^{(u)} \wedge k \in \left\{V^{(u)} \bigcup V^{(z)}\right\}\right) \Rightarrow j \in \left\{\overline{2, N_{v,1}}\middle| v \in V^{(p)}\right\} \wedge d^-(u) > 1 \Rightarrow\right.$$
$$\left(\left(RP_{j+1}^{(1)} = \max_c\left\{\left(RP_j + \Delta T_{j+1}\right)\middle| c = \overline{1, d^-(u)}\right\} \wedge RZ_{j+1}^{(1)} = RP_{j+1}^{(1)} + T_{j+1}\right)\middle|PP\Delta T_{j+1} \wedge\right.$$
$$\left.\left(RZ_{j+1}^{(2)} = \max_c\left\{\left(RZ_j + \Delta T_{j+1}\right)\middle| c = \overline{1, d^-(u)}\right\} \wedge RP_{j+1}^{(2)} = RZ_{j+1}^{(2)} - T_{j+1}\right)\middle|ZZ\Delta T_{j+1}\right) \Rightarrow$$
$$\left(RP_{j+1} = \max\left\{RP_{j+1}^{(1)}, RP_{j+1}^{(2)}\right\} \wedge RZ_{j+1} = \max\left\{RZ_{j+1}^{(1)}, RZ_{j+1}^{(2)}\right\}\right) \tag{5}$$

$$PF_{j+1} \equiv l_{u,1}\left|\left(u \in V^{(u)} \wedge \{1\} \in V^{(z)}\right) \Rightarrow j = N_{v,1} \wedge \left(KZ_{j+1} \equiv RZ_{j+1} \wedge KP_{j+1} \equiv RP_{j+1}\right)\right| j = N_{v,1} \tag{6}$$

$$PF_{j+1} \equiv l_{u,k}\left|\left(u \in \left\{V^{(u)} \bigcup V^{(p)}\right\} \wedge k \in V^{(u)}\right) \Rightarrow j \in \left\{\overline{1, N_{v,1} - 1}\middle| v \in V^{(p)}\right\} \wedge d^+(u) = 1 \Rightarrow\right.$$
$$\left(KP_j = KP_{j+1} - \Delta T_{j+1} \wedge KZ_j = KP_j + T_j\right)\left|PP\Delta T_{j+1} \vee\right.$$
$$\left(KZ_j = KZ_{j+1} - \Delta T_{j+1} \wedge KP_j = KZ_j - T_j\right)\left|ZZ\Delta T_{j+1}\right. \tag{7}$$

$$PF_{j+1} \equiv l_{u,k}\left|\left(u \in \left\{V^{(u)} \bigcup V^{(p)}\right\} \wedge k \in V^{(u)}\right) \Rightarrow j \in \left\{\overline{1, N_{v,1} - 1}\middle| v \in V^{(p)}\right\} \wedge d^+(u) > 1 \Rightarrow\right.$$
$$\left(\left(KP_j^{(1)} = \min_e\left\{\left(KP_{j+1} - \Delta T_{j+1}\right)\middle| e = \overline{1, d^+(u)}\right\} \wedge KZ_j^{(1)} = KP_j^{(1)} + T_j\right)\middle|PP\Delta T_{j+1} \wedge\right.$$
$$\left.\left(KZ_j^{(2)} = \min_e\left\{\left(KZ_{j+1} - \Delta T_{j+1}\right)\middle| e = \overline{1, d^+(u)}\right\} \wedge KP_j^{(2)} = KZ_j^{(2)} - T_j\right)\middle|ZZ\Delta T_{j+1}\right) \Rightarrow$$
$$\left(KP_j = \min\left\{KP_j^{(1)}, KP_j^{(2)}\right\} \wedge KZ_j = \min\left\{KZ_j^{(1)}, KZ_j^{(2)}\right\}\right) \tag{8}$$

$$UR_j = KZ_j - RZ_j \left| j = \overline{1, N_{v,1}}\right. \tag{9}$$

$$NR_j = KP_{j+1} - KZ_j \left| j = \overline{1, N_{v,1} - 1},\ NR_j = 0\right| j = N_{v,1} \tag{10}$$

4. ZAKLJUČAK

Na primeru složenog proizvoda, koji se nalazi u proizvodnom programu Kompanije „Sloboda“ Čačak prikazana je metodologija projektovanja proizvodnog ciklusa koristeći tehniku merežnog planiranja. Transformacija grafa tehnološke strukture u mrežu, prikazana na slici 5, može se koristiti za projektovanje proizvodnog ciklusa primenom CPM i PERT tehnike. U ovom slučaju nema preklapanja između proizvodnih faza i projektovana dužina proizvodnog ciklusa iznosi 41 dan i postoji samo jedan kritični put u grafu.

Međutim, ukoliko postoje preklapanja između PF-a, što je u praksi čest slučaj, onda se mora koristiti PDM tehnika. U radu je prikazan algoritam za crtanje i proračun mreže ukoliko se koristi PDM za projektovanje proizvodnog ciklusa složenog proizvoda. Projektovana vrednost proizvodnog ciklusa SP-a, kada imamo preklapanje PF-a, iznosi 31 dan pri čemu postoje dva kritična puta. Prednost PDM-a u odnosu na CPM i PERT je što se sa mreže mogu lako pročitati najraniji i najkasniji počeci i završeci svake proizvodne faze kao i ukupna i nezavisna vremenska rezerva.

5. LITERATURA

[1] Jovanović, J.: *Istraživanje procesa upravljanja proizvodnim ciklusom složenog proizvoda*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2015.

[2] Ilić, LJ.: *Projektovanje postupka za utvrđivanje ciklusa proizvodnje složenog proizvoda*, magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1978.

[3] Ilić, LJ.: *Organizacija kao faktor uticaja na ciklus proizvodnje složenog proizvoda*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1991.

[4] Kefer, P.: *Prilog organizaciji upravljanja proizvodnjom složenih proizvoda*, magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1993.

[5] Ćebić, D.: *Koncept određivanja strukture program menadžmenta u proizvodnji složenog proizvoda*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”, Zrenjanin, 2006.

[6] Jovanović, J., Milanović, D. D., Đukić, R.: *Manufacturing cycle time analysis and scheduling to optimize its duration*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol. 60, No. 7-8, pp. 512-524, 2014.

[7] Jovanović, J., Đukić, R.: *Establishing technological cycle time length of the production phase in the combined mode of workpiece move*, Proceedings of the 6th International Symposium on Industrial Engineering - SIE2015, pp. 355-358, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade**,** Belgrade, September 2015.

[8] Jovanović J., Đukić R.: *Uticaj proizvodno-transportne partije na trajanje tehnološkog ciklusa proizvodne faze*, 40. Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem, str. 4.1-4.6, Beograd, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Maj 2016.

[9] Jovanovic, J.: *Analysis of contributory factors on the technological cycle time*, 38th International Conference on Production Engineering –Serbia, ICPE-S, pp. 332-337, Faculty of Technical Science Čačak, October 2021.

Jovanović, J.

DESIGNING OF MANUFACTURING CYCLE OF A COMPLEX PRODUCT USING NETWORK PLANNING TECHNIQUE

Abstract: *The paper presents a methodology for designing the production cycle of a complex product based on the process of transforming its graph of technological structure into network. On the example of a complex product, which is in the production program of the "Sloboda" Co. – Cacak, the production cycle was designed using network planning technique, such as CPM, PERT and PDM. Special attention is paid to the production phases that are conditioned, that is, which form a characteristic path in the graph of the technological structure of a complex product.*

Key words: *designing, production cycle, complex product, network planning technique*

43. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

43rd JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNIK RADOVA

PROCEEDINGS

23. simpozijum

MENADŽMENT KVALITETOM

Beograd, oktobar 2022.

MENADŽMENT KVALITETOM
QUALITY

Milovanović, N., Đuričić, V., Stojadinović, S.
ANALIZA DOKUMENTOVANIH INFORMACIJA INTEGRISANOG MENADŽMENT SISTEMA HOLDING KORPORACIJE „KRUŠIK” A.D. 5.1

← NAZAD

Milovanović, N., Đuričić, V., Stojadinović, S. [1)]

ANALIZA DOKUMENTOVANIH INFORMACIJA INTEGRISANOG MENADŽMENT SISTEMA HOLDING KORPORACIJE „KRUŠIK" A.D.

Rezime

Integrisani menadžment sistem (IMS) omogućava efektivno i efikasno planiranje i upravljanje poslovanjem jedne organizacije. Shodno činjenici da jedan IMS može obuhvatiti dva ili više standarda, obim dokumentovanih informacija može biti znatno smanjen usled činjenice da odgovor na više zahteva iz različitih standarda koji čine IMS može biti jedinstven. Cilj ovog rada je analiza postojećih dokumentovanih informacija IMS-a u HK „Krušik" a.d. i njihovog uticaja na proizvodnju i poslovanje. Akcenat je na baznom standardu ISO 9001:2015 (QMS) - Sistem menadžmenta kvalitetom, i njegovoj primeni u HK „Krušik" a.d. Primenom ovog standarda, ispunjavaju se zahtevi zainteresovanih strana koje čine kupci, isporučioci, kao i direktor i svi zaposleni. Izvršena je analiza projektovanih modela dokumentovanih informacija IMS-a. Navedeni su i primeri razvijenih i primenjenih dokumentovanih informacija uz neophodnu diskusiju koja prati sve specifičnosti delatnosti preduzeća.

Ključne reči: Integrisani menadžment sistem, kvalitet, standardi, dokumentovane informacije

1. UVOD

Izgradnja efikasnog integrisanog menadžmenta sistema (engl. *Integrated Management System – IMS*) predstavlja ključni izazov za svaku organizaciju čiji je cilj kontinuirano poboljšavanje poslovnih performansi. Kada je uspešno implementiran, ovakav sistem povećava konkurentnost organizacije na tržištu, što znači da predstavlja osnovu za uspešno poslovanje i unapređenje poslovnih procesa. To dalje dovodi do unapređenja imidža, zadovoljstva kupaca, povećanja prihoda i smanjenja troškova. Organizacije postaju profitabilnije, ali i fleksibilnije i agilnije, te se mogu prilagoditi stalnim promenama na tržištu [1, 2].

Dakle, IMS je u osnovi sistem menadžmenta koji integriše više komponenti sistema u jedan koherentan sistem, što dovodi do postizanja željenih ciljeva u skladu sa politikom i strateškim usmerenjem organizacije [2]. Ove komponente sistema su različiti standardizovani sertifikovani sistemi menadžmenta: kvaliteta (engl. *Quality Management System - QMS*), životne sredine (engl. *environmental management system - EMS*), zdravlja i bezbednosti na radu (engl. *Occupational Health and Safety - OH&S*) i drugi.

U ovom radu je izvršena analiza implementiranog IMS-a u Holding korporaciji „Krušik" a.d. Pošlo se od poslovnika za IMS, kao osnovnog dokumenta integrisanih menadžment sistema. Poslovnik prikazuje sisteme menadžmenta i način rada u organizaciji sa ciljem zadovoljenja potreba i očekivanja korisnika proizvoda/usluga i drugih zainteresovanih strana [3]. Poslovnikom su obuhvaćeni svi zahtevi sistema menadžmenta, prema zahtevima pojedinačnih standarda, i to: SRPS ISO 9001:2015, SRPS ISO 14001:2015 i SRPS ISO 45001:2018.

Analiza IMS-a organizacije HK „Krušik" a.d. izvršena je kroz pet poglavlja, pri čemu je u potpunosti predstavljen princip funkcionisanja postojećeg sistema kvaliteta. Nakon uvoda, u drugom poglavlju je predstavljen proizvodni program organizacije u kojoj je IMS primenjen, polazeći od istorijata i izvršene sertifikacije. U trećem poglavlju su navedene karakteristike tri bazna standarda IMS-a, sa posebnim osvrtom na ISO 9001:2015 i primenjeni PDCA ciklus. U četvrtom poglavlju je definisan model dokumentovanih informacija IMS-a, a u petom poglavlju je predstavljen konkretan primer jedne izrađene procedure kao razvijenog i primenjenog dokumenta IMS-a u HK „Krušik" a.d. Šesto poglavlje obuhvata zaključak i pogled na buduća istraživanja u ovoj oblasti.

[1)] Nenad Milovanović, student druge godine Master akademskih studija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (1367-2020@studenti.mas.bg.ac.rs), Vukoman Đuričić, dipl. inž. maš., HK „Krušik" a.d., (vukomandj1959@gmail.com), dr Slavenko Stojadinović, van. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (sstojadinovic@mas.bg.ac.rs).

2. POSLOVANJE ORGANIZACIJE I UVOĐENJE STANDARDA

2.1 Kratak istorijat i proizvodni program organizacije

Proizvodna organizacija HK „Krušik" a.d. pod ovim nazivom posluje od januara 1948. godine. Prvobitno je preduzeće osnovano 1939. godine pod nazivom „Vistad" i važilo je za najvećeg proizvođača ratno-materijalnih sredstava na teritoriji Jugoslavije pred Drugi svetski rat i za vreme njegovog trajanja [3].

Do 1954. godine, „Krušik" je isključivo proizvodio robu za potrebe vojske, a sredinom pedesetih godina XX veka, postaje i izvoznik, te je prvi izvoz ostvaren 1954. godine, a primat u izvozu imala je namenska proizvodnja. 70% od ukupne proizvodnje plasirala je na strana tržišta, obezbeđujući time veliku finansijsku korist. Period od 1970. do 1985. godine, smatra se zlatnim dobom „Krušika", koji je predstavljao giganta u jugoslovenskim razmerama sa oko deset hiljada zaposlenih. Razvoj kapaciteta i novih tehnologija, namenskoj proizvodnji daje značajno mesto u razvoju jugoslovenske raketne industrije, a „Krušik" je postao razvojni nosilac grada Valjeva, ali i regiona.

Usled veliki promena na svetskom tržištu, u drugoj polovini osamdesetih godina, fabrike gube izvozna tržišta, što je znatno usporilo dotadašnji trend razvoja i otežalo položaj preduzeća. 1992. godine „Krušik" prelazi na organizaciju po Holding sistemu. Nakon bombardovanja, 1999. godine, fabrika je ostala bez 90% objekata, međutim najveći deo mašinskog kapaciteta je spašen, što je omogućilo organizovanje proizvodnje na lokacijama izvan HK „Krušik" a.d. Danas je proizvodni program ove organizacije podeljen u tri kategorije [3]:

1. vojni program (proizvodnja sredstava naoružanja i vojne opreme),
2. civilni program (protivgradne rakete i protivgradni sistemi, električni detonatori, grebenaste sklopke, panik svetiljke, odlivci od legura aluminijuma i bakra, univerzalni nosači klima uređaja) i
3. tehnološke mogućnosti (obrada obrtnih i prizmatičnih delova, termička obrada, obrada plastičnih delova, hemijska i elektrohemijska zaštita, tehnologija prerade u toplom stanju, tehnologija obrade hladnom deformacijom, tehnologije vezane za eksplozivna punjenja).

2.2 Sertifikacija

HK „Krušik" a.d. je kao proizvođač naoružanja i vojne opreme od samog nastanka imala uređene i dokumentovane postupke izrade i kontrole koji su činili uređen sistem kvaliteta. Pojavom ISO (engl. *International Organization for Standardization*) standarda, trebalo je samo postojeće stanje prilagoditi njihovim zahtevima. Prva sertifikacija o usklađenosti sa zahtevima standarda JUS ISO 9000:2001 izvršena je 2003. godine od strane Vojne kontrole kvaliteta. Kasnije resertifikacije su vršene u trogodišnjim intervalima, s tim da je 2009. godine sistem menadžmenta proširen i na druge oblasti standarda. Ovako je integrisani menadžment sistem sertifikovan 2009. godine od strane švajcarskog sertifikacionog tela (franc. *Société Générale de Surveillance - SGS*) i od strane Vojne kontrole kvaliteta prema zahtevima standarda SRPS ISO 9001:2008, SRPS ISO 14001:2005 i SRPS OHSAS (engl. *Occupational Health and Safety Assessment Series*) 18001:2007. Potom je 2011. godine akreditovana i metrološka laboratorija (standard ISO 17025:2006). Resertifikacija IMS-a izvršena je u julu 2012. godine od strane SGS-a, za svaki standard pojedinačno [3].

Od 2015. do danas, sertifikacije, odnosno resertifikacije se vrše jednom godišnje, od strane Vojne kontrole kvaliteta i SGS-a i to prema zahvetima pojedinačnih standarda koji čine IMS.

3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE I ZAHTEVI STANDARDA KOJI ČINE IMS

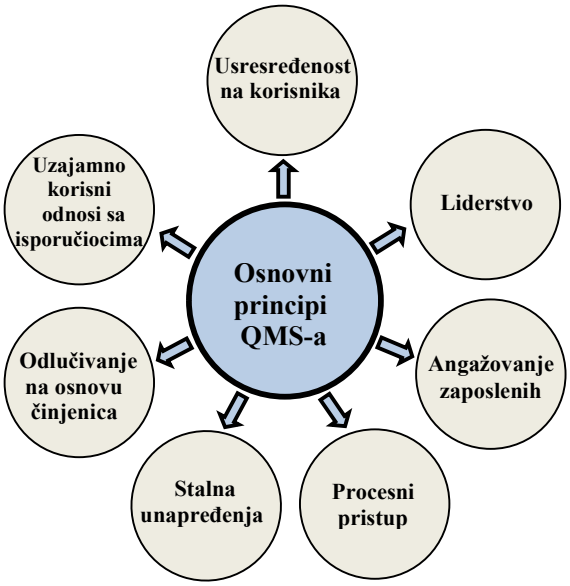
3.1 Standard ISO 9001:2015 – Sistem menadžmenta kvalitetom (QMS)

Standardi serije ISO 9000 se u našoj zemlji primenjuju u organizacijama svih vrsta i veličina (manje, srednje, velike), kako bi se sproveli efektivni sistemi menadžmenta kvalitetom. ISO 9001:2015 je međunarodni standard zasnovan na osnovnim principima upravljanja kvalitetom koje je neophodno razumeti i primeniti prilikom razvoja QMS-a.

Ovi principi su predstavljeni na slici 1, a u nastavku su ukratko opisani [4]:

1. **Usresređenost na korisnika.** Organizacije zavise od svojih korisnika, što znači da treba da razumeju njihove aktuelne i buduće potrebe, ispune njihove zahteve i pruže i više nego što korisnici očekuju.
2. **Liderstvo.** Lideri uspostavljaju jedinstvo ciljeva i pravca vođenja organizacije. Oni stvaraju i održavaju interno okruženje u kojem zaposleni mogu da učestvuju u ostvarivanju ciljeva organizacije.

3. **Angažovanje zaposlenih.** Uključenost zaposlenih omogućava da se njihove sposobnosti iskoriste za ostvarivanje dobrobiti organizacije.
4. **Procesni pristup.** Željeni rezultat se efikasnije postiže ako se upravljanje odgovarajućim aktivnostima i potrebnim resursima ostvaruje kao proces.
5. **Stalna unapređenja.** Kontinuirana poboljšanja ukupnih performansi organizacije su njen stalni cilj.
6. **Odlučivanje na osnovu činjenica.** Efektivne odluke zasnovane su na analizi podataka i informacija.
7. **Uzajamno korisni odnosi sa isporučiocima.** Organizacija i isporučioci uspostavljaju uzajamno korisne odnose čime se povećava sposobnost i jednih i drugih u procesu stvaranja vrednosti.



Slika 1. *Osnovni principi koji se primenjuju prilikom razvoja sistema menadžmenta kvalitetom*

Predviđeno je da svi zahtevi standarda ISO 9001:2015 budu primenljivi za sve organizacije, bez obzira na njihovu vrstu ili veličinu i proizvode/usluge koje obezbeđuju [5]. To znači da se obim i broj dokumentata QMS-a izrađen u HK „Krušik" a.d. može znatno razlikovati od bilo koje druge organizacije upravo zbog veličine organizacije i vrste njenih aktivnosti, složenosti procesa i njihovog međusobnog delovanja i osposobljenosti zaposlenih. Zahtevi QMS-a u okviru standarda ISO 9001:2015 predstavljeni su u tabeli 1.

Tabela 1. Zahtevi standarda SRPS ISO 9001:2015 [3, 5]

Zahtev	Tačke (poglavlja) zahteva standarda
1. Predmet i područje primene	Obuhvaćeni su Poslovnikom o IMS-u koji predstavlja osnovni dokument integrisanih menadžment sistema organizacije HK „Krušik" a.d. Poslovnik prikazuje sisteme menadžmenta i način rada u organizaciji, a u cilju zadovoljenja potreba i očekivanja korisnika proizvoda/usluga i drugih zainteresovanih strana.
2. Normativne reference	ISO 9000:2015, Sistemi menadžmenta kvalitetom - Osnove i rečnik.
3. Termini i definicije	Termini i definicije su preuzeti iz standarda ISO 9000:2015.
4. Kontekst organizacije	4.1. Razumevanje organizacije i njenog konteksta. 4.2. Razumevanje potreba i očekivanja zainteresovanih strana. 4.3. Utvrđivanje predmeta i područja primene. 4.4. Sistem menadžmenta kvalitetom i njegovi procesi.
5. Liderstvo	5.1. Liderstvo i posvećenost. 5.2. Politika i ciljevi. 5.3. Organizacione uloge, odgovornosti i ovlašćenja.
6. Planiranje	6.1. Mere koje se odnose na rizike i prilike. 6.2. Ciljevi kvaliteta i planiranje njihovog ostvarivanja.
7. Podrška	7.1. Resursi. 7.2. Kompetentnost. 7.3. Svest. 7.4. Komuniciranje. 7.5. Dokumentovane informacije.
8. Realizacija operativnih aktivnosti	8.1. Planiranje i upravljanje realizacijom operativnih aktivnosti. 8.2. Zahtevi za proizvode i usluge. 8.3. Projektovanje i razvoj proizvoda i usluga. 8.4. Upravljanje eksterno nabavljenim proizvodima i uslugama. 8.5. Proizvodnja i pružanje usluga. 8.6. Puštanje proizvoda i usluga.
9. Vrednovanje performansi	9.1. Praćenje, merenje, analiza i vrednovanje. 9.2. Interna provera. 9.3. Preispitivanje od strane rukovodstva.
10. Poboljšavanje	10.1. Opšte. 10.2. Neusaglašenost i korektivne mere. 10.3. Stalno poboljšavanje.

3.2 Standard ISO 14001:2015 – Sistem menadžmenta zaštitom životne sredine (EMS)

Cilj uvođenja ovog standarda je da organizaciji pomogne da zaštiti životnu sredinu i da odgovori na izmene stanja životne sredine u ravnoteži sa društveno-ekonomskim potrebama. Izgradnja EMS-a treba da ukaže na različite faktore i postupke koji mogu dovesti do postizanja uštede kao što su smanjenje škarta, racionalnije korišćenje sirovina ili smanjenje troškova zagađenja.

Osnovne prednosti implementacije sistema menadžmenta zaštitom životne sredine su [6]:

- smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu;
- smanjenje troškova;
- smanjenje otpada, ponovna upotreba i recikliranje;
- ispunjenje zakonskih obaveza i lakše dobijanje ovlašćenja i dozvola od lokalne i državne vlasti;
- povećanje poverenja zainteresovanih strana i klijenata.

3.3 Standard ISO 45001:2018 – Sistem menadžmenta zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu (OH&S)

OH&S 45001:2018 je razvijen tako da u potpunosti bude kompatibilan sa standardima za sisteme menadžmenta kvalitetom (QMS) i zaštitom životne sredine (EMS), čime se olakšalo integrisanje ovih sistema od strane organizacija koje žele da implementiraju integrisani menadžment sistem.

Standardi za upravljanje zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu treba da pomognu organizacijama da uspostave bezbedno radno okruženje, odnosno zaštite zaposlene i posetioce od mogućih povreda. Uvođenje OH&S sertifikata doprinosi i [7]:

- spremnosti organizacije da detektuje i pravovremeno otkloni opasnosti;
- usklađivanju radnih procesa organizacije;
- pružanju poverenja korisnicima/kupcima, jer postoji opredeljenost upravljanja zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu koja se može i dokazati;
- interesovanju stranih investitora, dokazivanjem odgovornosti i pouzdanosti;
- otvaranju novih tržišnih mogućnosti za saradnju sa inostranim preduzećima.

3.4 Veza između zahteva EMS-a i OH&S-a

Usled koncepcijske sličnosti ovih standarda sa ISO 9001:2015, čiji su zahtevi prikazani u tabeli 1, sada se može predstaviti veza između ISO 14001 i ISO 45001. Identično, u prva 3 zahteva su dati predmet i područje primene, normativne reference i termini i definicije, što znači da će samo biti razmatrani zahtevi od 4. do 10.

Poređenje ključnih (specifičnih) tačaka po kojima se razlikuju zahtevi ova dva standarda, predstavljeno je u tabeli 2. Preostale tačke nisu navedene, jer su identične tačkama zahteva u ISO 9001:2015.

Tabela 2. Veza između zahteva standarda ISO 14001:2015 i ISO 45001:2018 [6, 7]

ISO 14001:2015		ISO 45001:2018	
4.	4.3. Utvrđivanje predmeta i područja primene sistema menadžmenta životnom sredinom (EMS). 4.4. Sistem menadžmenta životnom sredinom.	**4.**	4.3. Utvrđivanje predmeta i područja primene sistema menadžmenta zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu (OH&S). 4.4. Sistem menadžmenta zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu.
5.	5.2. Politika životne sredine.	**5.**	5.2. OH&S politika. 5.4. Konsultovanje i učestvovanje radnika.
6.	6.1. Opšte 6.1.2. Aspekti životne sredine 6.2. Ciljevi životne sredine i planiranje njihovog ostvarivanja.	**6.**	6.1. Opšte 6.1.2. Identifikacija opasnosti i ocenjivanje rizika i prilika. 6.2. OH&S ciljevi i planiranje njihovog ostvarivanja.
7.	*Identično zahtevu u ISO 9001:2015.	**7.**	*Identično zahtevu u ISO 9001:2015.
8.	8.2. Pripravnost na reagovanje u vanrednim situacijama i odgovor na njih.	**8.**	8.2. Pripravnost na reagovanje u vanrednim situacijama i odgovor na njih.
9.	*Identično zahtevima u ISO 9001:2015.	**9.**	*Identično zahtevu u ISO 9001:2015.
10.		**10.**	10.1. Incident, neusaglašenost i korektivna mera.

3.5 Ciklus „planirajte-uradite-proverite-delujte”

Standardi integrisanog menadžment sistema su zasnovani na konceptu „planirajte-uradite-proverite-delujte” (engl. *„Plan-Do-Check-Act” – PDCA*), koji je 1950. godine u Japanu uveo američki inženjer i guru kvaliteta Edvard Deming. PDCA ciklus omogućava organizaciji da obezbedi snabdevanje svojih procesa adekvatnim resursima, kako bi se tim procesima moglo uspešno upravljati, kao i da se ustanove prilike za poboljšanje i da se prema njima deluje [5]. Postoje četiri faze PDCA ciklusa i one se ukratko mogu objasniti na sledeći način:

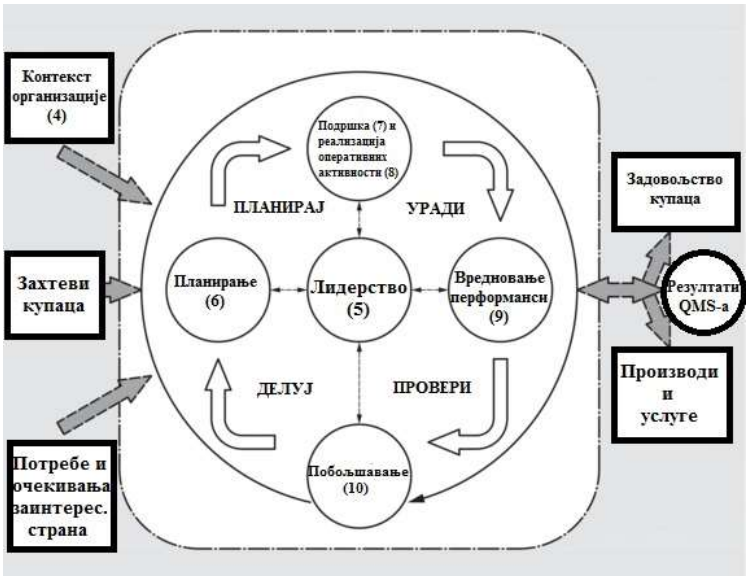
1. Planiranje – za početak, traži se analiza trenutnog stanja organizacije i njenih potreba. Treba pronaći područja koja se mogu poboljšati i na temelju toga utvrditi ciljeve koji se žele i mogu postići.

2. Realizacija/izvršavanje – u ovoj fazi je neophodno primeniti definisane procese po ranije utvrđenom planu, sa ciljem da se postigne kontinualno poboljšavanje.

3. Provera – ostvareni rezultati se mere i upoređuju sa željenim i to u skladu sa politikom, zahtevima i ciljevima organizacije. Na taj način se vrši provera da li je problem zaista rešen.

4. Delovanje – ako je rezultat prethodne faze dobar, podrazumeva se ponovno preduzimanje mera za stalno poboljšavanje. U slučaju da rezultati nisu bili zadovoljavajući, potrebno je promeniti plan i započeti novi ciklus.

Na slici 2 je grafički predstavljena veza između Demingovog PDCA ciklusa i zajedničkih zahteva QMS-a, EMS-a i OH&S-a kao baznih standarda integrisanog menadžment sistema.



Slika 2. *Veza između Demingovog PDCA ciklusa i zahteva standarda [5]*

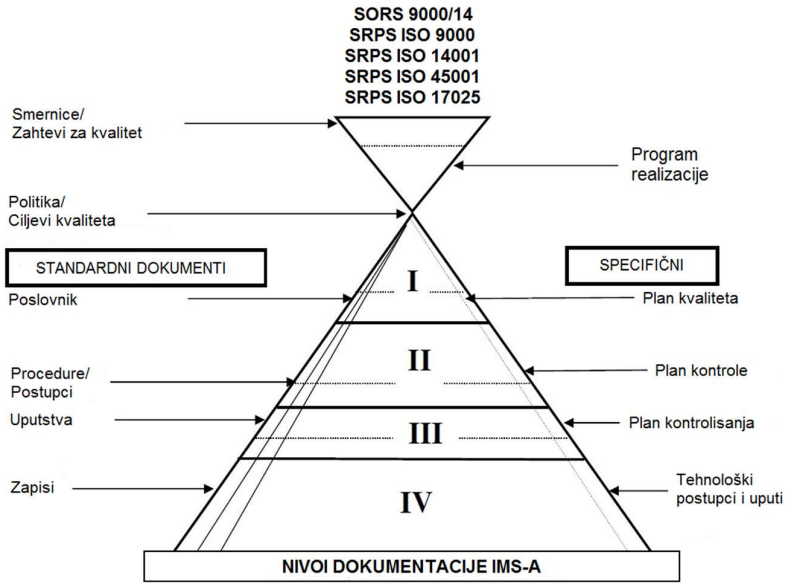
4. MODEL DOKUMENTOVANIH INFORMACIJA U HK „KRUIŠIK” A.D.

Sistem menadžmenta u HK „Krušik” a.d. zasnovan je na pisanim pravilima. Za dokumente integrisanih menadžment sistema propisan je način izrade, preispitivanja i odobravanja. U okviru načina izrade, definisane su obaveze u pogledu sadržaja, izgleda i označavanja dokumenata. Sve dokumente pre puštanja u primenu preispituju rukovodilac sektora kontrole kvaliteta i budući korisnici dokumenata, a konačno ih usvaja i odobrava generalni direktor preduzeća [3].

Dokumentacija IMS-a sadrži [3]:

- politiku i ciljeve integrisanih menadžment sistema,
- poslovnik o integrisanim menadžment sistemima,
- procedure/postupke,
- uputstva,
- dokumentaciju neophodnu za planiranje, izvođenje i upravljanje procesima i
- zapise za integrisane menadžment sisteme.

Grafički prikaz hijerarhijske strukture dokumenata IMS-a predstavljen je na slici 3.



Slika 3. *Hijerarhijska struktura i veza između dokumenata integrisanog menadžment sistema [3]*

Politika IMS-a – predstavlja izjavu najvišeg rukovodstva o načinu poslovanja kako bi se osiguralo zadovoljstvo svih zainteresovanih strana. Sva tri standarda insistiraju na izjavi o politici, međutim, optimalno je objaviti jednu zajedničku politiku. Poslovnik o sistemu menadžmenta je dokument kojim se definiše IMS.

Procedura/postupak je utvrđen način za obavljanje neke aktivnosti ili procesa. Sva tri standarda zahtevaju dokumentovane procedure, a dokumentacija može da bude zajednička. U narednom poglavlju predstavljen je primer jedne izdrađene procedure u HK „Krušik" a.d.

Uputstvo je dokument u kome se zbog racionalnih razloga navodi deo informacija koji kompletira skup informacija naveden u proceduri.

Zapis je dokument kojim se iskazuju dobijeni rezultati ili daju dokazi o izvršenim aktivnostima [3].

5. PRIMER RAZVIJENE I PRIMENJENE PROCEDURE ZA HK „KRUŠIK" A.D.

Tabela 3. Opšta procedura za realizaciju procesa proizvodnje u HK „Krušik" a.d. – svrha i područje primene [3]

Integrisani menadžment sistem (IMS)	Vrsta dokumenta: opšta procedura	
Naziv dokumenta: **Opšta procedura za realizaciju procesa proizvodnje**	Oznaka: KB - 81.21.016	Broj revizija: 3

1. Svrha - ovom procedurom definišu se:

- vrste proizvodnih procesa u HK „Krušik" a.d.;
- načini kontrole odvijanja proizvodnih procesa preko propisane dokumentacije, odobrenja, verifikacije i dokumentovanih instrukcija i obuke;
- proizvodni procesi, objekti i oprema za koje su potrebne odgovarajuće dozvole/saglasnosti;
- obaveze periodičnih pregleda i održavanja opreme radi obezbeđivanja neprekidne sposobnosti procesa;
- ovlašćenja za zaustavljanje procesa proizvodnje kada se ne ispunjava propisani kvalitet;
- iniciranje izmena u proizvodnim procesima.

2. Područje primene

Ova procedura se primenjuje i važeća je u svim organizacionim celinama (sektori, pogoni, službe, odeljenja ili drugi subjekti), pri:

- proizvodnji i montaži delova, podsklopova i finalnih proizvoda od izdavanja radnog naloga do pakovanja;
- doradi neusaglašenih proizvoda;
- sprovođenju privremenih/stalnih izmena u procesima.

Tabela 4. Opšta procedura za realizaciju procesa proizvodnje u HK „Krušik" a.d. – def. i detalji procedure [3]

Integrisani menadžment sistem (IMS)	Vrsta dokumenta: opšta procedura	
Naziv dokumenta: **Opšta procedura za realizaciju procesa proizvodnje**	Oznaka: KB - 81.21.016	Broj revizija: 3

3. Definicije pojmova

3.1. Proces: skup međusobno povezanih resursa i aktivnosti koji pretvara ulazne elemente u izlazne. **3.2. Resursi:** obuhvataju osoblje, finansije, pogone, opremu, postupke i metode. **3.3. Kontrola kvaliteta:** obuhvata operativne metode i aktivnosti koje imaju za cilj nadgledanje procesa i utvrđivanje postizanja usaglašenosti. **3.4. Samokontrolisanje/samoinspekcija:** kontrolisanje rada koje obavlja izvršilac tog rada prema jasno specificiranim pravilima. Rezultati samokontrolisanja mogu da se koriste za kontrolu procesa. **3.5. Odgovornost za kvalitet proizvoda:** opšti termin koji se koristi da opiše obavezu organizacije ili isporučioca da izvrše naknadu gubitka zbog povrede osoblja, oštećenja imovine ili drugih šteta koje je prouzrokovao proizvod. **3.6. Kvalifikovan:** status dodeljen nekom entitetu kada je prikazana njegova sposobnost da ispunjava specificirane zahteve.

4. Detalji procedure (kratak opis aktivnosti)

U HK „Krušik" a.d. postoje i odvijaju se sledeći proizvodni procesi:

- mehanička obrada rezanjem i plastičnim deformisanjem (kovanje, presovanje, prosecanje, istiskivanje i izvlačenje), livenje obojenih metala, termička obrada, zavarivanje, prerada plastičnih masa, površinska zaštita, fosfatiranje i nanošenje premaza, regenaracija ulja za podmazivanje i sredstava za odmašćivanje, proizvodnja i montaža akumulatora, montaža podsklopova i gotovih proizvoda, sinteza inicijalnih eksploziva i poluproizvoda, nalivanje eksploziva i fosfora.
- Izrada pirotehničkih smeša i eksplozivnih punjenja tehnologijom presovanja, proizvodnja i distribucija energenata i radnih fluida, prerada otpadnih voda i dr.
- Kontrola kvaliteta, pregled i etaloniranje merne opreme.

Svi navedeni procesi se obavljaju prema unapred propisanoj tehničkoj dokumentaciji, kao sastavnom delu dokumentacije sistema menadžmenta kvalitetom (QMS-a), u kojoj su definisani podesivi parametri procesa i karakteristike kvaliteta proizvoda. U tabeli 5 naveden je spisak dokumentacije i lica odgovornih za izradu i kontrolu dokumenata koji se koriste u procesima, tako da se samo važeća verzija tih dokumenata nalazi u pogonu gde se proces odvija:

Tabela 5. Spisak dokumentacije i lica odgovornih za izradu i kontrolu dok. korišćenih u procesima [3]

R.b.	Dokumentacija	Odgovorna osoba za izradu/kontrolu dokumentacije
1.	Tehnički crteži	Rukovodilac sektora razvoja
2.	Tehnološki postupci izrade i montaže	Rukovodilac sektora razvoja
3.	Etaloni	Rukovodilac sektora razvoja
4.	Planovi kvaliteta ili neki njihovi delovi	Rukovodilac sektora razvoja
5.	Obaveštenja o izmenama tehničke dok.	Rukovodilac sektora razvoja
6.	Procedure/postupci	Rukovodilac sektora kvaliteta
7.	Uputstva	Rukovodilac sektora kvaliteta

5. Zapisi i izveštaji (dokumenti koji prate ovu proceduru)

Tabela 6. Spisak zapisa koji prate proceduru [3]

R.b.	Naziv zapisa	Arhiviranje			Odgovoran
		mesto	način	rok (god.)	
1.	Zahtev za izmenu procesa	Izvršni direktor Rukovodioci RJ	original kopija	10 godina	Izvršni direktor Rukovodioci RJ
2.	Nalog za zaustavljanje procesa/prijema	Izvršni direktor Ruk. sektora kvaliteta Ruk. sektora proizvodnje Vlasnik procesa	kopija original kopija kopija	10 godina	Izvršni direktor Ruk. sekt. kval. Ruk. sekt. proizv. Vlasnik procesa
3.	Nalog za ponovno otpočinjanje procesa/prijema	Ruk. sektora kvaliteta Vlasnik procesa	original kopija	10 godina	Ruk. sekt. kval. Vlasnik procesa
4.	Zapisnik za validaciju procesa/podprocesa	Vlasnik procesa	original	2 godine	Vlasnik procesa
5.	Karton etalona uzorka	Vlasnik procesa	original	trajno	Vlasnik procesa

6. ZAKLJUČAK

Ovim radom su predstavljeni osnovni principi i politika poslovanja u proizvodnoj organizaciji HK „Krušik" a.d., u kojoj je uspešno implementiran integrisani menadžment sistem i omogućeno upravljanje dokumentovanim informacijama. Analizom zahteva integralnih standarda IMS-a, ukazano je na njihove sličnosti, pri čemu je veliki broj tačaka ovih zahteva gotovo identičan. Integracija je na taj način olakšana, a implementacijom IMS-a, mnogi rizici poslovanja su smanjeni. Pritom, organizacija ostvaruje značajne interne i eksterne koristi koje se mogu u potpunosti preispitati i analizirati.

U interne koristi preduzeća ubrajaju se: povećanje kvaliteta proizvoda/usluga, efikasno definisanje odgovornosti i podizanje nivoa kompetentnosti zaposlenih, poboljšana realizacija operativnih aktivnosti, smanjenje neusaglašenosti i izbegavanje (sprečavanje) dupliranja dokumentovanih informacija.

Najznačajnije eksterne koristi su: zadovoljenje potreba i zahteva kupaca i sticanje njihovog poverenja, unapređenje ugleda organizacije, održavanje konkurentnosti na tržištu i usklađivanje sa zakonima [3].

Uspešnom implementacijom IMS-a, kroz redovne sertifikacije i akreditacije, postavljen je temelj za sprovođenje razvojne strategije i ostvarivanje ciljeva preduzeća. Odvijanje definisanih procesa u organizaciji je poboljšano, smanjeni su neželjeni rizici i negativni uticaji na životnu sredinu, a zaposleni su na taj način dodatno zaštićeni. Međutim, zahtevi tržišta se menjaju, a trend promena nije lako predvideti, pa zbog toga treba razmišljati o daljem napretku i mogućim poboljšanjima. Neki od postupaka koje bi u budućnosti trebalo razmatrati, a koji direktno mogu dovesti do unapređenja poslovnih aktivnosti su:

- uporedna analiza (engl. *benchmarking*) poslovnih aktivnosti, gde se merenje performansi vrši na osnovu specifično utvrđenih parametara [8]. U ovom slučaju, može biti analiziran uticaj IMS-a na poboljšanje ugleda, zadovoljenje kupaca i povećanje prihoda u odnosu na konkurentne organizacije.
- Korišćenje statističkih metoda i modela koji treba da analiziraju uticaj različitih sistema menadžmenta i predvide trendove napretka, ali i ukažu na potencijalne nedostatke i propuste u njihovoj primeni.

7. LITERATURA

[1] Blazey, M.: *Insights to Performance Excellence – Understanding the Integrated Management System and the Baldrige Criteria*, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2013.

[2] Dalling, I., Holt, B.: *Management Integration: Benefits, Challenges and Solutions*, IIRSM (International Institute of Risk & Safety Management) Technical Paper, str. 10-12, London, England, March 2012.

[3] *Poslovnik o integrisanim menadžment sistemima*, HK „Krušik" a.d., Valjevo, Srbija, 2018.

[4] *Quality Management Principles*, ISO, Geneva, Switzerland, 2015.

[5] SRPS ISO 9001:2015 *Sistemi menadžmenta kvalitetom – Zahtevi*, Institut za standardizaciju Srbije (ISS), Beograd, 2015.

[6] SRPS ISO 14001:2015 *Sistemi menadžmenta životnom sredinom – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje,* ISS, Beograd, 2015.

[7] SRPS ISO 45001:2018 *Sistemi menadžmenta zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje*, ISS, Beograd, 2018.

[8] Domingues, P., Sampaio, P., Arezes, P.: *Benchmarking on Behalf of Management Systems Integration,* Business Sustainability II, str. 2-3, Povoa de Varzim, Portugal, June 2011.

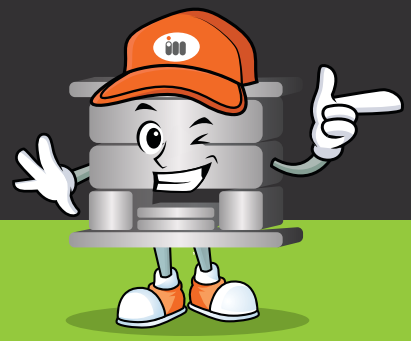
Milovanović, N., Đuričić, V., Stojadinović, S.

ANALYSIS OF DOCUMENTED INFORMATION OF THE INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM OF THE HOLDING CORPORATION „KRUŠIK" A.D.

Abstract: *An integrated management system (IMS) enables effective and efficient planning and management of an organization's business. Due to the fact that one IMS can cover two or more standards, the volume of documented information can be significantly reduced due to the fact that the response to multiple requests from different standards that make up IMS can be unique. The aim of this paper is to analyze the existing documented information of IMS in HK „Krušik" a.d. and their impact on production and business. The emphasis is on the basic standard ISO 9001:2015 (QMS) - Quality Management System, and its application in HK „Krušik" a.d. By applying this standard, the requirements of stakeholders consisting of customers, suppliers, as well as the director and all employees are met. An analysis of the projected models of documented IMS information was performed. Examples of developed and applied documented information are given, along with the necessary discussion that follows all the specifics of the company's activities.*

Key words: *Quality management, integrated management system, standards, documented information*

ZAHVALNICA



EKOLOŠKA ODRŽIVOST

390 t CO_2

UŠTEDA NA GODIŠNJEM NIVOU PROIZVODNJOM LAKE KANTICE

100% reciklabilno

NAPRAVLJENO OD JEDNOG MATERIJALA, U POTPUNOSTI SE MOŽE RECIKLIRATI

31,94% ušteda PP

UŠTEDA U ODNOSU NA STANDARDNU KANTICU OD 1L

Novi koncept alata

ROBUSNIJI I JAČI ALAT OMOGUĆAVA DUŽU UPOTREBU

Inovativni dizajn kantice

OMOGUĆAVA DUŽI ŽIVOTNI VEK UPAKOVANIH PROIZVODA

INMOLD

WWW.INMOLD-LTD.COM

DRIVEN BY EXPERIENCE AND INNOVATION

FMP
KONZORCIJUM

Brza i efikasna
primena naučnih
znanja u industriji

LOLA INSTITUT

3D REPUBLIKA
POSTANI DRŽAVLJANIN

https://www.3drepublika.com/

3D štampači

3D skeneri

Materijali - Filamenti

Automatizacija i robotika

Beograd	Sarajevo	Banja Luka DIG INN 3D HUB	Nikšić DIG INN 3D HUB
Telefon +381 11 422 0303 beograd@3drepublika.com Joza Laurenčića 8a 11283 Beograd Srbija	Telefon +387 33 821 490 sarajevo@3drepublika.com Vilsonovo šetalište 9 71000 Sarajevo Bosna i Hercegovina	Telefon +387 51 981 490 banjaluka@3drepublika.com Miše Stupara 3 78000 Banja Luka Bosna i Hercegovina	Telefon +382 68 836 399 niksic@3drepublika.com Radoja Dakića 81400 Nikšić Crna Gora

Meusburger – „Postavljamo standarde“

Ono što je započelo kao samostalan posao 1964. godine je s vremenom izraslo u globalno aktivnu kompaniju. U sklopu Meusburger grupe nalazi se više kompanija koje svojim radom čine da smo u mogućnosti ponuditi kompletnu podršku za projekte iz raznih oblasti.

Naša ponuda proizvoda se konstantno širi za potrebe ***izrade alata za brizganje plastike, deformacije lima, mašinogradnje i mašinske obrade***. Danas, pored visoko preciznih standardnih delova, radioničke opreme, toplih blokova i sistema za kontrolu toplih dizni, radimo i na metodama upravljanja znanja WBI i rešenja za efikasno korporativno upravljanje u području softvera ERP/PPS.

Konstantno radimo na obuci mladih kadrova. Naša radionica za praksu na površini od 2100 m² ima preko 60 modernih mašina za mašinsku obradu i 200 m² učionica, za kvalitetnu obuku preko 150 učenika godišnje.

Meusburger Georg GmbH & Co KG
Kesselstr. 42, 6960 Wolfurt, Austria
M: +381 69 79 555 3
T: +43 5574 6706-0
F: +43 5574 6706-11
D.Zatezic@meusburger.com
www.meusburger.com

meusburger
SETTING STANDARDS

creo®

ptc

novi svet pred vama

CPS CAD Professional Systems

CPS - CAD Professional Systems d.o.o.

Authorized distributor
Authorized training center

Vladimira Popovića 6/B28, 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

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 / [36. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala [i] 30. simpozijum CAD/CAM [i] 39. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 45. simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala [i] 23. simpozijum Menadžment kvalitetom [sve u okviru]] 43. Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem = 43rd Jupiter Conference with foreign participants, Beograd, oktobar 2022. ; [organizator] Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2022 (Beograd : Planeta print). - 1 USB fleš memorija ; 5 x 2 x 1 cm

Sistemski zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa nasl. strane dokumenta. - Na nasl. str.: University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering. - Tekst ćir. i lat. - Tiraž 100. - Predgovor / Bojan Babić. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-6060-137-9

1. Јупитер конференција са међународним учешћем (43 ; 2022 ; Београд) 2. Симпозијум CIM у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала (36 ; 2022 ; Београд) 3. Симпозијум CAD/CAM (30 ; 2022 ; Београд) 4. Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (39 ; 2022 ; Београд) 5. Симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала (45 ; 2022 ; Београд) 6. Симпозијум Менаџмент квалитетом (23 ; 2022 ; Београд)
а) CIM системи -- Зборници б) CAD/CAM системи -- Зборници в) Машине алатке -- Нумеричко управљање -- Зборници г) Роботи -- Зборници д) Флексибилни технолошки системи -- Зборници ђ) Металопрерађивачка индустрија -- Управљање -- Зборници е) Управљање квалитетом -- Зборници

COBISS.SR-ID 76178185

ISBN 978-86-6060-137-9