

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA **PROCEEDINGS**



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, maj 2012.

38. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



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

25. simpozijum
CAD/CAM

34. simpozijum
NU – ROBOTI –FTS

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

18. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Beograd, maj 2012. godine

38. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNIK RADOVA

Organizator:

UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

Adresa:

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Tel: 011-3370341, Fax: 011-3370364

El. pošta: jupiter@mas.bg.ac.rs

Tehnički urednici:

Prof. dr Ljubodrag Tanović

Mr Mihajlo Popović

Beograd, maj 2012.

Tiraž: 150 primeraka

Štampa: **Planeta print**,

11000 Beograd, Ruzveltova 10, tel.: 011 3088 129

ISBN 978-86-7083-757-7

38. JUPITER KONFERENCIJA

PROGRAMSKI I NAUČNI ODBOR

Predsednik:

Prof. dr Pavao Bojanić, Mašinski fakultet Beograd

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

ORGANIZACIONI ODBOR

Predsednik:

Prof. dr Ljubodrag Tanović, Mašinski fakultet Beograd

Sekretar:

Doc. dr Saša Živanović, Mašinski fakultet Beograd

Članovi:

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

ZAHVALNICA

Organizacioni odbor **38. JUPITER KONFERENCIJE** se najsrdačnije zahvaljuje svim institucijama i pojedincima koji su ličnim angažovanjem i konstruktivnim delovanjem pomogli u organizovanju ove konferencije.

Posebno se zahvaljujemo pokroviteljima:

Ministarstvo prosvete i nauke Vlade Republike Srbije



OSA Računarski inženjering

Beograd

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

PREDGOVOR

JUPITER Konferencija, kao najznačajnija stalna aktivnost JUPITER asocijacije (asocijacija industrije, fakulteta, instituta, visokih škola strukovnih studija i komora), prikazuje najvrednije rezultate postignute prethodne godine. Ovogodišnja XXXVIII JUPITER Konferencija je prilika da se sagledaju trendovi u domenu nauke, obrazovanja i industrije u Republici Srbiji i njihova kompatibilnost sa Strategijom obrazovanja i Strategijom industrijskog razvoja do 2020. godine.

Organizator, Katedra za proizvodno mašinstvo – Centar za nove tehnologije Mašinskog fakulteta, je ambiciozno pristupila organizovanju ove konferencije postavljajući tri cilja: (1) da se ukaže na značaj permanentnog obrazovanja kao preduslova ekonomije zasnovane na znanju; (2) da inicira nove naučne i tehnološke pravce u funkciji razvoja domaće industrije, pre svega njene reindustrijalizacije; (3) definiše novu generaciju naučnih radnika u oblasti proizvodnog inženjerstva u kontekstu definisanih nacionalnih programa.

Centar za nove tehnologije - naučni i tehnološki poligon za generisanje novih ideja, koncepta i proizvoda ka njihovim mogućim industrijama, u narednom periodu treba da postane jedan od nosioca stvaranja tehnoloških platformi Republike Srbije. Poseban akcent će biti usmeren ka povezivanju sa relevantnim naučnim institucijama, našim naučnim radnicima u inostranstvu, međunarodnim projektima i permanentnim inovacijama znanja.

Između dve konferencije u okviru škole za inovaciju znanja koja će prerasti u edukacioni centar, obučeno je 55 studenata Mašinskog fakulteta za rad u Autodesk Inventoru, čime su studenti stekli nova znanja neophodna u domenu projekovanja procesa i proizvoda.

Na Konferenciji će biti izloženo 63 rada autora iz Srbije i inostranstva.

Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije i OSA Računarski inženjering su finansijskom podrškom omogućili organizovanje ove konferencije kao podršku naporima za unapređenje obrazovanja i nauke u oblasti proizvodnog mašinstva, na čemu im se organizator i ovim putem zahvaljuje.

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

Dobro došli na XXXVIII JUPITER Konferenciju.

U Beogradu, 15. maj 2012.

Prof.dr Ljubodrag Tanović

Izaberite simpozijum JUPITER Konferencije

UVODNI RADOVI
PRELIMINARY PAPERS

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

CAD/CAM

NU – ROBOTI – FTS
NC - ROBOTS – FMS

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

MENADŽMENT KVALITETOM
QUALITY

Spisak svih radova na JUPITER Konferenciji
po prezimenu prvog autora

Avakumović, J., Avakumović, J., Vujačić, N. КОНТРОЛА ТРОШКОВА МАЛИХ И СРЕДЊИХ ПОСЛОВНО ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА.....	5.6
Babić, B., Miljković, Z., Bugarić, U., Bojović, B., Vuković, N. ПРИМЕНА ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА ОД ЛИМА ЗАСНОВАНА НА ЕКОЛОШКИМ ПРИНЦИПИМА - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА НА ПРОЈЕКТУ TP-35004.....	UR.67
Blanuša, V., Živković, A., Zeljković, M. РАЧУНАРСКА АНАЛИЗА ТОПЛОТНОГ ПОНАШАЊА СКЛОПА ГЛАВНОГ ВРЕТЕНА УЛЕЖИШТЕНОГ ВАЛЈЧАСТИМ ДВОРЕДИМ ЛЕЖАЈИМА.....	2.32
Bojović, B., Babić, B., Mileusić, I., Đukić, M. ФРАКТАЛНА АНАЛИЗА ТОПОГРАФИЈЕ СУПСТРАТА ПРЕВЛАКА КОД АЛАТА ЗА ИЗВЛАЧЕЊЕ.....	3.159
Borojević, S., Jovišević, V., Lakić-Globočki, G., Sredanović, B. ЕФЕКТИ ПРИМЈЕНЕ ПРОГРАМСКОГ СИСТЕМА CATIA У ПРОЦЕСУ ИЗРАДЕ ПРОГРАМА ЗА НУМЕРИЧКЕ МАШИНЕ.....	2.1
Bracanović, Z. УТИЦАЈ ФАКТОРА КОНКУРЕНТСКЕ ПРЕДНОСТИ НА ОДАБИР СТРАТЕГИЈЕ ПРЕДУЗЕЋА.....	1.11
Bulatović, M. ЛОГИСТИКА И КВАЛИТЕТ.....	5.11
Danilov, I., Petrović, P., Lukić, N. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИНСТАЛАЦИЈА ЗА УЛТРАБРЗУ ОПТИЧКУ TRIANGULACIJU СТРУКТУРИРАНЕ СВЕТЛОСТИ У РОБОТИЗОВАНОЈ МОНТАЖИ.....	3.140
Delić, I., Nasić, E., Mustafić, A. СИМУЛАЦИЈА ХЛАЂЕЊА АЛАТА ЗА ИНЈЕКЦИОНО ПРЕСАЊЕ ПОЛИМЕРА РАШЛАДНИМ МЕДИЈЕМ.....	2.15
Drndarević, D., Milivojević, M., Petrović, S., Panić, S. MODELLING OF THE SPRING-BACK OF PM PARTS BY NEURAL NETWORKS.....	3.47
Đenadić, D., Manić, M., Tanikić, D., Randelović, S. ПРИКАЗ ВРСТА ФИКСАТОРА И МЕТОДА ОБРАДЕ ЕЛЕМЕНАТА ЗА ФИКСАТОРЕ У МЕДИЦИНИ.....	3.32
Ehmann, k., Saxena, I., Pallav, K., Mohanty, S. CURRENT ADVANCES IN MICRO-MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY.....	UR.1
Glavonjić, D., Dimić, Z., Cvijanović, V., Kvrgić, V. РЕАЛИЗАЦИЈА АКВИЗИЦИОНОГ GPIB ИНТЕРФЕЈСА И ПРАЋЕЊЕ РАДА СТАНИЦЕ LASS ПОМОЋУ NJEGA.....	4.1
Glavonjić, M., Živanović, S. НОВИ ПРИСТУП ПРОГРАМИРАЊУ НУМЕРИЧКИ УПРАВЉАНИХ МАШИНА АЛАТКИ ПРИМЕНОМ STEP-NC.....	3.112
Hodolić, J., Plančak, M., Vilotić, D., Hadžistević, M., Budak, I. ПРИМЕНА САВРЕМЕНИХ ТЕХНОЛОГИЈА И РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНИХ СИСТЕМА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ И ИЗРАДУ ДЕНТАЛНИХ НАДОКНАДА.....	UR.35
Jakovljević, Ž. ПОРЕЂЕЊЕ HILBERT HUANGOVE I DISKRETNE VEJVLET TRANSFORMACIJE U АНАЛИЗИ НЕСТАЦИОНАРНИХ СИГНАЛА: ПРИМЕНА У ПРЕКИДНОМ СТРУГАНЈУ.....	3.95
Janjić, M., Vukčević, M., Savićević, S., Šibalić, N. АНАЛИЗА НАПОНА КОД ОСНОСИМЕТРИЧНОГ ДЕФОРМИСАЊА У ОТВОРЕНИМ КАЛУПИМА.....	3.89
Janković, D. ПРЕДЛОГ НОВОГ КОНЦЕПТА ИСПИТИВАЊА СИСТЕМА УБРИЗГАВАЊА ГОРИВА.....	3.40

Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N. DRUŠTVENI TROŠKOVI KORIŠĆENJA ENERGIJE VETRA.....	1.23
Jovanović, J., Milanović, D., Pokrajac, S., Đukić, R. GLOBALNO SAGLEDAVANJE PROIZVODNIH I FINANSIJSKIH EFEKATA POSLOVNO-PROIZVODNIH SISTEMA.....	1.17
Knežević, B., Blanuša, B. ONE SOLUTION FOR EFFICIENCY OPTIMIZED CONTROL OF ELEVATOR DRIVE	4.19
Komarov, D., Stupar, S., Simonović, A., Stanojević, M. PARAMETRIZACIJA ELEMENATA LOPATICE VETROTURBINE PRIMENOM CST METODE.....	2.56
Laković, D., Savićević, S., Vukčević, M., Janjić, M., Šibalić, N. ANALIZA STEZAČA KRANSKIH ŠINA	3.85
Lovrić, S., Tufekčić, D., Topčić, A., Beganović, M. PRIMJENA BRZE IZRADA PROTOTIPA I REVERZIBILNOG INŽENJERINGA PRI LIVENJU U PIJESKU.....	2.20
Lukić, N., Petrović, P., Danilov, I. OPTIMIZACIJA SENZORA SILE MEKOG ZGLOBA INDUSTRIJSKOG HUMANOIDNOG ROBOTA SA UPRAVLJANOM POPUSTLJIVOŠĆU ZA ZADATKE ROBOTIZOVANOG SPAJANJA DELOVA	3.118
Majstorović, V. ДИГИТАЛНА ФАБРИКА И ДИГИТАЛНА ПРОИЗВОДЊА	5.1
Marković, D., Pokrajac, S., Simonović, V., Marković, I., Kosanić, N. EKONOMSKI POKAZATELJI U FUNKCIJI MENADŽMENTA INOVACIJOM GPS TEHNOLOGIJE U POLJOPRIVREDI SRBIJE	1.5
Marković, S., Kajević, A., Stojanović, D., Čpajak, D. UTICAJ STANDARDIZACIJE, TIPIZACIJE I UNIFIKACIJE NA OBLIK MAŠINSKIH PROIZVODA	5.16
Milović, D., Marković, S., Milinković, D., Bjeloglav, D. UPOREDNA ISPITIVANJA SISTEMA ZA PRIPREMU UGLJENOG PRAHA PRE I POSLE REKONSTRUKCIJE.....	3.6
Milutinović, D., Slavković, N., Kokotović, B., Dimić, Z., Glavonjić, M. NOVI PRISTUP KINEMATIČKOG MODELIRANJA KAO OSNOVA ZA RAZVOJ DOMAĆEG DELTA ROBOTA.....	3.104
Milutinović, M., Tanović, Lj. PRILOG REŠAVANJU PROBLEMA OTRATKA PRI FORMATIRANJU PLOČASTIH MATERIJALA-IVERICE	3.25
Mitić, M., Miljković, Z., Babić, B. ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ РОБОТСКОГ СИСТЕМА - ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	3.149
Mujanović, E., Sprečić, D. ANALIZA TROŠENJA ZUBACA KOD KONUSNIH ZUPČANIH PAROVA.....	3.13
Mulugeta, B., Simonović, A., Trivković, S., Svorcan, J. DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF HAWT BLADES.....	2.68
Murar, Ž. GEOMETRIJA PRESEKA DVA CILINDRA PRIMENJENA U MAŠINAMA ZA AUTOMATSKO ZAVARIVANJE SPOJA DVE CEVI.....	4.16
Mustafić, A., Nasić, E., Mehmedović, M., Demirović, M. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО-МАТЕМАТИЧКО MODELIRANJE POKAZATELJA OPTEREĆENJA TRAČNOG TESTERISANJA PRI REZANJU VISOKOLEGIRANIH CrNi ČELIKA.....	3.19
Nasić, E., Mustafić, A. FEA SIMULACIJA FAZE INJEKTIRANJA MIM PROCESA	2.26
Nedić, B., Lakić-Globočki, G. HABANJA ALATA I OBRADIVOST TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA	3.59

Papić, S., Ibrović, T. UTICAJ INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA NA BRZINU STALNOG POBOLJŠANJA GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE.....	5.21
Pavićević, Ž., Sofrenović, M. POSLEDNJI TRENDOVI U INDUSTRIJI ALATNIH MAŠINA: SVETSKA KRIZA.....	3.171
Pavlović, G., Savković, M., Gašić, M., Bulatović, R. PRIMENA METODE KRUTIH TELA ZA DISRETIZACIJU NOSEĆIH STRUKTURA PRI DINAMIČKOJ ANALIZI NA PRIMERU KONZOLNE DIZALICE	3.52
Petrašinović, N., Petrašinović, D., Posteljnik, Z., Trivković, S. KONCEPTUALNI DIZAJN HELIKOIDNE VETROTURBINE SA VERTIKALNOM OSOM OBRTANJA	2.74
Petrović, P., Hodolić, J., Vićentić, A., Pilipović, M., Jakovljević, Ž. INTELEKTUALNI ROBOTSKE SISTEMI ZA EKSTREMNO DIVERZIFIKOVANU PROIZVODNJU – TR35007.....	UR.49
Petrović, P., Lukić, N., Danilov, I. INDUSTRIJSKI HUMANOIDI - NOVI KONCEPT ROBOTA ZA KOLABORATIVNI RAD ČOVEK-MAŠINA U SISTEMIMA ZA ROBOTSKE MONTAŽU	3.126
Pilipović, M. SEKVENCIJALNO UPRAVLJANJE PRIMENOM PROGRAMABILNIH KONTROLERA.....	4.24
Popović, M., Slavković, R., Jugović, Z., Milićević, I. ANALIZA KONVENCIONALNIH PRISTUPA ZA DEFINISANJE SPOLJAŠNJEG OPTEREĆENJA REZNIH ZUBA KOD BAGERA KONTINUALNOG DEJSTVA	3.69
Posteljnik, Z., Komarov, D., Stanojević, M., Svorcan, J. PROJEKTOVANJE I ANALIZA TERMOIZOLACIONE OBLOGE KORENIH UKRUĆENJA ČELIČNIH DIMNJAKA	2.79
Pršić, D., Đordjević, V. OPTIMIZACIJA PARAMETARA PID REGULATORA ZA UPRAVLJANJE INVERZNIH KLATNOM	4.10
Radić, N., Trifković, S., Milutinović, M., Jeremić, D. NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE UTICAJA OBLIKA I DIMENZIJA TANKOZIDNIH PROFILA NA VRIJEDNOST LOKALNOG I DISTORZIONOG KRITIČNOG NAPONA.....	2.9
Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D. CIM SISTEM – NEOPHODNOST DANAŠNJEG INVESTIRANJA.....	1.1
Radonjić, S., Kovač, P., Mitrović, A. TEHNOLOGIJA BRUŠENJA I POLIRANJA OKRUGLIH PROHROMSKIH CEVI.....	3.65
Simonović, A., Dragović, V., Peković, O., Radosavljević, V. PRIMENA INŽENJERSKIH SOFTVERA PRI PROJEKTOVANJU KOMPOZITNIH KOMPONENATA VETROTURBINE	2.62
Slavković, G., Spasić, Ž. MODELIRANJE DINAMIKE SISTEMA NA PRIMERU UNIVERZITETA	1.28
Stojadinović, S., Majstorović, V. ОПРЕЂИВАЊЕ РЕДОСЛЕДА ИНСПЕКЦИЈЕ ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ПРИМИТИВА НА НУММ.....	5.25
Stupar, S., Peković, O., Trivković, S., Zorić, N. KONCEPTUALNI DIZAJN LAKE AMFIBIJSKE LETELICE.....	2.45
Svorcan, J., Stupar, S., Komarov, D., Zorić, N. AUTOMATIZACIJA PROCESA MODELIRANJA LOPATICA VETROTURBINE U PROGRAMSKOM PAKETU CATIA	2.50
Tabaković, S., Bojanić, M., Milojević, Z., Živković, A. MODELIRANJE ELEMENATA SKELETNOG SISTEMA NA OSNOVU DIJAGNOSTIČKIH SNIMAKA	2.39
Tanović, L., Bojanić, P., Glavonjić, M., Milutinović, D., Majstorović, V. RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2011. GODINU – TR35022	UR.76

Todić, V., Zeljković, M., Lukić, D., Jovičić, G. MOGUĆNOST PRIMENE HIBRIDNIH OBRADNIH SISTEMA U PROIZVODNJI KOTRLJAJNIH LEŽAJA	3.1
Trivković, S., Peković, O., Petrašinović, N., Stanojević, M. PRIMENA NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA U PROJEKTOVANJU SAVREMENIH OPITNIH POSTROJENJA ZA TRETMAN PIJAĆE VODE	3.81
Veličković, D., Marković, S., Đurović, Z., Kajević, M. JEDNA MOGUĆNOST MODELIRANJA TAČNOSTI IZRADE EKSPANZIONE CEVI	3.75
Zeljković, M., Navalušić, S., Todić, V., Tabaković, S., Milojević, Z. SAVREMENI PRILAZI U RAZVOJU SPECIJALNIH REŠENJA ULEŽIŠTENJA U MAŠINSTVU I MEDICINSKOJ PROTETICI	UR.16
Zorić, N., Mitrović, Z., Simonović, A., Posteljnik, Z. OPTIMALNA KONTROLA VIBRACIJA KOMPOZITNOG ELASTIČNOG PIEZOELEKTRIČNOG MANIPULATORA PRIMENOM FAZI-LOGIČKOG UPRAVLJANJA.....	3.165

SPISAK AUTORA LIST OF AUTHORS

ANTIĆ, ACO
AVAKUMOVIĆ, JELENA
AVAKUMOVIĆ, JULIJA

BABIĆ, BOJAN
BEGANOVIĆ, MEDIHA
BJELOGLAV, DEJAN
BLANUŠA, BRANKO
BLANUŠA, VLADIMIR
BOJANIĆ, MIRJANA
BOJANIĆ, PAVAO
BOJOVIĆ, BOŽICA
BOROJEVIĆ, STEVO
BRACANOVIĆ, ZLATA
BUDAK, IGOR
BUGARIĆ, UGLJEŠA
BULATOVIĆ, MIODRAG
BULATOVIĆ, RADOVAN

CVIJANOVIĆ, VOJKAN
ČPAJAK, DARKO

DANILOV, IVAN
DELIĆ, IZUDIN
DEMIROVIĆ, MENSUR
DIMIĆ, ZORAN
DONDUR, NIKOLA
DRAGOVIĆ, VUK
DRNDAREVIĆ, DRAGOLJUB

ĐENADIĆ, DALIBOR
ĐORDJEVIĆ, VLADIMIR
ĐUKIĆ, MARKO
ĐUKIĆ, RADISAV
ĐUROVIĆ, ZAVIŠA

EHMANN, K

GAŠIĆ, MILOMIR
GLAVONJIĆ, DUŠAN
GLAVONJIĆ, MILOŠ
HADŽISTEVIĆ, MIROSLAV
HODOLIĆ, JANKO

IBROVIĆ, TAJMA

JAKOVLJEVIĆ, ŽIVANA
JANJIĆ, MILETA
JANKOVIĆ, DEJAN
JEREMIĆ, DEJAN
JOSIPOVIĆ, SONJA
JOVANOVIĆ, JELENA
JOVIČIĆ, GORAN
JOVIŠEVIĆ, VID
JUGOVIĆ, ZVONIMIR

KAJEVIĆ, ARMIN
KAJEVIĆ, MAID
KNEŽEVIĆ, BOJAN

KOKOTOVIĆ, BRANKO
KOMAROV, DRAGAN
KOSANIĆ, NENAD
KOVAČ, PAVEL
KVRGIĆ, VLADIMIR

LAKIĆ-GLOBOČKI, GORDANA
LAKOVIĆ, DUŠAN
LOVRIĆ, SLAĐAN
LUKIĆ, DEJAN
LUKIĆ, NIKOLA

MAJSTOROVIĆ, VIDOSAV
MANIĆ, MIODRAG

MARKOVIĆ, DRAGAN
MARKOVIĆ, IVANA
MARKOVIĆ, SVETISLAV
MEHMEDOVIĆ, MUHAMED
MILANOVIĆ, DRAGAN LJ.
MILEUSNIĆ, IVANA
MILIĆEVIĆ, IVAN

MILINKOVIĆ, DARKO
MILIVOJEVIĆ, MILOVAN
MILJKOVIĆ, ZORAN
MILOJEVIĆ, ZORAN
MILOVIĆ, DRAGOLJUB
MILUTINOVIĆ, DRAGAN
MILUTINOVIĆ, MILAN

MILUTINOVIĆ, MIROSLAV
MITIĆ, MARKO
MITROVIĆ, ANĐELIJA
MITROVIĆ, ZORAN

MOHANTY, S
MUJANOVIĆ, ENES
MULUGETA, BIADGO ASRESS
MURAR, ŽIVKO
MUSTAFIĆ, ADNAN

NASIĆ, EDIS
NAVALUŠIĆ, SLOBODAN
NEDIĆ, BOGDAN

PALLAV, K
PANIĆ, STJEPAN
PAPIĆ, SEJFO
PAVIĆEVIĆ, ŽELJKO
PAVLOVIĆ, GORAN
PEKOVIĆ, OGNJEN
PETRAŠINOVIĆ, DANILO
PETRAŠINOVIĆ, NIKOLA
PETROVIĆ, PETAR
PETROVIĆ, SLOBODAN
PILIPOVIĆ, MIROSLAV
PLANČAK, MIROSLAV
POKRAJAC, SLOBODAN

POPOVIĆ, MARKO
POPOVIĆ, MIHAJLO
POSTELJNIK, ZORANA
PRŠIĆ, DRAGAN
PUZOVIĆ, RADOVAN

RADIĆ, NEBOJŠA
RADOJEVIĆ, DARKO
RADOJEVIĆ, MIROSLAV
RADOJEVIĆ, ZORAN
RADONJIĆ, SNEŽANA
RADOSAVLJEVIĆ, VELIMIR
RANĐELOVIĆ, SAŠA

SAVIĆEVIĆ, SRETEN
SAVKOVIĆ, MILE
SAXENA, I
SIMONOVIĆ, ALEKSANDAR
SIMONOVIĆ, VOJISLAV
SLAVKOVIĆ, GORAN
SLAVKOVIĆ, NIKOLA

SLAVKOVIĆ, RADOMIR
SOFRENOVIĆ, MIRJANA
SPASIĆ, ŽARKO
SPREČIĆ, DENIJAL
SREDANOVIĆ, BRANISLAV
STANOJEVIĆ, MARIJA
STOJADINOVIĆ, SLAVENKO
STOJANOVIĆ, DRAGAN
STUPAR, SLOBODAN
SVORCAN, JELENA
ŠIBALIĆ, NIKOLA

TABAKOVIĆ, SLOBODAN
TANIKIĆ, DEJAN
TANOVIĆ, LJUBODRAG
TODIĆ, VELIMIR
TOPČIĆ, ALAN
TRIFKOVIĆ, SPASOJE
TRIVKOVIĆ, SRDJAN
TUFEKČIĆ, DŽEMO

VELIČKOVIĆ, DRAGOLJUB
VIĆENTIĆ, ALEKSANDAR
VILOTIĆ, DRAGIŠA
VUJAČIĆ, NIKOLA
VUKČEVIĆ, MILAN
VUKELIĆ, ĐORĐE
VUKOVIĆ, NAJDAN

ZELJKOVIĆ, MILAN
ZORIĆ, NEMANJA

ŽIVANOVIĆ, SAŠA
ŽIVKOVIĆ, ALEKSANDAR

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



UVODNI RADOVI

OKRUGLI STO

Beograd, maj 2012.

UVODNI RADOVI
PRELIMINARY PAPERS

Ehmann, k., Saxena, I., Pallav, K., Mohanty, S. CURRENT ADVANCES IN MICRO-MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY	UR.1
Zeljковић, M., Navalušić, S., Todić, V., Tabaković, S., Milojević, Z. SAVREMENI PRILAZI U RAZVOJU SPECIJALNIH REŠENJA ULEŽIŠTENJA U MAŠINSTVU I MEDICINSKOJ PROTETICI.....	UR.16
Hodolić, J., Plančak, M., Vilotić, D., Hadžistević, M., Budak, I. ПРИМЕНА САВРЕМЕНИХ ТЕХНОЛОГИЈА И РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНИХ СИСТЕМА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ И ИЗРАДУ ДЕНТАЛНИХ НАДОКНАДА	UR.35
Petrović, P., Hodolić, J., Vićentić, A., Pilipović, M., Jakovljević, Ž. INTELIGENTNI ROBOTSKI SISTEMI ZA EKSTREMNO DIVERZIFIKOVANU PROIZVODNJU – TR35007	UR.49
Babić, B., Miljković, Z., Bugarić, U., Bojović, B., Vuković, N. ПРИМЕНА ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА ОД ЛИМА ЗАСНОВАНА НА ЕКОЛОШКИМ ПРИНЦИПИМА - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА НА ПРОЈЕКТУ TR-35004	UR.67
Tanović, L., Bojanić, P., Glavonjić, M., Milutinović, D., Majstorović, V. RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2011. GODINU – TR35022.....	UR.76



K. Ehmann, I. Saxena, K. Pallav, S. Mohanty¹

CURRENT ADVANCES IN MICRO-MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY

Abstract:

Micro-manufacturing in the context of this paper refers to the fabrication and manufacturing of components and products in the sub-millimeter to a few millimeter range with feature sizes ranging from 1 to 100 microns fabricated with high accuracy and precision in a wide range of materials by non-lithography based processes. The paper presents an overview of some of the novel and recently developed high precision micro-manufacturing processes and machines that are capable of processing a wide range of products to tight dimensional and form tolerances.

Keywords: Miniaturization, Micro-manufacturing processes, Micro-manufacturing machines

1. INTRODUCTION

Micro-manufacturing encompasses the creation of very high precision 3D products made of a variety of materials with feature sizes ranging from a few microns to a few millimeters [1] under tight tolerances. It started in the late eighties spurred by Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technologies, which were developed from semi-conductor processing methods. Despite of the successful utilization of MEMS technologies for micro-fabrication, the growing needs to use various materials with more complex shapes lead to the development of a much broader range of micro-manufacturing process, many of which were derived from conventional counterparts. LIGA (an acronym from German words for lithography, electroplating, and molding), laser beam machining, ion beam machining, micro-ultrasonic machining, micro-EDM (electro-discharge machining), micro-ECM (electro-chemical machining) and others were developed and the possibilities to utilize them for ensuring desired precision and productivity were examined.

An exponential growth in the demand for miniaturized components that are characterized by small dimensional and form features, reduced energy consumption, design flexibility and high accuracy, at reasonable costs and superior performance in sectors such as defense, medical, biotechnology, telecommunications and energy has fuelled a widespread interest in micro-manufacturing among the major R&D institutions as well as industry worldwide [2]. Hence, micro-manufacturing has become an emerging paradigm that is rapidly evolving in response to an ever increasing demand for miniaturized products that are frequently manufactured in low volumes and are characterized by small size, tight dimensional and form tolerances, complex geometry, and high surface finish and integrity. Examples of micro-machined features are shown in Fig. 1, while some typical industrial micro-manufacturing systems can be seen in Fig. 2.

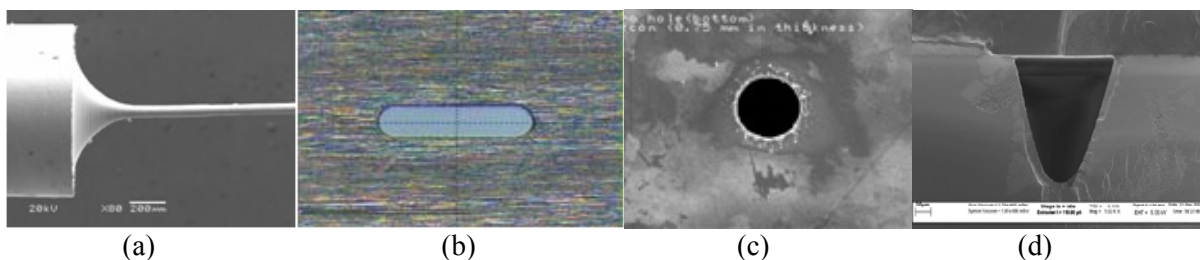


Fig. 1: (a) Shafts of 30 μm in diameter up to an aspect ratio of 200 by micro-turning [3] (b) 100 μm slots via micro-milling [4] (c) 50 μm holes produced by micro-EDM [4] (d) 70 μm wide micro-channels produced by laser micromachining [5]

¹Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston IL, U.S.A.

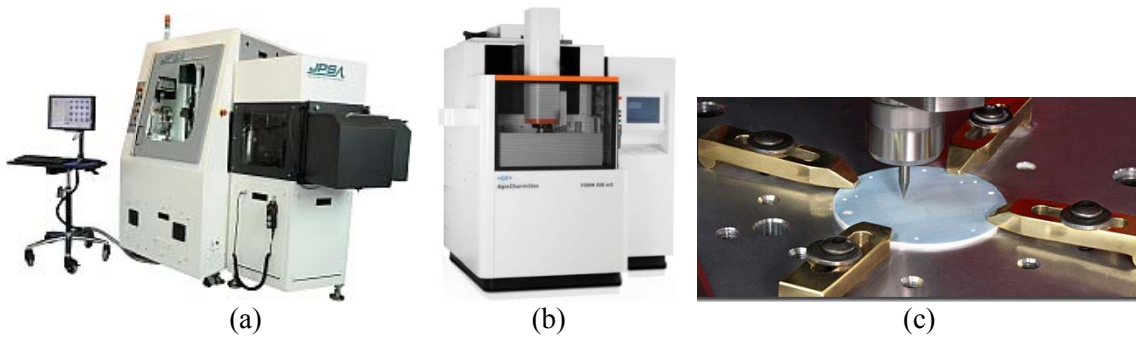


Fig. 2: Industrial micro-manufacturing systems: (a) solid-state laser system [6], (b) micro-EDM machine [7], (c) micro-drilling setup [8]

A comparison between the existing and the micro-manufacturing technologies addressed in this paper is depicted in Fig. 3a. As it can be seen, in terms of relative accuracy and size, the evolving micro-manufacturing process capabilities are aimed at filling the existing gap between the nano- and macro-worlds by enabling the exploitation of advances in nanotechnology [9]. They constitute an essential capability consisting of an extremely wide range of processes that are essential in providing a continuum of processes across all scales. A salient feature of micro-manufacturing processes is also their ability to process a wide range of materials, other than silicone, such as metals, polymers, composites, ceramics, etc.

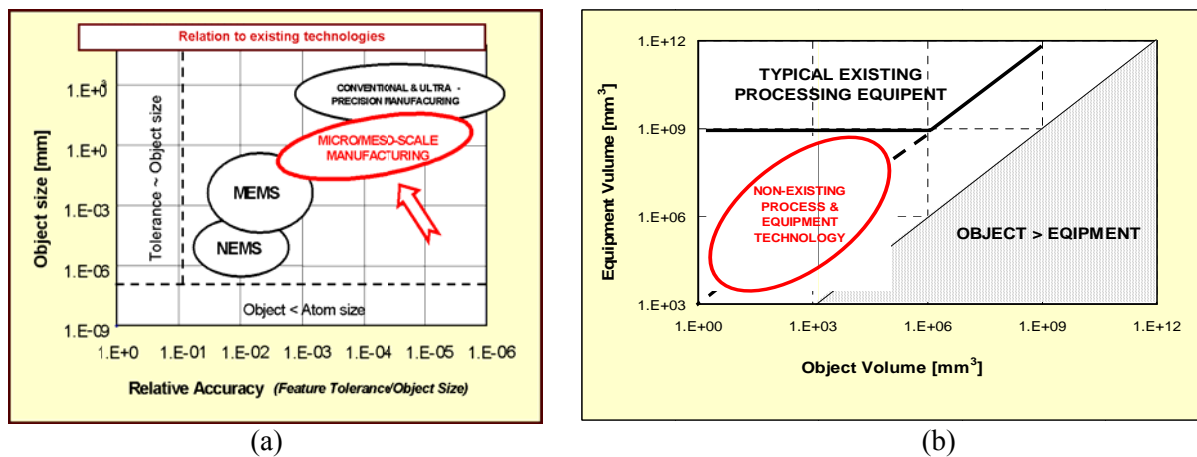


Fig. 3: (a) Relationship between existing technologies; (b) Size domain of typical micro-manufacturing equipment

In parallel to the development of new micro-manufacturing capabilities are efforts dedicated to the development of supporting manufacturing equipment and machines. The rationale for this can be clearly seen from Fig. 3b that depicts the typical relationship between machine and workpiece volumes for macro-scale equipment and processes. At the macro-scale this relationship is expressed by a ratio of approximately 1000:1. However, this relationship ceases to exist in the micro-manufacturing domain where this ratio can be as much as 9 orders of magnitude higher than in the macro-world. Both the technological and economic disadvantages of this situation do not require much elaboration, hence current trends are in the direction of scaling micro-manufacturing equipment in a way to be more in line or commensurate to the size of the products they produce. These efforts have the potential to lead to significant reductions in capital investment, energy consumption, space requirements, enhanced production rates and higher accuracy and precision of manufactured products. Both the down-scaling of the machines and of the factory undoubtedly lead to energy saving, reductions in fixed costs, and economic advantages. The flexibility of the factory also increases with the miniaturization of the individual machines.

Some of the typical application areas that are driving the need for research and development in micro-manufacturing processes and machines are defense, automotive, lab-on-chip systems, medical implants, portable electronic devices and packaging, micro-fluidic systems, micro-molds, micro-fuel cells, and drug delivery systems to mention a few.

The objective of this paper is to present an overview of various newly developed and novel types of micro-manufacturing processes and machines, including their state-of-the-art, limitations, and current research trends. Section 2 presents a classification of the various micro-manufacturing processes while Sections 3

through 6 describe four major classes of micro-manufacturing processes categorized into subtractive, near-net-shape, additive and hybrid processes respectively. A brief conclusion follows in Section 8.

2. MICRO-MANUFACTURING PROCESSES AND SYSTEMS

Micro-manufacturing processes can be broadly classified into four main categories- subtractive, near-net-shape, and additive processes. While some of the processes are scaled down versions of their conventional macro-scale counterparts, many can be described as new and innovative processes that have been recently developed for specific processing functions in a wide range of materials using a variety of physical mechanisms and/or their combination. The most widely used processes in each category include:

- *Subtractive processes* include mechanical processes such as turning, drilling, milling and grinding; electro-physical and chemical processes such as micro-EDM and micro-ECM processes; and energy beam machining processes, e.g., laser, plasma, ion-beam, and electron machining.
- *Near net shape* processes comprise of various micro-forming and -rolling micro-injection molding, micro-casting, micro-incremental forming, micro-punching, micro-extrusion and micro-embossing processes.
- *Additive processes* include various types of thin film deposition processes such as chemical and physical vapor deposition, electrochemical deposition, and spin-on deposition processes; and the rapid prototyping processes that include micro-stereo lithography, direct metal deposition, selective laser sintering and 3D printing processes.
- *Hybrid micro-manufacturing processes* combine two or more conventional micro-manufacturing processes. The objective may be to enable processing hard materials (LMM process), or achieving ease of machining or higher process accuracy.

In the Sections that follow a synopsis of processes falling into these four categories will be given.

3. SUBTRACTIVE MICRO-MACHINING PROCESSES

Mechanical Micro-machining Process: Mechanical micro-machining processes are essentially modified or scaled-down versions of the conventional macro-scale mechanical machining processes, although different issues are present due to size and scale effects. By mechanical micro-machining, 3D micro features of dimensions below 100 μm and surface roughness less than 1 μm can be achieved in a wide range of materials with moderately high material removal rates [10]. These processes are also characterized by good geometric correlation between the tool path and the machined surface. Micro patterns generated on surfaces by mechanical micro-machining can work as reflectors, abrasives, hydrophobic surfaces, and other functions. Microgrooves can be created by a rotating cutting tool along one direction relative to the surface, as shown in Fig. 4(a). A micro-turbine made by mechanical micro-machining is shown in Fig. 4(b). Mechanical micro-machining can be further classified into isotropic and anisotropic processes with different tooling requirements depending on the nature of the size effects.

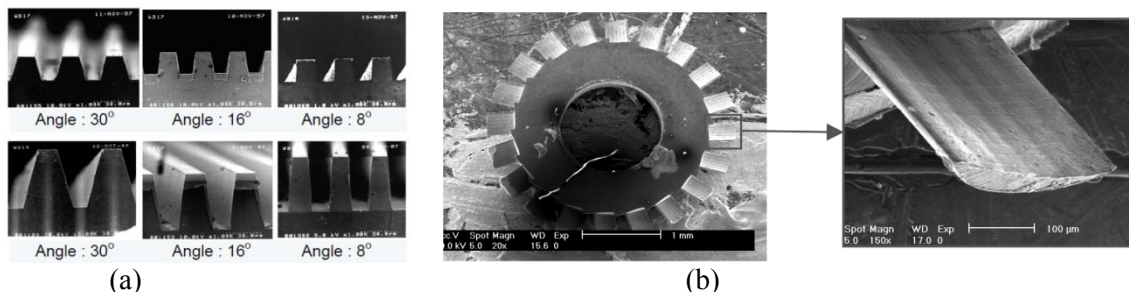


Fig. 4: (a) Trapezoidal microgrooves (first row 20 μm , second row 50 μm depth) [10], (b) Turbine blades machined by a 5-axis micro-milling machine (inset: single blade) [11]

Since there is a mechanical contact between the tool and the workpiece, the tool should have an extremely sharp edge. This limits the minimal achievable size of the micro-features and the range of machinable materials. A factor that dominates micro-cutting operations is related to the ratio of the chip thickness and tool edge radius that gives rise to the so-called minimum chip thickness effect that is reflected in the fact that below a certain ratio no chip can be produced [12]. The mechanics of the process is also vastly different from

its macro-scale counterpart since the force system acting on the tool and the workpiece is dominated by ploughing rather than shearing mechanisms. Additional salient features of the process include the consideration of the grain structure of the material that is frequently of the same order in size as the feature being machined, low-feedrate instability, unexplored chatter mechanisms influenced by the non-linearity of the process, etc.

As alluded to above, there have been considerable efforts devoted to the development of micro/meso-scale machine tools. Figure 5 shows two prototype desktop machines developed at Northwestern University (NU) and the University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC) respectively. The former is a fully functional 3-axis, while the latter a 5-axis micro/meso-scale machining center. Both machines boast full CNC programmability and sub-micron accuracy. From a technological standpoint they include mechanical and aerostatic guideways, brushless servo and linear motor drives and glass scales for feedback.

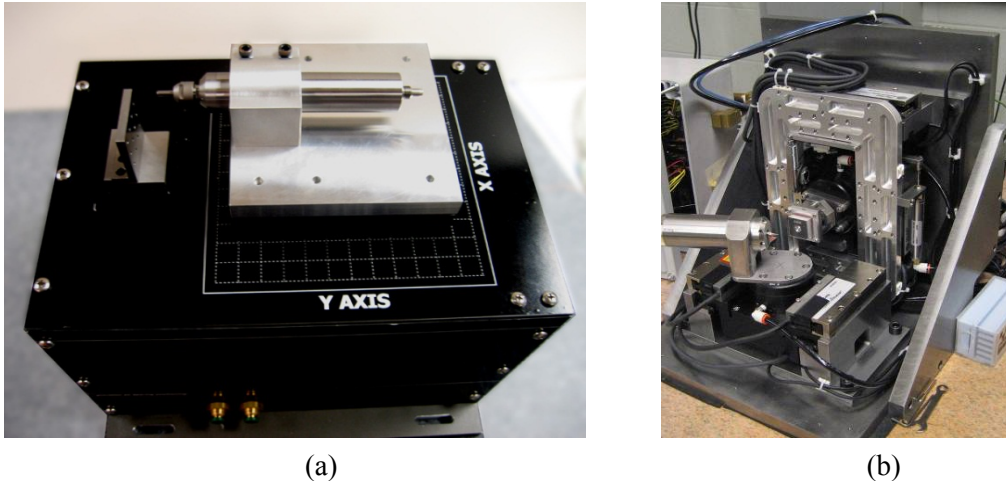


Fig. 5: Micro/meso-scale machines developed at (a) NU and (b) UIUC

Micro-EDM Process: In recent years, micro-EDM has become one of the front runners for micro-manufacturing. It is a non-contact subtractive process in which the material removal is facilitated through the plasma created when the electric field caused by the high voltage between the electrode and the workpiece exceeds the threshold value for dielectric breakdown. The plasma that explosively expands sends shock waves to the surface of the workpiece at very high speed leading to localized heating and ablation[13]. The debris that is formed is removed by continuous flushing of the gap between the electrode and the workpiece by the dielectric. Process variants include micro-EDM milling, micro-wire EDM, and micro-EDM die sinking that have been designed to specific types of 3D free form feature manufacturing of sizes as small as 5 μm and with high aspect ratios.

Micro-EDM as a contactless process can be used on a wide range of conductive materials irrespective of their hardness for very complex 3D free form features of extremely small size and high aspect ratios. Figure 6 shows a micro-slot in an aluminum workpiece, along with a commercially available machine made by SmartTec Inc. Process limitations include the relatively low material removal rate (MRR) as compared to micro-machining and laser ablation and need for conductive workpiece material [9]. Electrode wear, although small in comparison to the material removal rate, leads to loss in accuracy and needs complex electrode wear compensation strategies. Significant amounts of sub-surface damage and heat affected zone have also been reported.

From both the scientific and technological standpoint a number of outstanding challenges still remain to be answered. These include the fundamental understanding of the mechanisms responsible for the removal of the material through issues surrounding debris removal to electrode wear compensation. Numerous research groups have established extensive R&D programs in this field.

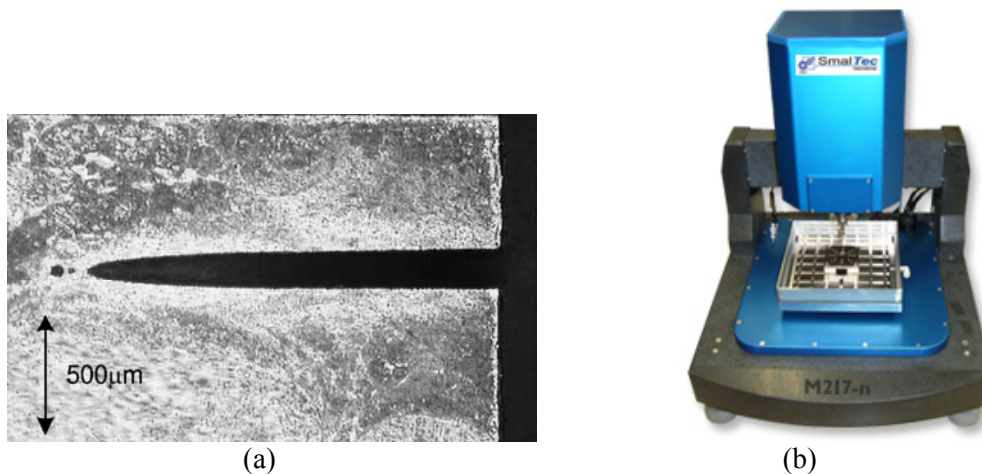


Fig. 6: (a) A micro-slot machined by the micro-EDM process (top surface) [14], and (b) Commercially available hybrid micro-EDM machine [15]

Ultra-short Laser Micro-machining Process: A process that is gaining increased importance, in spite of its high cost, is the application of ultra-short laser pulse-based processes with pulse durations ranging from ps to few fs at frequencies ranging up to 500 kHz and usually also very low average power (up to 10 W).

Due to the extremely short pulse width, when the ultra-short pulses are tightly focused, they have a very high peak power density even with low pulse energy. As a consequence, the fundamental mechanism of laser-matter interaction becomes different from the typical short pulsed laser-matter interaction in which material removal occurs by a relatively slow heating process where the deposition of optical energy can be assumed to be instantaneous. For ultra-short pulses, the time required for deposition of optical energy cannot be ignored and must be considered. Laser-matter interaction can be described by three individual processes, i.e., deposition of optical energy to the free electrons, the transport of energy by the free electrons to the lattice and heating of the lattice through the electron-phonon interaction.

Since in ultra-short laser-material processing, the heat diffusion into the material is much lower than in short and very-short pulsed laser beams, they offer many advantages when compared to short and very-short pulsed laser micro-machining. Ultra-short pulsed laser micro-machining results in negligible heat diffusion into the bulk material leading to a negligible heat affected zone and molten metal. Given that most of the heat energy gets locally absorbed in the skin layer, the ablation threshold also becomes one order of magnitude smaller. Hence, with ultra-short laser pulses, precise micro-machining can be done with lower energy density levels and negligible heat affected zone, even for materials that have very high heat conductivity. The time scale for laser-matter interaction is so small that ablation can be considered as a direct solid-vapor transition and that best quality micro-machining is obtained when laser irradiance is very close to the ablation threshold irradiance [16-19]. It has also been demonstrated that ablation is accompanied by electron heat conduction and formation of a molten zone inside the metal target which reduces precision when machining metals and is one of the major limitations for the use of such processes [20]. The technological experiments on microstructures manufacturing demonstrated that both picosecond and nanosecond laser pulses can produce the high quality of deep holes and cuts with step and smooth walls in different ceramics and metals. Fig. 7 demonstrates the through cut with aspect ratio of 17, produced in AlN ceramic plates with thickness of 175 microns.

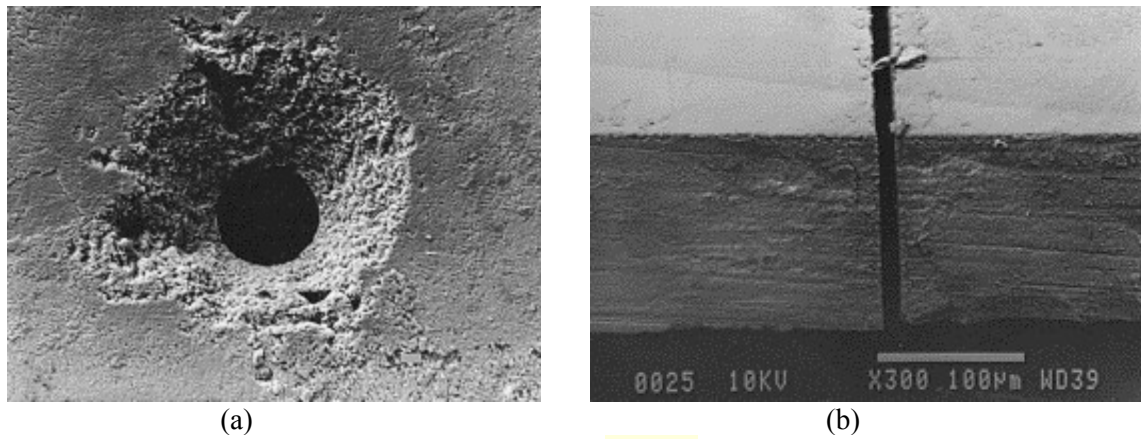


Fig. 7(a) Upper view of a through hole produced in AlN ceramic plate - thickness $175\ \mu\text{m}$, hole diameter $50\ \mu\text{m}$; (b) Cross-sectional view (aspect ratio = 17) [20]

The MRR in ultra-short laser micro-machining of metals depends on their surface finish. With sub-micron surface finish, the absorptivity of laser beam is significantly reduced, thus resulting into very low MRR. The relative accuracy of complex 3D features depends on many factors including polarization, type of material, peak pulse power, repetition rate, pulse duration, environmental conditions and pressure, and wavelength [21, 22]. This makes the ultra-short laser micro-machining a very complex process, as controlling all of these parameters is a major challenge. Materials that are transparent to the laser beam are also difficult to machine by conventional ultra-short laser ablation processes.

Laser Interference Micro-patterning: The technique of micro-patterning comprises the creation of patterns of a specific geometry and depth, of the order of microns, on surfaces over a relatively large area. Laser-based micro-patterning, being free from the drawbacks of tool wear, leads to lesser loss of repeatability and resolution of size, both of which are critical for precise micro-patterning. However, the inherent challenges are more extensive process parameter control, depth control, and adaptability and absorption of the laser beam by a variety of materials, speed of machining, and scaling up of the process. Micro-patterned surfaces have applications in micro-optical surfaces, micro-lens arrays, micro-filters, hydrophilic surfaces, surfaces which impede bacteria growth, and more. As the complexity of patterns increases, so does the time needed to pattern large areas.

A promising technique for producing periodic patterns on a plane is by means of direct interference of two or more sources [23, 24]. The sources may be collimated beams of a plane wave front interfering at a region [24], or two point (or line) sources generating spherical (or cylindrical) waves to create interference patterns. In both cases, the multiple sources are typically generated from a single source by means of beam-splitters, mirrors, slits and other optics. While the former has been studied and used for fabricating micro-channels [24], micro-pillars, and other periodic micro-textures [25], the latter is also being explored for micro-manufacturing applications, because of a higher depth of focus and easier beam-alignment. Figure 8 shows a typical setup for laser micro-patterning by splitting and superimposing the beam, while Fig. 9 shows micro-patterns generated by two or three interfering beams.

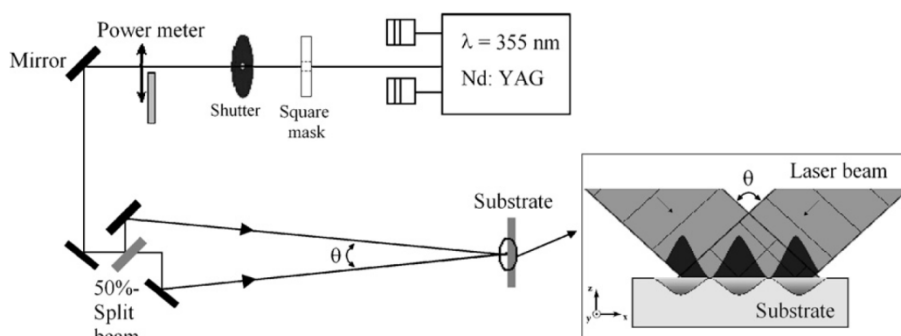


Fig. 8: Setup for laser interference micro-patterning using two split laser beams from a 355nm 20 ns laser source, to fabricate micro-channels [24]

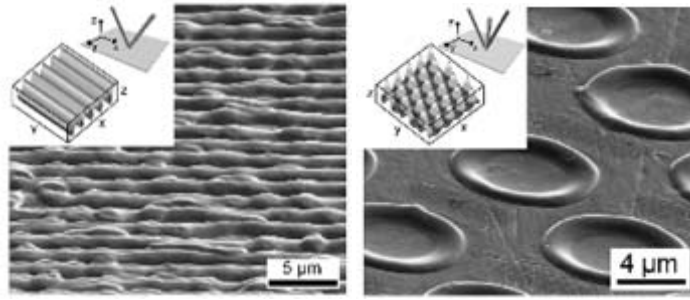


Fig. 9: Surface morphologies fabricated by two and three laser beams simultaneously projected in a symmetrical configuration onto a surface [23]

The inherent advantages of laser interference micro-machining are: (1) there is a near-lossless transfer of beam energy onto the substrate, (2) wider beams can be employed, thereby facilitating machining over a larger area at once, and (3) geometric precision depends on achieving well-resolved diffraction/interference, which is a function of the optics surfaces and diffraction lengths rather than on mask geometry.

Laser Induced Plasma Micro-machining Process (LIP-MM): Although micro-EDM has been a frontrunner among micro-manufacturing processes in the last decade, it has limitations as previously discussed. Similarly, ultra-short laser ablation processes are limited in their ability to ablate materials that are transparent or have low absorptivity for the incident laser irradiation or possess high reflectivity due to a mirror surface finish [17, 19, 26]. Consequently, although both processes are successful, they have low MRR, and are incapable of machining certain classes of materials due to limitations associated with electrical conductivity in the case of micro-EDM and absorptivity in the case of laser ablation.

Laser induced plasma micro-machining (LIP-MM) is a novel tool-less and multi-material micro-manufacturing process that circumvents some of the limitations associated with both of the above-mentioned processes [27-29]. It uses an ultra-short laser beam to generate plasma within a transparent dielectric media [27-29]. The plasma then facilitates material removal from the workpiece surface through the plasma-matter interaction process. LIP-MM has been effectively used to machine materials, such as ceramics, borosilicate glass, and quartz that are difficult to machine by micro-EDM or by the ultra-short laser ablation process [27, 29].

Figure 10 shows the process schematics and microscopic images of typical micro-channel based surface texturing done in borosilicate glass. As it can be inferred from the figure, an ultra-short pulsed laser beam focused slightly above the workpiece surface is utilized to create plasma within a transparent dielectric media such as distilled water by the optical breakdown mechanism. Once the plasma is generated, it absorbs energy from the incident laser irradiation during the laser-plasma interaction process [30, 31]. The energy absorbed by the plasma is partitioned in mechanical and thermal energies [30, 31]. A fraction of energy from the incident laser irradiation is also lost to the surrounding through reflection, scattering and radiation from the plasma. A crater is machined on the workpiece surface at the end of each plasma-matter interaction. Overlapping successive craters by moving the workpiece along a given path at a specific feed-rate allows the generation of complex 3D micro-features.

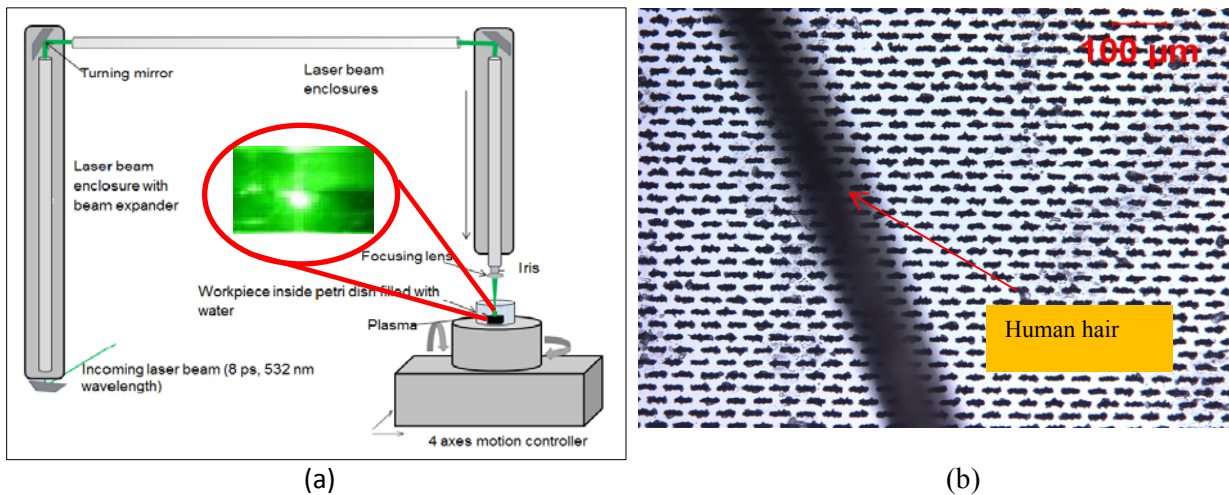


Fig.10: (a) Experimental setup for the LIP-MM process; (b) Microscopic image of a micro-channel based surface textured borosilicate glass

4. NEAR-NET-SHAPE MICRO-MANUFACTURING PROCESSES

Micro Incremental Forming: Incremental forming (IF) is a flexible sheet metal forming technique that uses simple generic tooling guided along pre-defined tool-paths to locally deform an originally flat sheet metal blank into a desired shape [32]. Its biggest advantages are: (1) it completely eliminates the need of having traditional geometry-specific forming dies, and (2) yields a much higher formability as compared to conventional stamping processes. The generic tooling can be a single point rigid tool, or a water jet in conjunction with a laser beam, see Fig. 11 (a). While a single point tool offers better control of accuracy by displacement control the surface finish of the product is limited by the incremental depth of the rigid tool. Water jet incremental forming achieves a much better surface finish, but being a pressure controlled process, the geometric accuracy is difficult to control.

Micro IF sheet forming was first explored by Saotome and Okamoto [33] who developed a CNC-micro incremental sheet metal forming system for foil materials, where aluminum sheets of $10\mu\text{m}$ in thickness were incrementally hammered to achieve bending and bulging deformation by a $10\mu\text{m}$ punch. A $600\mu\text{m}$ long micro-car body shell was formed without dies. Obikawa et al. [34, 35] found that the thinner aluminum foil with a $12\mu\text{m}$ thickness had a worse forming limit than the one with $50\mu\text{m}$ thickness and the forming limit was greatly improved with a tool rotating at $20,000\text{ rpm}$. Some typical micro incremental formed parts are shown in Fig. 11 (b).

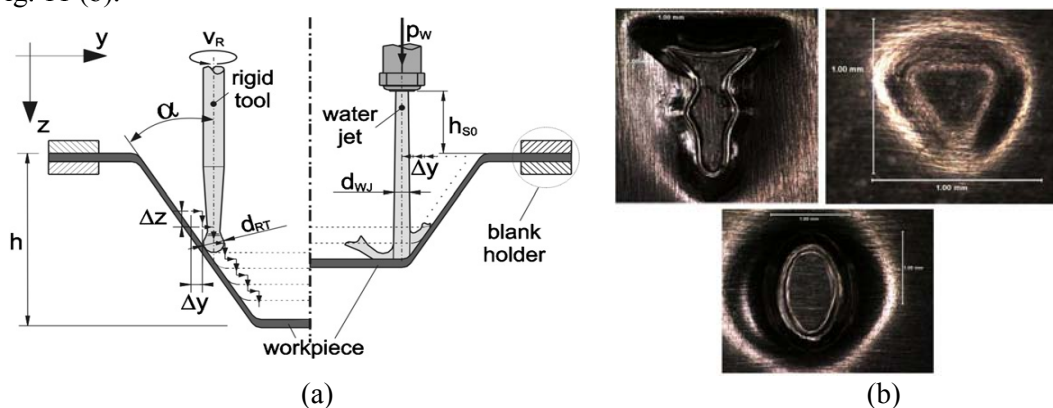


Fig. 11: (a) Schematic of IF with incremental forming with single point rigid tool (left) and water-jet (right) [45], (b) Parts formed by IF at NU on a MORI-SEIKI 3 axis CNC machine

The exploration of non-conventional techniques for IF at the micro-scale is still in its infancy. The current challenges in geometric accuracy and process control might be overcome by suitable combination of the available incremental processing techniques.

Micro-rolling: Micro-rolling is a deformation-based micro-manufacturing process that imposes plastic deformation to the workpiece. The conventional micro-rolling process is commonly used in reducing the

thickness of the sheet, although, in this context, it is used for texturing the sheet with micro-scale patterns on the rolls. An indigenous desktop micro-rolling machine developed at NU [36] is shown in Fig. 12(a), along with the textured rolls, in Fig.12(b).

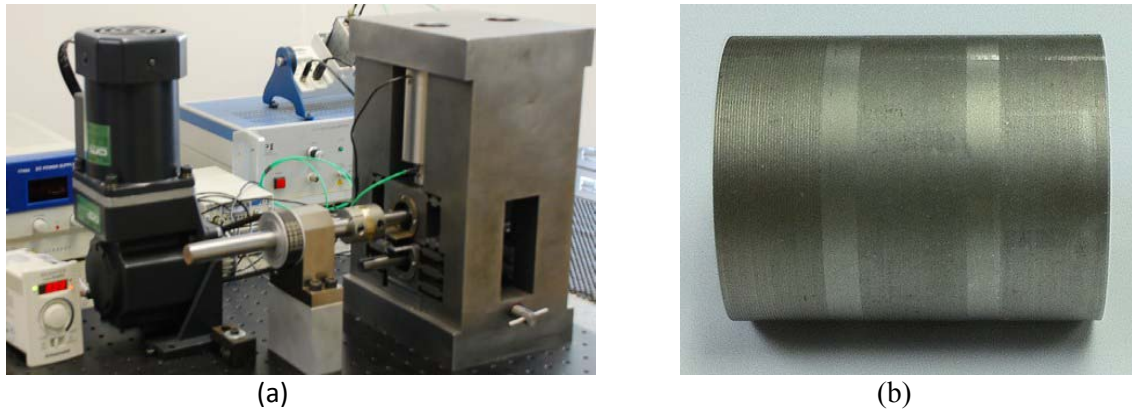


Fig. 12: (a) Micro-rolling machine, (b) Pre-textured roll for creating micro-channels

Micro-patterns are transferred from rolls onto the workpiece (sheet-metal) surface by rolling. A flexural bearing housing (FBH) has been designed to enable roll gap adjustment by a pair of piezo-actuators and a wedge adjusting unit[37]. A pair of capacitive position sensors attached on each lower FBH monitors the roll gap. A load cell is placed on the top of each upper FBH for roll separating force measurement. Capacitive sensors are embedded in the flat/untextured roll to monitor the temporal and spatial pressure distribution across the roll-workpiece interface during the rolling process. Adjusting the relative velocity between the upper and lower roll can control both the channel depth and curvature. A high DC current is passed through the workpiece to perform electrical-assisted micro-rolling (EA μ R) [38].

By adjusting the relative velocity between the upper and lower roll, the curvature of the rolled metal sheet has been reduced and the channel depth is increased. Multi-pass surface texturing enabled the production of different texture patterns on the sheet metal surfaces[39]. Multi-pass rolling can be used to further reduce the sheet thickness and increase the channel depth. The sensors embedded in the flat roll were able to measure the pressure distribution across the roll-workpiece interface. Thermal expansion of the workpiece was observed in EA μ R. Increasing the DC current level has increased the amount of thermal expansion. However, higher DC current levels produced a steadier channel depth along the channel. Larger reduction also promoted a relatively steady channel depth production. Figure 13 shows images of microstructures produced by micro-rolling.

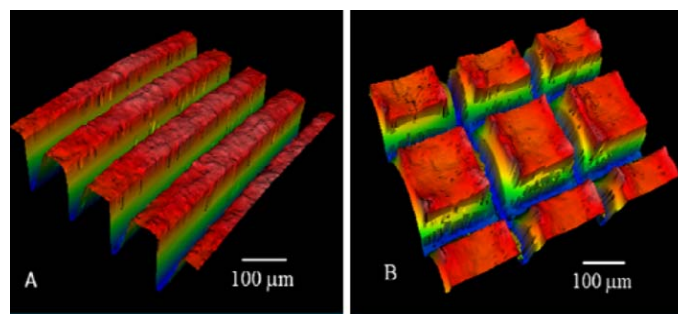


Fig. 13: Examples of textured patterns by micro-rolling (single and multi-pass)

The current challenges in the process are related to the production of finer surface micro-scale features with EA μ R, and channel formability improvement.

Micro-extrusion: Due to an ever increasing demand for miniaturized components, micro-forming, due to its advantageous characteristics such as mass production, relatively better material integrity, less waste, and relatively lower manufacturing costs has become an attractive option for the manufacture of these components. Micro-extrusion, a fast process with low raw material waste levels, is therefore ideally suited for the mass production of miniaturized components with characteristic dimensions less than 1 mm, e.g., micro-pins.

The micro-extrusion process is essentially a scaled down adaptation of the extrusion process. Figure 14(a) shows the images of a typical scaled down micro-extrusion machine developed at NU [40]. The machine consists of two main components: actuator and forming assembly. The actuator provides up to a 19kN force, 250mm/s speed, and 30mm stroke length. The machine uses a segmented die to facilitate the removal of the pins after extrusion. The segmented die is mounted onto a specially designed forming assembly that consists of a ram mounted on a yoke that slides along linear bearings, which guide the ram into the segmented die that is mounted and clamped in a die block. This forming assembly is equipped with a load cell (capacity 8909N) and an LVDT to measure the extrusion force and the corresponding ram displacement. Figure 14(b) shows typical extruded micro-pins made by the micro-extrusion machine. Extrusion of brass pins with different grain sizes at various extrusion dimensions and strain rates were performed [41], with extrusion diameters ranging from 1.33mm to 0.57mm . As it can be seen in the figure, the micro-pins extruded by the micro-extrusion machine are typically in the sub-millimeter domain [41].

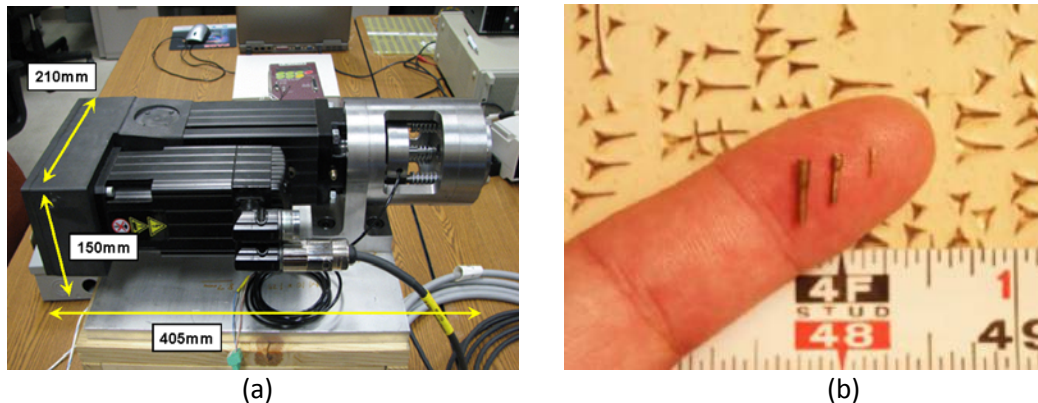


Fig.14: (a) Micro-extrusion machine developed at NU, and (b) typical extruded components

One of the major issues, in general, encountered during scaling down of conventional manufacturing processes to the micro-scale domain is the “size effect” [41, 42]. As a consequence of the size effect, factors such as the microstructure and surface characteristics of the workpiece and that of the tooling play a much more significant role at the micro-scale. Due to this, the process is dominated by different physical phenomena than at the macro-scale. One of the most important aspects of the size effect has been observed in friction behavior. To alleviate friction effects, coatings such as Titanium Nitride (TiN), Chromium Nitride (CrN), Diamond-like Carbon (DLC) and Molybdenum Di-sulphide (MoS_2) can be deposited by different methods. Such coatings have been used to improve the performance of the dies in the micro-extrusion process [42]. Extrusion forces were estimated by analytical models and FEM simulation, and compared with experimental values. It has been found, in the case of the larger sized pins, the FEM force profiles are fairly close to the experimental results. However, for the smaller sized pins, the FEM simulations generally over-predict the extrusion force profiles when compared to the experimental results.

Micro injection molding: The micro injection molding process was developed in the late 1980s with modified commercial units. The task was to reduce to a minimum the amount of the injected resin, which was necessary for a stable process. The minimum dimensions which can be reproduced faithfully by injection molding are determined mainly by the aspect ratio. For example, for aspect ratios smaller than 1, these minimal details can reach up to the sub-micrometer range[43]. By using the special features of “classic” micro injection molding like evacuation and the variotherm process, polymeric microstructures with a minimal wall thicknesses of 10 μm , structural details in the range of 0.2 μm , and surface roughness of about $R_z < 0.05 \mu\text{m}$ have been manufactured. The polymers most commonly used in micro injection molding are PMMA, PC, PA, PEEK, among others. A good example of micro injection molding is the fabrication of optical fiber connectors with up to 16 multi-mode fiber channels as shown in Fig. 15(a).

Fabrication of micro-molded parts by conventional injection molding machines is challenging. If such machines are used for production of micro-parts (part weight down to 1 mg), they produce large sprues to achieve the minimum necessary shot size, which often leads to wastage of more than 90% of the polymer and this can be an important cost factor [44].

In order to control the accuracy of the process and the homogeneity of the parts, a micro injection molding machine that uses an injection system consisting of a screw extruder and a plunger injection unit has been developed. The micro injection molding steps are: (1) plasticizing and feeding of pellets, (2) closing the shut-

off valve to prevent back flow, (3) delivering the shot to the injection barrel, (4) pushing the melt into the mold by a plunger, and (5) applying a holding pressure, see Fig. 15(b).

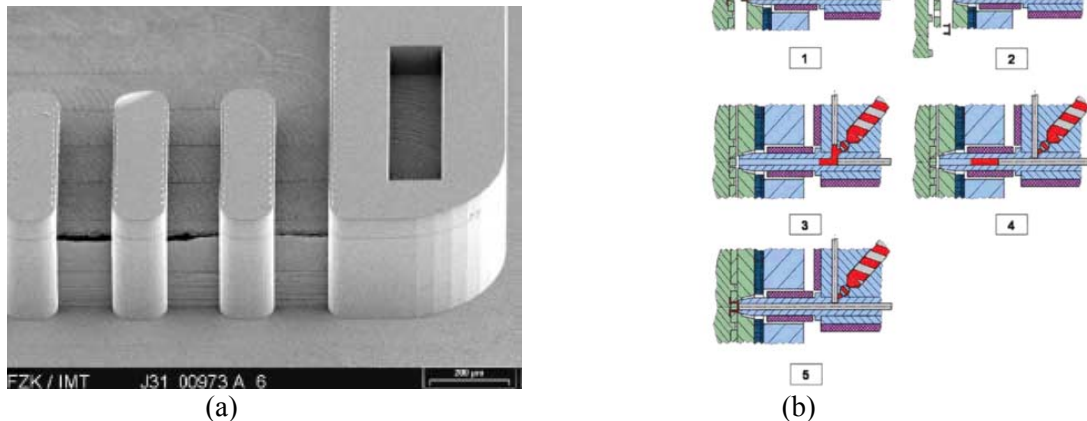


Fig. 15: (a) SEM image of leading structures for optical fibers, made by micro injection molding (scale bar = 200 μm) [45]; (b) Steps in micro injection molding [44]

5. ADDITIVE PROCESSES

Micro-stereo lithography: Micro-stereolithography is a novel micro-manufacturing process which builds truly 3D microstructures by solidifying a liquid photosensitive monomer in a layer by layer fashion[46]. Micro-stereolithography is derived from conventional stereolithography, whose basic principle is schematically shown in Fig. 16(a), along with a micro-part produced by the process, in Fig. 16(b) [47]. A 3D solid model is sliced into a series of 2D layers with uniform thickness. The NC code generated from each sliced 2D file is then executed to control a motorized x–y stage carrying a vat of a UV curable solution. The focused scanning UV beam is absorbed by the solution consisting of monomer and photoinitiators, leading to the polymerization, i.e., conversion of the liquid monomer to the solid polymer. After one layer is solidified, the elevator moves downward and a new layer of liquid resin can be solidified as the next layer. With the synchronized x–y scanning and the Z-axis motion, the complicated 3D micro part is built in a layer by layer fashion.

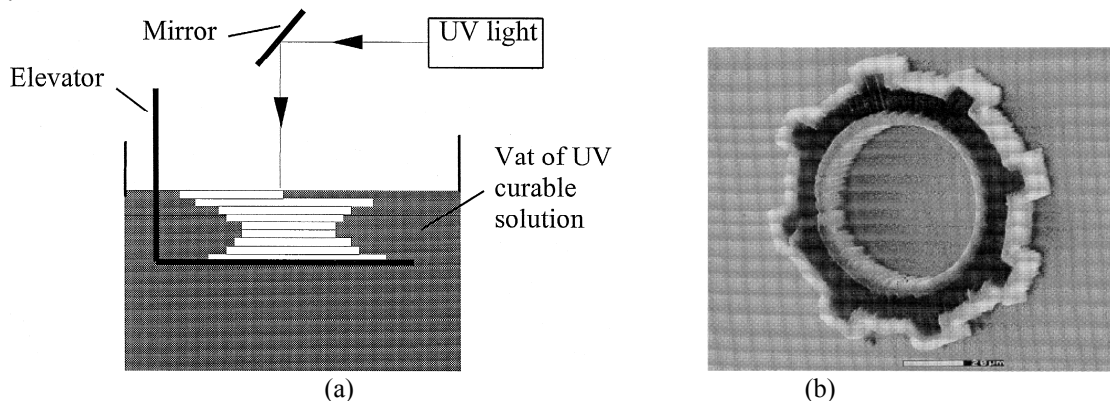


Fig. 16: (a) Schematic of micro-stereo lithography process [47], (b) 100 μm diameter micro-gear with thickness of 15 μm [46].

In combination with a digital micromirror device (DMD) [48], micro-stereo lithography has been carried out to produce high precision 3D microparts [49]. The dynamic mask is capable of modulating the multiple mask-patterns electronically, without physically replacing the mask for each layer. The commercially available large format dynamic mask is the micro display device, which was initially developed for the high-resolution projection display.

The process resolution can be enhanced (down to the nano-scale) by using X-ray lithography. However, lithography has a drawback of not being able to process most materials and is, therefore, not under the true domain of micro-manufacturing.

6. HYBRID PROCESSES

Water Jet Guided Laser Material Processing: Water jet-guided laser technology (see Fig. 17(a)), as a hybrid technology, first presented in 1994[50], has found a broad range of applications in precision micro-manufacturing. The principle of water jet-guided laser processing is to couple a high-power, pulsed laser beam into a hair-thin low pressure water jet, [51] see Fig. 17(b). The cylindrical water jet guides the laser beam by means of total internal reflection at the water/air interface, similar to conventional optical fibers. On reaching the workpiece the laser ablates the material by melting and vaporization. The advantages offered by this technology are uniform distribution of laser energy compared to the Gaussian distribution in conventional lasers, elimination of limitations of optical focus control due to the variable length of the jet allowing precision machining to a considerable depth (higher aspect ratio), improved tolerance in micro-machined features due to in-situ cooling action of water jet and effective inherent flushing with almost negligible mechanical force. All these advantages are of prime importance in the domain of micro-manufacturing.

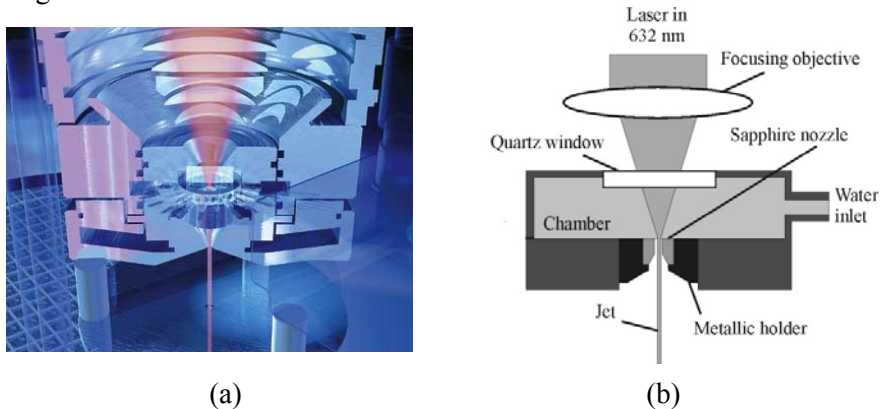


Fig. 17: (a) Laser beam coupling with pressurized water to obtain the water jet guided laser beam[52], (b) Schematic of laser beam being focused into the pressurized water chamber and coupled with water jet [51]

Applications of water jet guided laser technology encompass some of the major research tasks in micro-manufacturing, for example, edge isolation of solar cells, as shown in Fig. 18(a) [51] that can be achieved by cutting a groove with a water jet guided laser at the wafer edge to prevent shunt forming to improving the cell conversion efficiency, die separation where wafers as thin as $50\ \mu\text{m}$ can be cut at up to $200\ \text{mm/s}$ with excellent cut quality and a kerf width as low as $28\ \mu\text{m}$ [52]. Other useful applications include high-speed thin Ga-As wafer dicing, see Fig. 18(b) [53], cutting of metal screens for OLED displays [54] and processing of heat sensitive materials (shape memory alloys) for medical device (stents) [55].

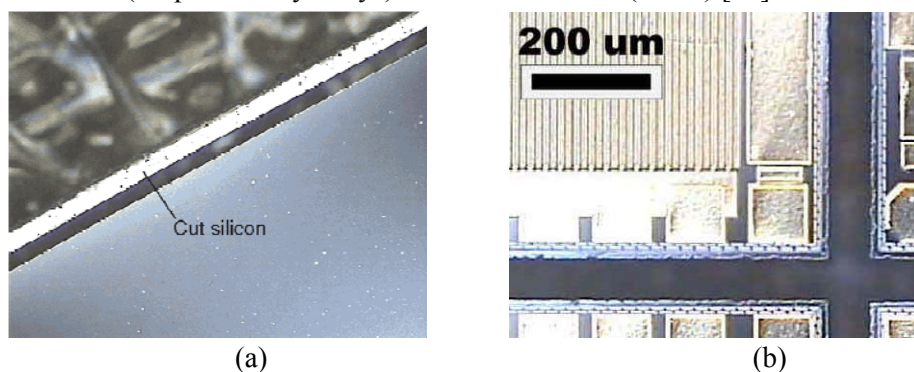


Fig. 18: Examples: (a) $70\text{-}\mu\text{m}$ -thick wafer with an edge cut parallel to the edge of the wafer shows a thin ring of cut silicon about $50\text{-}\mu\text{m}$ wide[52], (b) Ga-As wafer dicing with water jet guided laser system [53]

The process capability of this technology is, however, limited by the smallest achievable diameter of the stable water jet waveguide which in turn depends largely on the processing of micron sized nozzles in ranges below $50\ \mu\text{m}$ in diameter. Also the use of water jet-guided laser systems being a relatively newer technology is yet to be explored beyond the domain of unidirectional, planar cutting and featuring operations.

Laser-assisted Mechanical Micro-machining (LAMM): To overcome the limitation of the range of materials that can be processed by mechanical micro-machining, a hybrid process of laser-assisted mechanical micromachining has been designed [56]. 3D micro-grooves are created, in conjunction with a

highly localized thermal softening of the workpiece by focusing a solid-state continuous wave laser beam in front of a miniature cutting tool. The laser variables have shown to significantly influence the process, by decreasing the thrust force by 17% and increasing the average surface roughness by 36% when the laser power is increased from 0 to 10 W. A typical groove is shown in Fig. 19, along with a process schematic.

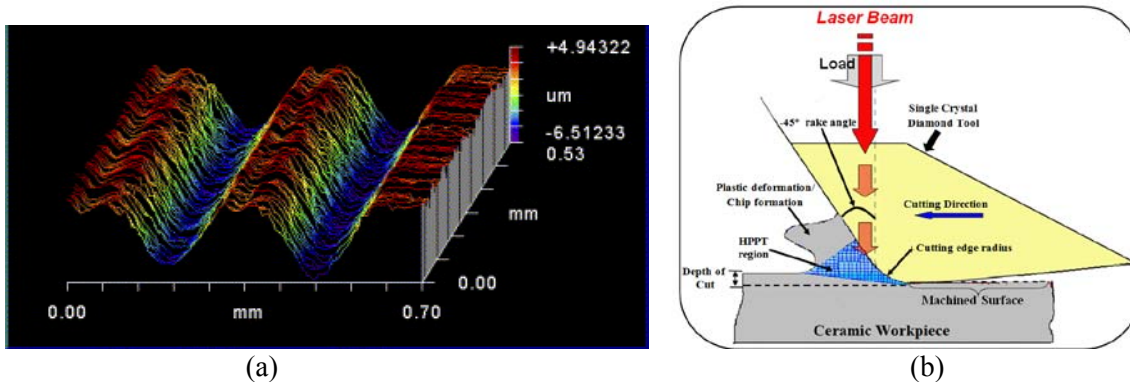


Fig. 19: (a) Sinusoidal profile cut in H-13 steel (42 HRC) using a 1 W laser beam with a 70 μm spot size located 200 μm from the tool edge [56]; (b) Schematic of micro laser-assisted machining [57].

7. CONCLUSIONS

The current trend toward miniaturization has given rise to an exponential growth in the demand for energy efficient miniaturized components. The paper has presented a very brief overview, limitations, and current research trends in some of the newly developed novel mechanical, electro-physical, laser based, and hybrid micro-manufacturing processes that are capable of machining 3D micro-features and miniaturized products in a wide range of materials including metals, polymers and ceramics to tight dimensional and form tolerances.

8. REFERENCES

- [1] K. F. Ehmann, D. Bourell, M. L. Culpepper, T. J. Hodgson, T. R. Kurfess, M. Madou, K. Rajurkar, and R. DeVor, *Micromanufacturing: International Assessment of Research and Development*: Springer, 2007.
- [2] Z. Katz and C. J. Tibbles, "Analysis of Micro-scale EDM Process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, pp. 923-928, 2005.
- [3] (04-20-2012). www.jpsalaser.com.
- [4] Y. Huang, Y. J. Wang, J. Cao, and M. Li, "Prediction of Forming Limit in Single Point Incremental Forming With the Ductile Fracture Criterion," *ASME Conference Proceedings*, vol. 2007, pp. 929-934, 2007.
- [5] J.-Y. Cheng, C.-W. Wei, K.-H. Hsu, and T.-H. Young, "Direct-write laser micromachining and universal surface modification of PMMA for device development," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 99, pp. 186-196, 2004.
- [6] O. S. Frank Wagner, Nandor Vágó, Rafal Romanowicz, Bernold Richerzhagen. The Laser Microjet $\text{\textcircled{R}}$ Technology – 10 Years of Development.
- [7] C. Manufacturing. (04-20-2012). www.canadianmanufacturing.com.
- [8] I. Riff Company. (04-20-2012). www.riff-co.com.
- [9] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, "Micro-EDM-Recent Developments and Research Issues," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 50-57, 2004.
- [10] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi, "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, pp. 745-768, 2006.
- [11] Y.-b. Bang, K.-m. Lee, and S. Oh, "5-axis micro milling machine for machining micro parts," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, pp. 888-894, 2005.
- [12] K. F. Ehmann, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, and I. Lazoglu, "Machining Process Modeling: A Review," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 119, pp. 655-663, 1997.
- [13] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 1287-1300, 2003.

- [14] H. S. Lim, Y. S. Wong, M. Rahman, and M. K. Edwin Lee, "A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 318-325, 2003.
- [15] (04/27/2012). www.smalltec.com.
- [16] C. Y. Chien and M. C. Gupta, "Pulse width effect in ultrafast laser processing of materials," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 81, pp. 1257-1263, 2005.
- [17] C. Momma, S. Nolte, B. N. Chichkov, F. v. Alvensleben, and A. Tünnermann, "Precise Laser Ablation with Ultrashort Pulses," *Applied Surface Science*, vol. 109-110, pp. 15-19, 1997.
- [18] N. N. Nedialkov, S. E. Imamova, and P. A. Atanasov, "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *Journal of Physics D: Applied Physics*, p. 638, 2004.
- [19] J. Jandeleit, A. Horn, R. Weichenhain, E. W. Kreutz, and R. Poprawe, "Fundamental Investigations of Micromachining by Nano- and Picosecond Laser Radiation," *Applied Surface Science*, vol. 127-129, pp. 885-891, 1998.
- [20] T. V. Kononenko, S. V. Garnov, S. M. Klimentov, V. I. Konov, E. N. Loubnin, F. Dausinger, A. Raiber, and C. Taut, "Laser ablation of metals and ceramics in picosecond-nanosecond pulsewidth in the presence of different ambient atmospheres," *Applied Surface Science*, vol. 109-110, pp. 48-51, 1997.
- [21] S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. von Alvensleben, and H. Welling, "Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling," *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 68, pp. 563-567, 1999.
- [22] S. M. Klimentov, T. V. Kononenko, P. A. Pivovarov, S. V. Garnov, V. I. Konov, D. Breitling, and F. Dausinger, "Role of gas environment in the process of deep-hole drilling by ultrashort laser pulses," in *Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, Osaka, Japan, 2003, pp. 515-520.
- [23] A. Lasagni, M. D'Alessandria, R. Giovanelli, and F. Mücklich, "Advanced design of periodical architectures in bulk metals by means of Laser Interference Metallurgy," *Applied Surface Science*, vol. 254, pp. 930-936, 2007.
- [24] M. D'Alessandria, A. Lasagni, and F. Mücklich, "Direct micro-patterning of aluminum substrates via laser interference metallurgy," *Applied Surface Science*, vol. 255, pp. 3210-3216, 2008.
- [25] A. Lasagni, C. Holzapfel, and F. Mücklich, "Periodic Pattern Formation of Intermetallic Phases with Long Range Order by Laser Interference Metallurgy," *Advanced Engineering Materials*, vol. 7, pp. 487-492, 2005.
- [26] M. D. Shirk and P. A. Molian, "A Review of Ultrashort Pulsed Laser Ablation of Materials," *Journal of Laser Applications*, vol. 10, pp. 18-28, 1998.
- [27] K. Pallav and K. F. Ehmann, "Feasibility of Laser Induced Plasma Micro-machining (LIP-MM)," in *Precision Assembly Technologies and Systems*, S. Ratchev, Ed., ed: Springer, 2010, pp. 73-80.
- [28] K. Pallav, J. Ramkumar, Nagahanumaiah, and K. F. Ehmann, "Comparative Assessment of the Laser Induced Plasma Micro-machining (LIP-MM) and the μ -EDM Process " in *International Forum on Micro Manufacturing*, Japan, 2010.
- [29] K. Pallav, P. Han, J. Ramkumar, Nagahanumaiah, and K. F. Ehmann, "Comparative Assessment of the Laser Induced Plasma Micro-Machining (LIP-MM) and the Micro-EDM Processes," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering (To appear)*, 2011.
- [30] A. Vogel, J. Noack, K. Nahen, D. Theisen, S. Busch, U. Parlitz, D. X. Hammer, G. D. Noojin, B. A. Rockwell, and R. Birngruber, "Energy Balance of Optical Breakdown in Water at Nanosecond to Femtosecond Time Scales," *Applied Physics B: Lasers and Optics*, vol. 68, pp. 271-280, 1999.
- [31] K. Nahen and A. Vogel, "Plasma formation in water by picosecond and nanosecond Nd:YAG laser pulses. II. Transmission, scattering, and reflection," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 2, pp. 861-871, 1996.
- [32] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, and J. Allwood, "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal," *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, vol. 54, pp. 623-649, 2005.
- [33] Y. Saotome and T. Okamoto, "An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials," *Journal of materials processing technology.*, vol. 113, p. 636, 2001.
- [34] T. Obikawa, S. Satou, and T. Hakutani, "Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils," *Int J Mach Tools Manuf International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 906-915, 2009.

- [35] T. Obikawa, T. Hakutani, T. Sekine, M. Yoshino, S. Numajiri, and T. Matsumura, "Single-point incremental micro-forming of thin shell products utilizing high formability," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, vol. 4, pp. 1145-1156, 2010.
- [36] J. Cao, Zhou, R. and Ehmann, K, "Desktop deformation-based micro surface texturing system," 61/459,668, Dec. 16, 2010.
- [37] R. Zhou, J. Cao, K. Ehmann, and C. Xu, "An Investigation on Deformation-Based Micro Surface Texturing," *ASME Conference Proceedings*, vol. 2011, pp. 613-619, 2011.
- [38] M. K. Ng, Fan, R., Zhou, R., Smith, E.F. III , Gao, R.X. and Cao, J, "Ng, M.K., Fan, R., Zhou, R., Smith, E.F. III , Gao, R.X. and Cao, J," presented at the International Conference On Micromanufacturing, 2012.
- [39] R. Zhou, Cao, J., Xu, C. and Ehmann, K., "An Investigation on Multi-pass Deformation-based Surface Texturing," *Steel Research International*, p. 171, 2011.
- [40] J. Cao, N. Krishnan, Z. Wang, H. Lu, W. K. Liu, and A. Swanson, "Microforming: Experimental Investigation of the Extrusion Process for Micropins and its Numerical Simulation Using RKEM," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, pp. 642-652, 2004.
- [41] N. Krishnan, J. Cao, and K. Dohda, "Study of the Size Effects on Friction Conditions in Microextrusion---Part I: Microextrusion Experiments and Analysis," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, pp. 669-676, 2007.
- [42] S. A. Parasiz, B. Kinsey, N. Krishnan, J. Cao, and M. Li, "Investigation of Deformation Size Effects During Microextrusion," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, pp. 690-697, 2007.
- [43] V. Piotter, K. Mueller, K. Plewa, R. Ruprecht, and J. Hausselt, "Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding," *Microsystem Technologies*, vol. 8, pp. 387-390, 2002.
- [44] Y. Qin, *Micromanufacturing Engineering and Technology*, 2010.
- [45] H. D. U. Wa11rabe1, G. Friedsam5, Th. Hanemann2, J. Mohr', K. MU11er2, V. Piotter2, P. Ruther4, Th. Scha11er3, W. ZiB1er5, "RibCon: micromolded easy-assembly multifiber connector for single- and multimode applications," *Proceedings of SPIE*, vol. 4408, pp. 478-485, 2001.
- [46] P. F. Jacobs, *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography*: SME, 1992.
- [47] X. Zhang, X. N. Jiang, and C. Sun, "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 77, pp. 149-156, 1999.
- [48] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass, "A MEMS-based projection display," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 1687-1704, 1998.
- [49] C. Sun, N. Fang, D. M. Wu, and X. Zhang, "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 121, pp. 113-120, 2005.
- [50] B. Richerzhagen, G. Delacretaz, and R. P. Salathe, "Complete model to simulate the thermal defocusing of a laser beam focused in water," *Optical Engineering*, vol. 35, pp. 2058-2066, Jul 1996.
- [51] N. U. K. T. A. Mai, N. Vago, B. Richerzhagen, K. Stay, "Laser MicroJet® Technology - Fundamental Study and Highlights of it's Latest Applications," *ALAC*, 2007.
- [52] R. Ayala. (2004) Water guided lasers create clean cuts. *LaserFocusWorld: International Resource for Technology and Applications in the Global Photonics Industry*.
- [53] A. S. Delphine Perrottet, Simone Amorosi, Bernold Richerzhagen. GaAs-Wafer Dicing using the waterjet-guided Laser
- [54] A. S. a. R. B. Perrottet D, "New process for screen cutting: Water-jet guided laser," in *SPIE proceedings*, 2005.
- [55] R. H. Delphine Perrottet, and Bernold Richerzhagen. A new technology that uses a waterjet to guide a laser enables precision micromachining without causing damage to delicate metal materials. .
- [56] R. Singh and S. N. Melkote, "Characterization of a hybrid laser-assisted mechanical micromachining (LAMM) process for a difficult-to-machine material," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1139-1150, 2007.
- [57] D. Ravindra, et al, "Pressure and Temperature Effects in Silicon during Indentation Test," *Proceedings of ICOMM 2012*, pp. 8-13, 2012.



Zeljковиć, M.¹, Navalušić, S.¹, Todić, V.¹, Tabaković, S.¹, Milojević, Z.¹, Antić, A.¹, Živković, A.¹, Gerić, K.¹, Vićević, M.¹, Lukić, D.¹, Beju, L.², Mladenović, C.¹, Blanuša, V.¹, Bojanić, M.¹, Jovičić, G.¹, Vukman, J.¹

SAVREMENI PRILAZI U RAZVOJU SPECIJALNIH REŠENJA ULEŽIŠTENJA U MAŠINSTVU I MEDICINSKOJ PROTETICI - Rezultati istraživanja prve godine realizacije projekta -

Rezime: Sadržaj istraživanja, prezentovanih u ovom radu, obuhvata problematiku koja je poslednjih godina aktuelna i vrlo značajna kako u neposrednoj okolini tako i u svetskim okvirima. U domaćim uslovima istraživanja vezana za ovu problematiku su od posebnog značaja i za participante i za širi krug korisnika. Kotrljajni ležaji i/ili ležajni sklopovi danas predstavljaju široko rasprostranjenu grupu podsklopova u automobilske industriji, kod mašina svih namena, železnici i proizvoda široke potrošnje. I pored toga što su ležaji doživeli svoj procvat pre više decenija, još uvek postoji veliki broj područja interesantnih za istraživanja. To se ne odnosi samo na usavršavanja postojećih i poznatih rešenja npr. kroz primenu novih materijala ili adaptroniku, već i na razvoj novih rešenja za specijalne primene kao i na otvaranje novih područja njihove primene.

Izdvajajući samo neka od pitanja koja su posebno interesantna za realizatora projekta i participante, u okviru projekta je naglasak stavljen na istraživanja konstrukcione i eksploatacione problematike ležaja i ležajnih sklopova sa jedne strane i drugim, manjim delom na specifičnu "tehnološku" problematiku koja je značajna za njihovu proizvodnju. Pri tome je naglasak stavljen na istraživanju sledećih ležaja i ležajnih sklopova:

- integrisane ležajne sklopove točka vozila,
- ležajne sklopove za vučena i vučna vozila za železnicu,
- ulažištenja karakteristična za endoproteze ljudskih ekstremiteta (uležištenja humanih endoptoteza).

U skladu sa prethodnim, istraživanja u okviru projekta su koncipirana kroz četiri celine-segmenta, kako sledi.

- A) Istraživanje ponašanja ležajnih sklopova točka vozila, ležajnih sklopova za vučena i vučna vozila za železnicu i drugih specijalnih ležaja;
- B) Istraživanje i razvoj komponenti medicinske endoprotetike (endoproteza zgloba kuka, ramena, kolena, ...);
- V) Istraživanje mogućnosti primene savremenih tehnologija izrade razmatranih tipova uležištenja i komponenti medicinske endoprotetike;
- G) Unapređenje metoda nadzora i dijagnostike procesa obrade u automatizovanoj fleksibilnoj proizvodnji kroz praćenje stanja pohabanosti alata.

Primarni cilj istraživanja, u okviru prve celine, je razvoj integrisanog matematičkog toplotno-mehaničkog modela koji čine: toplotni izvori, mehanizmi prenosa toplote, toplotni ponori i toplotno širenje kotrljajnih ležaja i ležajnih sklopova. Raspored temperaturnih polja definisan je primenom programskog sistema opšte namene baziranog na metodi konačnih elemenata. Računarski model obuhvata linerano provođenje i nelinearni prelaz toplote. Na osnovu porasta temperature određena je promena mehaničkih karakteristika u funkciji broja obrtaja. Izvršena je karakterizacija toplotnih izvora i ponora, definisane termodinamičke i elastične karakteristike materijala elemenata, određene količine generisane toplote i definisni mehanizme prenosa toplote, kao i opterećenja ležaja u funkciji početnog mehaničkog i toplotnog prednapreznja i radnog opterećenja, kao i identifikovano dinamičko ponašanje.

Drugi cilj istraživanja predstavlja definisanje podloga za razvoj unapređenog rešenja totalne endoproteze kuka bazirane sa jedne strane, na morfološkim karakteristikama svakog pacijenta pojedinačno, a sa druge strane na savremenim saznanjima o kinematici i dinamici lokomotornog sistema čoveka. Polazeći od toga izvršene su studije različitih savremenih rešenja za analizu i transformaciju dijagnostičkih snimaka dobijenih primenom kompjuterizovane tomografije (CT) i magnetne rezonance (MRI). Pri tome je naglasak stavljen na karakteristike samih snimaka u cilju povećanja kontrasta između tkiva i koštane materije, kao i mogućnosti konverzije takvih snimaka u standardizovane formate primenljive u savremenim CAD/CAE/CAM programskim sistemima. Sem toga, analizirani su najnoviji rezultati usmereni na analizu kosti femura (butne kosti) sa stanovišta kinematike i opterećenja u statičkim i dinamičkim uslovima pri svakodnevnim aktivnostima. Na taj način se stvaraju preduslovi za defisanje trodimenzionalnog oblika totalne endoproteze kuka prilagodljive ekstremitetu konkretnog pacijenta.

¹ Prof.dr. Milan Zeljković, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, milanz@uns.ac.rs

² Livia Beju, Lucian Blaga" University of Sibiu, "Herman Oberth" Engineering Faculty, Emil Cioran 4, 550025 Sibiu, Romania

Polazeći od činjenice da istraživanja obuhvataju dve tehnološki različite grupe proizvoda (i po geometriji i po serijnosti) istraživanje mogućnosti primene savremenih tehnologija izrade se posebno razmatra za slučaj serijske i za slučaj pojedinačne proizvodnje.

Isto tako, neminovna je činjenica da je savremena proizvodnja bazirana na automatizovanim fleksibilnim tehnološkim strukturama različitog nivoa složenosti, te je neophodno istražiti mogućnost rada takvih sistema bez poslužioca. Jedno od ključnih pitanja primene automatizovanih obradnih sistema je, pored ostalog, razvoj pouzdanog i robustnog sistema za nadzor alata i procesa, što je jedan od posebnih ciljeva istraživanja u okviru projekta. U tom cilju je izvršena sistematizacija metoda za razvoj inteligentnih sistema za monitoring procesa obrade, te definisana koncepcija sistema baziranog na postojećim sensorima, odnosno njihovom kombinacijom.

Ključne reči: integrisani ležaj točka, ležaj za vučna i vučena vozila za železnicu, komponente medicinske endoprotetike, endoproteza zgloba kuka, multifunkcionalni obradni sistemi, hibridni obradni sistemi, dijagnostika stanja alata, nadzor stanja alata

1. UVODNA RAZMATRANJA

U okviru istraživanje ponašanja ležajnih sklopova točka vozila, ležajnih sklopova za vučena i vučna vozila za železnicu i drugih specijalnih ležaja, se pošlo od činjenice da je u savremenoj automobilskoj industriji u najvećem broju slučajeva zastupljen ležaj točka vozila baziran na integraciji pojedinih komponenti osovine (*Hub Unit Bearing-HUB; Integrisani ležaj točka- „ILT“*) u cilju smanjenja mase i dimenzija kao i poboljšanja ukupnih performansi vozila. Poslednjih godina proizvođači vozila veliku pažnju posvećuju bezbednosti svojih proizvoda i u tom pogledu najnovija rešenja ležaja točka imaju značajno unapređenu strukturu i funkcionalnost. Novije rešenja ležaja točka vozila su *ILT II, ILT III* i *ILT IV*, su rezultat potrebe proizvođača vozila da zadovolje osnovna tri zahteva: kompaktnost, smanjenje mase i povećanje pouzdanosti. Na taj način postiže se smanjena potrošnja goriva i povećana stabilnost pri upravljanju vozilom. Pored osnovnog konstrukcionog rešenja sve više su u primeni ležaji točka vozila sa ugrađenim odgovarajućim sensorima.

Takođe treba konstatovati, da istraživanja u svetu pokazuju da se raste značaj transporta železnicom. To ukazuje na potrebu revitalizacije dosadašnjih vagona i lokomotiva kao i proizvodnju novih. Na početku transporta železnicom, teretni i putnički vagoni su imala samo dve osovine. Zahtevi za povećanom udobnošću u prevozu putnika, a kasnije i povećanom nosivosti teretnih vagona, usloveli su razvoj vagona unapređene konstrukcije i u nekim slučajevima povećanjem broja osovinskih sklopova. Uvedeni su novi, kompleksniji sistemi vešanja i različiti tipovi uležištenja osovina, pri čemu su ležaji jedan od kritičnih elemenata ležajnog sklopa osovine. Ležaji, koji se koriste za ove namene, moraju da budu prilagođeni vrlo teškim uslovima eksploatacije. Materijal, geometrija i kvalitet obrade su samo neki od elementa koji obezbeđuju potreban kvalitet. Takođe, zaptivanje i podmazivanje ležaja predstavljaju kritične elemente za ostvarivanje projektovanog veka eksploatacije.

Polazeći od prethodnog može se konstatovati da toplotno-mehaničko ponašanje kotrljajnih ležaja predstavlja osnovne pokazatelje kvaliteta ležajnog sklopa. Kroz istraživanja u okviru projekta se želi doći do rezultata koji će omogućiti da se još u fazi projektovanja identifikuje ponašanje ležajnog sklopa u eksploataciji. U konkretnom slučaju za ležajne sklopove definisane namene želi se kroz: a) računarska modeliranja i b) eksperimentalna istraživanja doći do uticajnih parametara na toplotno-elastične i dinamičke karakteristike ovih sklopova.

Drugi segment istraživanja obuhvata problematiku razvoja komponenti medicinske protetike. U predhodnom periodu je izvršena analiza urađaja koji se koriste za dijagnozu oboljenja lokomotornog sistema čoveka pri čemu je akcenat na savremenim metodama dijagnoze kao što su kompjuterizovana tomografija (CT) i magnetna rezonanca (MRI). Analiza obuhvata parametre niza ravanskih snimaka koje ovi uređaji generišu u obliku DICOM zapisa i mogućnosti generisanja zapreminskih elemenata (voxel-a) kojima se oni konvertuju u prostorne oblike. Na ovaj način su stvorene podloge za razvoj sopstvenog programskog rešenja primenom VTK (Visualization ToolKit) biblioteke klasa za programski jezik C++, kojim se omogućava formiranje prostornih modela obolelih ekstremiteta u svrhu analize i projektovanja endoproteza. Pored toga analizirani su rezultati savremenih istraživanja lokomotornog sistema čoveka kojima su definisani: prostorni oblici kosti femura, opterećenja na pojedinim elementima kosti femura, karakteristike materijala kosti, koštanih cemenata i njihove međusobna interakcija u cilju definisanja kontaktnih uslova kod implementacije cementnih endoproteza zgloba kuka. Na ovaj način prikupljene su informacije neophodne za redefinisane oblika postojećih proteza radi parametrizacije ključnih segmenata (proksimalnog, srednjeg i distalnog) endoproteze zgloba kuka.

Treći segment istraživanja se odnosi na problematiku primene savremenih tehnologija izrade razmatranih tipova uležištenja i komponenti medicinske endoprotetike. Polazeći od činjenice da su razmatrani proizvodi razvrstani u dve grupe, za prvu grupu proizvoda predložene savremene tehnologije njihove izrade se odnose na slučajeve serijske i maloserijske proizvodnje, dok su za drugu grupu proizvoda razmatraju savremene tehnologije izrade za slučaj maloserijske i pojedinačne proizvodnje.

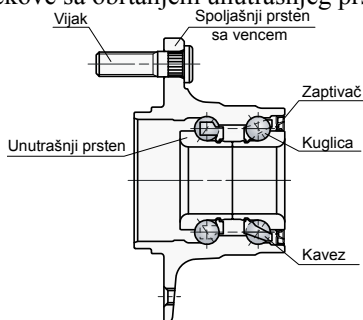
Četvrti segment istraživanja je vezan za oblast nadzora i dijagnostike procesa obrade rezanjem. Proizvođači savremenih obradnih sistema povećavaju nivoa automatizacije istih. Jedno od pitanje kod automatizovanih obradnih sistema je razvoj pouzdanog i robustnog sistema za nadzor alat i procesa. Istraživanja vezana za probleme nadzora i dijagnostike su usmerena na izbora senzorskog sistema, primenu više senzora i sistem fuzije senzora [13, 7], obradu signala i funkcije selekcije senzorskog signala (izdvajanje osobina) [21, 22], projektovanju i postavci eksperimenata

[69,8] i izboru tehnike veštačke inteligencije za modeliranje procesa [57]. I pored intenzivnih istraživanja sprovedenih u ovoj oblasti, još uvek ne postoji jedinstvena metodologija za razvoj dijagnostike obradnih sistema koja omogućava optimiziranu obradu, na osnovu koje je moguće sigurno i potpuno predviđanje i upravljanje ovim procesom.

2. 0 SISTEM ANALIZA DOSADAŠNJIH REZULTATA

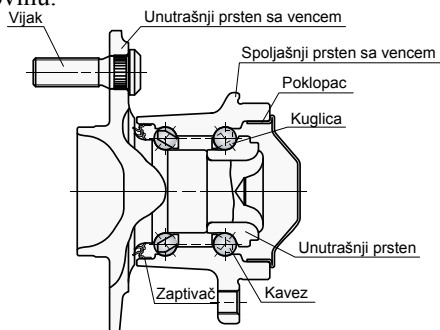
A) Istraživanje ponašanja ležajnih sklopova točka vozila, ležajnih sklopova za vučena i vučna vozila za železnicu i drugih specijalnih ležaja

ILT II je rešenje integrisanog ležaja kod koga je spoljašnji prsten izrađen zajedno sa vencem (diskom). Ova grupa ležaja se proizvodi u varijantama sa dvoredim kugličnim ležajem (slika 1.) ili dvoredim konično valjkastim ležajem. Navedeno rešenje se najčešće koristi za gonjene točkove, pri čemu se vrši obrtanje spoljašnjeg prstena na koji je montiran točak i kočioni disk sistema za kočenje, dok je unutrašnji prsten fiksiran na osovinu vijčanom vezom. Takođe, postoji i izvedba za pogonske točkove sa obrtanjem unutrašnjeg prstena.

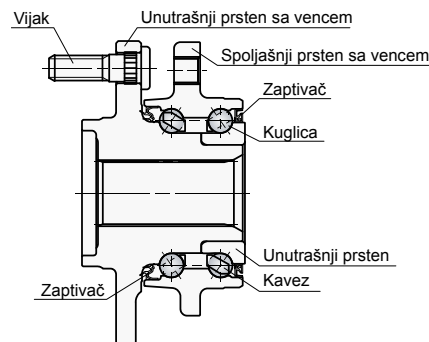


Slika 1. ILT II rešenje sa kugličnim ležajem sa kosim dodirrom [32]

ILT III je integrisani dvoredi kuglični ležaj kod koga je i spoljašnji i unutrašnji prsten izrađen sa vencem (slika 2. i 3.). Ovaj tip ležaja se najčešće koristi za prednje pogonske točkove i zadnje gonjene točkove [32]. Postoji rešenje sa obrtanjem spoljašnjeg i rešenje sa obrtanjem unutrašnjeg prstena. U verziji obrtanja spoljašnjeg prstena, kod gonjenih točkova, točkovi i kočioni diskovi se vežu za venac spoljašnjeg prstena, dok je unutrašnji prsten vezan za telo vozila. Kod rešenja sa obrtanjem unutrašnjeg prstena (gonjeni točkovi), točak i kočioni disk su vezani za venac unutrašnjeg prstena, a venac spoljašnjeg prstena se fiksira za telo vozila. Rešenje za pogonske točkove sa obrtanjem unutrašnjeg prstena, točak i kočioni disk su, takođe, vezani za venac unutrašnjeg prstena, dok je venac spoljašnjeg prstena fiksiran za osovinu.



Slika 2. ILT III rešenje sa kugličnim ležajem sa kosim dodirrom za gonjene točkove [32]

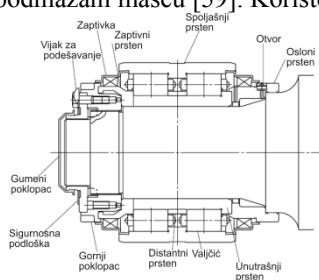


Slika 3. ILT III rešenje sa kugličnim ležajem sa kosim dodirrom za pogonske točkove [32]

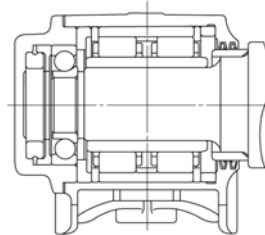
Osovinski sklopovi za železničke vagon (vučena vozila) i lokomotive (vučna vozila) su izloženi uticaju opterećenja usled šinskih spojeva, preklopnika, kućišta, kao i statičkih i dinamičkih opterećenja usled mase vozila i tereta. Ovi sklopovi takođe primaju aksijalna opterećenja pri kretanju voza u krivini. Sve ovo predstavlja složen oblik opterećenja koja deluju na osovinski sklop. Imajući prethodno u vidu ležaji za osovinske sklopove moraju biti projektovani na osnovu svih opterećenja kojima su izloženi tokom eksploatacije. Ležaji za osovinske sklopove koji su trenutno primenjuju, mogu se klasifikovati u nekoliko tipova, na osnovu tipa ležaja i načina zaptivanja: 1. Cilindrično - valjčasti; 2. Sferično - valjčasti; 3. Konusno - valjčasti; 4. RCT ležajevi (zaptiveni konusno - valjčasti ležaji sa rotirajućim poklopcem). Da bi se obezbedila potrebna nosivost ove vrste ležaja se izrađuju u dvorednoj konfiguraciji.

Cilindrično - valjčasti ležaji imaju veliku nosivost zbog linearnog kontakta između staza kotrljanja i kotrljajnih elemenata. Izrađuju se sa zazorom od 130 do 180 [µm]. Za uležištenje osovinskih sklopova postoji nekoliko tipova cilindrično - valjčastih ležaja koji se prema izvedbi dele na [58], [59]: 1. Zaptiveni cilindrično-valjčasti ležaji sa rotirajućim poklopcem (RCC ležaji); 2. Cilindrično valjčasti ležaji kombinovani sa kugličnim ležajima; 3. Cilindrično valjčasti ležaji sa rebrima; 4. Cilindrično valjčasti ležaji standardizovani po UIC (International Union of Railways) standardu.

Najvažnija eksploataciona karakteristika RCC ležajeva (slika 4.) je da ne zahtevaju održavanje i da imaju vek eksploatacije 600.000 – 1.000.000 [km]. RCC ležajevi su cilindrično valjčasti ležaji montirani u blok sa zaptivkom i unapred podmazani mašću [59]. Koriste se za putničke vagona i za električne lokomotive.



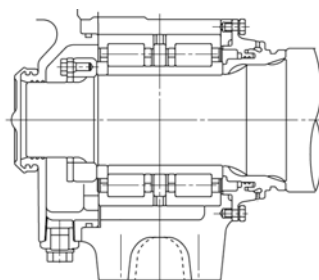
Slika 4. RCC ležajevi za osovinsko uležištenje lokomotiva [59]



Slika 5. Osovinski sklop sa cilindrično valjčastim ležajem sa rebrima i kugličnim ležajem sa kosim dodirom i gumenim odbojnikom [58];

Cilindrični valjčasti ležaj nema mogućnost prenošenja aksijalnog opterećenja. Stoga, osovinski sklop sa ovim ležajima zahteva dodatni ležaj koji će primiti aksijalna opterećenja, povećavajući na taj način broj elemenata u osovinskom sklopu [58]. Na ovaj način nastaje osovinski sklop cilindrično-valjčastih ležaja kombinovan sa kugličnim ležajima. Kod ovakvih osovinskih sklopova na kraju osovine se nalazi kuglični ležaj sa kosim dodirom koji prima aksijalno opterećenje. U nekim slučajevima na kraju osovine se pored kugličnog ležaja sa kosim dodirom nalazi i opruga sa konusnim diskom ili gumeni odbojnik da bi se apsorbivala udarna opterećenja (slika 5.).

Cilindrični valjčasti ležaji sa rebrima (slika 6.) (CRB ležaj) primaju aksijalno opterećenje na unutrašnjem i spoljašnjem prstenu [59]. U poređenju sa prethodnim tipom uležištenja osovinskog sklopa ima prednost zbog manjih troškova, jednostavnije i kompaktnije ugradnje (nema potrebe za kugličnim ležajem). Ovaj tip ležaja se izrađuje sa zaptivkom na zadnjem poklopcu osovinskog sklopa ili sa unutrašnjom zaptivkom na samom ležaju. Takođe ovi ležaji se izrađuju i sa rebrima za vođenje kotrljajnih tela. Pojedini proizvođači cilindrično valjčaste ležaje sa rebrima izrađuju i po UIC standardu.



Slika 6. Osovinski sklop sa CRB ležajem sa rebrima [60]

B) Istraživanje i razvoj komponenti medicinske endoprotetike

Implantati koji se koriste u medicinskoj protetici se prema načinu izrade mogu podeliti na: serijski i pojedinačno proizvedene, odnosno tipski (prema odgovarajućim kategorijama) ili prema merama pacijenta („custom made“). Implantati koji se trajno ugrađuju u ljudsko telo su najčešće veštački zglobovi kuka i kolena. U dosadašnjoj kliničkoj praksi se najčešće podrazumeva primenu, serijski izrađenih implantata, što u komplikovanim slučajevima (složene frakture kostiju) ne obezbeđuje uslove za uspešno izlečenje, jer implantat treba da odgovara obliku kosti svakog pacijenta i stepenu defekta njegovih koštanih elemenata. Istraživanja pokazuju da su se najbolji pokazali implantanti po meri tj. oni koji bi se izrađivali za svakog pacijenta pojedinačno za razumno kratak vremenski period. Ponekad postoji potreba da implantati budu porozni, što dodatno usložnjava postupak izrade istih. Osim ovih implantata u medicinskoj protetici se koriste i implantati za druge delove tela kao što je koleno, potkolenična i butna kost, itd.

Prema načinu ugradnje tela i spajanja sa kosti femura, endoproteze zgloba kuka se mogu podeliti na: cementne i bezcementne.

Neki od najpoznatijih proizvođača cementnih endoproteza, koje u praksi imaju najveću primenu, su: Zimmer, Corin, DePuy, Styker, Acor i drugi. U zavisnosti od namene i oboljenja proizvođači su razvili veći broj različitih tipova endoproteza zgloba kuka među kojima se nalaze i modularno koncipirane sa proksimalnim, središnjim i distalnim elementima koji su projektovani i izrađeni kao nezavisne celine.

I u domaćim uslovima su razvijeni određeni tipovi endoproteza kao što su BB - 1 i BB - 2, koji predstavljaju „standardna rešenja“. Najveći broj ovih proteza je ugrađen u Institutu za ortopedsko-hiruške bolesti „Banjica“ i Kliničkom centru Vojvodine. Takođe su razvijane, na osnovu konkretnih zahteva, revizione i tumorske endoproteze zgloba kuka.

Razvijene proteze i inostranih i domaćih proizvođača, u najvećem broju slučajeva, su definisane na osnovu ravanske interpretacije oblika ose femura čime se sa jedne strane omogućava njihova ugrađuju i u u desni ili levi kuk, a sa druge smanjuje pokretljivost obolelog femura. Imajući to u vidu kao i mogućnosti razvoja proteza po meri pacijenta i pri prvoj ugradnji, a posebno u slučaju revizije, posebni istraživački napor su usmereni obradi dijagnostičkih snimaka dobijenih primenom MRI i CT metode snimanja koštanog tkiva.

Medical Imaging (Medicinsko generisanje slika), predstavlja oblast medicine koja se bavi generisanjem snimaka ljudskog tela. Najpoznatije metode koje pripadaju ovoj oblasti su: klasično snimanje rentgentskim (X) zracima, primena CT (Computed Topography) i MRI (Magnetic Resonance Imaging) metode kao i ultrazvučne metode. Kod navedenih metoda, ljudsko telo je izloženo različitim vrstama zračenja, pri čemu se prolazak zraka kroz telo na kraju registruje na odgovarajućem medijumu u obliku generisane slike (snimka). Vrednosti piksela na snimcima generisanim prethodno pomenutim metodama, predstavljaju intenzitet fizičke veličine koja je specifična za svaku metodu kojom je snimak generisan.

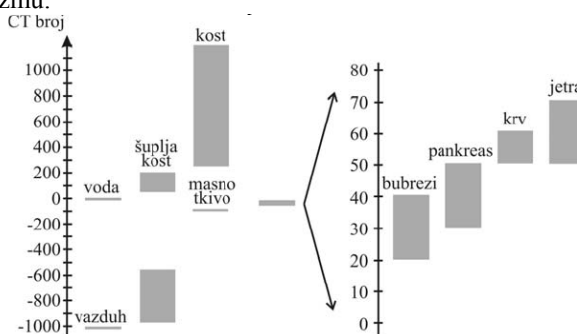
CT i MRI metode prema svojoj strukturi pripadaju tomografskim metodama čime se kao rezultat snimanja dobija niz ravanskih snimaka poprečnog preseka tela. Osnovna prednost primene tomografskih metoda snimanja obolelih ekstremiteta, sa stanovišta primene u endoprotetici, je mogućnost rekonstrukcije ekstremiteta u prostornom obliku.

Serije generisanih snimaka se arhiviraju u DICOM (Digital Imaging and COmmunications in Medicine) formatu, koji predstavlja standard za arhiviranje, manipulisanje, štampanje i razmenu snimaka. Pored informacija o snimcima, ovaj standard predstavlja i mrežni protokol za razmenu serije snimaka između uređaja koji ga podržavaju. Za razliku od klasične bitmapirane slike, DICOM format sadrži zaglavlje (header), u kome su date informacije, kao što su: dimenzije snimka u pikselima, debljina reznja snimanja (slice thickness), datum snimanja, uređaj na kome je izvršeno snimanje, ime operatora koji je izvršio snimanje, redni broj snimka u seriji, podaci o pacijentu (ime i prezime, godište), rastojanje između piksela, broj bita po pikselu, itd. Dakle sve informacije koje su potrebne da bi se na osnovu serije snimaka, naknadno mogla izvršiti analiza.

Snimci generisani CT/MRI uređajima, mogu biti snimljeni u različitim rezolucijama. Neke od standardnih rezolucija su 64x64, 128x128, 512x512 i 1024x1024 piksela. Najčešća rezolucija koju podržava većina novijih standardnih uređaja je 512x512. Svaki piksel na snimku može imati jednu nijansu sive boje, najčešće u 12-bitnoj paleti, što znači 4096 nijansi. Svaki piksel na snimku generisanom CT skenerom, može imati vrednost od -1000 – +3000 HU (Hounsfield Units) [26]. Pošto uređaj meri koeficijent absorpcije X-zraka (μ), CT jedinice koju vrednost piksela može imati izračunava se na sledeći način:

$$CT[HU] = 1000 \frac{\mu - \mu_{vode}}{\mu_{vode}}$$

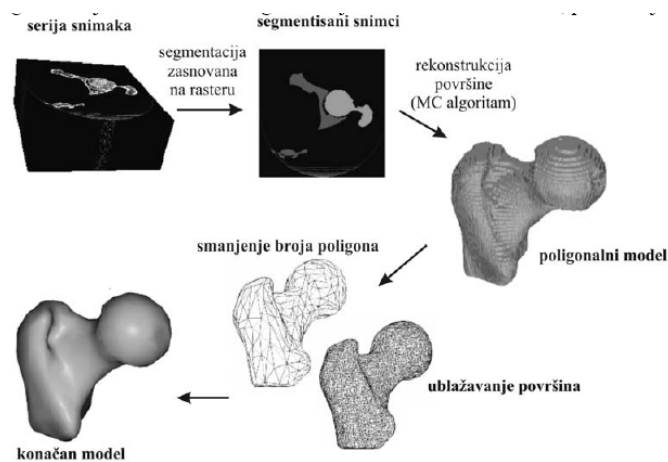
Na ovaj način se praktično vrši i kalibracija uređaja, pošto je moguće da različiti uređaji pri proračunu koeficijenta absorpcije tkiva daju rezultate koji odstupaju jedan od drugog. Utvrđeno je da pojedina tkiva imaju odgovarajuće vrednosti CT broja, što u mnogome olakšava analizu snimaka. Na slici 7, date su vrednosti CT brojeva za neka karakteristična tkiva u organizmu.



Slika 7. Hounsfield-ova skala za različita tkiva

Za potrebe definisanja prostornog modela ekstremiteta površinski elementi pojedinih snimaka - pikseli se zamenjuju zapreminskim elementima - vokselima čime se dobija prostorna interpretacija snimka. Da bi se identifikovala različita tkiva na snimcima, potrebno je izvršiti segmentaciju snimaka. To podrazumeva identifikaciju oblasti snimaka koje pripadaju odgovarajućim organima. Ovo je jedan od najvažnijih koraka pri rekonstrukciji modela na osnovu serije snimaka, i od njega umnogome zavisi tačnost generisanog modela. Procesi segmentacije se mogu podeliti u dve grupe: 1. Raster-based segmentation (rasterska segmentacija), identifikuju se pikseli na snimcima koji pripadaju odgovarajućim tkivima; 2. Vector based segmentation (vektorska segmentacija), spoljašnje i unutrašnje granice tkiva generišu se u nekom vektorskom obliku (linije, krive, poligoni...).

Generisanja modela nakon rasterske segmentacije, prikazano je na slici 8.



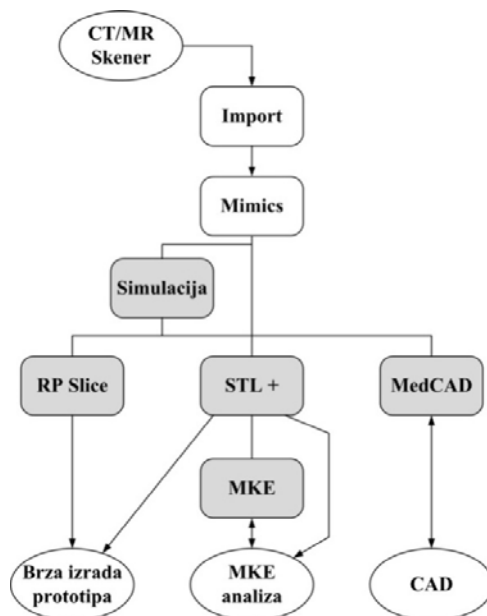
Slika 8. Generisanje modela nakon rasterske segmentacije

Nakon segmentacije, pri čemu je određen skup piksela koji pripadaju oblasti interesantnoj za analizu, potrebno je generisati model. Svaki piksel na snimku, dobija svoje mesto u temenu zapremiskog elementa. U praksi se za ovu namenu najčešće koristi metoda bazirana na Marchin Cubes algoritmu [52] koja omogućava genetisanje odgovarajućih ravanskih kontura.

Za generisanje modela, na osnovu serije snimaka, mogu se izabrati dva prilaza. Prvi prilaz podrazumeva izradu sopstvene aplikacije koja će biti bazirana na razvojnoj biblioteci tkz. otvorenog koda (open source), dok drugi prilaz podrazumeva primenu komercijalnih programskih sistema razvijenih za tu namenu.

Za raealizaciju prvog prilazaa najčešće je u upotrebi VTK (Visualization ToolKit) [64] koji predstavlja objektno orijentisanu biblioteku klasa u C++ programskom jeziku, i u sebi sadrži mnoštvo klasa i algoritama koji se primenjuju u kompjuterskoj grafici. Treba napomenuti da je bibiloteka „otvorenog koda“ (open source), i da je besplatna. Zbog svoje univerzalnosti i pristupačnosti, postala je standard. U algoritme koji su sastavni deo ove biblioteke, spadaju i algoritmi koji se koriste u obradi serije snimaka i generisanju modela: Marching Cubes algoritam, algoritmi za pročišćavanje i smanjenje broja poligona površina, algoritam zasnovan na definisanju granica za segmentaciju (tresholding). Takođe ova biblioteka poseduje i mogućnost eksportovanja generisanog poligonalnog modela u STL format.

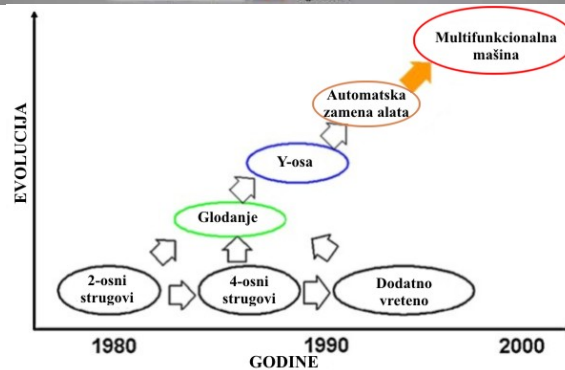
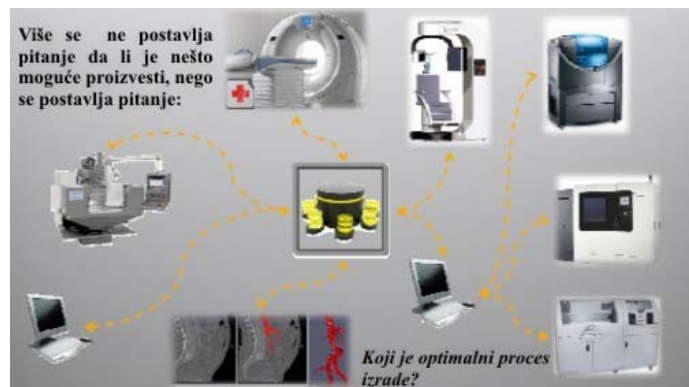
Najzastupljeniji komercijalni programski sistem za generisanje modela na osnovu serije snimaka predstavlja Mimics kompanije Materialise [31]. On omogućava učitavanje serije snimaka u DICOM formatu i formiranje modela koji se može izvesti u neki od CAD/CAE/CAM sistema u STL ili IGES formatu. Programski sistem je građen na modularnom principu (slika 9.).



Slika 9. Struktura programskog sistema Mimics

V) Istraživanje mogućnosti primene savremenih tehnologija izrade razmatranih tipova uležištenja i komponenti medicinske endoprtetike

Nivo razvoja proizvodnih tehnologija, s jedne strane i karakteristike zahteva tržišta, s druge strane, određuju osnovne zadatke savremene proizvodnje u kojoj se ne postavlja pitanje „ Da li se nešto može proizvesti?“, nego se postavlja pitanje „ Koji je najpovoljniji proces izrade?“, slika 10.



Slika 10. Karakteristike savremenih procesa proizvodnje [54]

Slika 11. Evolucija mašina alatki

Proizvodi koji su obuhvaćeni istraživanjem, proizvode se u uslovima maloserijske, odnosno serijske proizvodnje. Za takve uslove savremeni tehnološki sistemi, moraju biti bazirani na rešenjima koja su visoko automatizovana i fleksibilna. Na taj način obezbediće se visok nivo kvaliteta proizvoda, skraćivanje tehnološkog, odnosno proizvodnog ciklusa proizvodnje, uz maksimalno prilagođavanje zahtevima kupaca. Za takve uslove i ciljeve proizvodnje predlažu se dva osnovna pravca razvoja i primene fleksibilnih tehnoloških sistema, čijom se kombinacijom mogu formirati odgovarajuće tehnološke strukture za pojedine proizvode i uslove njihove proizvodnje. Predlog primene savremenih tehnologija izrade ležaja i ležajnih sklopova, odnosi se na izradu prstenova, dok se izrada kotrljajnih tela i kaveza ne razmatra.

Prema nivou fleksibilnosti AFTs se mogu podeliti na:

- *Namenjene AFTs (Dedicated FMS)* – koji su projektovani za proizvodnju ograničene familije proizvoda i
- *AFTs slučajnog redosleda (Random order FMS)* – projektovani za proizvodnju široke familije proizvoda.

Postoje određene prepreke za uspešnu implementaciju fleksibilnih tehnoloških struktura, a to je kompleksnost njihovog modeliranja, analize, simulacije i upravljanja. Pri ovome se koriste različite metode, kao što su metode Petrijevih mreža i slični alati.

AFTs se mogu projektovati i na bazi multifunkcionalnih i hibridnih mašina alatki. Multifunkcionalne mašine alatke su mašine na kojima se može vršiti više operacija obrade. Ove mašine mogu da integrišu različite procese obrade materijala rezanjem. Integrišu operacije obrade kao što su struganje, glodanje, bušenje, brušenje itd. Slika 11. pokazuje vremenski period razvoja mašina alatki u poslednjih 30. godina do pojave multifunkcionalnih mašina alatki.

Hibridni procesi predstavljaju još jednu mogućnost da se prevaziđu tehnološke granice. Za to se na postojeće procese pridodaju dodatni oblici energije, pri čemu iz ovog proizilazi niz mogućnosti za kombinaciju procesa i pridodatog oblika energije.

Hibridizacija mašina alatki predstavlja paralelno ili serijsko korišćenje višestrukih tehnoloških procesa u okviru jedne mašine. Ako se dva različita fizička mehanizma koriste paralelno tehnološki proces sam po sebi je hibridan. Na primer, kombinacija laserske obrade i struganje se može koristiti za obradu keramike. Danas se sve češće u praksi sreću komercijalna rešenja mašina alatki sa hibridnom obradom. Uopšte, kombinacije obrada skidanjem strugorine i lasera predstavljaju vrlo aktuelnu oblast istraživanja u svetu. Glavna prednost hibridnih procesa je mogućnost obrade u jednom stezanju. Na taj način se smanjuje ciklusno vreme jer su logistički naponi za transport između mašina alatki ili spoljašnjih partnera, stezanja i vremena kalibracije eliminisani. Ove prednosti su naročito važne ako su primenjene na malim serijama i proizvodima sa mnogo varijanti.

Prethodno prikazana rešenja savremenih obradnih i tehnoloških sistema se mogu koristiti za izradu specijalnih uležištenja, posebno kada se radi o maloj serijnosti.

Savremene tehnologije izrade implantata mogu se podeliti u dve osnovne grupe:

- *Fleksibilne tehnologije koje se zasnivaju na primeni CAD/CAM tehnologija i*
- *Direktne proizvodne tehnologije.*

Kod primene fleksibilnih tehnologija izrada implantata rezanjem koriste se sledeća tehnološka rešenja:

- *Kovanje i obrada rezanjem;*
- *Precizno livenje, vruće izostatičko brizganje (HIP), brušenje i poliranje;*

- Kovanje ili precizno livenje, obrada rezanjem i modifikacija površina;
- Vruće izostatičko brizganje (HIP), brušenje i poliranje (za keramiku).

Prema podacima jednog proizvodnog sistema za proizvodnju implantata, tehnološki ciklus proizvodnje pojedinih elemenata se sastoji od operacija kovanja, mašinske obrade struganjem, glodanjem i brušenjem, poliranja i glačanja, potom termičke obrade (kaljenje), površinske zaštite (niklovanje), elektroerozivne i elektrohemijske nekonvencionalne obrade, eletropoliranja, određenih operacija doterivanja i na kraju kontrole i pakovanja [29].

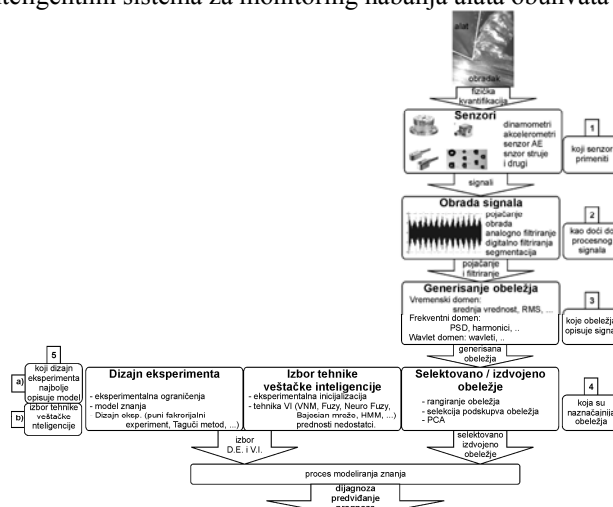
Direktne proizvodne tehnologije je najčešće korišćen naziv za familiju tehnologija (Rapid prototyping – RP, Rapid tooling – RT, Rapid manufacturing – RM i Reverse engineering – RE) koje se koriste za izradu fizičkih objekata direktno od trodimenzionalnog 3D CAD modela [66, 39].

Pored RP i RT tehnologija, Rapid Manufacturing (RM) tehnologija je prirodni nastavak i proširenje RP i RT tehnologija, odnosno brza/automatska proizvodnja metalnih implantata direktno na osnovu 3D CAD modela. Tehnologija RM je optimalna za proces proizvodnje implantata po meri.

Iz ovih razloga Rapid prototyping (RP) tehnologije i Revezni inženjering (RE) igraju vrlo značajnu ulogu u medicini.

G) Unapređenje metoda nadzora i dijagnostike procesa obrade u automatizovanoj fleksibilnoj proizvodnji kroz praćenje stanja pohabivosti alata

Metodologija razvoja inteligentnih sistema za monitoring habanja alata obuhvata pet faza (slika 12.):



Slika 12. Opšta metodologija za razvoj inteligentnog sistema za monitoring procesa obrade

1. *Izbor senzora:* Proces rezanja je karakterisan različitim fizičkim veličinama. Odgovarajući senzori kao što su: dinamometri, akscelerometri, senzori akustične energije, sensor struje/napona, temperatura, itd., transformišu fizičke kvantifikatore u odgovarajuće električne signale. Važno je uzeti u obzir pouzdanost, cenu i prirodu svakog tipa senzora u cilju izbora najpovoljnijeg za praćenje određene pojave.

2. *Obrada signala:* Obrada signala može biti manje ili više složena. Sastoji se u pojačavanju i filtriranju signala. Frekvencija uzorkovanja ograničena je karakteristikama uređaja za akviziciju i mora se uzeti u obzir da bi se izbegle smetnje. Pored toga, primena digitalne obrade signala korišćenjem digitalnih filtera i operacija segmentacije signala može da ukloni deo signala koji je važan.

3. *Izdvajanje obeležja:* Signal od senzora mora da bude transformisan tako da na adekvatan, zadovoljavajući način opiše signal. Veliki broj metoda se može koristiti u ovu svrhu, u vremenskom, frekventnom i vavelet domenu.

4. *Selekcija obeležja/odabir signifikantnog obeležja:* U cilju razvoja robustnog i pouzdanog modela za praćenje, neophodno je da se koriste karakteristike (obeležja) koje najbolje opisuju proces obrade. Funkcija izbora i izdvajanje obeležja su dva metoda koji omogućavaju definisanje najkorisnijih senzorskih obeležja.

5. *Modeliranje znanja:* Izvođenje eksperimenta obrade kao i modeliranje su ekonomski skupi i dugotrajni, tako da dobro projektovan eksperiment treba da omogući primenu stečenih znanja na sistem monitoringa u industriji. Sistemi za nadzor zahtevaju pouzdane modele koji su u stanju da nauče složene nelinearne odnose između promenljivih performansi procesa i promenljivih procesa obrade. Adekvatan izbor tehnike veštačke inteligencije od ključnog je značaja za razvoj pouzdanih modela obrade. Ovaj izbor uglavnom zavisi od broja eksperimentalnih uzoraka, stohastičke prirode procesa, željene tačnosti modela, vrste modela i prethodnog znanja o procesu.

G.1. IZBOR SENZORA

Integracija senzora za praćenje i upravljanje procesom obrade je pristup od koga se očekuje da će imati veliki uticaj na proizvodnju u narednim godinama [70]. Metode za nadzor procesa obrade mogu biti: direktne i indirektne. Direktne metode koriste laserske, optičke i ultrazvučne senzore koji omogućuju direktno merenje [67, 41]. Ove metode su još uvek veoma skupe i teško primenljive u neposrednoj proizvodnji [13]. Indirektne metode su ekonomičnije, a za praćenje procesa obrade koriste senzore koji definišu stanje obradnog sistema mereći: sile rezanja, vibracije, temperaturu, trenutnu potrošnju energije, itd. Kod indirektnih metoda se najčešće koriste četiri vrste senzora za praćenje stanja procesa obrade: dinamometri, akcelerometri, senzori akustične energije (AE), strujni i drugi tipovi senzora.

...1 *Dinamometri*: U obradi materijala, sila rezanja se smatra promenljivom koja najbolje opisuje proces rezanja [18]. Informacije prikupljene od obeležja sila rezanja mogu se koristiti i za procenu kvaliteta i geometrijskog profila obrađene površine [24]. Praćenje sila rezanja se često koristi za dijagnozu/predviđanje stanja pohabanosti alata [21] i tačnosti izrade obradka [69, 9]. Habanje alata se može lako detektovati jer se javlja povećano trenje, značajno se povećava potrebna sila obrade kada ivica reznog alata gubi ili ima smanjenu sposobnost rezanja. Dinamometri se mogu koristiti i za detekciju samopobudnih vibracija. Frekvencija samopobudnih vibracija je često mnogo veća od frekvencije sila rezanja.

...2 *Akcelerometri*: Praćenje vibracija se uglavnom koristi za identifikaciju hrapavosti površine jer je hrapavost superpozicija pomaka po zubi i alata [31, 11]. Ova činjenica je posebno potvrđena pri obradi struganjem [33]. Čen [11] je proučavao efikasnost položaja akcelerometara pri obradi struganjem i konsatovao da najjači signal vibracija nije i najkorisniji za određivanje hrapavosti površine. U eksperimentima, Y pravac (pravac brzine rezanja) je imao manje signale vibracija ali je najznačajniji, dok su u Z pravcu (pravcu pomaka), bile najveće vibracije, ali su bile manje značajne. Monitoring vibracija se primenjuje u i dijagnostici habanja alata. Analiza signala vibracija se, takođe, koristi za detekciju loma alata. Čen, u realnom vremenu, vrši detekciju loma alata za glodanje na izlazu iz zahvata praćenjem signala vibracija. Iako se senzori vibracija uspešno primenjuju kod sistema za monitoring obrade, u praksi postoji veliki broj problema koji ometaju praćenje signala vibracija za procenu stanja alata i tačnosti obradka [8]: 1. brzina obrade treba da je u određenom opsegu; 2. amplituda signala opada sa povećanjem udaljenosti senzora od vrha alata; 3. montaža senzora blizu mesta obrade povećava varijabilnost signala; 4. srugotina može da ošteti akselerometar, ili da dovede do pogrešnog očitavanja vibracija.

...3 *Senzori akustične energije (AE)*: Akustična energija se oslobađa u obliku mehaničkih vibracija materijala (alat, obradak, telo mašine) što se izražava preko napona. AE signal generiše napon deformisanja i lom strugotine, trenje između strugotine i alata, obradka i alata, lom alata, deformacije elastičnih struktura mašine i toplotne reakcija materijala [70]. Ovaj signal, u procesu rezanja, se sastoji od stalnog i prolaznih (isprekidanih) signala, koji imaju izrazito različite karakteristike. Stalni signal je povezan sa smicanjem u osnovnoj zoni i habanjem alata na grudnoj i leđnoj površini, a prolazni signali su posledica i loma alata i loma strugotine [48]. Uobičajeni izvori AE u procesu rezanja su [21]: 1. deformacije i smicanje u zoni rezanja; 2. deformacije i trenje klizanja na površini alat strugotina; 3. trenje kliznja između obratka i leđne površine alata i 4. lom strugotine i njen uticaj na alat ili obradak.

...4 *Senzor trenutne struje i snage motora*: Napon struje motora je srazmeran obrtnom momentu koji stvara motor jednosmerne struje, što je, proporcionalno sili rezanja, pa se merenje struje može koristiti za indirektno praćenje trenutne sile obrade. Senzori za merenje trenutne struje motora su nelinearni senzori koji zahtevaju posebnu i često veoma komplikovanu kalibraciju [70]. Sistem za praćenje stanja alata koji je razvio Jones i Vu [36] neprekidno meri potrošnju električne energije na glavnom vretenu. Energija koja se troši u toku narednih zahvata u procesu rezanja se poredi sa postavljenim pragovima kao alarmima za praćenje stanja alata. Glavno ograničenje za sistem ove vrste je da prag varira kako variraju parametri rezanja. Iako ovi senzori nisu tačni kao dinamometri, oni su ekonomski isplativi, lako se instaliraju, dobri su za prikupljanje informacija za dijagnostiku habanja alata [22] i detekciju loma alata [13, 24].

...5 *Drugi tipovi senzora*: Drugi tipovi senzora za praćenje procesa obrade su, između ostalih, temperaturni, optički i ultrazvučni senzori. Temperaturni senzori se primenjuju u obradi kao termoparovi, termo otporni elementi i poluprovodnički elementi [70]. Merenje temperature u zoni rezanja može biti dobar pokazatelj stanja procesa, jer se temperatura menja promenom pohabanosti alata. Osim toga, promena temperature utiče na formiranje strugotine i generisanje hrapavosti površine [14, 65]. Obično se prate prosečne temperature oko vrha alata sa gubitkom važnih informacija zbog inertnosti samog procesa.

Zajedničko kod optičkih senzora je da se zasnivaju na snopu svetlosti koji se reflektuje od obrađene površine u željenom pravcu i čiji intenzitet može biti u korelaciji sa kvalitetom obrađene površine [27]. Digitalizovani podaci se zatim koriste za korelaciju sa grafikonima stvarnih vrednosti hrapavosti [43] ili za detekciju stanja pohabanosti alata [8]. Primena optičkih tehnika u sistemima za dijagnostiku ima ozbiljnih ograničenja zbog uticaja pojava u zoni obrade.

Ultrazvučni senzori se koriste za merenja profila obrađene površine [15]. Ovi senzori otkrivaju neželjene pojave iznad površine. Senzor šalje ultrazvučni impuls na površinu a meri se amplituda povratnog signala. Podaci se zatim proveravaju u korelaciji sa podacima dobijenim sa profilometra na osnovu koga je razvijen model.

...6 *Fuzija senzora*: Za povećanje pouzdanosti senzorskih informacija pri različitim uslovima obrade i povećanje nezavisnosti korisnog sadržaja signala može se koristiti nekoliko različitih senzorskih signala umesto jednog. Senzorska fuzija se odnosi na korišćenje više od jednog senzorskog signala komplementarnog ponašanja da bi se obezbedila veća robustnost predviđanja jednog ili više parametara obrade [70]. Izdvajanje nekoliko karakteristika iz jednog signala se ne smatra fuzijom senzora. Uspeh fuzije senzora zavisi od vrsta signala koja se koriste za opisivanje posmatranog procesa, izdvojene karakteristike iz signala i na koji način ona može biti dopunjena [50]. Sila rezanja i AE su manje povezani i mogu se efikasno koristiti kao dopunske informacije [13, 21]. Obično se primenjuju dva glavna pristupa za fuziju senzora: (1) statistički pristup i (2) pristup korišćenjem veštačke inteligencije. Statistički pristup dovodi u vezu senzorske podatke sa promenljivima iz procesa obrade koristeći regresije više promenljivih i definišući tako statistički model procesa. U tabela 1. je prikazana mogućnost primene fuzije senzora za različite aplikacije prećenja procesa obrade i stanja alata.

Tabela 1. Fuzija senzora primenjena u obradnim sistemima

Red. br.	Vrsta senzora	Metod fuzije	Aplikacija	Liter.
1.	Senzor trenutne struje, AE	BM	Dijagnostika habanja alata	[16]
2.	Senzor trenutne struje, Akcelerometar	BM	Dijagnostika habanja alata Predviđanje hrapavosti površine	[4] [4]
3.	Akcelerometar, AE	NM	Dijagnostika habanja alata	[65]
4.	Akcelerometar, Sistem vizije	NM	Dijagnostika habanja alata	[8]
5.	Dinamometar, AE	- NM	Detekcija loma alata Dijagnostika habanja alata	[53] [57]
6.	Dinamometar, AE, Akcelerometar	NM NM	Predviđanje hrapavosti površine Dijagnostika habanja alata	[6] [25, 40]
7.	Dinamometar, Akcelerometar	NM NM NM	Dijagnostika habanja alata Predviđanje hrapavosti površine Predviđanje dimeziona tačnosti obradka	[55] [63] [63]
8.	Dinamometar, Termistor	NM	Predviđanje dimeziona tačnosti obradka	[61]

Napomena: BM- bajesian mreža; NM- neuronska mreža

G.2. OBRADA SIGNALA

Pre izbora karakteristika senzora, treba definisati strategiju obrade signala, zbog visokog nivoa mehaničkih, električnih i akustičnih smetnji u industrijskom okruženju [22]. U nastavku se prikazuje neke od strategija obrade signala.

...1. *Analogno filtriranje i uzorkovanja signala.* Senzorski signal se filtrira da bi bio u opsegu frekventnog odziva senzora. Kontinualno eliminisanje visokih frekvencija šuma i drugih uticaja sprečava izobličenje signala tokom akvizicije zbog skraćivanja preklapanja. Nikuist-Šenon teorema uzorkovanja tvrdi da ravnomerno raspoređeni diskretni uzorci potpuno prikazuju sadržaj signala ako je propusni opseg manji od polovine broja uzoraka. Dovoljan uslov za sposobnost tačne rekonstrukcije signala iz uniformno uzorkovanih uzoraka treba da je $fs > 2B$, gde je fs predstavlja frekvenciju uzorkovanja, a B širinu propusnog opseg signala.

...2. *Digitalno filtriranje.* Nakon uzorkovanja signala u digitalnom obliku, digitalno filtriranje se vrši da bi se sačuvala bitne informacije signala od senzora koje imaju najbolju korelaciju sa promenljivom performansom procesa. U mnogim aplikacijama, takođe može biti interesantno filtriranje prikupljenog signala u cilju izdvajanja visoko frekventnog sadržaja šuma i oscilacija u signalu zbog prolaznih mehaničkih događaja, kao što je odvajanje naslaga na reznoj ivici, lokalnoj promeni tvrdoće materijal obratka i sl. Ghosh [22] testira značajana poboljšanja sadržaja signala za praćenje habanja alata korišćenjem trećeg reda Butterworth lov-pass filtera na akvizicionom signalu sile rezanja. Jemielniak [34] takođe primenjuje digitalno filtriranje signala sile rezanja u cilju poboljšanja pouzdanosti modela za nadzor habanja alata.

...3. *Segmentacija signala.* Segmentacija signala se može izvršiti izdvajanjem informacija iz signala kada je alat u stabilnom stanju u procesu rezanja, jer samo ovaj deo signala sadrži informacije o stanju pohabanosti alata i hrapavosti obrađene površine. Segmentacija ima za posledicu nemogućnost analize signala u frekventnom i wavlet domenu. Ona je ograničena na kasnije analize i obeležja u vremenskom domenu, kao što su: vrednosti pikova, kvadrat srednjih vrednosti, srednja vrednost, itd.

G.3. GENERISANJE OBELEŽJA

Jedna od faza razvoja sistema za monitornog alata je generisanje karakteristika i pretvaranje digitalnog signala u određene karakteristike signala koje se nazivaju deskriptori ili „obeležja“. Koriste se različite metode generisanja obeležja u vremenskom, frekventnom i wavlet domenu. U tabela 2 su prikazana relevantna obeležja koja se koriste u sistemima za monitoring procesa obrade, a u nastavku ista detaljnije opisuju.

Tabela 2. Signifikantna obeležja za modeliranje procesa obrade

Signal	Vremenski domen									Frekventni domen			Wavlet domen	Liter.
	RMS	pik	Mean	Std	Skev.	Kurt.	Var.	AR	TDA	Odnos harmonika	Pojedin. harmonici	PSD	RMS pik	
Sile rezanja	✓	✓	✓								✓			[22] [24] [18] [12] [69] [7] [57] [4] [40] [9]
Vibracije		✓	✓								✓	✓		[25] [3] [12] [10] [17] [21] [4] [40]
Trenut. snaga	✓								✓				✓	[22] [45] [49]
Akust. energija		✓	✓			✓	✓				✓	✓		[61] [57] [4] [40] [35] [61] [45] [46]

Napomena: RMS- koren kvadrata srednje vrednosti; Pik-pikovi; Mean- srednja vrednost; Std.- standardna devijacija; Skev.-skewnes; Kur. – kurtosis; Var.-varijansa; AR- autoregresivni parametri; TDA- prosečna vrednost; PSD gustina spektra snage;

...1. Obeležja signala sila rezanja. Srednja vrednost i koren kvadrata srednje vrednosti (RMS) sila rezanja su jednostavna i efikasna obeležja koja su testirana za nadzor habanja alata i deo sistema za praćenje tačnosti obrade obradka [21, 25, 40]. Međusobni odnosi sila se takođe mogu koristiti za predviđanje pojasa habanja alata, jer oni predstavljaju određeni obrazac ponašanja habanja alata. Utvrđeno je da odnos sile pomoćnog kretanja prema glavnoj sili rezanja jako zavisi od habanje leđne površine. Dontamsetti i Fišer [19] prikazuju da RMS vrednosti vertikalne komponente sile rezanja (Fz) ostaju približno konstantne pri obradi glodanjem, dok RMS vrednosti komponenti sile rezanja u X i Y pravcu (Fx, Fy) ili njihov odnos bolje opisuje procese obrade pri modeliranju. Do sličnog zaključka su došli Benardos i saradnici [8]. Eksperimentalno je potvrđeno da X komponenta sile rezanja najbolje opisuje model hrapavosti obrađene površine. Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja Haber [25] je konstatovao da najbolje performanse za praćenja stanja alata, opisuju srednja vrednost, pikovi sile rezanja i signal vibracija. Dong [18] analizira nekoliko obeležja za praćenje stanja alata na osnovu sila rezanja. Sve karakteristike su ispitane u vremenskom i frekventnom domenu.

...2. Obeležja signala vibracija. Povećanje energije rezanja generisane usled habanja leđne površine dovodi do povećanja magnitude vibracija, što se može detektovati RMS ili srednjom vrednošću signala [8]. Haber [25] koristi srednju vrednost i maksimalnu vrednosti signala vibracija za praćenje stanja alata. Dimla [17] analizira korelaciju obeležja signala vibracije za praćenje habanja alata pri obradi struganjem u vremenskom i frekventnom domenu. Smatra se da su obeležja iz vremenskog domena osetljivija na uslove rezanja nego na habanje alata, dok su neka obeležja vrednosti pikova u frekventnom domenu u dobroj korelaciji i sa izmerenim vrednostima habanja alata. Abouelatta [3] je proučavao uticaj pojedinačnih harmonika i gustine spektra snage (PSD), za predviđanje hrapavosti površine. Čen [10] primenjuje tri obeležja signala senzora srednju vrednost, varijansu i pojedinačne harmonike signala vibracija za razvoj modela nadzora stanja pohabivosti alata. Ertekin [21] analizira RMS u X i Y komponenti signala vibracija i njihove harmonike. Al-Habaibeh [4] analizira vibracije obratka i alata u X, Y i Z pravcima koristeći različite obeležja kao što su vavelet analiza, srednja vrednost, standardna devijacija, intenzitet snage, kurtosis, frekvencije harmonika i vrednost skewnes. Kuo [40] analizira pet vrednosti harmonika signala vibracija u frekventnom domenu i srednje vrednosti u vremenskom domenu.

...3. Obeležja signala akustične emisije. Većina aplikacija koje koriste signal AE za nazor se oslanjaju na RMS vrednosti [48]. U [35] je razmatrano više obeležja signala AE za nadzor habanja alata i konstatovano da najveću

korelaciju sa habanjem alata ima srednja vrednost RMS signala, snaga signala u određenim visoko frekventnom opsegu i srednja vrednost signala. Ravindra i saradnici [62] koriste tehniku modelovanja vremenskih serija za izdvajanje obeležja iz signala AE prikupljenog pri obradi struganjem. Kamarthi i saradnici [37] se bave analizom pitanja reprezentativnosti signala AE u procesu obrade struganjem. Prikazana je sposobnost vevlet analize signala AE u kontekstu ispitivanja i procene habanja ledne površine alata pri struganju. Procena precizanog habanja ledne površine alata ukazuje na veoma zastupljenu i efikasnu primenu vavelet transformacije signala AE u izdvajanju obeležja koja su osetljiva na postepeno povećanje ovog habanja. Li [46] primenjuje vavelet transformaciju da se izdela signal AE u različite frekventne opsege u vremenskom domenu. Isto tako, Li [45] analizira, u vavelet domenu, signal AE i struje pogona glavnog vretena za detekciju loma alata. Detekcija loma alat je definisana poređenjem vavelet koeficijenata signala u odnosu na vavelet koeficijenate postavljenih pragova.

...4. *Obeležja signala snage i trenutne struje.* Signali trenutne struja i snage su uglavnom analizirani u vremenskom domenu zbog ograničenog propusnog opsega detekcije. Ghosh i saradnici [22] koriste samo odabrana najjednostavnija obeležja u vremenskom domenu kako bi se osigurala izvodljivost implementacije u realnom vremenu. Obeležja kao što su maksimalne vrednosti, standardna devijacija, meana i RMS vrednosti su analizirani radi procene habanja alata pri glodanju. Kim [38] je razvio sistem monitoringa loma alata zasnovan na signalu struje vretena u procesu obrade. RMS vrednost sila rezanja na vretenu odlično predstavlja efekte loma alata pri gruboj čeonj obradi od kratkotrajnih prolaznih efekata ulaska i izlaska glodala iz zahvata rezanja. Li [49] je prikazao sistem za detekciju loma alata na kraju glodanja koristeći struju pogonskog motora za pomoćno kretanje. Lee [43] pratiti struje AC motora sistema pogona pomoćnog kretanja i primenjene model autoregresivnih parametara prvog reda koji obezbeđuje dobre pokazatelje loma alata koristeći analizu razlike između predviđenih i stvarnih struja motora.

G.4 IZBOR, IZDVAJANJE/EKSTRAKCIJA OBELEŽJA

Veliki broj senzorskih obeležja za modeliranje i praćenje stanja mehaničkih sistema čini da je neophodno saznati koje kombinacije su najrelevantnije i pouzdane za specifične svrhe primene. Samo sistematski pristup smanjivanju broja obeležja koja se koriste obezbeđuje dragocene smernice za uspešan razvoj pouzdanih i robustnih sistema za praćenje procesa obrade. Postoje dva metoda smanjenja broja obeležja: izbor obeležja i izdvajanje obeležja. Cilj metodologije izbora obeležja je da se pronade K od D obeležja koja daju najviše informacija i da se odbace ostala $(D - K)$ obeležja. S druge strane, metodologijom izdvajanje obeležja pokušava se pronaći novi set K karakteristika koje su kombinacija originalnih D karakteristika. U principu, koristi od primene metodologije selektovanja ili izdvajanja obeležja je razvoj sistema praćenja koji se može definisati na sledeći način [20]: 1. smanjenje ulaznih obeležja ima tendenciju da se definiše prostiji model procesa znanja kroz manje složene algoritame učenja; 2. jednostavniji modeli su robusniji na malim grupama podataka; 3. jednostavniji modeli imaju manje razlike (neslaganja), drugim rečima, oni se manje razlikuju u zavisnosti od pojedinosti uzorka, uključujući i šum, spoljašnje uticaje, i td.; 4. kada se podaci mogu objasniti sa manje obeležja, stiče se bolja ideja o procesu koji je u osnovi podataka, što omogućava ekstrakcije znanja; 5. kada se podaci mogu reprezentovati u nekoliko dimenzija, bez gubitka informacije, moguć je prikaz i vizuelna analiza da bi se odredila struktura i spoljašnji uticaji.

Algoritmi izbora obeležja obično koriste rangiranje obeležja i izbor podskupova. Karakteristika rangiranja je da se koristi metrika pri rangiranju obeležja i eliminišu se sva obeležja koje ne postižu odgovarajući rezultat. Prednosti ovog algoritma su u njegovoj jednostavnosti, skalabilnosti, kao i visok stepen empirijskog uspeha [21]. Računski je efikasna metoda jer zahteva izračunavanje „ n “ rezultata, gde je „ n “ broj obeležja. Tipičan izbor obeležja je sproveden kroz rangiranje indeksa korelacije pri izboru obeležja koja su najviše u korelaciji sa posmatranom promenljivom. Metod izbora podskupova se koristi za formiranje optimalnog podskupa obeležja pretragom celog skupa formiranih obeležja. Zajednički pristup za formiranje i izbor podskupa je selekcija unapred, eliminacija unazad i genetski algoritami. Algoritam selekcije unapred počinje izbor bez promenljivih i dodaje ih jednu po jednu, u svakom koraku dodatim obeležjem se smanjuje predviđana greška modela, postupak se provodi sve dok greška ne postaje konstantna tj. smanjuje se veoma malo. U eliminaciji unazad, počinje sa svim promenljivima i uklanjaju se jedna po jedna. U svakom koraku uklanjanjaju se ona obeležja koja povećavaju grešku samo neznatno sve dok svako dalje uklanjanje obeležja značajno ne poveća grešku. Genetski algoritmi se takođe koristi kao algoritam pretrage za izbor najboljeg podskupa obeležja. Kuo [40] je proučavao primenu sile, vibracija i AE senzora nezavisno, i obučavao različite modela neuronskih mreža za dijagnozu habanja alata sa fiksnim obeležjima u vremenskom i frekvencijskom domenu. Karakteristika neuronske mreže je model koji je korišćen za izbor kandidata senzora i domena koji će se koristiti (vreme, frekvencija ili oba). Pristup izbora obeležja nudi nekoliko prednosti u odnosu na izdvajanje: 1. selektuje se set obeležja, a ne izabrana obeležja se više neće koristiti; 2. prikupljanje novih obeležja se odvija iz postojećeg skupa odabranih karakteristika i nije neophodno formiranje novog, što smanjuje troškove računarske obrade; 3. fizički smisao svakog izabranog obeležja se zadržava.

G.5. MODELIRANJE ZNANJA - IZBOR TEHNIKA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE (VI)

Sprovođenje adekvatno postavljenih eksperimenata može omogućiti relativno dobro korišćenje modela regresije za parametre rezanja kao regresora. Međutim, korišćenje indirektnih signala kao što su sila rezanja, vibracije ili AE merenja mogu da pruže dodatne informacije koje se mogu koristiti u složenijim i preciznijim modelima. U tom kontekstu, nekoliko tehnike veštačke inteligencije se ranije dosta koristilo za predviđanje hrapavosti površine i dijagnozu habanja alata. Glavne tehnike veštačke inteligencije koje se koriste za modeliranje i monitoring mehaničkih sistema su neuronske mreže (NM) [22, 62], ekspertski sistemi nazvani sistemi fuzzy logike [1] i tehnika VI koja proizilazi iz hibridizacija ove dve tehnike, koja se zove neuro-fazi sistem [20, 51]. Drugi pristupi VI, kao što su bajesian

mreže (BM), [16, 2], se manje koriste. Određene smernice za izbor najprikladnije tehnike VI u skladu sa svojim prednostima i nedostacima su prikazane u tabeli 3.

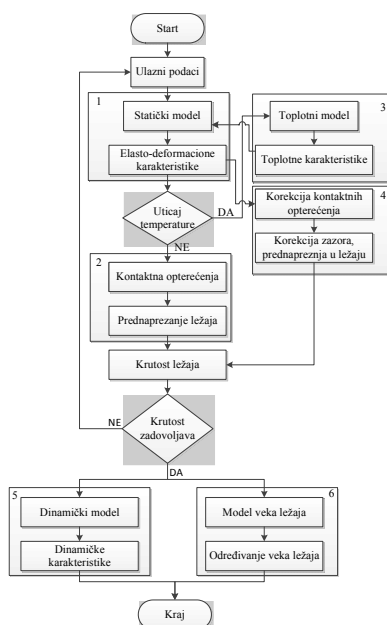
Tabela 3. Osnovne tehnike veštačke inteligencije i primenljivost za određene aplikacije

Red. broj	Tehnike veštačke inteligencije	Osnovne karakteristike aplikacije
1.	Neuronske mreže	<ul style="list-style-type: none"> - ne postoji prethodno znanje o procesu i izdvajanje znanja nije cilj - zahteva se predikcija visoke tačnosti, - nema ekstrapolacije i potrebna dobra generalizacija, - eksperimentalni skup podataka se sastoji od srednjeg - velikog broja uzoraka, - potrebno samo predviđanje, ili postavljanje dijagnoze
2.	Sistemi Fuzzy logike	<ul style="list-style-type: none"> - ima dovoljno znanja o procesu i znanje treba implementirati u model, - razumevanje procesa preovlađuje nad tačnosti modela, - ekstrapolacije se mogu pojaviti, - eksperimentalni broj podataka se sastoji od malog - srednjeg broja uzoraka, - inverzni problem mora da se reši od određenih predviđanja promenljivih
3.	Adaptivni neuro-fuzzy sistem zaključivanja	<ul style="list-style-type: none"> - cilj je da se doda prethodno znanje i da se izdvoji skriveno znanje iz eksperimentalnih podataka, - aplikacije sa umerenim zahtevima tačnosti, - eksperimentalni skup podataka sastoji od srednje velikog broja uzoraka, - rešavanje inverznog problema
4.	Bajesian mreže (BM)	<ul style="list-style-type: none"> - cilj je da se doda prethodno znanje i da se izdvoji skriveno znanje iz eksperimentalnih podataka u formi uzročne veze i verovatnoće, - mala tačnost predviđanja ali visok stepen pouzdanosti, - modelovani sistem se veoma stohastički ponaša, - eksperimentalni skup podataka se sastoji od velikog - veoma velikog broja uzoraka u zavisnosti od promenljive i očekivane tačnosti

3.0 PRIKAZ REZULTATI ISTRAŽIVANJA

A) Istraživanje ponašanja ležajnih sklopova točka vozila, ležajnih sklopova za vučena i vučna vozila za železnicu i drugih specijalnih ležaja

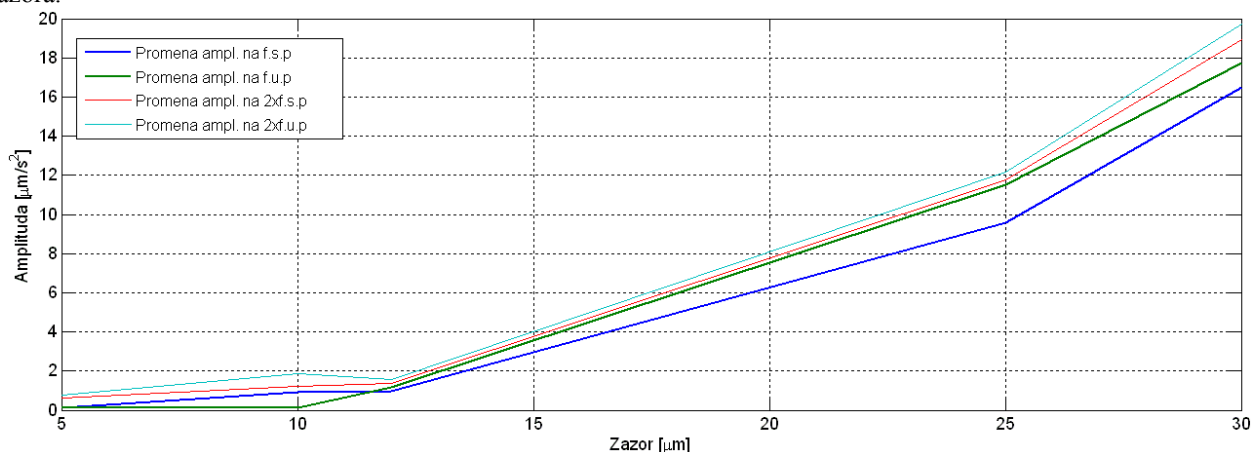
Sveobuhvatna analiza ležaja za specijalne namene podrazumeva kompleksno ispitivanje parametara koji utiču na ponašanje ležaja u eksploataciji. Kotrljajni ležaji su realitvno zahtevni za simulaciju, zbog nelinearnosti samog sistema, složenosti mehaničkih pojava i fenomena koji se dešavaju u samom ležaju tokom rada. Da bi se ispitaio uticaj konstrukcionih, tehnoloških i eksploatacionih parametara na ponašanje kotrljajnih ležaja, razvijen je opšti model za kompleksnu analizu ponašanja kotrljajnih ležaja (slika 13.). Ulazni podaci predstavljaju konstrukcione, tehnološke i eksploatacione parametre ležaja kao što su: početno prednaprezanje, unutrašnja geometrija ležaja, materijal prstenova i kotrljajnih tela, radni uslovi itd.



Slika 13. Model sistema za analizu ponašanja kotrljajnih ležaja

Određivanje elastično-deformacionih karakteristika ležaja sprovodi se u bloku 1. Kada se razmatra uticaj temperature, tada se u bloku 3 određuju količina generisane toplote i raspored temperatura na elementima ležaja u zavisnosti od elastično-deformacionih karakteristika. U bloku 4 se izračunavaju stvarna kontaktna opterećenja i prednaprezanje ležaja na osnovu početnih vrednosti izračunatih u bloku 1 i 3. Ukoliko se ne razmatra uticaj temperature kontaktna opterećenja i prednaprezanje se izračunavaju u bloku 2. Na osnovu prethodnih parametara se određuje krutost ležaja bez ili sa uticajem temperature. Ako krutost ležaja zadovoljava unapred definisane vrednosti, tada se u bloku 5 određuju dinamičke karakteristike ležaja, dok se u bloku 6 izračunava vek ležaja. U slučaju da krutost ležaja ne zadovoljava, vrši se redefinisavanje ulaznih parametara kao što je: početni prekop/zazor u ležaju, broj obrtaja ili spoljašnje opterećenje.

Kao ilustracija rezultata eksperimentalnih istraživanja novode se deo rezultata istraživanja uticaja zazora na amplitudu oscilovanja kod integrisanog ležaja točka (slika 14.). Na osnovu slike se može konstatovati da amplituda oscilovanja linearno raste sa povećanjem zazora ležaja u opsegu od 12 do 25 μm . Kod ležaja sa manjim zazorom (od 5 do 10 μm), veći uticaj na amplitudu oscilovanja imaju tehnološke karakteristike kao što su valovitost i hrapavost od zazora.



Slika 14. Zavisnost amplitude oscilovanja specifičnih frekvencija unutrašnjeg i spoljašnjeg prstena od zazora u višem frekventnom domenu

B) Istraživanje i razvoj komponenti medicinske endoprotetike

Jedan od osnovnih pravaca istraživanja komponenti medicinske endoprotetike predstavlja usavršavanje procesa razvoja endoproteza zglobova kuka kao jednog od najvažnijih zglobova u ljudskom organizmu. U savremenoj ortopediji postoji veliki broj tipova i dimenzija endoproteza zglobova prilagođenih različitim vrstama i stepenima oboljenja kao i dimenzijama elemenata. Endoprotezu kao celinu čine tri elementa:

- femoralni (koji se ugrađuje u butnu kost pacijenta i preuzima funkciju dela butne kosti),
- acetabularni (koji se ugrađuje u karlicu pacijenta i koji preuzima funkciju čašice sfernog zgloba) i
- kontaktna površina (koja se postavlja u sam zglob sa ciljem minimizacije trenja).

Prema ISO 7206 standardu iz 2008 godine su u bioinženjering uvedene klasifikacije tipova endoproteza zglobova kuka kao i najvažnije dimenzije svakog od elemenata. Tako se prema stepenu oboljenja endoproteze dela na:

- Primarne koje se koriste kod zamene prirodnog zgloba kuka veštačkim, a koje mogu biti rađene prema merama pacijenta ili tipske koje odgovaraju određenom rasponu dimenzija kostiju.
- Revizione, koje se koriste u slučajevima kada primarne ne ispune svoju funkciju ili čak pogoršaju oboljenje. Ovaj tip proteza se najčešće pravi prema dimenzijama pacijenta.
- Rekonstrukcione koje se koriste kod teških povreda zgloba kuka i butne kosti i imaju za cilj potpuno ili delimično vraćanja funkcije zgloba.

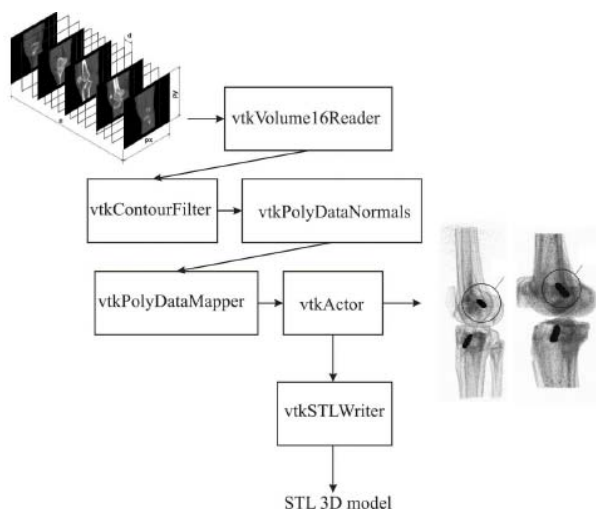
U okviru pojedinih faza projekta, realizovana istraživanja su posvećena:

- Unapređenju konverzije dijagnostičkih snimaka u cilju formiranja prostornih računarskih modela obolelih ekstremiteta;
- Usavršavanju procesa projektovanja kroz: formiranje opštih geometrijskih zakonitosti kojima se opisuju pojedini prostorni segmenti sklopa endoproteze i omogućuje automatizacija njihovog projektovanja prema merama pacijenta;
- Eksperimentalnom ispitivanju opterećenja i veka endoproteza;
- Optimizaciji oblika tela endoproteze na osnovu rasporeda i intenziteta opterećenja koji se javljaju pri svakodnevni aktivnostima.

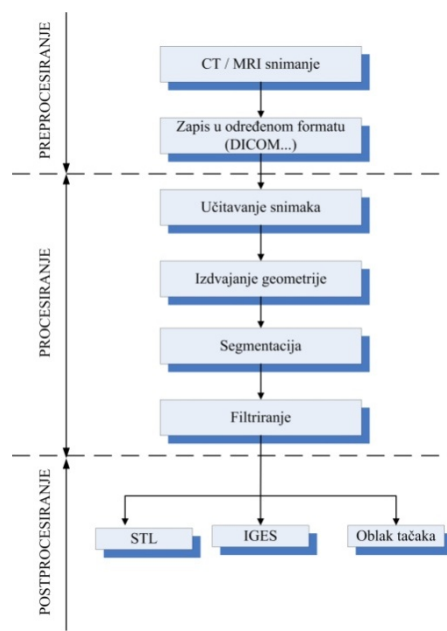
Imajući u vidu zastupljenost na tržištu Srbije, istraživanja su u prvom redu usmerena na proces usavršavanja primarnih cementnih proteza kao i revizionih proteza rađenih prema merama pacijenata.

U prethodnom periodu je izvršeno koncipiranje i delimična realizacija programskog sistema za konverziju dijagnostičkih snimaka u prostorne modele koji se mogu koristiti za razvoj endoproteza. Ulazne podatke u sistem predstavlja niz slika aksijalnog poprečnog preseka obolelog ekstremiteta dobijen tomografskim metodama u DICOM formatu, koje se u programski sistem uvoze preko VtkVolume16Reader klase. Tu se definišu osnovni parametri serije

snimaka kao što je prikazano na slici 15. Zatim se preko klase `vtkContourFilter`, izoluju konturne površine za svaki presek na osnovu definisanja gornje i donje granice za segmentaciju. Nakon toga sledi definisanje normala preko klase `vtkPolyDataNormals`, i na kraju mapiranje, to jest generisanje 3D modela preko klase `vtkPolyDataMapper`. Konačnu klasu 3D modela, predstavlja `vtkActor` klasa, koju je moguće prikazati u grafičkom prozoru razvijenog programskog sistema. Radi naknadne manipulacije sa generisanim 3D modelom, iskorišćena je klasa `vtkSTLWriter`, koja zapisuje generisani model u STL formatu. Ovaj format je moguće naknadno učitati u neki od CAD sistema, radi naknadne analize.



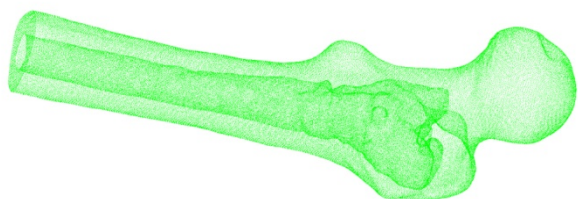
Slika 15. Konceptija generisanja poligonalnog modela primenom VTK biblioteke



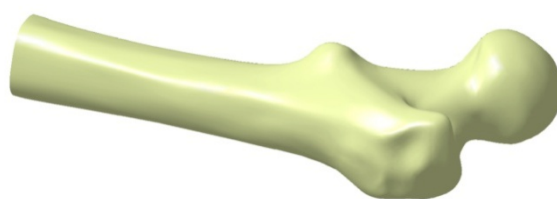
Slika 16. Algoritam rekonstrukcije računarskog modela

Za potrebe kontrole procesa segmentacije, ili za primenu naprednih tipova vektorske segmentacije, u sistem se mogu implementirati i funkcije ITK (Insight Segmentation and Registration Toolkit) biblioteke [26]. Ova biblioteka u sebi poseduje napredne algoritme, kako za rastersku, tako i za vektorsku segmentaciju. Biblioteka u sebi ne sadrži klase i funkcije za prikaz modela, ali se može veoma lako integrisati sa već primenjenom VTK bibliotekom.

Drugi pravac obrade dijagnostičkih snimaka je vezan za primenu komercijanih prgramskih sistema za ovu namenu. Postupak računarskog modeliranja kostiju se sastoji iz nekoliko faza kako je prikazano na slici 16. Nakon segmentacije i uklanjanja neželjenih piksela, površina modela sadrži nepravilnosti sa šupljinama i ostrim ivicama, pa je za njihovo ispravljanje neophodno izvršiti filtriranje. Posle definisanja računarskog model, vrši se konverzija u različite formate zapisa geometrijskih podataka od kojih su najčešći: IGES, STEP, STL i oblak tačaka (*Point cloud*). Modeli sačuvani u IGES i STEP formatu koriste se kod CAD i CAE programskih paketa za projektovanje i anлізу. STL format se koristi na mašinama za brzu izradu prototipa. Oblak tačaka se takođe koristi na mašinama za brzu izradu prototipa, ali je to tekstualni format koji sadrži koordinate svih tačaka, pa zahteva naknadnu obradu u nekom programskom sistemu (slika 17.). Računarski model butne kosti realizovan primenom programskog sistema CATIA prikazan je na slici 18.



Slika 17. Oblak tačaka kojim se opisuje butna kost



Slika 18. Računarski model butne kosti

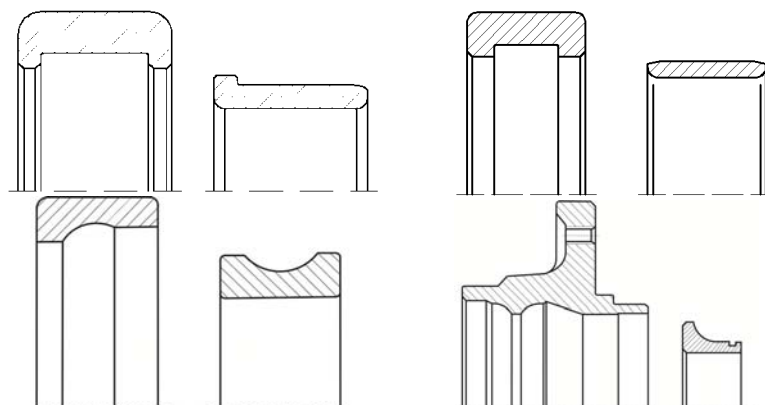
Na osnovu rekonstruisanog modela butne kosti razvijeno je telo endoproteze zgloba kuka prema dimenzijama femoralnog kanala (slika 19.).



Slika 19. Model tela endoproteze

V) Istraživanje mogućnosti primene savremenih tehnologija izrade razmatranih tipova uležištenja i komponenti medicinske endoprotetike

Razmatrana grupa ležaja čiji su oblici spoljašnjih i unutrašnjih prstenova prikazani na slici 20, proizvode se u određenom opsegu dimenzija, u količinama koje pripadaju maloserijskoj proizvodnji. Prstenovi ovih ležaja i ležajni sklopovi proizvode se od čelika za poboljšanje.



Slika 20. Profili spoljašnjih i unutrašnjih prstenova razmatranih grupa ležaja i ležajnih sklopova: ležaji za vučena i vučna vozila za železnicu (a), (b), kuglični ležaji sa kosim dodirom (c) i integrisani ležaja točka vozila (d)

Usvojeno rešenje tehnološkog procesa izrade pomenutih delova posmatrane grupe ležaja, zasnovano na primeni hibridnih multifunkcionalnih obradnih sistema za određene operacije obrade, prikazano je u tabeli 4. u vidu sadržaja standardnog tehnološkog procesa. Pripremi za prstenove ležaja, bilo da su odsecci, odlivci ili otkovci, precizirani su na principima grupne tehnologije, dakle kao grupni za određene opsege dimenzija prstenova. Operacija odsecanja, za slučaj kada su pripremi od cevi, nije prikazana u sadržaju standardnog tehnološkog procesa izrade.

Tabela 4. Sadržaj standardnog tehnološkog procesa izrade prstenova kotrljajnih ležaja

Broj operacije	Opis operacije	Naziv obradnih sistema i opreme
10/1	Grubo struganje jedne strane	Obradni centar za struganje podržan laserom
10/2	Grubo struganje druge strane	
20	Čišćenje obradka	Radni sto
30/1	Brušenje čeone strane	Obradni centar za brušenje i struganje podržan laserom
30/2	Brušenje druge čeone strane	
30/3	Fino struganje staze	
40	Brušenje	CNC brusilica
50	Superfinaširanje	Superfinaš
60	Demagnetizacija	Uređaj za demagnetizaciju
70	Kontrola i uparivanje	Kontrolni sto

U narednom periodu očekuje se definisanje i tehnološkog procesa izrade tela endorpoteze zgloba kuka nekom od direktnih tehnologija, odnosno primenom CAD/CAM programskih sistema i ondarom na NU mašinama. .

G) Unapređenje metoda nadzora i dijagnostike procesa obrade u automatizovanoj proizvodnji kroz praćenje stanja pohabanosti alata

Istraživanja realizovana u prvoj godini projekta ukazala su na činjenicu da savremenimi prilazi u nadzoru i dijagnostici procesa obrade sve više baziraju na fuziji senzorskih signala, u cilju realizacije robusnog i pouzdanog sistema. Imajući to u vidu, definisana je koncepcija eksperimentalnog sistema za nadzor procesa rezanja zasnovanog na fuziji dinamometra i akcelerometra, što otvara široke mogućnosti istraživanja na polju integracije senzora, obrade signala i sl. Pored toga ovakva kombinacija senzora u fuzionisanim sistemima nadzora i dijagnostike se smatra jednom od najperspektivnijom sa stanovišta primene u komercijalnim sistemima u obradi struganjem.

4.0 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Istraživanja realizovana u toku prve godine trajanja projekta, su omogućila stvaranje podloga za obimnija teorijska i eksperimentalna istraživanja u okviru sve četiri istraživačke celine definisane projektom:

- Istraživanje ponašanja ležajnih sklopova za vučena i vučna vozila za železnicu,
- Istraživanje i razvoj komponenti medicinske endoprotetike,
- Istraživanje mogućnosti primene savremenih tehnologija izrade razmatranih tipova uležištenja i komponenti medicinske endoprotetike i
- Unapređenje metoda nadzora i dijagnostike procesa obrade u automatizovanoj proizvodnji.

Budući da sve četire istraživačke celine predstavljaju u međunarodnim okvirima veoma atraktivna područja za istraživanja, aktivnosti sprovedene u prvoj godini su pored predviđenih sistem analiza i postavljanja odgovarajućih teorijskih modela obuhvatila i realizaciju jednog dela teorijskih istraživanja čime su po obimu značajno prevaziđeni postavljeni ciljevi. To se može zaključiti i prema ostvarenim rezultatima, odnosno broju i kategorijama objavljenih radova u praktično svim aktivnostima predviđenim planom istraživanja za prvu godinu realizacije projekta.

Ostvareni rezultati predstavljaju solidnu bazu za izradu prototipskih rešenja kao i buduća eksperimentalna ispitivanja.

5.0 LITERATURA

- [1] Abburi, N. R., Dixit, U. S.: A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process. *Robot Comput Integr. Manuf.* 22:363–372: 2006.
- [2] Abellan, J. V., Morales-Menéndez, R., Vallejo, A. J., Rodriguez, C.: Surface roughness and cutting tool-wear diagnosis based on Bayesian networks, In: Sixth IFAC symposium on fault detection, supervision and safety of technical processes, pp 439–444, 2006.
- [3] Abouelatta, O. B., Madl, J.: Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations, *J Mater Process Technol* 118:269–277, 2001.
- [4] Al-Habaibeh, A., Gindy, N.: A new approach for systematic design of condition monitoring systems for milling processes. *J Mater Process Technol.* 107: 243–251: 2000.
- [5] Azouzi, R., Guillot, M.: On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion, *Int. J. Mach. Tools. Manuf.* 37: 1201–1217, 1997.
- [6] Bade, R., Haase, J., Preim, J.: Comparison of Fundamental Mesh Smoothing Algorithms for Medical Surface, *Simulation und Visualisierung (SimVis)*, pp: 289-304. SCS Verlag, 2006.
- [7] Bahr, B., Motavalli, S., Arfi, T.: Sensor fusion for monitoring machine tool conditions, *Int J Comput Integr Manuf* 10:314–323, 1997.
- [8] Benardos, P. G., Vosniakos, G. C.: Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments, *Robot Comput Integr Manuf* 18:343–354, 2002.
- [9] Brecher, C., Hoffman, F., Karlberger, A., Jorg Rosen, C.: Multi-technology platform for hibrid metal processing, *The 41 CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2008.
- [10] Chen, J. C., Chen, W. L.: A tool breakage detection system using an accelerometer sensor. *J Intell Manuf* 10:187–197, 1999.
- [11] Chen, J. C., Huang, L. H., Lan, A. X., Lee, S.: Analysis of an effective sensing location for an in-process surface recognition system in turning operations, *J Ind Technol* 15:1–6, 1999.
- [12] Chen, S. L., Jen, Y. W.: Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining, *Int J Mach Tools Manuf* 40:381–400, 2000.
- [13] Cho, D. W., Leeb, S. J., Chu, C. N.: The state of machining process monitoring research in Korea. *Int J Mach Tools Manuf* 39:1697–1715, 1999.
- [14] Choudhury, S. K., Bartarya, G.: Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments, *Int J Mach Tools Manuf* 43:747–753, 2003.
- [15] Coker, S. A., Shin, Y. C.: In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system, *Int J Mach Tools Manuf* 36:411–422, 1996.
- [16] Dey, S., Stori, J. A.: A Bayesian network approach to root cause diagnosis of process variations, *Int J Mach ToolsManuf* 45:75–91, 2005.
- [17] Dimla, D. E.: The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation, *Int J Adv Manuf Technol* 19:705–713, 2002.
- [18] Dong, J. F., Subrahmanyam, K. V. R., Wong, Y. S., Hong, G. S., Mohanty, A. R.: Bayesian-inference-based neural networks for tool wear estimation, *Int J Adv Manuf Technol* 30:797–807, 2006.
- [19] Dontamsetti, S. K., Fischer, G. W.: Factors affecting surface roughness in finish turning of gray cast iron. *Adv Mater Manuf Process* 3:689–725, 1988.
- [20] Dweiri, F., Al-Jarrah, M., Al-Wedyan, H.: Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of alumic-79. *J Mater Process Technol* 133:266–275, 2003.
- [21] Ertekin, Y. M., Kwon, Y., Tseng, T. L.: Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions, *Int J Mach Tools Manuf* 43:897–904, 2003.
- [22] Ghosh, N., Ravi, Y. B., Patra, A., Mukhopadhyay, S., Paul, S., Mohanty, A. R., Chattopadhyay, A. B.: Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion, *Mech Syst Signal Process* 21:466–479, 2007.
- [23] Guyon, I., Elisseeff, A.: An introduction to variable and feature selection, *J Mach Learn Res* 3:1157–1182 7, 2003.
- [24] Haber, R. E., Haber, R. H., Alique, J. R., Ros, S.: Application of knowledge-based systems for supervision and control of machining processes, In: *Handbook of software engineering and knowledge engineering*, vol 2, World Scientific, Singapore, pp 673–710, 2002.
- [25] Haber, R. E., Jimenez, J. E., Peres, C. R., Alique, J. R.: An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process, *Sens Actuators A-Phys* 116:539–545 11, 2004.
- [26] Hounsfield, G. N.: Nobel Award address: Computed Medical Imaging, *Med Phys.*;7(4): 283-29, 1980.
- [27] Hoy, D., Yu, F.: Surface quality assessment using computer vision methods, *J Mater Process Technol* 28: 265–274, 1991.
- [28] <http://www.geomagic.com/en/solutions/industry/medical/>, 14.09.2011.
- [29] <http://www.instrumentaria.hr/frontpage>, 06.10.2011.
- [30] <http://www.materialise.com/dicom2cad>, 14.09.2011.
- [31] <http://www.materialise.com/mimics>, 14.09.2011.
- [32] Hub Unit Bearings, Catalog, NSK - Motion & Control

- [33] Jang, D. Y., Choi, Y. G., Kim, H. G., Hsiao, A.: Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. *Int J Mach Tools Manuf* 36:453–464, 1996.
- [34] Jemielniak, K., Kosmol, J.: Tool and process monitoring—state of art and future prospects, In: *Scientific papers of the institute of mechanical engineering and automation of the Technical University of Wrocław*, vol 61, pp 90–112, 1995.
- [35] Jemielniak, K.: Some aspects of AE application in tool condition monitoring, *Ultrasonics* 38:604–608, 2000.
- [36] Jones, J., Wu, Y.: Cutting tool's power consumption measured. US Patent, US 5-587-931, 1996.
- [37] Kamarthi, S. V., Kumara, S. R. T., Cohen, P. H. . Flank wear estimation in turning through wavelet representation of acoustic emission signals. *J Manuf Sci E-T ASME* 122: 12–19, 2000.
- [38] Kim, G. D., Chu, C. N.: In-process tool fracture monitoring in face milling using spindle motor current and tool fracture index, *Int J Adv Manuf Technol* 18:383–389, 2001.
- [39] Korunović, N., Trajanović, M., Mitković, V., Vulović, M.: Od CT snimka do modela za analizu naponskog stanja u femuru primenom metoda konačnih elemenata, *IMK-14 Istraživanje i razvoj*, Godina XVI, Broj (35), 2/2010.
- [40] Kuo, R. J., Cohen, P. H.: Multi-sensor integration for online tool wear estimation through radial basis function networks and fuzzy neural network, *Neural Netw* 12:355–370, 1999.
- [41] Kurada, S., Bradley, C.: A machine vision system for toolwear assessment, *Tribol Int* 30:295–304 14, 1997.
- [42] Lan, M. S., Dornfeld, D. A.: Experimental studies of tool wear via acoustic emission analysis, In: *Proceedings of the 10th NAMRC, SME*, pp 305–311, 1982.
- [43] Lee, B. Y., Tarn, Y. S.: Surface roughness inspection by computer vision in turning operations, *Int J Mach Tools Manuf* 41:1251–1263, 2001.
- [44] Lee, J. M., Choi, D. K., Kim, J., Chu, C. N.: Real-time tool breakage monitoring for NC milling process. *CIRP Ann—Manuf Technol* 44:59–62, 1995.
- [45] Li, X. L., Dong, S., Yuan, Z. J.: Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring, *Int J Mach Tools Manuf* 39:1935–1944, 1999.
- [46] Li, X. L., Yao, Y. X., Yuan, Z. J.: On-line tool condition monitoring system with wavelet fuzzy neural network, *J Intell Manuf* 8:271–276, 1997.
- [47] Li, X. L., Yuan, Z. J.: Tool wear monitoring with wavelet packet transform fuzzy clustering method, *Wear* 219:145–154, 1998.
- [48] Li, X. L.: A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning, *Int JMach ToolsManuf* 42:157–165, 2002.
- [49] Li, X. L.: Detection of tool flute breakage in end milling using feed-motor current signatures, *IEEE-ASME Trans Mechatron* 6:491–498, 2001.
- [50] Liang, S. Y., Hecker, R. L., Landers, R. G.: Machining process monitoring and control: the state-of-the-art. *J Manuf Sci E-T ASME* 126:297–310, 2004.
- [51] Lo, S. P.: An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. *J Mater Process Technol* 142:665–675, 2003.
- [52] Lorensen, W., Cline, J.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, *Journal of Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp: 163-169, 1987.
- [53] Maeng, M. J., Cho, S. S., Chung, J. K.: Tool fracture detection in end milling using cutting force and acoustic emission propagated through cutting fluid, *J Korean Soc Precis Eng* 14:163–170, 1997.
- [54] Maričić, S.: *Optimizacija tehnoloških procesa izrade rekompatibilnih delova*, doktorska disertacija, Rijeka, 2011.
- [55] Moriwaki, T., Tobito, M.: A new approach to automatic detection of life of coated tool based on acoustic-emission measurement, *J Eng Ind-Trans ASME* 112:212–218, 1990.
- [56] Navalušić, S., Milojević, Z., Milankov, M., Dragoi, M.V., Beju, L.: System for verification of the human knee post-operative results, *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, Issue 1, pp:62-67, ISSN:1583-7904, 2009.
- [57] Niu, Y. M., Wong, Y. S., Hong, G. S.: An intelligent sensor system approach for reliable tool flank wear recognition, *Int J Adv Manuf Technol* 14:77–84, 1998.
- [58] NSK Motion&Control: Axle Bearings for Railway Rolling Stock-Cylindrical Roller Bearings
- [59] NSK Motion&Control: Bearings for Railway Rolling Stock
- [60] NTN: Railway bearings, cat. no. 8501-II/E
- [61] Ouafi, A. E., Guillot, M., Bedrouni, A.: Accuracy enhancement of multi-axis CNC machines through on-line neurocompensation, *J. Intell Manuf* 11:535–545, 2000.
- [62] Ravindr, H. V., Srinivasa, Y. G., Krishnamurthy, R.: Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear* 212:78–84, 1997.
- [63] Risbood, K. A., Dixit, U. S., Sahasrabudhe, A. D.: Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process, *J Mater Process Technol* 132:203–214, 2003.
- [64] Schroeder, W., Martin, K., Lorensen, B.: *The visualization toolkit an object-oriented approach to 3D graphics*, 3rd Edition, Pearson Education Inc., 2002.
- [65] Sreejith, P. S., Ngoi, B. K. A.: Dry machining: machining of the future, *J Mater Process Technol* 101:287–291 44, 2000.
- [66] Trajanović, M., Grujović, N., Milovanović, J., Milivojević, B.: *Računarski podržane brze proizvodne tehnologije*, monografija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.
- [67] Wong, Y. S., Nee, A. Y. C., Li, X. Q.: Reisdorf, C.: Tool condition monitoring using laser scatter pattern. *J Mater Process Technol* 63:205–210, 1997.
- [68] Yoon, S. I., Lee, S. S., Kim, H. S.: Tool wear monitoring in milling operation using ART2 neural network, *J Korean Soc Precis Eng* 12:120–129, 1995.
- [69] Zhang, J. Z., Chen, J. C.: The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations, *Int J Adv Manuf Technol* 31:877–887, 2007.

- [70] Zhou, Y, Orban, P, Nikumb, S.: Sensors for intelligent machining-a research and application survey. In: Systems, man and cybernetics IEEE international conference on intelligent systems for the 21st century, vol 2, pp 1005–1010, 1995.

CONTEMPORARY APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF SPECIAL SOLUTIONS RELATED TO BEARING SUPORTS IN MECHANICAL ENGINEERING AND MEDICAL PROSTHETICS - The research results of the first year of the project

Abstract. *The contents of the research presented in this paper covers the actual and important topics relevant to the region but also to the global environment. Research topics mentioned here are of particular importance for participants, but also for a wider range of users in Serbian environment. Rolling bearings and/or bearing assemblies are now widespread group of sub-assemblies in the automotive industry, in machines of all types, railway, and consumer products. Although the bearings experienced a boom decades ago, there are still a number of interesting areas for research. This applies not only to the improvement of existing and known solutions eg. through the use of new materials or adaptronics, but also to development of new solutions for special applications and open ing of new areas for rolling bearings application.*

As the example of the topics of special interest for project realizator and participants, it is worth to mention that the emphasis is here on research related to the exploitation and structural behavior of bearing and bearing assemblies and, also, on specific "technology" related topics important for their production. The research is especially focused on the following bearings and bearing assemblies related topics.

- vehicle wheel integrated bearing assemblies;
- bearing assemblies for the towed and towing vehicles for railway;
- bearing characteristic of human extremity prosthesis (human endo-prosthesis bearing).

Following the previous statements, the research within the project contains four parts/segments, as follows:

- A) *research on behaviour of vehicle wheel bearing assemblies, bearing assemblies for the towed and towing vehicles for railway, and other special bearings;*
- B) *research and development of medical endo-prosthetics components (endo-prosthesis of the hip, shoulders, knees, ...);*
- C) *exploration of the possibilities of application of contemporary production technologies for specific types of bearings and components of medical endo-prosthetics;*
- D) *improvement of monitoring and diagnostic methods of the flexible automated manufacturing process through the monitoring of tool schabbiness status.*

The primary research objective of the first project segment is the development of an integrated mathematical thermal-mechanical model consisting of: heat sources, mechanisms of heat transfer, heat sinks and thermal expansion of ball bearings and bearing assemblies. Disposition of the temperature fields was defined by using the general-purpose programming system based on finite element method. The computer model includes the implementation of linear and nonlinear heat transfer. Based on the temperature rise, the change of mechanical characteristics was determined as a function of speed. The characterization of the heat sources and sinks was done, thermodynamic and elastic material properties of elements was defined, the amount of heat generated and heat transfer mechanisms were defined, the bearing load as function of the initial mechanical and thermal preload and workload was defined, as well as it's dynamic behavior.

The second research objective is to define the basis for the development of improved solutions for total hip endo-prosthesis, based on the individual morphological characteristic of each patient, on one side, and on the current knowledge of the kinematics and dynamics of the locomotion system of man, on the other. Various contemporary solutions for analysis and transformation of diagnostic images obtained with computer based tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) were considered. Here the emphasis was on the characteristics of the obtained images with the objective to increase the contrast between tissue and bone matter, as well as the possibility of conversion of such images into standardized formats used in the actual CAD/CAE/CAM software systems. In addition, the latest results related to the analyses focused on the bone of the femur (thigh bone) from the viewpoint of kinematics and loads in static and dynamic conditions during the patient's daily activities were considered. In this way, the preconditions were defined to allow definition of the three-dimensional shape for total hip endo-prosthesis for the specific individual patient.

Having in mind that research includes two technologically distinct groups of products (regarding the geometry and the amount of produced pieces) the third research objective, i.e. exploration of possibilities of modern production technologies, was realized separately for the case of serial and for the case of individual production.

It is the inevitable fact that the contemporary production is based on automated flexible technological structures with different levels of complexity and it is necessary to explore the possibility of operation of such systems without the operators. One of the key issues regarding the application of automated machining systems (among other to pics) is the development of a reliable and robust system for monitoring of tools and processes, which is one of the specific research objectives of this project too. Because of that, and to fulfill the fourth research objective, a systematization of methods for the development of intelligent systems for monitoring of machining processes was created and the concept of the system based on the existing sensors, or a combination of them, was defined.

Keywords: *integrated wheel bearings, bearings for towing and towed vehicles for railway, medical components endo-prosthetics, total hip endo-prosthesis, multifunctional machining systems, hybrid processing systems, tool condition diagnostics, tool condition monitoring*



J. Ходолич¹, М. Планчак, Д. Вилотић, М. Хаџистевић, И. Будац, Ђ. Вукелић

ПРИМЕНА САВРЕМЕНИХ ТЕХНОЛОГИЈА И РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНИХ СИСТЕМА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ И ИЗРАДУ ДЕНТАЛНИХ НАДОКНАДА

Резиме:

У овом раду су приказани резултати истраживања проблематике примене технологија производног машинства и одговарајућих система у стоматологији у областима везаним за моделирање и израду денталних надокнада као што су: узимање денталних отисака, 3D дигитализацији и моделирању, брзој изради прототипа, технологија пластичног деформисања, примена рачунаром подржане производње као и технологија и система и обезбеђење квалитета израде денталних надокнада.

1. УВОД

Развој медицинске науке током последњих неколико деценија карактерише све израженија интердисциплинарност која се огледа и у примени различитих инжењерских достигнућа. У том смислу се стоматологија може идентификовати као једна од грана медицине са најдужом традицијом примене, али и као иницијатор развоја нових инжењерских достигнућа. У контексту претходног, стоматолошка протетика (дисциплина која изучава поновно успостављање и одржавање оралних функција надокнађивањем изгубљених зуба и потпорних структура вештачким надокнадама) је одувек имала изражену везу са инжењерским наукама, која се у највећој мери односи на примену технологија производног машинства. Информациона револуција, која је кроз увођење рачунара потпуно изменила и производно машинство, није заобишла ни стоматолошку протетику. Напротив, тежња за поштовањем основног постулата медицинске науке - “*primum non nocere*”, (првенствено не нашкодити) што се у стоматолошкој протетици своди на прецизну израду адекватних и за сваки појединачни случај оптималних денталних надокнада, је довела до развоја нових технологија и метода. Тако се у технолошки развијеним земљама, посебно у последњих десетак година, чине значајни напори да се процес моделирања и израде денталних надокнада – до скоро у највећој мери базиран на мануелним вештинама припреме и израде надокнада и због тога у великој мери угрожен могућношћу појаве субјективних грешака – унапреди применом савремених машинских технологија и рачунаром подржаних система, а све у циљу постизања квалитетнијих надокнада (са аспекта материјала и економичности), као и ефикаснијег процеса њихове израде. Од савремених машинских технологија, односно рачунаром подржаних система који се у овој области данас примењују, треба истаћи CNC системе за 3D-дигитализацију, CAD, реверзибилно инжењерство (RE), CAE, CAM, ласерско синтеровање (SLS), брзу израду прототипа (RP), CAQ итд. Развој и примена наведених технологија и система су отворили могућности за значајно унапређење конвенционалног поступка моделирања и израде денталних надокнада, односно њихове контроле.

Прва успешна практична интеграција рачунаром подржаних производних технологија у стоматолошку праксу се десила 1985. са појавом CEREC система за израду денталних надокнада [1]. Систем конципиран на овим основама представља синоним за термин CAD/CAM у оквирима стоматологије. Занимљиво је да је развој система био мотивисан увођењем нових материјала за надокнаде, као што је цирконијумска керамика. Систем представља интеграцију оптичког скенирања, рачунаром подржаног моделирања и нумерички управљаног система за израду надокнада. На слици 1 је приказана еволуција овог аутоматизованог система кроз постепено историјско увођење иновација и системских унапређења као што су: иницијално истраживање обрадљивости керамичког материјала

¹ Проф. др Јанко Ходолич, Департман за производно машинство, Факултет техничких наука у Новом Саду, hodolic@uns.ac.rs

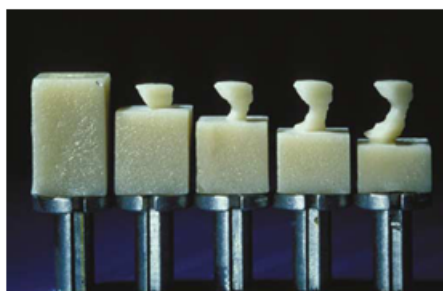
брушењем (1а), употреба погонског система у виду турбине (1б), фазе израде надокнаде и одговарајући патентирани облик држача обратка (1в), E-drive погонски систем (1г), симултана обрада цилиндричним алатима (1д), истовремена употреба цилиндричног и конусног алата (1ђ), профилни алат уведен 2006. (1е).



а



б



в



г



д



ђ



е

Слика 1: Развој и еволуција система за аутоматизовану производњу денталних надокнада (CEREC) [1]

У нашој земљи се денталне надокнаде још увек претежно израђују конвенционалним поступком који, у најкраћем, обухвата мануелно узимање денталних отисака и креирање модела, на бази којег се, затим, израђује калуп за ливење металног дела надокнаде. Овакав поступак, посебно у фази узимања отиска и креирања модела будуће надокнаде, у великој мери зависи од вештине (и субјективног расположења) стоматолога. Непрецизности које се јаве у првим фазама поступка је готово немогуће исправити у току даљег поступка израде, односно начињене грешке се надовезују једна на другу и извор су додатних грешака у даљем поступку израде. Разлози за овакво стање у нашој земљи су вишеструки, при чему се као основни може навести недовољна сарадња и повезаност истраживача и стручњака из области стоматологије и машинства.

Циљеви истраживања описаног у овом раду се могу поделити у две логичке целине. Прва логичка целина је анализа и систематизација примене CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада. Основни циљ анализе и синтезе је детаљно и потпуно разумевање подручја рада и интеракције његових активности. Поред тога, анализа и систематизација обезбеђују дефинисање информационих и техничко-технолошких потреба. Анализа је спроведена за методе и системе за узимање денталних отисака, методе и системе за екстра-оралну 3Д-дигитализацију денталних отисака, методе и системе за интраоралну 3Д-дигитализацију денталног система, примену RE-CAD технологија и система код моделирања денталних надокнада, примену RP технологија и система у изради денталних надокнада, примену технологија пластичног деформисања (ТПД) у изради денталних надокнада, примену CAM технологија и система у изради денталних надокнада,

примену метода за обезбеђење квалитета у изради денталних надокнада, примену метода за више-критеријумско вредновање утицаја моделирања и израде денталних надокнада на животну средину. Друга логичка целина је дефинисање подлога и развој општег модела CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада. Општи модел је могуће поделити на одговарајуће подмоделе па је складу са тим дефинисан низ секвенцијално интерактивних циљева који су обухватили развој подмодела дентално отискивање, развој подмодела за 3Д-дигитализацију денталног система, развој подмодела за RE-CAD моделирање денталних надокнада, развој подмодела за RE денталних надокнада, развој подмодела за ТПД за израду денталних надокнада, развој подмодела за САМ израду денталних надокнада, развој подмодела за обезбеђење квалитета и избор адекватних поступака за контролу израду денталних надокнада, развој подмодела за вишекритеријумско вредновање утицаја моделирања и израде денталних надокнада на животну средину.

2. АНАЛИЗА СТАЊА ПРИМЕНЕ CAD/CAM/RE/RP СИСТЕМА И ТЕХНОЛОГИЈА У МОДЕЛИРАЊУ И ИЗРАДИ ДЕНТАЛНИХ НАДОКНАДА

У наставку се анализирају неки од карактеристичних модула истраживања.

2.1 Стање примене метода и система за узимање денталних отисака

Идеална својства које отисни материјали треба да поседују:

- да су нешкодљиви за људски организам (нетоксични, неиритативни),
- да се лако припремају и једноставно апликују,
- да им је време везивања релативно кратко,
- да се не лепе за ткива која отискују,
- да хемијски не реагују са садржајем у устима и материјалом од ког се излива радни модел,
- да су димензионално стабилни у различитим условима,
- да су пријатног мириса и прихватљиве боје и
- да поседују својства која се односе на трајност препарата, услове лагеревања и економску исплативост.

За узимање денталних отисака за израду фиксних зубних надоканада данас се користе еластомери. Еластомери су синтетички материјали из групе еластичних материјала. Актуелна класификација еластомера заснива се пре на заједничким особинама појединих група (еластичне особине, димензионе промене везаног материјала) него на хемизму њиховог очвршћавања. Међутим, детаљнијом поделом еластомера, у зависности од вискозитета, разликују се четири класе: ретки (light body), еластомери средње конзистенције (medium или regular body), густе (heavy body) и веома густе (putty) – тестасти еластомери.

Полазни материјал еластомера чине полимери мале молекулске масе. То су ретке течности у случају полисулфида или гушће у случају силикона. Додавањем пунила препарати еластомера добијају конзистенцију пасте или теста. Везивање полазних компонената еластомера остварује се полимеризацијом, па завршни производ добија својства гуме. Процес полимеризације еластомера одвија се на два начина: кондензацијом и адицијом. Репродуктивне особине ређих еластомера су добре, али су мале димензионе стабилности и треба их користити у малим количинама. Димензиона стабилност еластомера зависи од три параметра: контракције услед полимеризације, од вредности коефицијената термичког ширења и од промене температуре средине (прелазак отиска с температуре уста на собну температуру). У вези с тим, потребно је обезбедити коректну везу отисне кашике и еластомера.

У поређењу са осталим отисним материјалима, еластомери су мање осетљиви на спољне утицаје, подносе веће деформације при скидању отисака, без трајних последица, димензионо су стабилнији при стајању, имају боља механичка својства, делују мање неповољно на моделе од гипса, па због претходно наведених особина претстављају материјале избора за дентално отискивање при изради фиксних зубних надокнада.

У отисне материјале, еластомере спадају: полисулфида, кондензациони силикони, адициони силикони и полиетри. Наведени материјали су детаљно анализирани на бази хемијског састава, предности и мана, на основу чега су и изведене конкретне препоруке за њихову примену.

2.2 Стање примене метода и система за 3D-дигитализацију у области денталне протетике

Истраживање је спроведено на основу доступних података прикупљених из литературних извора, контаката са произвођачима, дистрибутерима и корисницима опреме. Анализом су обухваћени, поред специјализованих система за 3D дигитализацију, и системи за 3D дигитализацију општије намене, пре свега имајући у виду тренд развоја мултифункционалних система ове врсте. Унутар ове две групе система, анализирани су три врсте система:

- контактне системе за 3D дигитализацију,
- безконтактне оптичке системе за 3D дигитализацију и
- безконтактне системе за 3D дигитализацију на бази компјутеризоване томографије.

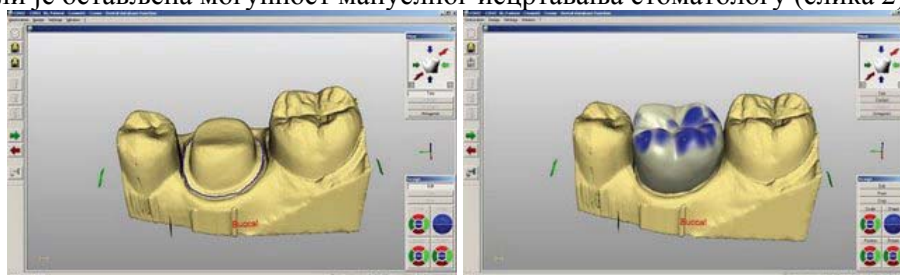
Анализом је обухваћено укупно 9 система који се могу применити за екстраоралну 3D дигитализацију.

Интраорални системи за 3D-дигитализацију у области денталне протетике се интензивно развијају у последњих неколико година и већ сада заузимају значајно место у овој области. Анализа је спроведена на основу доступних података прикупљених из литературних извора, контаката са произвођачима, дистрибутерима и корисницима опреме, а обухватила је 6 система специјализоване намене и 1 систем општије намене.

2.3 Стање примене RE-CAD технологија и система код моделирања денталних надокнада

Примена рачунаром подржаног реверзибилног инжењерског моделирања (RE-CAD) у стоматолошкој протетици омогућила је да мануелно моделирање надокнада замени виртуелно (дигитално). Задатак RE-CAD сегмента је да на виртуелном радном моделу изради виртуелни модел надокнаде. Након извршене 3Д-дигитализације препарације, скенирани подаци се процесирају у специјализованом софтверу.

Може се рећи да је данас, у овој области, истакнут развој софтверске компоненте, односно њено континуално унапређивање. Основна функција овог дела RE-CAD система јесте графичка и аритметичка подршка систему. Виртуелно креирање модела денталне надокнаде представља спој мануелно изведене препарације и 3Д-дигитализације, са једне стране, и нумерички вођеног моделирања са друге стране. Препарацијом се добијају геометријски врло сложене површине, које се на бази података добијених путем 3Д-дигитализације прилично верно могу измоделирати. Ово, нажалост, не искључује избегавање неправилности насталих у току препарације (познато је да и највештији стоматолози нису у стању да изведу апсолутно прецизну препарацију), што истиче значај прецизне и егзактне препарације од стране стоматолога. У том смислу је тенденција развоја софтверских алата за потребе корекције грешака препарације. Важан аспект код дефинисања препарације јесте дефинисање њене демаркације која представља промену правца површинских функција. Савремене RE-CAD софтвере ове врсте одликују опције за аутоматско препознавање демаркација, али је остављена могућност мануелног исцртавања стоматологу (слика 2).



Слика 2: Виртуелно моделирање денталне надокнаде у оквиру CEREC 3D система [6]

Интензиван развој РЕ-ЦАД система у општем смислу, утицао је и на развој ове врсте система у области денталне протетике. У том смислу се, у последњих неколико година, појавио на тржишту већи број софтвера ове врсте, међу којима, поред поменутих CEREC система, треба поменути и Curtina CAD30-Oratio, DentCAD-Delcam, Incise CAD-Renishaw, WorkNC-CAD-Sescoi. Претходна листа сугерише да су се у област РЕ-САД система упустиле и компаније чији су производи већ доказани у области индустријског РЕ-САД моделирања попут Delcam-а и Renishaw-а.

2.4 Стање примене RP технологија и система у изради денталних надокнада

Захваљујући све широк доступности и низу компаративних предности у односу на конвенционалне технологије, RP се све више користи у индустријски развијеним земљама за потребе стоматологије. Увидом у литературне изворе извршена је условна класификација карактеристичних подручја

стоматологије у којима је могућа ефикасна примена Rapid Prototyping (RP) технологија, са посебним освртом на израду денталних надокнада.

RP моделе карактерише неколико кључних предности у односу на конвенционалне технологије, а кључну предност у домену израде денталних надокнада представља могућност брзог и ефикасног рада са моделима веома сложене геометрије.

Тродимензионални RP модели омогућавају стоматолозима свих субспецијализација да добију визуелне и тактилне информације о анатомској структури подручја од интереса. На овај начин је значајно олакшана и унапређена комуникација између различитих учесника у процесу планирања и израде денталних надокнада, а у крајњем случају, поједностављује се и комуникација између стоматолога и пацијента. Коначно, RP модели представљају и педагошко средство које се може врло ефикасно користити, како у општој настави, тако и за увежбавање сложенијих хируршких захвата и сл.

RP модели омогућавају оралним хирурзима да ефикасно планирају операције различитих нивоа сложености. Поред тога, RP модели такође могу бити коришћени као мастер модели за извођење хируршких захвата. Овакви модели не само да омогућавају примену правих хируршких инструмената ради увежбавања захвата, већ хирурзима пружају прилику да се детаљно упознају са величином и конфигурацијом зоне која захтева хируршку интервенцију. При том транспарентни и/или вишебојни модели омогућавају квалитетнији увид у анатомску структуру подручја од интереса.

До увођења RP технологија у стоматологију, примена имплантата сводила се на избор стандардизованих компоненти које су биле у понуди неколицине произвођача. У случају потребе за уградњом имплантата нестандартних димензија, као последице болести или генетског наслеђа, долазило је до проблема. Стандардне имплантате је било потребно дорадити и прилагодити новонасталом случају, што је резултовало одлагањем оперативног третмана, самим тим узрокујући могуће компликације. Такође је постојала могућност да стандардни имплантат не одговара у потпуности у погледу налегања и сл. Предност RP технологија лежи у томе што омогућава израду денталних имплантата који су прилагођени индивидуалним захтевима пацијента, чиме се елиминише могућност појаве претходно наведених проблема.

У складу са претходним напоменама, RP технологије могу бити успешно коришћене у изради ортодонтских протеза које ће бити посебно прилагођене индивидуалним захтевима.

Конвенционални начин израде денталних надокнада у основи се ослања на вештину стоматолога и техничара. Увођењем RP технологија, омогућен је значајан помак, с обзиром да процес губи занатски карактер и поприма одлике индустријског процеса, уједначеног квалитета.

RP технологије представљају важно средство у различитим форензичким студијама. Имајући у виду да омогућавају тачност која је неопходна за овакву врсту испитивања, RP модели се успешно користе за евидентирање и архивирање форензичких доказа.

Стоматологија очекује велике резултате и од развоја једне нове области RP-а, која се назива биопринтинг. Суштину поступка чини генерисање нових ткива депоновањем живих ћелија у биоактивни супстрат. Примера ради, очекује се да ће, у скорој будућности, у области стоматологије, применом овог поступка бити могуће репродуковати зубе, виличне кости, итд.

2.5 Стање примене технологија пластичног деформисања (ТПД) у изради денталних надокнада

Метални материјали имају особину да при пластичној деформацији услед структурних промена, мењају механичка својства. Ова појава нарочито је изражена при хладној деформацији која се одвија на температурама испод температуре рекристализације. При томе долази до значајног повећања тврдоће и чврстоће материјала уз пад жилавосити и пад пластичних својстава. Феномен деформационог ојачавања је значајан за израду денталних надокнада методама ТПД. С друге стране, неки материјали, као што су легуре титанијума, које спадају у групу биокompatibilних материјала, имају ниску пластичност у хладном стању, те се њихово обликовање мора вршити на повишеној температури или применом специјалних метода (хидростатичко обликовање и др.).

За обликовање денталних надокнада могу се користити следеће методе пластичног деформисања:

- хладно истискивање и ковање,
- микро деформисање у хладном и топлим стању,
- методе интензивне пластичне деформације,
- инкрементално деформисање у хладном стању,
- инкрементално деформисање потпомогнуто ласером,
- цупер пластично деформисање и др.

Илустрација појединих метода израде денталних надокнада помоћу ТПД, приказана је у тачки 3.5. Обликовање денталних надокнада од Ti легура изводи се у топлом стању применом ласерског инкременталног деформисања, супер пластичног обликовања и ковања. Високолегирани челици могу се обликовати успешно и у хладном стању. Методе инкременталног обликовања су погодне за интеграцију у CAD/ CAM/RE/RP систем израде денталних надокнада.

2.6 Стање примене САМ технологија и система у изради денталних надокнада

Укупан квалитет обнове и одржавања оралне функције пацијента у многоме зависи од примењене технологије и материјала за израду фиксних стоматолошких надокнада. Класичан приступ изради ових надокнада подразумева много ручног рада, док је квалитет у директној зависности од умешности и искуства стоматолога и стоматолошког техничара.

Са становишта производног машинства, израда стоматолошких надокнада се може сврстати у категорију високо сложене и појединачне производње, што избор методологије своди на рачунаром подржану производњу (САМ). Другим речима, квалитет израде фиксних стоматолошких надокнада може бити у многоме увећан укључивањем САМ методологије у процес израде.

У оквиру задатака из ове подгрупе, обрађено је мноштво страних и домаћих извора информација као што су: чланци у научним часописима, чланци у стручним часописима, научне и стучне књиге, проспекти каталози и публикације доступни на сајму “International Dental Show” у Келну, Немачка. На овај начин је обезбеђена усклађеност знања са савременим развојем техничких достигнућа у овој области и повећано разумевање између инстраживача разнородних профила (доктора стоматологије и машинских инжењера). Израда стоматолошких надокнада применом САМ система изводи се на четири начина:

- електро ерозија,
- постопак глодања полазног облика надоканде,
- поступак електрофорезе керамичког материјала и
- поступак ласерског синтеровања честица метала.

Глодање је најчешће коришћена метода израде у оквиру САМ система. Основу система чине путање алата (која се генерише на бази САД модела) и нумерички управљана машина која израђује надокнаду скидањем материјала из одабраног полазног облика. Перформансе ових система су ограничене могућностима машине и софтверске подршке. Проблем израде овом методом представља тачност израђене надокнаде. Важну карактеристику представља максимални број обртаја вретена машине. Обрада керамичког облика захтева око 100000 обртаја у минути и дијамантске брусне елементе.

Поступак селективног ласерског синтеровања честица материјала (метала или керамике), представља најновији метод израде надокнада у оквиру САМ система. Систем функционише тако што се најфиније честице метала (Au, Ti, Co-Cr-Mo) наносе на специјалан калуп. Енергија ласера омогућава синтеровање праха и израду надокнаде у слојевима. Поступак траје дуго, али је могуће истовремено израђивати више надокнада, што компензује утрошено време. Овим поступком готово да нема вишка утрошеног материјала, те је веома је исплатив код скувих материјала. На овај начин функционишу: Vego, HintEls-rapid pro и Centra Dent системи.

2.7 Стање примене метода за обезбеђење квалитета у изради денталних надокнада

Планирање квалитета и спровођење испитивања не би имали потпуну сврху ако се информације проистекле из контроле не би враћале тамо где су неопходне ради регулисања процеса. Основне компоненте при овоме су извештаји о контроли и испитивању, извештаји о испуњењу захтева корисника (у овом случају пацијента) и извештаји о економским ефектима.

Примена одговарајућих техника унапређења квалитета и са аспекта зубних надокнада у циљу задовољења захтева пацијента и са аспекта процеса подразумева низ сукцесивних и логичких корака као што су: анализа, систематизација, дефинисање подлога, развој модела, развој или избор техника за конкретан модел, имплементација техника у одговарајућем окружењу, њихова верификација и на послетку идентификација грешака и дефинисање могућности и ефеката унапређења. При овоме се мора имати на уму да на сваки процес утиче велики број фактора и колико се год трудили да утицајне факторе држимо под контролом, расипања су неизбежна. Њих треба одржати на прихварљивом нивоу и тежити њиховом непрекидном редуковању.

3. ОПШТИ МОДЕЛ CAD/CAM/RE/RP СИСТЕМА И ТЕХНОЛОГИЈА У МОДЕЛИРАЊУ И ИЗРАДИ ДЕНТАЛНИХ НАДОКНАДА

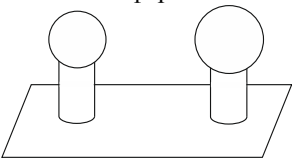
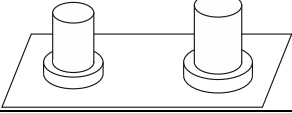
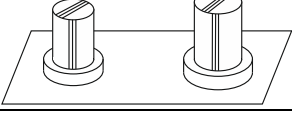
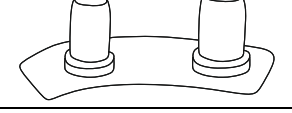
У наставку ће бити описани модули општег модела CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада.

3.1 Карактеристике савремених метода за узимање денталних отисака и избор адекватних поступака

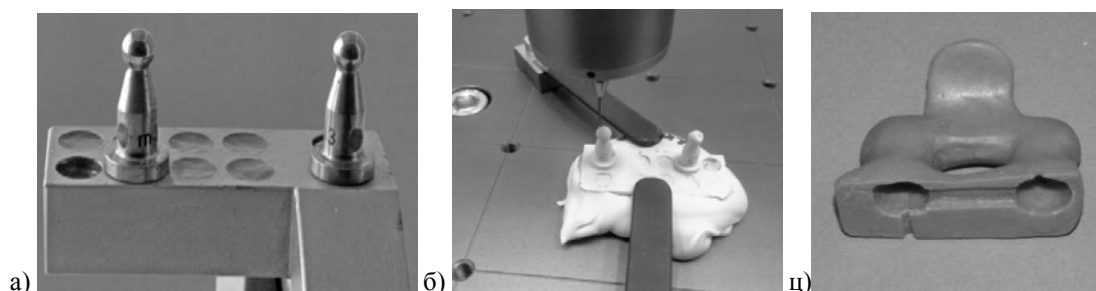
У склопу развоја општег модела CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада развијен је модел (слика 3.) анализе денталног отискивања.

Испитана је тачност гипсаних радних модела са врхом у облику сфере добијених изливањем отисака мастер модела (слика 4.) узетих адисионим и кондензационим силиконом. Отисци су изливани након различог временског интервала који је протекао између узимања и изливања отиска. Мастер модел се састојао од два метална цилиндра са сфером на врху, са дефинисаном међусобном раздаљином, који су представљали моделе брушених зуба са постојањем подминираних места. Раздаљина између цилиндара одговарала је раздаљини зубних патрљака у устима пацијента. Пре почетка истраживања мастер модел је измерен на координатној мерној машини (Carl Zeiss Contura G2). Начињена је индивидуална кашика од акрилата, по упутству произвођача ради обезбеђивања једнаког слоја отисне масе од 2 mm око отискиваног објекта и ради симулације реалне клиничке ситуације.

Тиме је испитана димензиона стабилност силикона, као најчешће коришћених материјала за узимање отисака у току израде зубних надокнада.

Примењиване методе	Радни модел	Анализирани параметри
Координатна метрологија Статистичка обрада резултата	Сфере 	- Геометријски однос основних геометријских елемената (оса, површина и центара калота...)
Координатна метрологија Статистичка обрада резултата	Цилиндри 	- Геометријски однос основних геометријских елемената (оса и површина цилиндара...)
Координатна метрологија CAD-инспекција Статистичка обрада резултата	Цилиндри са зарезима 	- Геометријски однос основних геометријских елемената (оса и површина цилиндара...) - Репродукција (једноставних) 2D детаља
“CAD-to-part” инспекција Статистичка обрада резултата	Реалан модела са патрљцима 	- Геометријски однос сложених геометријских елемената (фре-форм површина) - Репродукција комплексних 3D детаља

Слика 3. Модел анализе маса за отискивање



Слика 4. Мастер модел (а), мерење отиска на КММ (б), акрилатна кашика (ц) [7]

3.2 Карактеристике савремених метода 3Д-дигитализације и избор адекватних поступака за 3Д-дигитализацију денталног система

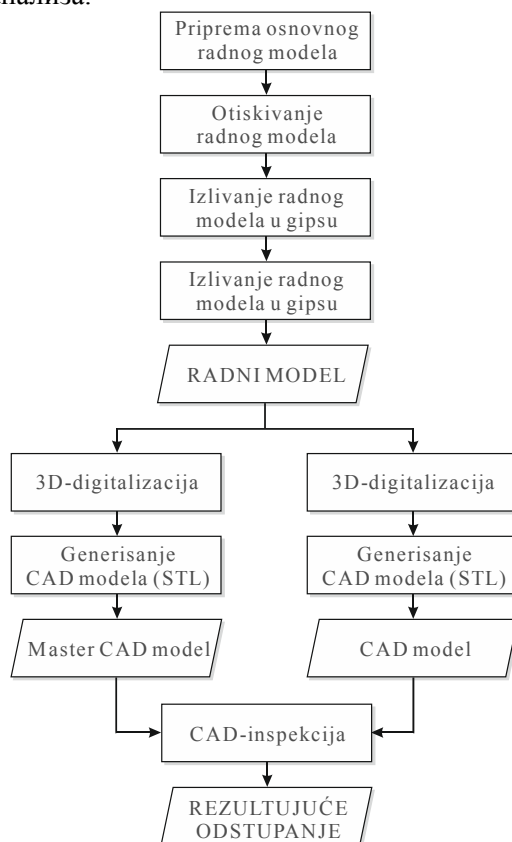
Посебан акценат, код развоја подмодела, је стављен на методе и тачност система. У том смислу је постављен концепт базиран на компаративној анализи који је, респектујући специфичне карактеристике система за 3Д-дигитализацију у области денталне протетике, омогућио квалитативну анализу система.

Компаративна анализа је обухватила осам система:

1. Cerec inEOS - екстраорални оптички стоматолошки систем за 3Д дигитализацију;
2. KAVO - екстраорални оптички стоматолошки систем за 3Д дигитализацију;
3. CerecAC - интраорални оптички стоматолошки систем за 3Д дигитализацију;
4. TRIOS - интраорални оптички стоматолошки систем за 3Д дигитализацију;
5. Zeiss Contura G2 – КММ са сензором за контактну 3Д-дигитализацију;
6. GOM Atos Triple Scan – оптички систем за 3Д дигитализацију;
7. Siemens CT SENSATION 64 multislice – медицински СТ систем за 3Д-дигитализацију
8. Zeiss METROTOM 1500 – индустријски СТ систем за 3Д-дигитализацију.

Концепт анализе је заснован на САД-инспекцији, а шематски приказ је дат на слици 5.

Први корак у анализи представљала је припрема основног радног модела за отискивање. За основни радни модел је изабран модел горње вилице који се користи у едукативне сврхе, а на коме су (за потребе отискивања и премеравања) препарисани акрилатни зуби и то: горњи централни секутић, први премолар и први молар са десне стране (слика 2.2.2а). Препарација је обављена у складу са правилима препарације зуба за израду керамичких надокнада (керамичких круница на секутићу и молару и керамичког инлеја на премилару), на САМ систему CEREC 3 уз примену воденог хлађења. Након тога је извршено отискивање модела помоћу адиционог силикона у стандардној стоматолошкој кашици применом једно-фазне технике. Затим је, на основу реализованог отиска, извршено изливање радног модела од гипса (типа САМ stone Siladent) који је погодан са оптичку 3Д-дигитализацију јер не захтева апликацију матирајућег праха. На овај начин добијен је основни радни модел на коме је спроведена анализа.

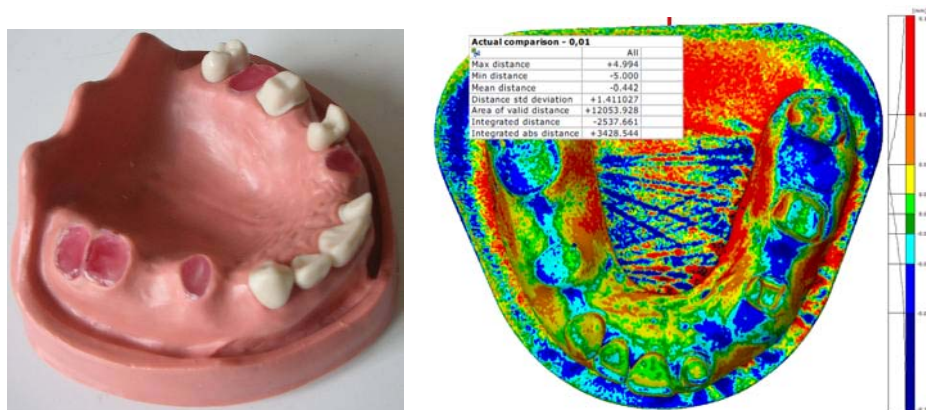


Слика 5: Концепција развоја подмодела

У следећем кораку је, у циљу креирања референтног тј. мастер САД модела, било неопходно изабрати систем за 3Д-дигитализацију који у датом случају генерише најмање одступање уз довољан број дигитализованих тачака. Резултат избора, између доступних система, је био систем Atos triple scan немачке фирме GOM. Полазећи од чињенице да је, у оквирима стоматолошке протетике, STL

формат записа података неформална vrста стандарда, спроведена анализа је у потпуности базирана на овом формату (специјализовани системи за 3Д-дигитализацију у области стоматолошке протетике у највећем броју случајева нуде могућност извоза резултата у STL формат, иако треба напоменути да је одређени број ових система и даље “затворен” тј. корисник нема могућност извоза резултата).

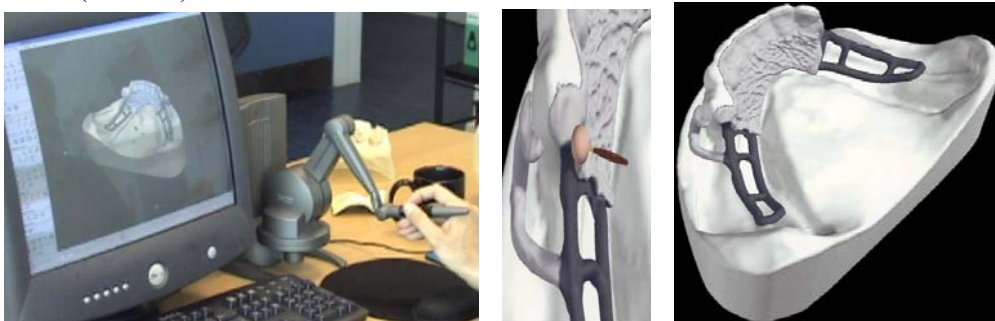
3Д-дигитализација је извршена без наношења матирајућег праха, а након спроведеног препроцесирања и сегментације, генерисан CAD мастер модел у STL формату који је послужио као основа за проверу тј. поређење са експерименталним узорцима добијеним са преостала четири система за 3Д-дигитализацију. Поређење резултата је реализовано применом методе CAD инспекције у програмским системима GOM Inspect и PTC Pro/VERIFY (слика 6).



Слика 6: Основни радни модел (а), пример резултата CAD инспекције (б)

3.3 Карактеристике савремених метода RE-CAD и избор адекватних поступака за моделирање денталних надокнада

Развој RE-CAD система у области денталне протетике утицао је на њихову примену код моделирања све сложенијих денталних надокнада – од круница, преко мостова, до парцијалних мобилних протеза. Једна од нових области примене RE-CAD система јесу прибори за позиционирање уградње имплантата у вилице као „носача“ протеза. Дентални RE-CAD системи се у зависности од области примене, имајући у виду специфичности различитих денталних надокнада, значајно разликују у смислу опција и алатки које нуде што у великој мери зависи и од САМ технологије која се примењује за израду денталних надокнада. Тенденција је да се овакви системи опскрбљују базама података које нуде кориснику прелиминарни модел или део модела који је могуће дорадити и прилагодити конкретном случају. На тај начин се унапређују брзина и квалитет укупног процеса. Додатно унапређење представљају најновије опције које укључују аутоматско дизајнирање оклузалне површине, коришћење информација из високоподесивих артикулатора (на бази којих се усклађује оклузална морфологија са индивидуалним вредностима граничних кретања мандибуле), као и примену хаптичких рука које омогућавају виртуелни контакт путем софтвера са препаратацијом тј. радним моделом (слика 7).

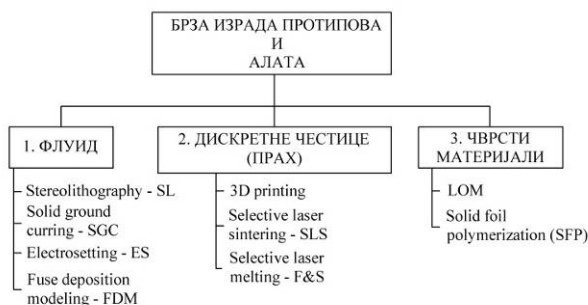


Слика 7: Примена хаптичке руке у RE-CAD моделирању денталних надокнада

Избор адекватног система и методе, у контексту претходне анализе, представља комплексан задатак. Олакшавајућу околност представља чињеница да су новији системи ове врсте модуларне структуре кроз коју се кориснику нуди широка лепеза опција и алатки за моделирање различитих денталних надокнада. Такође, за очекивати је да ће укључење компанија са богатом историјом у области развоја индустријских RE-CAD система у област денталне протетике, значајно допринети већој отворености ове врсте система у смислу њихове интер-компатибилности.

3.4 Карактеристике савремених метода RP и избор адекватних поступака за израду денталних надокнада

Карактеристике савремених метода RP – Rapid Prototyping (RP) представља групу технологија помоћу којих се физички предмети израђују директно из 3D CAD модела без коришћења алата. Све RP технологије могу се класификовати, у односу на материјале који се примењују, у три групе приказане на слици 8.



Слика 8: класификација RP технологија

RP технологије од своје прве примене у индустријском окружењу 1989. године па све до данас доживљавају перманентне модификације у циљу побољшања квалитета производа (модела, прототипа производа) и повећање ефикасности процеса у целини. То се односи како на већ етаблиране RP методе као што су стереолитографија (SL), селективно ласерско синтероване (SLS), solid ground curring (SGC), 3D printing, LOM поступак и др., тако и на методе које су развијене у неколико последњих година, од којих је карактеристична метода брзе израде ледених модела (Rapid freeze prototyping – RFP). Поред тога у примени су и комбинације RP технологија са класичним технологијама у циљу добијања финалних металних делова високог квалитета и тачности. Ти делови примењују се у разним областима: машинство, архитектура, медицина, индустрија забаве и др.

Основне карактеристике савремених метода RP су а) кратко време израде модела, б) могућност брзе измене у процесу креирања модела и на тај начин реализовање оптималне конструкције модела инкременталним путем, ц) скраћење тзв. “time to market”, тј. повећање конкурентности производа, д) тачност модела које задовољава већину примена, е) могућности добијања модела комплексних геометријских конфигурација, ф) коришћење широке палете материјала модела, укључујући и метале, г) комбинација RP са класичним производним методама. У том смислу карактеристична је комбинација RP и прецизног ливења. При томе се помоћу неког од RP система израђују воштани модели или готови калупи који се затим користе у процесу прецизног ливења. Овај поступак нашао је примену и у медицини, посебно у стоматологији.

Ограничења RP технологија односе се на недовољну тачност модела и у случају високих захтева за тачности модел се подвргава накнадној обради. Поред тога, разлог за још недовољно широку примену RP технологија код нас је релативно висока цена опреме.

Избор адекватних поступака за израду денталних надокнада - Са становишта доступности опреме, цене потрошног материјала и компатибилности са конвенционалним технологијама за израду денталних надокнада, од споменутих поступака су најприхватљивији SLS и 3D printing.

Selective Laser Sintering (SLS) и 3D принтинг су RP технологије које директно формирају чврст модел од праха, који се користи као полазни материјал. У току SLS поступка, ласер топи прах на одређеним местима дефинисаним програмом, који се затим везује и након хлађења отврдњава, док код 3D принтинг-а за спајање честица праха користи се глава кроз коју излази везивно средство на тачно одређеним путањама дефинисаних програмом.

Једна од најзначајнијих предности SLS поступка за израду модела у медицини и стоматологији је разноликост материјала који се могу користити (полимери, керамике, метали). SLS поступак омогућава брзу израду модела, као и релативно високу тачност израде од $\pm 0,2$ mm и могућност израде делова дебљине од 0,3 mm. Обзиром да ова технологија омогућава и коришћење транспарентних материјала, она је погодна за израду модела за употребу у дијагностици, визуализацији, образовању и планирању операцијског захвата у стоматологији и медицини. Најновији трендови у примени RP технологија у медицини и стоматологији крећу се у правцу директне израде импланата од биокompatibilних материјала, где SLS поступак налази своје место због могућности рада са разноликим материјалима.

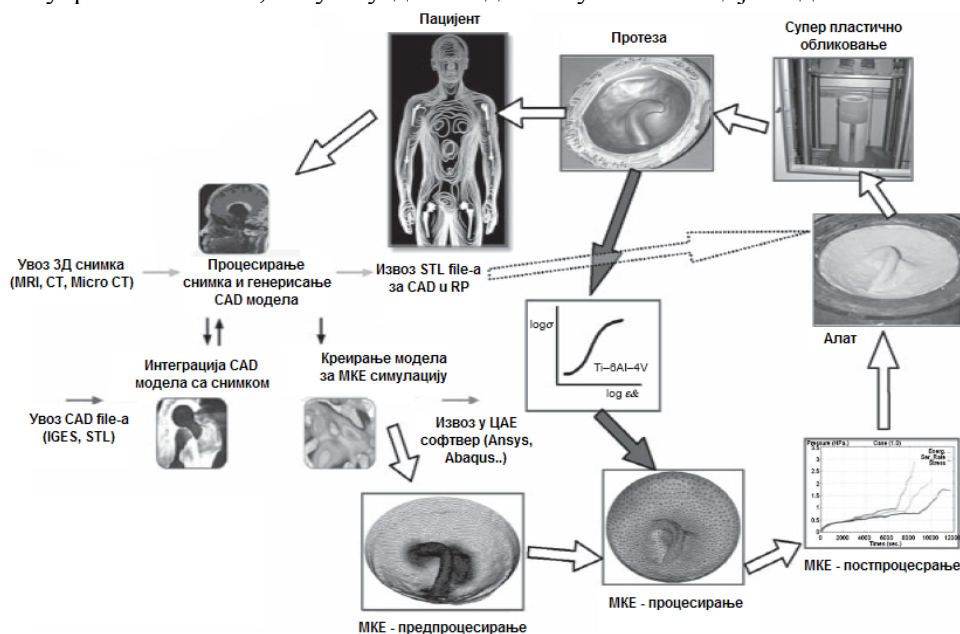
3D printing технологија такође може да користи широк спектар различитих материјала (метални, керамички, полимерни прах и др.). Међутим, због потребе компатибилности између праха и везивног

средства, дијапазон различитих материјала је мањи него код SLS -а. Овај поступак је једноставан и брз, док је опрема релативно јефтина, што утиче на велику распрострањеност овог система. Поред класичне примене ради визуелизације или планирања стоматолошких захвата овај поступак се може успешно применити и у изради калупа за ливење металних делова денталних надокнада методом прецизног ливења, уз адекватну подршку софтвера за 3Д визуелизацију СТ или MRI снимка. Један од примера је израда металне крунице где се помоћу овог поступка може изградити воштани модел или готов калуп који тачно одговара пацијенту.

Незаобилазан RP поступак који се врло широко примењује у стоматологији и протетици је стереолитографија (SL) који као материјал за израду модела користи фотополимер.

3.5 Развој под-модела ТПД - Карактеристике савремених метода ТПД и избор адекватних поступака за израду денталних надокнада

Савремене методе технологије пластичног деформисања омогућавају обликовање тешко деформабилних материјала, израду делова сложене геометрије, повећане тачности и квалитета, већу продуктивност, итд. због чега су производи добијени овом технологијом све више заступљени у различитим индустријским гранама, медицини и др. Оно што представља карактеристику савремених метода технологије пластичног деформисања, јесте примена рачунара и напредних компјутерских техника (CAD, CAE, CAM, RE, слика 9), што је довело до суштинских промена у скоро свим сегментима процеса. Овакав приступ омогућио је не само побољшање постојећих процеса, већ и развој нових поступака, аутоматизацију процеса пројектовања и производње, разноврсност дизајна, већу флексибилност, већу поузданост делова у експлатацији итд.



Слика 9: Интегрисани поступак пројектовања и израде денталних надокнада [7]

Избор адекватног поступка за израду неког производа веома је комплексан проблем јер подразумева доношење одлуке на бази различитих критеријума, при чему су најважнији: дизајн и сложеност геометрије дела, деформабилност материјала, жељена тачност и квалитет, механичке и физичке особине, количина и цена. У случају производње денталних надокнада ово питање је још више наглашено због низа специфичних захтева у погледу карактеристика материјала (биокомпатибилност, механичке карактеристике и др.) и чињенице да у већини случајева денталне надокнаде представљају производ јединственог дизајна (тзв. tailor-made производи).

Поступак микро-деформисања омогућава обликовање зубног импланта од легуре титанијума у само две операције. Међутим, с обзиром да зубни имплант представља типски производ који се израђује у већим серијама, развој метода технологије пластичног деформисања за његову израду неће бити у првом плану у будућим истраживањима. Интересантнији су поступци који пружају могућност брзе и економичне израде tailor-made компоненти денталних надокнада као што су: хладно и топло инкрементално деформисање, развлачење и дубоко извлачење. Ови поступци најчешће се користе за израду базе код парцијалних и тоталних виронит протеза и металних мостова за надоградњу денталних импланта.

Инкрементално деформисање је модерни, нумерички контролисан поступак који пружа нове могућности у обликовању делова из лима. Поступак је веома флексибилан, са великим бројем адаптивних параметара којима се може битно утицати на излазне резултате. Главна карактеристика методе, а уједно и највећа предност у односу на класичне поступке обликовања лима је употреба универзалног алата једноставног облика. Захваљујући компјутерском вођењу алата практично не постоје ограничења везана за облик финалног дела. Поред тога, због парцијалног захвата алата, постижу се веће ефективне деформације што је веома важно при обликовању тешко деформабилних материјала какви се обично користе за израду денталних надокнада. Са друге стране главна предност поступака са комплетним захватом алата (дубоко извлачење) јесте већа продуктивност и тачност делова, а недостатак релативно висока цена алата.

3.6 Карактеристике савремених метода САМ и избор адекватних поступака за израду денталних надокнада

Истовеменим укључивањем нумерички управљаних машина алатки и брзих техника дигитализације у процес израде стоматолошких надокнада остварена су значајна унапређења у областима: примене нових материјала, смањења ручног рада, веће ценовне ефикасности и контроле квалитета. У завршној фази САД модел се трансформише у физичку круницу, мост или другу врсту надокнаде уз помоћ САМ подсистема и специјалне машине алатке. Данашњи напредни системи користе субтрактивну или адитивну методологију израде. Субтрактивне технологије обраде глодањем или брушењем су најчешће везане за обраду керамичких припремака где је функција САМ подсистема прорачун путање алата за резање на основу САД модела и дигитализованих података.

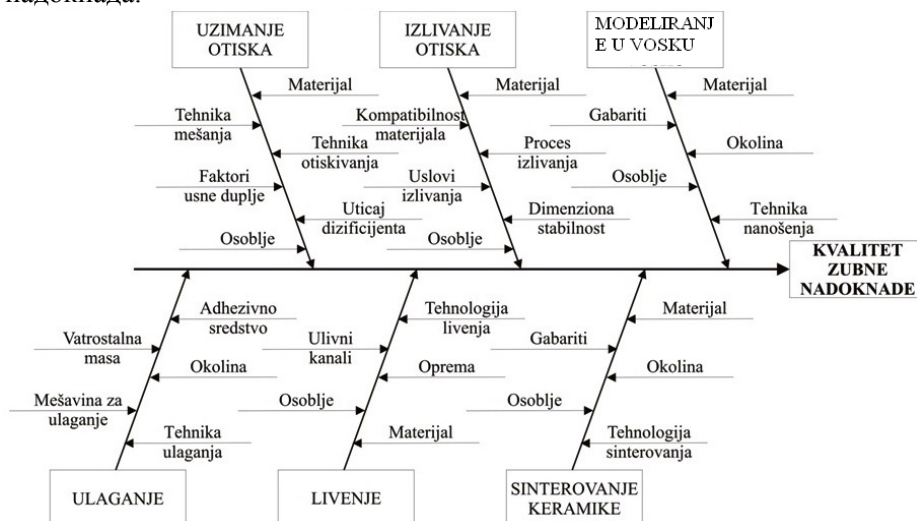
Адитивне методе су погодне за израду модела од воска (корак у распрострањеној технологији прецизног ливења). Адитивне технологије као што је SLM (Selective Laser Melting) омогућавају директну адитивну израду објеката од керамике, Ti легура и легура племенитих материјала. Задатак подсистема САМ у овом случају је да виртуално позиционира објекат у запремини SLM машине, направи попречне пресеке са САД моделом и изабере оптималне параметре процеса.

Интегрисање описаних подсистема различитих произвођача отвара нове изазове од којих су највећи интероперабилност, укључивање нових метода дигитализације као што је СТ и повећање тачности и контрола квалитета израде стоматолошких надокнада.

3.7 Карактеристике савремених метода обезбеђења квалитета и избор адекватних поступака за контролу израду денталних надокнада

Уз примену метода Браинсторминг-а су идентификовани утицајни фактори на одабрану излазну карактеристику квалитета те успостављене релације узрочно-последичних веза које су представљене Ишикавиним дијаграмом. На овај начин се у потпуности омогућава идентификација утицајних фактора који се могу варирати, држати на константном нивоу или занемарити.

На основу дијаграма и спроведених анализа посебно је истакнут значај материјала и у сврху побољшања квалитета извршена су одређена експериментална истраживања. Испитивана је димензиона стабилност силикона као најчешће коришћених материјала за узимање отисака у току израде зубних надокнада.



10: Развијени Ишикава дијаграм по фазама израде зубне надокнаде

4. ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживања која ће се спровести треба да допринесу прилагођавању и интеграцију савремених технологија и рачунаром подржаних система из области производног машинства у стоматолошку протетику и кроз то обезбеде ефикасну израду денталне надокнаде чија прецизност задовољава потребе клиничке апликабилности, односно ефикаснију рехабилитацију пацијента. Претходно наведени општи правци истраживања ће бити остварени кроз реализацију следећих фаза:

- анализа стања примене савремених технологија и рачунаром подржаних система у моделирању и изради денталних надокнада;
- развој општег модела CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада
- детаљна разрада специфичних елемената наведеног система
- експериментална испитивања појединих сегмената система
- развој специфичних технолошких и програмских подсистема за моделирање и израду денталних надокнада
- развој унапређеног модела CAD/CAM/RE/RP система и технологија у моделирању и изради денталних надокнада
- експериментална испитивања појединих сегмената система
- оцена ефикасности примене унапређеног модела.

5. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказани резултати истраживања аспеката примене савремених производних технологија и рачунарских и производних система у области обнове и одржавања оралне функције пацијената кроз моделирање и израду денталних надокнада. Испитана је димензиона стабилност еластомера који се користе у почетним фазама израде ресторације. Истражени су специфичности техника 3D дигитализације као непосредног наставка фазе узимања отиска, али и као могућа замена фазе отискивања кроз интраорално скенирање. Приказане су и бројне предности примене технологија RP технологија у различитим дијагностичким, фазама планирања као и фазама израде надокнада. Истакнут је значај технологија пластичног деформисања као и специфичности инкременталног деформисања. Такође су приказани аспекти примене CAM технологија и система за обраду делова од керамичких материјала за израду стоматолошких надокнада. Пажња је усмерена и на идентификацију утицајних фактора на одабрану излазну карактеристику квалитета.

Интегрисање описаних подсистема различитих произвођача отвара нове изазове од којих су највећи интероперабилност, укључивање нових метода дигитализације као што је СТ и повећање тачности и контрола квалитета израде стоматолошких надокнада.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Mormann, W.: The evolution of the CEREC system, The Journal of the American Dental Association, Am Dental Assoc, Vol. 137(1), pp.7S, 2006
2. Miyazaki, T., Hotta, Y., Kunii, J., Kuriyama, S. & Tamaki, Y.: A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience, Dental materials journal, Vol. 28(1), pp. 44-56, 2009
3. Hodolič, J., Puškar, T., Bešić, I.: Current status and future trends in dental CAD restorative systems, 34. International Conference on Production Engineering, Niš: Faculty of Mechanical Engineering, pp. 185-189, 2011, ISBN 978-86-6055-019-6.
4. Hadžistević M., Hodolič J., Budak I., Vukelić Đ., Štrbac B.: Results of the analysis on stylus calibration of a coordinate measuring machine (CMM), 34. International Conference on Production Engineering, Niš: Faculty of Mechanical Engineering, pp. 143-146, 2011, ISBN 978-86-6055-019-6.
5. Matin I., Hadžistević M., Hodolič J., Vukelić Đ.: An Interactive CAD/CAE System for Mold Design, 34. International Conference on Production Engineering, Niš: Faculty of Mechanical Engineering, pp. 213-216, 2011, ISBN 978-86-6055-019-6.
6. Sirona, CEREC Chairside Solutions, <http://www.sirona.com/en/products/digital-dentistry/cerec-chairside-solutions>, 2012

7. R. Curtis, T. Watson, Dental biomaterials, Imaging, testing and modeling, Woodhead Publishing Limited, 2008

**APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES AND COMPUTER AIDED SYSTEMS FOR
MODELLING AND MANUFACTURING OF DENTAL RESTORATIONS**

Abstract:

Paper presents research results undertaken in the field of production engineering and its application in dental restoration modeling and fabrication specifically, with ephasis of importance of: dental impression taking, 3D digitization and modelling, rapid prototyping, technology of plactic deformation for dental restorations, application of computer aided manufacturing for restoration fabrication and restoration quality assurance.



P.B. Petrović¹, J. Hodolič², A. Vićentić³, M. Pilipović¹, Ž. Jakovljević¹, I. Danilov¹, N. Lukić¹, P. Baltić³, Dj. Vukelić², I. Budak², M. Hažistević², V. Miković¹

INTELIGENTNI ROBOTSKI SISTEMI ZA EKSTREMNO DIVERZIFIKOVANU PROIZVODNJU – TR35007

Rezime

U okviru ovog rada navode se rezultati sprovedenih istraživanja na četvorogodišnjem projektu TR35007 koji zajednički realizuju Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu i kompanija Ikarbus iz Beograda. Ovaj projekat finansijskih podržava Ministarstvo prosvete i nauke u okviru četvorogodišnjeg ciklusa istraživačkih projekata za tehnološki razvoj, od 2011. do 2014. godine. Prvo se navode istraživački okvir projekta, osnovni ciljevi koji postavljeni pred istraživački tim i organizacija projekta koja je izvedena po modelu radnih paketa. U drugom delu rada navode se osnovni rezultati ostvarenih u prvoj istraživačkoj godini, sa odgovarajućim opisom i osnovnim detaljima tehničke i organizacione prirode.

1. UVOD

Projekat TR 35007⁴, je četvorogodišnji projekat koji je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije za period 2011-2014. godina. Na ovom projektu učestvuje Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za proizvodno mašinstvo i Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, u svojstvu nosioca istraživačko-razvojnih aktivnosti (koordinator projekta je Mašinski fakultet) i kompanija IKARBUS iz Beograda, kao korisnik istraživanja za domen industrije prerade metala. U širem smislu, konzorcijum ima svoju Poslovnu interesnu grupu koju čini klaster kompanija iz oblasti koje direktno ili indirektno gravitiraju tematskim ciljevima projekta i koje su u poslovnom smislu zainteresovane za rezultate projekta kao budući korisnici, ili kao tehnološka baza za praktičnu realizaciju istraživačkih i demonstracionih aktivnosti. Poslovna interesna grupa obuhvata dva velika i tri mala i srednja preduzeća, koja sa Mašinskim fakultetom imaju formalne (konkretni ugovori o poslovnoj saradnji) i neformalne oblike saradnje. Poslovno interesnu grupu čine sledeće kompanije: Kolubara Metal, Vreoci; Goša, Simićevo; Milan Blagojević, Smederevo; FAP, Priboj; kompanija CINI iz Čačka i kompanija Mikroelektronika iz Beograda. Poslovno interesna grupa ima poseban značaj sa aspekta diseminacije i praktične implementacije rezultata istraživanja u industrijski sistem za domen industrije prerade metala.

2. SADRŽAJ ISTRAŽIVANJA I CILJEVI

Predmet istraživanja na ovom projektu su novi koncepti proizvodnih sistema za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju i izgradnja modela za njihovu primenu u domaćoj industriji.

¹ Prof. dr Petar B. Petrović, Prof. dr Miroslav Pilipović, Doc. dr Živana Jakovljević, Ivan Danilov, Nikola Lukić, Vladimir Miković, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

² Prof. dr Janko Hodolič, Doc. dr Igor Budak, Doc. dr Djordje Vukelić i Prof. dr Miodrag Hažistević Milanov, Fakultet tehničkih nauka, Dep. za proizvodno maš., Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad

³ Aleksandar Vićentić, dipl. ing., Generalni direktor, Petar Baltić, dipl. ing., Direktor proizvodnje, IKARBUS a.d., Autoput 24, 11080 Beograd

⁴ Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije kroz projekat TR35007 Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju.

Ključno svojstvo koncepta ekstremno diverzifikovane proizvodnje, odnosno personalizovane proizvodnje, jeste ekstremna fleksibilnost proizvodne opreme, čija se svojstva približavaju ili izjednačavaju onim koja čovek poseduje u okviru manuelnih sistema. U generičkom smislu, osnovni sadržaj ovakvog koncepta jeste inteligencija, koja je ugrađena u opremu i proizvodni sistem u celini [6].

Postojeće stanje kao i trendovi u stvaranju generičkih znanja iz domena veštačke inteligencije ukazuju na činjenicu da izgradnja inteligentnih proizvodnih sistema, praktično primenljivih u industrijskim uslovima, nije realna u skorijoj budućnosti. Zato se u okviru ovog projekta istražuje jedno prelazno rešenje - hibridni sistem, ostvaren kroz simbiotsku interakciju čoveka sa mašinskim sistemom. Unutar ovog koncepta robot ili druga automatska oprema, izvršava repetitivne rutinske zadatke, a čovek, koristeći svoja izuzetna senzorska svojstva i superiornu inteligenciju, obezbeđuje autonomnu funkciju sistema u realnom vremenu. Ovaj koncept se detaljno istražuje u okvirima robotske montaže i robotskog zavarivanja, pri čemu se zadatak simbiotske interakcije robota i čoveka ostvaruje kroz tutorsku funkciju čoveka i nove mehanizme prenosa znanja i veština sa čoveka na robota. Dakle, u okviru hibridnog proizvodnog sistema, roboti imaju sposobnost da uče.

Planirana istraživanja su ograničena na domen tehnologije montaže i zavarivanja, gde se kao osnovni tehnološki entitet pojavljuje manipulacioni robot, odgovarajuće mehaničke konfiguracije i konstrukcije, opremljen ekstenzivnim senzorskim sistemom, inteligentnim upravljačkim sistemom, i okružen odgovarajućom proizvodnom opremom.

Projekat je strukturiran i sastoji se iz pet radnih paketa: RP_1 - Menadžment projekta, RP_2 - Interfejs za simbiotsku spregu čovek-mašina i transfer znanja/veština na mašinski sistem, RP_3 - Virtuelni model proizvodnog procesa i planiranje tehnološkog zadatka, RP_4 - Praktična verifikacija i izgradnja demonstracionih instalacija, RP_5 - Diseminacija i transfer znanja u industrijsko okruženje i obrazovanje inženjera.

Navedeni radni paketi obuhvataju sledeće istraživačke sadržaje:

RP_2 - Interfejs za simbiotsku spregu čovek-mašina i transfer znanja/veština na mašinski sistem

- a. konceptualne osnove i razrada modela dvosmerne komunikacije čoveka i mašine i transfer znanja i veština sa čoveka na mašinu;
- b. konceptualne osnove i razrada modela sistematske akvizicije čovekovog ponašanja u razrešavanju kompleksnih situacija tokom izvršavanja postavljenog zadatka;
- c. Senzorski sistem - sila, veštačko gledanje;
- d. Sistem za obradu, fuziju i prepoznavanje senzorskih signala, posebno sistem za optičku triangulaciju strukturirane svetlosti;
- e. Konceptualne osnove i razrada modela semantičke interpretacije obrađenih senzorskih signala - svest robota o stanju okruženja u kome deluje;
- f. Eksperimentalna verifikacija na laboratorijskim instalacijama za domen tehnologije montaže:
 - Instalacija 1: montiranje zavarenih sklopova, robotsko zavarivanje, robotsko sečenje (operacije dorade zavarenog sklopa), digitalizacija geometrije zavarenog sklopa i dimenziona metrologija laserskom triangulacijom i triangulacijom strukturirane svetlosti;
 - Instalacija 2: montaža malih mehaničkih sklopova, operacije robotizovanog spajanja delova s uključenom funkcijom adaptivnog ponašanja akvizicijom generalizovanog vektora sile spajanja, uvođenje delova u proces primenom visokorezolutnih optičkih sistema na bazi triangulacije strukturirane svetlosti, dimenziona metrologija i kontrola kvaliteta (međufazna i završna), interfejs za simbiotsku spregu kolonije kooperativnih robota sa čovekom;
- g. Izgradnja konceptualnih osnova za izgradnju specijalnog haptičkog interfejsa koji omogućava fizičku spregu manipulacionog robota i čoveka, pri čemu čovek ima nadređeni status tutora i može da saopštava kretanja robotu po teleoperatorskom konceptu.

RP_3 - Virtuelni model proizvodnog procesa i planiranje tehnološkog zadatka

- a. Dogradnja funkcije robotskog simulatora u razvojno okruženje u izabrani komercijalno raspoloživi CAD paket za prostorno geometrijsko modeliranje;
- b. Dogradnja funkcije akvizicije geometrijskih informacija iz realnog okruženja u izabrani komercijalno raspoloživi CAD paket za prostorno geometrijsko modeliranje;
- c. Izgradnja interaktivnog interfejsa za vizuelizaciju odstupanja nominalnog od stvarnog stanja okruženja i generatora/simulatora izmenjenog plana izvršenja tehnološkog zadatka;
- d. Izgradnja hardverskog interfejsa za vizuelizaciju robotskog sistema u realnom vremenu i tutorsku interakciju čovek-robot u izvršenju zadatka.

RP_4 - Praktična verifikacija i izgradnja demonstracionih instalacija

- a. Izgradnja regionalnog Competence Center na Mašinskom fakultetu u Beogradu za domen inteligentnih robotskih sistema za tehnologiju montaže i zavarivanje / plazma rezanje.
- b. Demonstraciona instalacija 1 - IKARBUS hibridni sistem za robotsko zavarivanje modula nove generacije noseće strukture niskopodnih autobusa - izgradnja tehnološke ćelije koja će u završnoj fazi projekta TR35007 biti dovedena u potpuno funkcionalno stanje i dalje, kao referentna instalacija, replikovana za potrebe kompanije i kompanija domaće industrije.
- c. Demonstraciona instalacija 2 - Hibridni sistem za robotsku montažu modula sklopa izabranog elektromehaničkog proizvoda - izgradnja modularne tehnološke linije ili ćelije koja će u završnoj fazi projekta TR35007 biti dovedena u potpuno funkcionalno stanje i dalje, kao referentna instalacija, biti replikovana za potrebe kompanija domaće industrije.

RP_5 - Diseminacija i transfer znanja u industrijsko okruženje i obrazovanje inženjera

- a. Osavremenjavanje kurseva za obrazovanje mladih inženjera na Mašinskom fakultetu u Beogradu i Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, posebno kursa za Mehatronske sisteme i srodnih multidisciplinarnih kurseva;
- b. Uvođenje novih sadržaja i tematskih okvira za izradu doktorskih disertacija na doktorskim studijama Mašinskog fakulteta u Beogradu i Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu;
- c. Specijalni Workshop na temu inteligentnih robotskih sistema;
- d. Transfer tehnologije i organizacionih/funkcionalnih modela kroz uspostavljanje bliske saradnje na prostoru Evropske unije u okviru programa Evropskih tehnoloških platformi.

3. CILJEVI PROJEKTA I PREGLED OSNOVNIH REZULTATA SPROVEDENIH ISTRAŽIVANJA

U prvoj godini istraživački napori su bili fokusirani na: 1)formulaciju, identifikaciju stanja stvari i predikciju budućeg razvoja u okvirima nove proizvodne paradigme masovne personalizacije / kastomizacije, odnosno ekstremno diverzifikovane proizvodnje, uključujući i prepoznavanje osnovnih istraživačkih pravaca u onome što je u evropskom industrijskom prostoru definisano kao program Fabrike budućnosti (*Factories of Future*) [2, 3], i 2)postavka, sistem analiza i izgradnja teoretskih modela za simbiotsku spregu čovek-mašina, i transfer znanja/veština na mašinski sistem, odnosno, akvizicije čovekovog ponašanja u razrešavanju kompleksnih situacija u okviru nedovoljno struktuiranog radnog okruženja.

U cilju praktične verifikacije i provere kritičnih teoretskih modela, koncepata ili hipoteza, u okviru prve istraživačke godine napori su bili fokusirani na koncipiranje i početak izgradnje laboratorijskih instalacija u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme CMSysLab, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Redukovanje cene koštanja ostvareno je kroz pristup samogradnje, odnosno primenu postojeće opreme, projektovanje i izradu nedostajućih specijalizovanih komponenti i podсистema i nabavke gotovih komponenti i podсистema. Sopstvenim znanjem kojim je raspolagao projektni tim, izvršena je sistem integracija i dovođenje pojedinih podсистema u funkciju. Pristup samogradnje omogućava inherentnu fleksibilnost eksperimentalne opreme, koja pre svega podrazumeva mogućnost sistema da se prilagodi širokom spektru zahteva, uključujući i one koji nisu ranije prepoznati u fazi inicijalnih aktivnosti koncipiranja i projektovanja. Polazeći od prethodno navedenog pristupa, u prvoj istraživačkoj godini započeta je realizacija dve laboratorijske instalacije: 1)Laboratorijska instalacija za robotsko gledanje bazirano na laserskoj tačkastoj i linijskoj triangulaciji i superbrzoj akviziciji geometrijskog prostora baziranoj na optičkoj triangulaciji struktuirane (kudirane) svetlosti, i 2)Haptički interfejs baziran na šestokomponentnom senzoru sile za identifikaciju interakcije sa okruženjem i transfer veština na manipulacioni robot antropomorfne konfiguracije. Sve navedeno poseduje pored hardverske strukture i odgovarajuću softversku strukturu specijalizovane namene, prilagođene specifičnostima upotrebljenog hardvera i postavljenim istraživačkim zadacima.

U istraživačkom smislu, prethodno navedeni sadržaji teoretske i eksperimentalne prirode stvaraju osnovu za formiranje tematskih okvira doktorskih disertacija najmlađih članova projektnog tima.

Poseban cilj istraživanja u prvoj godini, koji će biti razrađivan i proširivan u narednim istraživačkim godinama, jeste diseminacija rezultata istraživanja, pre svega u domen industrije Srbije. Nova paradigma proizvodnih tehnologija je realnost koja više od jedne decenije egzistira u istraživačkom i industrijskom prostoru Evrope. Ovakvi sadržaji moraju da se prenesu u domaće okvire, između ostalog i u kontekstu evropskih integracionih procesa Srbije. U tom smislu, tokom prve istraživačke godine učinjeni su veliki napori na uvođenju koncepta Evropskih tehnoloških platformi, odnosno njihovog nacionalnog ekvivalenta u

industrijski prostor Srbije. Aktivnosti na projektu TR35007 su povezane sa aktivnostima koje se realizuju u okviru Akademije inženjerskih nauka Srbije, gde je tokom 2010. godine uspostavljen program Nacionalnih tehnoloških platformi Srbije, koji ima široki zahvat i prostire se kroz kompletan tehnološki prostor ekonomije Srbije. Aktivnosti u okviru realizacije ovog programa, posebno u delu razvoja proizvodnih tehnologija, odnosno oporavaka industrije Srbije i jačanja njenih tehnoloških osnova, prezentirane su javnosti kroz dva jednodnevna skupa organizovana u obliku Foruma. Predsednik organizacionog odbora oba NTPS Foruma bio je prof. Petar B. Petrović, rukovodilac projekta TR35007. Deo ovih aktivnosti saopšten je i međunarodnoj javnosti na skupu ManuFUTURE 2011 – Future European Manufacturing Technologies, koji je održan oktobra 2011. godine u Vroclavu, Poljska.

Dalje se navodi detaljniji pregled ostvarenih rezultata u okviru istraživačke 2011. godine.

3.1. Masovno personalizovana proizvodnja – tehnološki okvir i stanje stvari

Savremeni trendovi u razvoju proizvodnih tehnologija nastali pod uticajem tržišta i intenzivnog rasta u domenu informacionih tehnologija, dovode do njihove transformacije iz koncepta masovne proizvodnje u novi koncept proizvodnje po zahtevu, odnosno masovne personalizacije proizvoda. Ovim se struktura modela masovne proizvodnje: projektovanje – proizvodnja – prodaja, drastično transformiše u novu strukturu: prodaja – projektovanje – proizvodnja. U fokus poslovnih aktivnosti se postavlja kupac, odnosno tržište, a proizvodni sistem mora da poseduje takve performanse da zadovolji specifične potreba kupca kroz **ekstremnu diverzifikaciju** proizvoda. Reakcija na zahteve tržišta mora da bude brza, pri čemu proizvodni proces treba da poseduje sve attribute tehnologije masovne proizvodnje, uključujući i tehnoekonomske aspekte, uz istovremeno uvažavanje narastajućeg kompleksa zahteva/ograničenja održivog razvoja.

Promene ove vrste iz osnova menjaju proizvodne tehnologije, postavljajući pred istraživače i industriju nove izazove razvoja tehnologije sposobne da racionalno produkuje proizvode visokog kvaliteta u serijama vrlo malog obima, uključujući pojedinačnu i unikatnu proizvodnju. Proizvodni sistem komplementaran sa zahtevima nove proizvodne paradigme, po svojim svojstvima fleksibilnosti, odnosno, sposobnosti prilagođavanja promenama (planiranim i neplaniranim), mora da se približi i izjednači sa svojstvima manuelnih sistema, što obuhvata: 1) sposobnost da se brzo prilagodi naglim promenama proizvodnih zadataka (ekstremna diverzifikacija istovremeno vodi ka ekstremno malim serijama, koje se spuštaju ka pojedinačnoj i unikatnoj proizvodnji), uključujući i reagovanje u realnom vremenu na širok spektar poremećaja; 2) sposobnost rekonfiguracije na svim organizacionim nivoima i tehničkim podsystemima, 3) svojstvo kompleksne informacione integracije funkcionalnih podstruktura, i 4) sposobnost ekstenzivne interaktivnosti sa okruženjem i visoka autonomnost koja obuhvata i sposobnost fuzije senzorskih informacija, učenja kroz generalizaciju ponašanja sa inherentnim mehanizmom za prenos znanja i veština sa čoveka na mašinu. Proizvodni sistem ove vrste kao svoje osnovno obeležje ima inteligenciju, i zato je koncept ekstremno diverzifikovane proizvodnje u suštini koncept inteligentnih proizvodnih sistema, a njegova praktična realizacija je u najvećoj meri uslovljena merom kojom su svojstva inteligentnog ponašanja ugrađena u proizvodni sistem u celini i/ili njegove komponente [6].

Postojeće stanje kao i trendovi u stvaranju generičkih znanja iz domena veštačke inteligencije ukazuju na činjenicu da izgradnja inteligentnih robotskih sistema koji bi bili praktično primenljivi u industrijskim uslovima nije realna u skorijoj budućnosti. Zato se rešenje mora da potraži kroz izgradnju hibridnih sistema, odnosno sistema koji će sadržati radikalno nove oblike interakcije čoveka sa robotom i njegovim okruženjem, obezbeđujući kritične sadržaje kao što su: sposobnost kompleksne dvosmerne interakcije sa nepoznatim okruženjem, donošenje odluka i sinteza rešenja u realnom vremenu, i sposobnost učenja bez i sa nadzorom kroz različite tehnike prepoznavanja oblika i mehanizme generalizacije. Pored navedenog, ovakav hibridni sistem mora da ima svojstvo transfera znanja i veština sa čovaka na mašinu, što podrazumeva da je mašina komunikativna i sposobna da se usavršava, a da čovek, sa funkcijom tutora i asistenta u jednom ovakvom kontekstu, poseduje mehanizme za prenos znanja i veština, korišćenjem odgovarajućeg interfejsa. Ovakav scenario razvoja novih tehnoloških osnova kao odgovora na zahteve koje nameće praktična implementacije koncepta ekstremno diverzifikovane/personalizovane proizvodnje je po svojoj svojoj prirodi evolutivnog karaktera i zato realističan. On je u osnovi prihvatljiv za industriju, jer ne zahteva radikalne promene u postojećoj industrijskoj praksi i sadrži inherentne mehanizme za upravljanje rizikom.

Proizvodna paradigma ekstremno diverzifikovane, odnosno kastomizovane proizvodnje u skorijoj budućnosti evoluiraće u novu paradigmu, paradigmu održive proizvodnje. Pritisak globalnih megatrendova povezanih sa klimatskim promenama, ograničenim energetskim i materijalnim resursima, u industrijskom kontekstu postaje sve izraženiji i sa tim u vezi postoje predviđanja da će u prvoj polovini dvadesetprvog veka (najverovatnije već tokom tridesetih godina, a čak možda i jednu deceniju ranije), biti zamenjena proizvodnom paradigmom održive proizvodnje, u kojoj će interakcija proizvodnih procesa i okruženja

postati dominantna, odnosno opredeljujuća u odnosu na interakciju proizvodnih procesa i tržišta koja je sada aktuelna. Konkretna nagoveštaj ovakvog razvoja stvari je već sada prisutna fraza, koja se provlači kroz veliki broj političkih dokumenata u delu strategije industrijskog razvoja: *'As much as possible Clean, Lean and Green manufacturing'*.

Za nove tehnološke osnove proizvodnih sistema, posmatrano u evropskim i globalnim okvirima, značajne su takozvane ključne generičke tehnologije (*Key Enabling Technologies - KETs*) i nove proizvodne tehnologije (*Advanced Manufacturing Technologies - AMT*).

Ključne generičke tehnologije su one tehnologije koje poseduju veliki potencijal za radikalne promene u životnom kontekstu. To su tehnološki diskontinuiteti, koji dovode do skokovitog tehničkog progressa sa velikim uticajem na industrijski i ekonomski sistem u celini (na primer pronazak tehnologije parne mašine ili tehnologija poluprovodnika). U savremenom kontekstu, definisano je pet ključnih generičkih tehnologija od strateškog značaja za domen proizvodnih tehnologija: nanotehnologija, industrijska biotehnologija, novi materijali, mikro i nanoelektronika (uključujući poluprovodnike) i fotonika. U najnovijim dokumentima EU, kao ključna generička tehnologija pojavljuju se i proizvodne tehnologije (*manufacturing technologies*). U ovom kontekstu posebno je značajan program Fabrike budućnosti (*Factories of Future – FoF*) koji je inicirala Evropska tehnološka platforma *ManuFuture – Future Manufacturing technologies of Europe*, kao odziv na ekonomsku krizu 2008. godine i sa tim u vezi reakcije Evropske komisije u delu iniciranja i podsticaja širokog korpusa aktivnosti privatnog i javnog partnerstva, u čiju realizaciju je uključena industrija i naučno-istraživačka zajednica. Za operacionalizaciju programa FoF formirana je specijalna asocijacija *EFFRA - European Factories of the Future Research Association*, locirana u Briselu, koja operativno sprovodi FoF program i u tom kontekstu generiše dokumente, relevantne za razvoj evropskog industrijskog, istraživačkog i obrazovnog prostora. U konceptualnom smislu, FoF program nije novost za Srbiju. Sličan program je razvijan u Srbiji osamdesetih godina prošlog veka. Ovaj program treba obnoviti i postaviti ga u novi kontekst.

Pored prethodno navedenih ključnih generičkih tehnologija - *KETs* [1], na razvoj proizvodnog sistema ključni uticaj imaju i proizvodne informacione tehnologije. Osnovi izazovi sa kojima se suočavaju industrijske kompanije odnose se na ubrzani rast kompleksnosti njihovih proizvodnih procesa i lanaca snabdevanja, cenovnih pritisaka, rasta očekivanja kupaca za kvalitetom i ekstremnom varijantnošću proizvoda, i održivosti proizvodnog sistema u odnosu na nove zahteve tržišta. U okviru FoF programa i FP7 okvirnog programa, u delu koji se odnosi na informacione i komunikacione tehnologije, definišu se tri osnovna strateška programa koji se direktno odnose na proizvodne tehnologije i razvoj industrijskog sistema[2]:

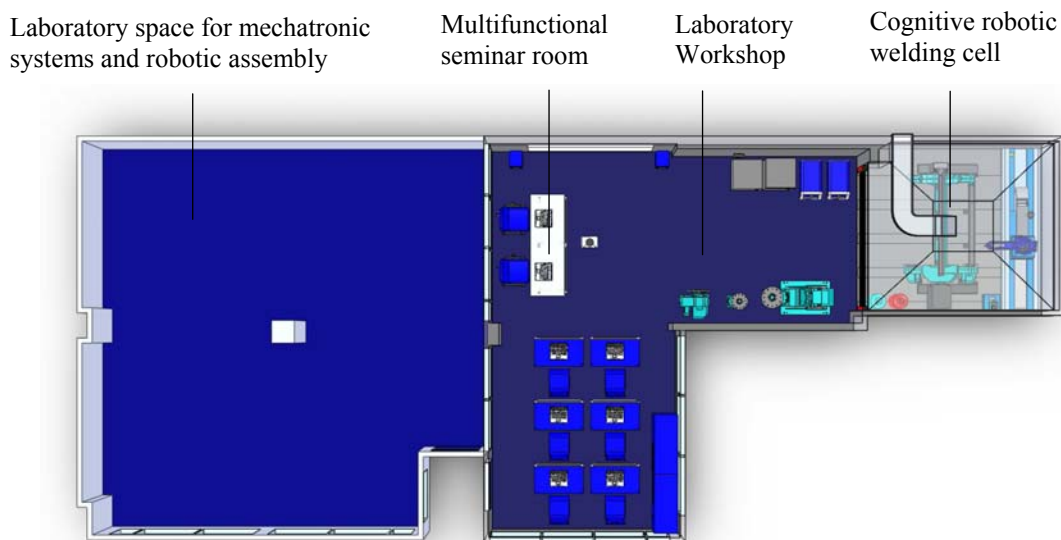
- Program PAMETNE FABRIKE (*Smart Factories*) – agilna proizvodnja i personalizacija, uključujući: automatsko upravljanje proizvodnim procesima, planiranje, simulaciju i optimizaciju, robotika, i alati za održivi razvoj;
- Program VIRTUELNE FABRIKE (*Virtual Factories*) – stvaranje nove vrednosti u okvirima globalno umreženog poslovanja, uključujući: menadžment proizvod-usluga, i interakcije i menadžment distribuiranih proizvodnih resursa i proizvodnih celina;
- Program DIGITALNE FABRIKE (*Digital Factories*) – bolje razumevanje i projektovanje proizvodnih procesa i proizvodnih sistema za efektivnije upravljanje životnim ciklusom proizvoda, uključujući: simulaciju, modeliranje, i druge ICT bazirane tehnike, koje zahvataju kompletan životni ciklus proizvoda, od koncepta, proizvodnje pa do održavanja i demontaže/recikliranja.

Za razvoj proizvodnih tehnologija, pored ICT, kao posebno značajne izdvajaju se: industrijska automatizacija, robotika, mehatronske tehnologije i kognitivni sistemi. Samo za oblast istraživanja koja se odnosi na kognitivnu robotiku Evropska komisija je opredelila 536 miliona EUR za petogodišnji period 2007. – 2012. godine, kao ključni sadržaj za razvoj nove proizvodne paradigme.

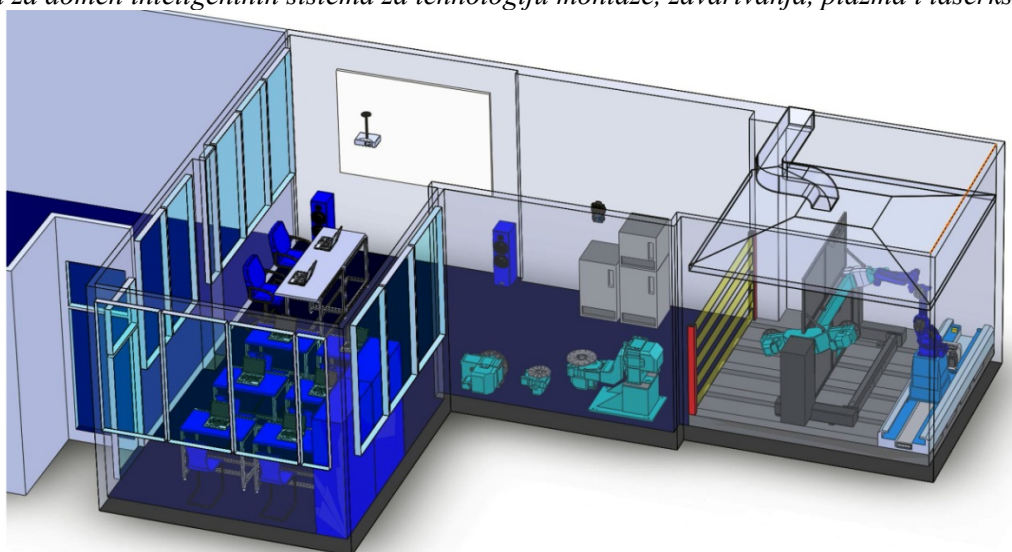
Sledeći postavljene istraživačke okvire projekta TR35007 i sledeći okvire NTPS Programa, pristupilo se pripremnim radnjama na izgradnji regionalnog Competence Center na Mašinskom fakultetu u Beogradu za domen inteligentnih robotskih sistema za tehnologiju montaže i zavarivanje/plazma i lasersko sečenje. U tom smislu formiran je konzorcijum poslovno zainteresovanih domaćih kompanija koji čine: Ikarbus a.d. (Zemun), Kolubara Metal (Vreoci), Goša a.d. (Simićevo), Milan Blagojević (Smederevo), CINI (Čačak), Mikroelektronika (Beograd), kao i inostrane kompanije: MILLER USA (tehnologija zvarivanja), Yaskawa (Japan), Phoenix Contact (Nemačka), Henkel LOCTITE (Nemačka). Predviđeno je da se iskoristi postojeća oprema na Mašinskom fakultetu, oprema koja će biti obezbeđena na projektu TR35007, oprema

koju doniraju inostrane kompanije članice konzorcijuma, odnosno poslovno interesne grupe projekta TR35007, i predviđeno je da se izvrši adaptacija postojećeg prostora na Mašinskom fakultetu). Na slikama 1 i 2 prikazan je budući izgled ovog prostora.

Smart Robotic Systems for Customized Manufacturing Regional Competence Center



Slika 1: Osnova Regional Competence Center koji će biti izgrađen na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu za domen inteligentnih sistema za tehnologiju montaže, zavarivanja, plazma i laserskog rezanja.



Slika 2: Prostorni prikaz Regional Competence Center sa detaljima seminar sale i robotskom ćelijom u punoj konfiguraciji za demonstraciju koncepta hibridnog sistema baziranog na kolaborativnom odnosu čovek-mašina.

3.2 Konceptualne osnove i razrada modela dvosmerne komunikacije čoveka i mašine i transfer znanja i veština sa čoveka na mašinu

Ovo je jedna od ključnih istraživačkih celina projekta TR35007, a pripada radnom paketu TR35007-RP_2: Interfejs za simbiotsku spregu čovek-mašina i transfer znanja/veština na mašinski sistem.

U okviru ove istraživačke aktivnosti sprovedena je sistemska identifikacija varijantnih koncepata za dvosmernu komunikaciju čoveka i robota u cilju transfera čovekovog znanja na mašinski sistem u okviru izvođenja kompleksnih tehnoloških operacija, kao što je spajanje delova u robotskoj montaži ili formiranje šava u okviru sistema za robotsko elektrolučno zavarivanje [4, 5, 8]. U okviru prve istraživačke godine,

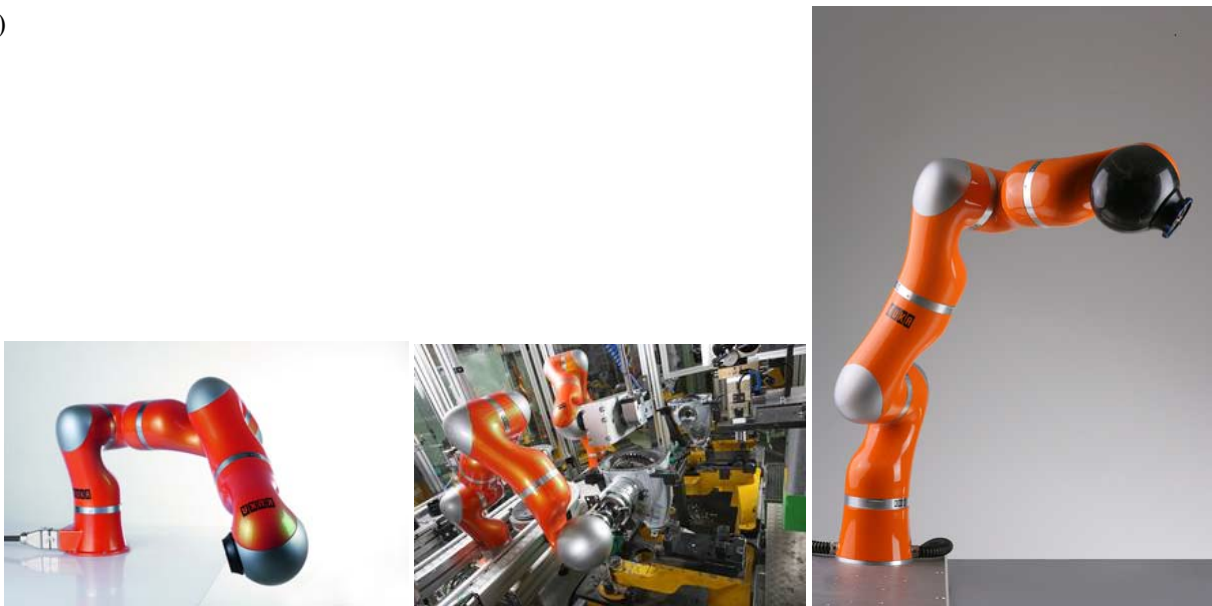
fokus je stavljen na robotsku montažu i kolaborativni rad čoveka i robota u okviru jednog hibridnog sistema, koji po svojim performansama može da odgovori aktuelnim tehnološkim zahtevima koji se postavljaju kroz novu paradigmu ekstremno diverzifikovane proizvodnje. U ovim aktivnostima najveća pažnja posvećena je jednom novom konceptu robotskih sistema koji je prepoznat kao najviši istraživački prioritet u oblasti robotike, a odnosi se na robote specifične inovativne konstrukcije, koji zajednički nose naziv **humanoidni roboti**. U pitanju je stari termin kome se kroz ova istraživanja daje novo značenje, polazeći od toga da se inicijalna korelacija između čovekove ruke ili ruku, i geometrijsko-kinematske konfiguracije, sada proširuje na mnogo bitniji aspekt, a to je korelacija u dinamičkom, upravljačkom i funkcionalnom smislu. Prema novoj definiciji humanoidnog antropomornog robota, to je robot koji je sličan čoveku pre svega u kontekstu ponašanja. Pokazuje se da se konvencionalna konstrukcija industrijskog robota ne može na adekvatan način primeniti za kolaborativni rad čoveka i mašine u okviru hibridnih tehnoloških sistema pogodnih za praktičnu implementaciju koncepta ekstremno diverzifikovane proizvodnje. Industrijski robot i čovek mogu da rade jedan pored drugog, ali nikada zajedno, deleći isti radni prostor i međusobno saradujući u izvršavanju zadatka na simbiotskoj osnovi. Industrijski roboti su isuviše glomazne mašine da bi mogle da postanu inherentno bezopasne za čoveka. Problem je u tome što su industrijski roboti građeni po konceptu mašina alatki, odnosno oni su projektovani da budu precizni i brzi, što dalje implicira visoku krutost mehaničke strukture i upravljačkog sistema, a to dalje znači veliku masu robota. Tipičan industrijski robot ima odnos sopstvene mase i mase kojom može da manipuliše 10:1 pa do 100:1 (u izvesnim situacijama i više). Humanoidni industrijski robot, odnosno industrijski humanoid je onaj robot kod koga je ovaj odnos blizak jediničnom! Ovakav robot tada može da bude dovoljno dinamična struktura koja će posedovati svojstvo pune interaktivnosti sa okruženjem, a njegovo upravljanje će iz tipičnog PID linearnog koncepta moći da bude prevedeno u upravljanje na bazi modela (robota i okruženja), sa potpunom kontrolom impedanse ili admitanse robota, zavisno od zadatka u kome se on nalazi.

Sprovedenom sistem analizom identifikovana su dva robota ovakvih performansi koji postoje samo u okviru istraživačke zajednice i koji su rezultat najnovijih istraživačkih aktivnosti. To su roboti: 1) FRIDA, koji je u razvojnom smislu nastao u okviru FP7 projekta ROZETTA, a kao industrijski prototip realizovan od strane kompanije ABB za potrebe praktične verifikacije koncepta, i 2) LWR robot kompanije KUKA, koji je nastao kroz evoluciju inicijalnog razvoja sprovedenog od strane istraživačkog konzorcijuma predvođenog od strane DLR - Institute of Robotics and Mechatronics, koji je evolutivno razvijan dugi niz godina pod nazivom DLR Light Weight Robot (LWR). Na slici 3 prikazani su ovi roboti. Oba robota su kinematski redundantna, sa specijalnim integrisanim senzorsko-aktuacionim sistemima u svakom zglobo. Primena novih materijala omogućila je da roboti poseduju gotovo jedinični odnos sopstvene mase i nosivosti, a koncept popustljivog upravljanja na bazi upravljanja mehaničkom impedansom čini ih idealnim za eksperimentalne radnje u domenu uspostavljanja mehanizama za transfer znanja i veština sa čoveka na mašinu.

a)



b)



Slika 3: Koncept humanoidnih robota za kolaborativni rad čovke-mašina na hibridnim robotskim linijama za montažu: a)ABB FRIDA i b)KUKA LWR.

Navedeni primeri humanoidnih robota poseduju bitno drugačije osobine u odnosu na klasu industrijskih robota koji se danas masovno primenjuju na proizvodnim linijama u industriji. Ove osobine čine da humanoidni roboti konačno postaju platforma na kojoj će moći da bude izgrađen univerzalni tehnološki entitet za montažu (analogija sa strugom koji je univerzalni tehnološki entitet za izradu cilindričnih delova metodom odvajanja strugotine). Ovi roboti su istinski interaktivni sa okruženjem i poseduju mogućnost pune kontrole sopstvene impedanse ili admitanse, što stvara odličnu podlogu za dalju praktičnu implementaciju različitih strategija inteligentnog ponašanja u okviru hibridnog tehnološkog sistema za montažu, i pre svega proaktivnog pristupa u rešavanju suštinskog problema/fenomena procesa montaže, a to je kompenzacija geometrijske nesavršenosti objekata koji se spajaju i nesavršenosti okruženja u kome se ovaj proces izvodi. U istraživačkom smislu, industrijski humanoidi će biti u najužem fokusu

projekta TR35007, a jedan od mladih istraživača će težište u svojoj doktorskoj tezi imati upravo na nekom od aspekata projektovanja ili primene industrijskih humanoida u okviru tehnologije robotske montaže.

3.3. Transfer znanja/veština na mašinski sistem - Senzorski sistem - interakcija sa okruženjem preko generalizovanog vektora sile

Ovaj rezultat ostvaren je kroz aktivnosti na radnom paketu TR35007-RP_2: Interfejs za simbiotsku spregu čovek-mašina i transfer znanja/veština na mašinski sistem.

U okviru ove istraživačke aktivnosti studiran je fenomen spajanja delova u tehnologiji robotske montaže sa ciljem transfera neformalizovanih znanja i veština kojima raspolaže čovek na robotski sistem. Ključni problem u tehnologiji montaže jeste geometrijska nesavršenost, koja nastaje kao posledica: nesavršenosti geometrije objekata koji se spajaju, nesavršenosti pozicionog sistema (pribor i alati kojima se izvode operacije montaže), i inherentne nesavršenosti geometrije i upravljanja robota koji izvodi operaciju montaže. Problem je u tome što su geometrijske nesavršenosti veće od zazora koji postoji kod objekata koji se spajaju, što dalje dovodi do različitih kolizionih stanja, od kojih je većina takva da proces spajanja čini neuspešnim. Trivijalni pristup u rešavanju ovog problema povećavanjem stepena tačnosti ukupnog sistema, uključujući i intervencije na tolerancijskim poljima objekata koji se spajaju, je neodrživ u kontekstu ekstremno diverzifikovane proizvodnje. Realno upotrebljiv pristup jeste onaj koji koristi čovek kada izvodi operacije montaže, a to je sposobnost za aktivnu kompenzaciju nesavršenosti korišćenjem ekstenzivne senzorske informacije i korišćenjem svojih kognitivnih sposobnosti kojima u realnom vremenu sintetiše optimalne strategije za rešavanje prepoznatog problema, a zatim i za njihovu operacionalizaciju na nivou detalja. Ključna sposobnost ovog sistema je dakle sposobnost prepoznavanja oblika sadržanih u senzorskim informacijama i zatim sposobnost sinteze optimalnog plana na bazi odgovarajućeg mehanizma za donošenje odluka.

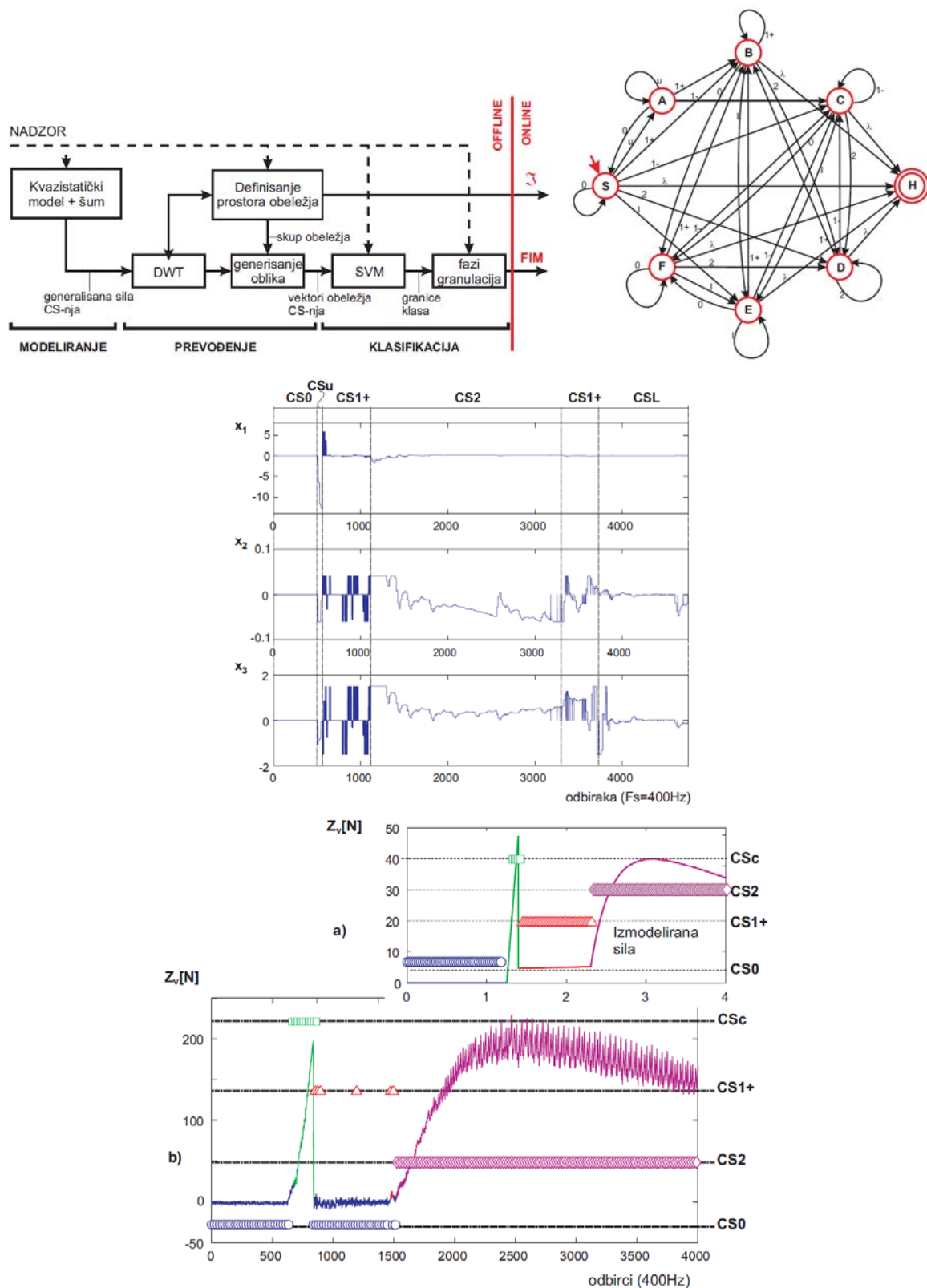
U prvoj istraživačkoj godini, detaljno je razrađivana problematika prepoznavanja karakterističnih kontaktnih stanja objekata koji se spajaju i prepoznavanje odgovarajućih strategija za sintezu kolizione trajektorije koja će izbeći katastrofalna stanja, odnosno neregularnosti koja nužno zaustavljaju proces spajanja. Kao rezultat ovih istraživačkih aktivnosti, razvijena je fazidinamička formalna struktura u obliku fazi konačnog automata koja sadrži ekstrahovana znanja izvedena iz aproksimativnih analitičkih modela, koji imitiraju ponašanje čoveka u izvođenju zadatka spajanja.

U metodološkom smislu korišćena je moderna matematička aparatura za obradu vremenskih serija na bazi diskretne vejtlet transforacije, teorija fazi skupova i aproksimativnog zaključivanja, formalno rigorozna teorija optimalne particije prostora stanja na bazi nosećih vektora, i klasična teorija konačnih automata (akceptor stanja). Na slici 4 naveden je koncept razvijene inferentne mašine i primer praktične verifikacije izvedene na razvijenoj eksperimentalnoj instalaciji za akviziciju vektora generalizovane sile robotskog cilindričnog spajanja.

3.4. Projektovanje i realizacija demonstracione instalacije

Ovaj rezultat ostvaren je kroz aktivnosti koje pripadaju radnom paketu TR35007-RP_4 - Praktična verifikacija i izgradnja demonstracionih instalacija.

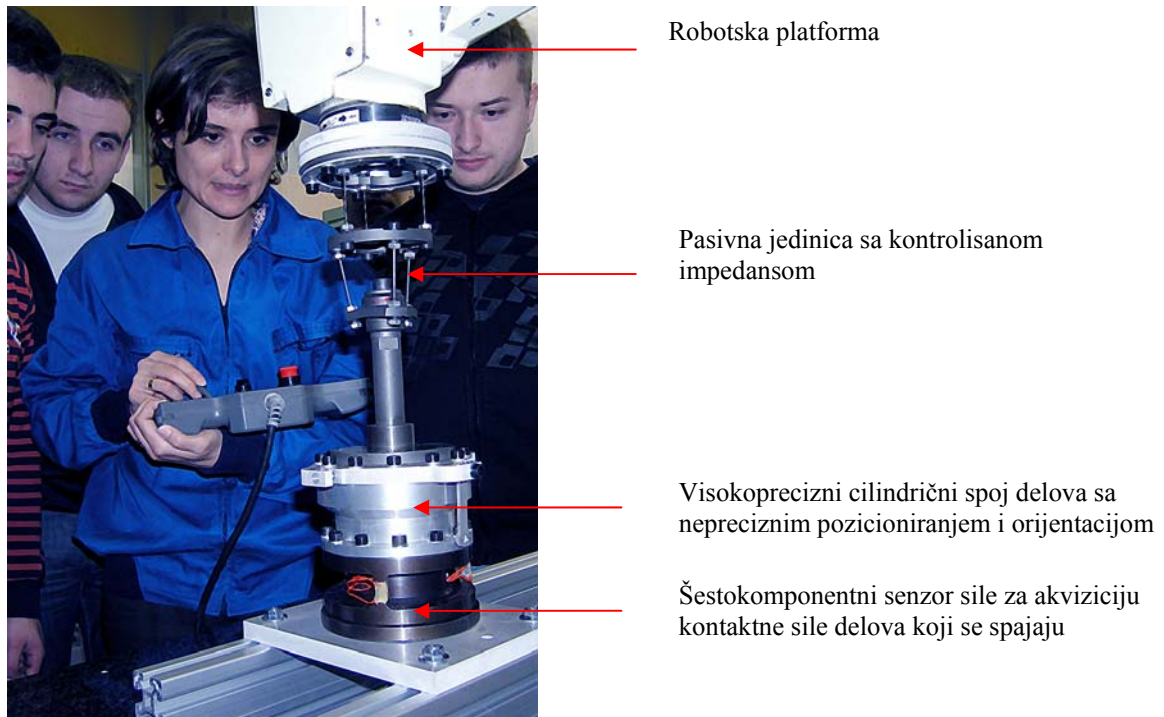
Za potrebe praktične provere postavljenih modela interakcije čoveka i robota u izvršavanju kompleksnih zadataka predviđena je izgradnja namenskih eksperimentalnih instalacija laboratorijskog tipa u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta u Beogradu. Za domen tehnologije montaže i upravljanja ograničenim kretanjem robota, u prvoj godini istraživačke aktivnosti su bile fokusirane na izgradnju jednog sistema za akviziciju vektora generalizovane sile. Samogradnjom, koja je zbog ograničenih sredstava bila bazirana na postojećoj opremi i njenoj rekompoziciji, konfigurisana je instalacija koja se sastoji iz industrijskog robota, specijalne popustljive jedinice za pasivnu kontrolu mehaničke impedanse sistema, i specijalnog višekanalnog senzora sile, opremljenog odgovarajućim akvizicionim sistemom. Ključne komponente ovog sistema su popustljiva jedinica i senzor sile.



Slika 4: Koncept inferentne mašine za sistemsku akviziciju znanja i veština koje čovek koristi u rešavanju kompleksnih tehnoloških situacija u zadacima robotskog spajanja nedeformabilnih geometrijski komplementarnih cilindričnih objekata visoke krutosti i preciznosti spoja [4, 5].

Obe komponente su realizovane samogradnjom. Popustljiva jedinica je projektovana tako da poseduje specifičnu impedansu koja obezbeđuje mehaničku izotropnost i sposobnost projektovanja tačke izotropnosti izvan geometrijskih okvira sopstvene konstrukcije. Sensor sile poseduje mogućnost simultanog registrovanja 6 kanala, odnosno 3 ortogonalne komponente sile i tri ortogonalne komponente momenta. Precizno rasporezanje pojedinih kanala je vrlo delikatan inženjerski zadatak. Ovaj zadatak je rešen primenom inovativnog koncepta baziranog na softverskom rasporezanju. Suština ovog pristupa je u tome da se umesto

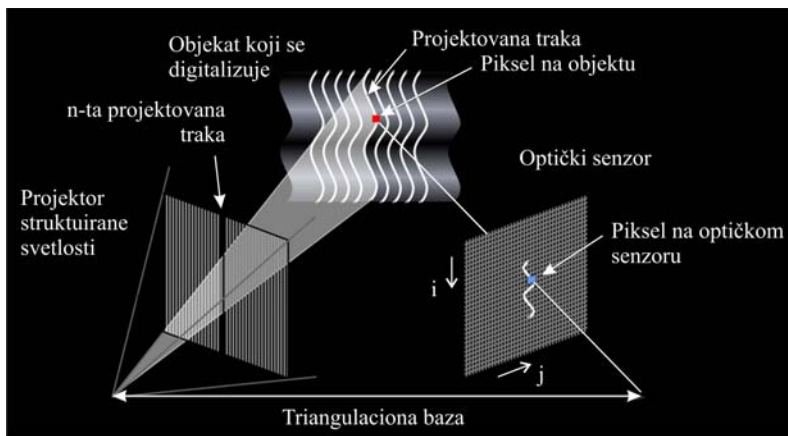
mehaničkog i/ili električnog rasprezanja koje kod višekanalnih senzora dovodi do ekstremne tehničke kompleksnosti, dozvoli potpuna sprega, odnosno mešanje pojedinih kanala. Ovim se omogućava vrlo jednostavno rešenje mehanike i pretvaračkog bloka, koji se sastoje iz jednog monolitnog tela, na koji je ugrađeno šest pretvaračkih mostova mernih traka odgovarajuće konfiguracije. Rasprezanje se ostvaruje množenjem generisanog izlaza odgovarajućom transformacionom matricom. Transformaciona matrica se dobija odgovarajućom procedurom, čija je suština da se senzorski sistem pobuđuje poznatim skupom linearno nezavisnih vektora generalisane sile. Konfiguracija ove eksperimentalne instalacije prikazana je na slici 5.



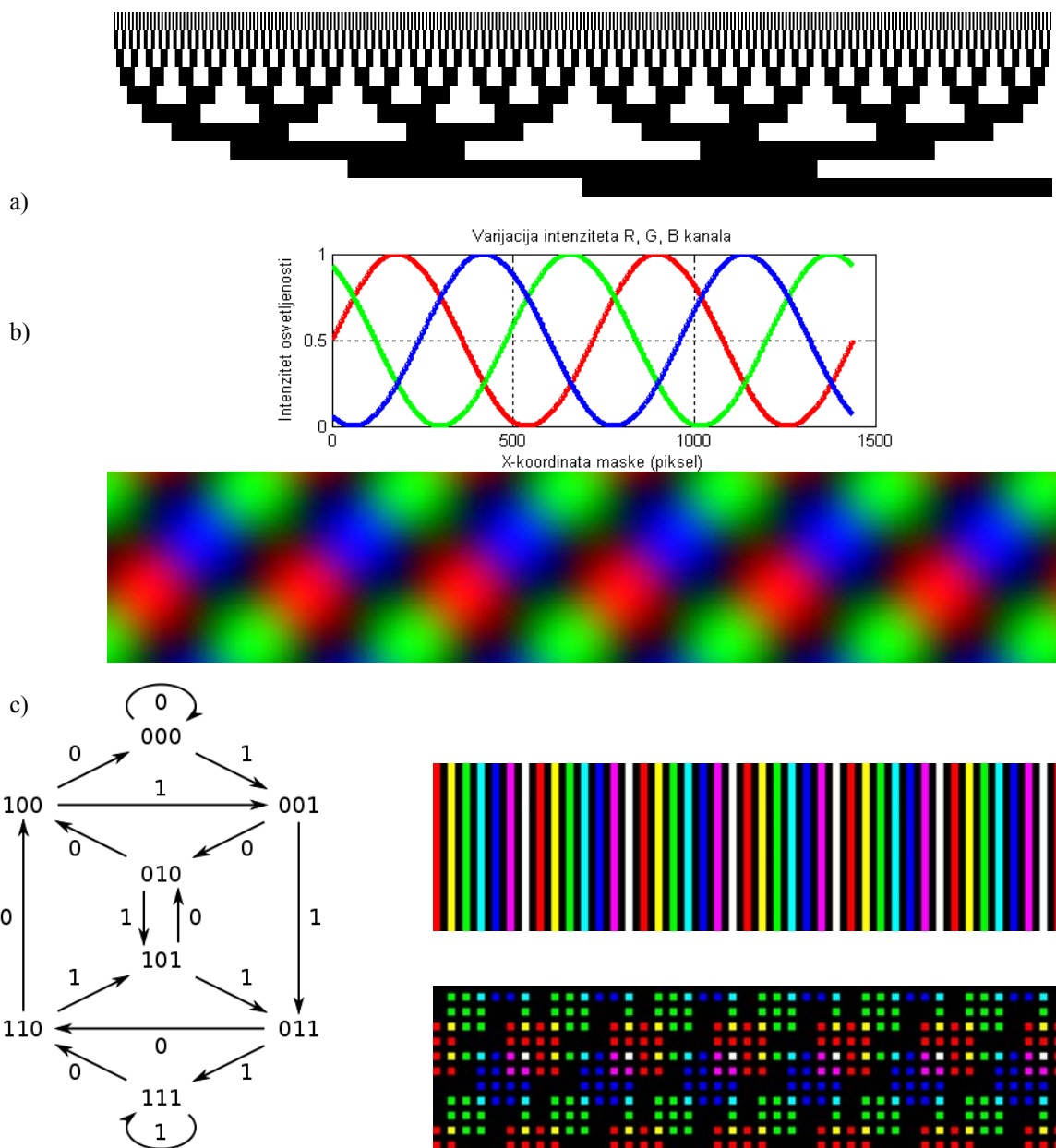
Slika 5: Fotografije eksperimentalne instalacije za akviziciju sile u zadacima robotske montaže.

Za ove potrebe razvijeno je specijalno softversko rešenje koje obezbeđuje obradu signala koje generiše pretvarački blok i tako ekstrahuje informaciju o vektoru generalisane sile koji nastaje u interakciji robota i okruženja u zadatku spajanja. Nedostatak ovog rešenja je u tome što se proces obrade generisanih signala ostvaruje naknadno, dakle, ne u toku procesa generisanja senzorskih signala. U narednoj istraživačkoj godini ovaj nedostatak će biti razrešen kroz izgradnju specijalizovanog elektronskog sklopa baziranog na primeni mikroprocesora integrisanog u mehaničku strukturu senzora. Ovaj sklop će posedovati mogućnost dvosmerne digitalne komunikacije, čime će postojeće rešenje biti prevedeno u visokovredan sistem – inteligentni senzor sile u formi mikroelektromehaničkog sklopa, sposoban da komunicira sa robotom i čovekom tokom izvršenja postavljenog zadatka.

Za potrebe praktične provere postavljenih modela interakcije čoveka i robota u izvršavanju kompleksnih zadataka predviđena je izgradnja namenskih eksperimentalnih instalacija laboratorijskog tipa u okviru Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta u Beogradu. Za domen tehnologije montaže i robotskog zavarivanja, u prvoj godini istraživačke aktivnosti su bile fokusirane na izgradnju jednog sistema za veštačko gledanje. Kao i u prethodnom slučaju, primenjen je pristup samogradnje zbog ograničenih finansijskih resursa. Razvijen je i realizovan jedan merni sto koji je opremljen laserskim i programabilnim izvorom svetlosti, metrološkim obrtnim stolom, i senzorskim sistemom za akviziciju odraza emitovanog svetlosnog signala.



Slika 6: Princip optičke triangulacije strukturiranom svetlošću.



Slika 7: Varijantni oblici kodiranja svetlosti. Monohromatsko kodiranje Grejovim cikličnim kodom (a). Kodiranje primenom manipulacije i superpozicije RGB kanala: a) manipulacija faznim pomakom i iz toga generisana ortogonalno superponirana mapa; b) slobodna manipulacija faznim pomakom i intenzitetom - mapa kodirana na bazi modifikovanih De Bruijn-ovih sekvenci u linijskoj i ortogonalnoj formi.

U istraživačkom smislu, posebno je značajan koncept koji je baziran na kodiranoj svetlosti. Kod ovog koncepta sistema veštačkog gledanja, svetlosni izvor emituje svetlost koja u sebi poseduje poznatu kodiranu strukturu. Na scenu koja se posmatra usmerava se ovakva svetlost, koja u opštem slučaju obuhvata jednu sekvencu proizvoljne dužine različito kodiranih dvodimenzionalnih mapa. Svetlost se odgovarajućim kolimacionim optičkim sistemom fokusira na objekat koji se digitalizuje. Svetlost se zatim difuzno reflektuje i jedan deo te svetlosti se fokusira na optoelektronski sklop senzora koji vrši njegovu akviziciju. Zbog interakcije sa neuniformnim prostornim objektima, odraz sadrži izobličeni kodirani signal. Primenom triangulacionog principa i algoritama za ekstrakciju i prepoznavanje izobličenja originalnog kodiranog signala, moguće je postići vrlo robusnu digitalizaciju prostornog okruženja. U poređenju sa tačkastim ili linijskim izvorom svetlosti, ovakav sistem ima sposobnost ekstremno brze triangulacije. Na slikama 6 i 7 dat je koncept sistema i varijantni oblici kodiranja monohromatskom svetlošću i svetlošću sa punim frekventnim spektrom (vidljiv deo spektra).

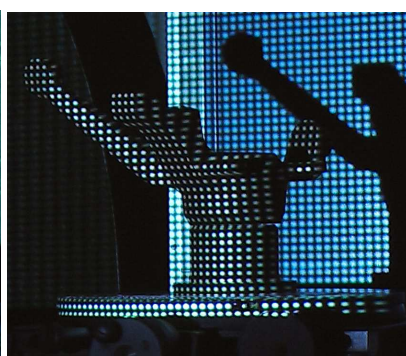
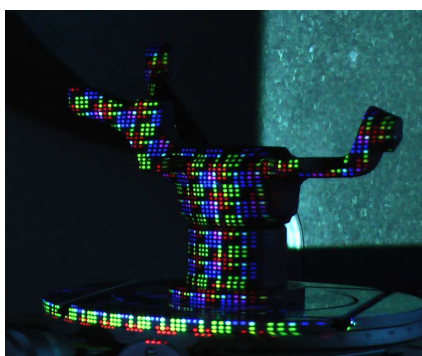
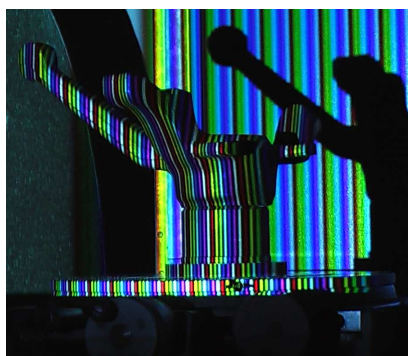
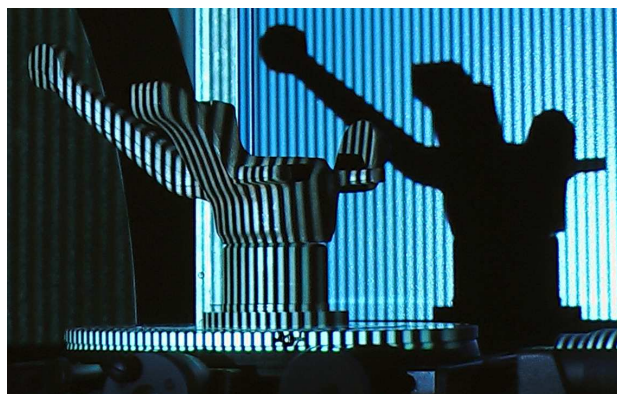
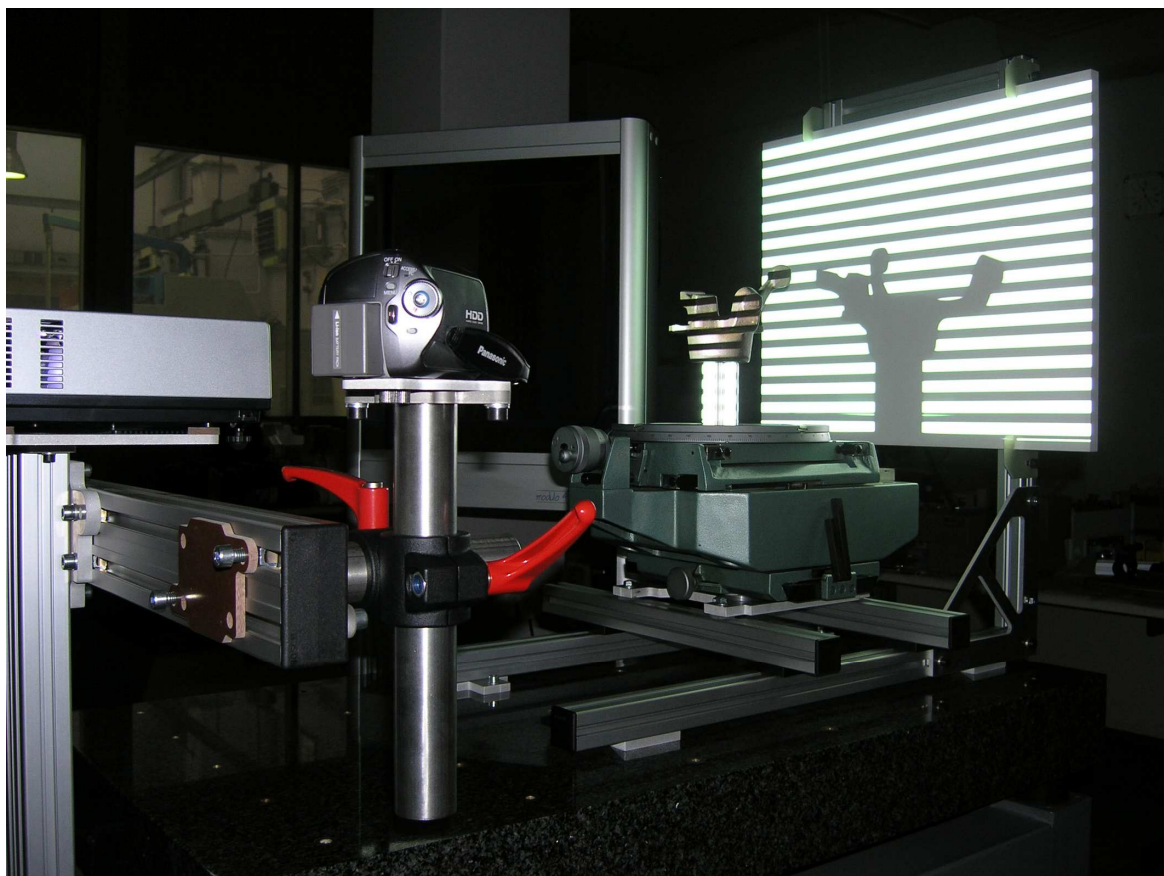
Eksperimentalna instalacija je laboratorijskog tipa i stacionarna. Njena prevashodna namena je precizna verifikacija koncepta samog po sebi i razvoja odgovarajućih algoritama uz mogućnost provere pod precizno kontrolisanim uslovima. Na slici 8 je prikazana fotografija ove instalacije. U narednoj godini, ova instalacija će biti dalje unapređivana i započete aktivnosti razvoja funkcionalnog ekvivalenta koji će biti minijaturnih dimenzija i koji će moći da bude postavljen na vrh industrijskog robota. Ovakav robot će biti testiran na zadacima elektrolučnog zavarivanja, gde je problem geometrijske nesavršenosti sklopova koji se zavaruju drastično izražen i ne može se uspešno realizovati bez kvalitetne senzorske povratne sprege.

3.5. Virtuelni model proizvodnog procesa i planiranje tehnološkog zadatka

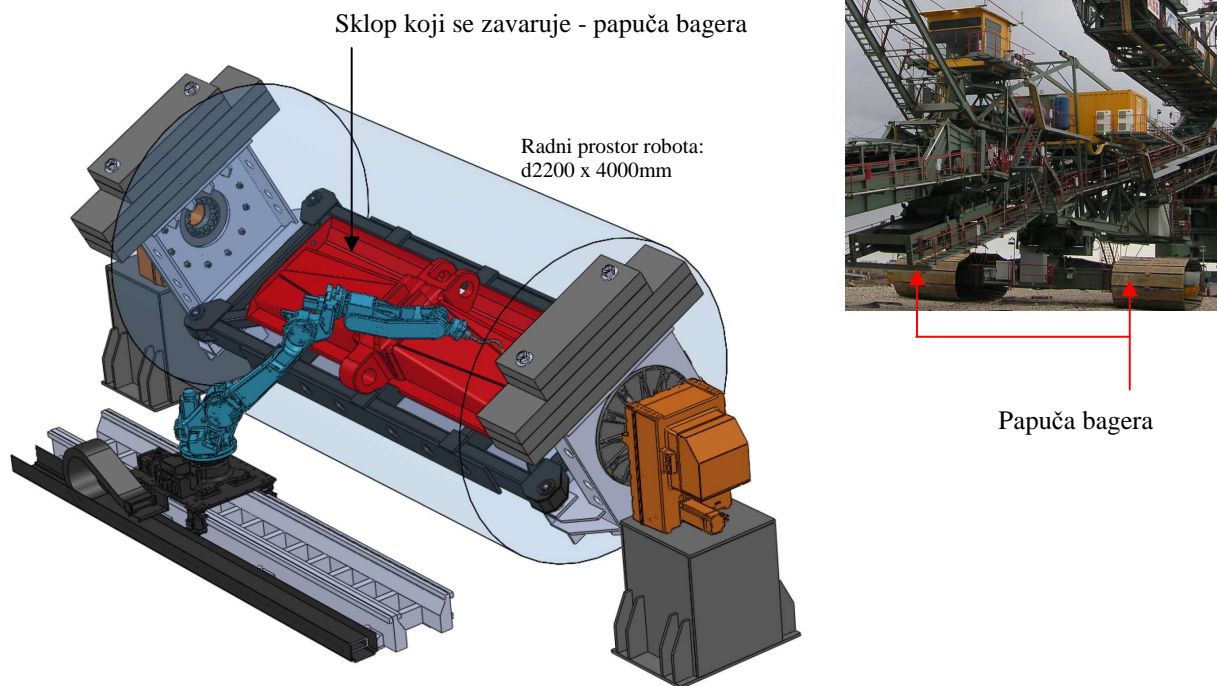
Ova aktivnost pripada radnom paketu TR35007-RP_3 - Virtuelni model proizvodnog procesa i planiranje tehnološkog zadatka. U okviru ove aktivnosti istraživanja su bila usmerena u pravcu izgradnje odgovarajućeg virtuelnog okruženja u okviru kojeg će pored uobičajenih sadržaja: geometrijski model proizvodnih entiteta u okviru jednog proizvodnog sistema (na primer, tehnološka ćelija za robotsko zavarivanje) i kinematski model procesnih aktivnosti opreme, biti ugrađena još jedna dodatna komponenta, a to je modul za identifikaciju stanja izabranog tehnološkog entiteta na bazi senzorskih informacija koje generiše realni sistem [9]. Ovaj modul ne treba izjednačiti sa funkcijom monitoringa i vizuelizacije koja se sreće u konvencionalnim SCADA sistemima. Ovaj modul obavlja vrlo značajnu aktivnost, koja prethodi i bez koje nije moguće sprovesti sintezu radnog zadatka u realnim uslovima za slučaj rada modeliranog proizvodnog sistema u nedovoljno struktuiranom i nedovoljno poznatom okruženju (nekompletni informacioni sadržaj). Na primer, kod robotskog zavarivanja, nominalni radni zadatak u opštem slučaju je direktno neprimenljiv, jer se stanje geometrije predmontiranog sklopa koji se zavaruje bitno razlikuje, na mikro i makro nivou, od nominala, koji je definisan geometrijskim modelom.

U prvoj etapi realizacije ovog zadatka, za konkretne i pažljivo izabrane primere iz proizvodnje u kompanijama iz poslovno interesne grupe projekta TR35007, generisani su kompletni virtuelni modeli geometrije i procesa montaže, odnosno finalne faze zavarivanja predmontiranog sklopa. Ovi modeli su razvijani u okviru CAD paketa CATIA, odnosno njegovog tehnološkog modula DELMIA. Ovim je realizovan slučaj idealnog virtuelnog sistema. Ovi modeli su prikazani na slikama 9, 10 i 11.

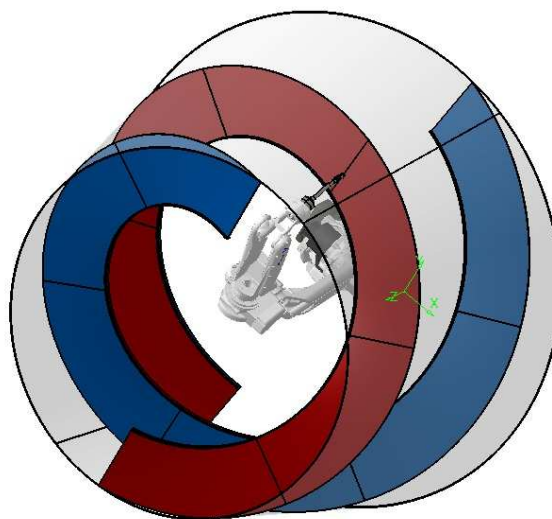
Druga etapa koja je započeta krajem prve istraživačke godine i koja će biti nastavljena tokom druge istraživačke godine, odnosi se na izgradnju neidealizovanog modela, odnosno modela koji pored idealnog sadrži i informacije o realnom stanju stvari, generisane odgovarajućim senzorskim sistemom. Cilj je da se tekući položaj manipulacionog robota, sprege koordinata položaja robota sa signalima koje generiše senzorski sistem (na primer laserski triangulacioni sistem) integrišu u CAD razvojno okruženje (virtuelni metrološki sistem). Ključni problem koji se ovde pojavio odnosi se na zatvorenost komercijalno raspoloživih upravljačkih sistema u smislu dostupnosti koordinata položaja robotskog mehanizma u prostoru, odnosno informacija koje se čitaju sa enkodera akcionog sistema robota u realnom vremenu i koje su sinhronizovane sa radom senzorskog sistema. Rešenje ovog problema će biti razrešeno kroz primenu otvorenog robotskog upravljačkog sistema, baziranog na PC platformi ili, izgradnjom specijalnog interfejsa u saradnji sa proizvođačem robota, koji bi preuzimao tekuće koordinate neposredno sa regulatora servo motora, ili iz modula za slaganje kretanja (interpolator) centralne procesorske jedinice.



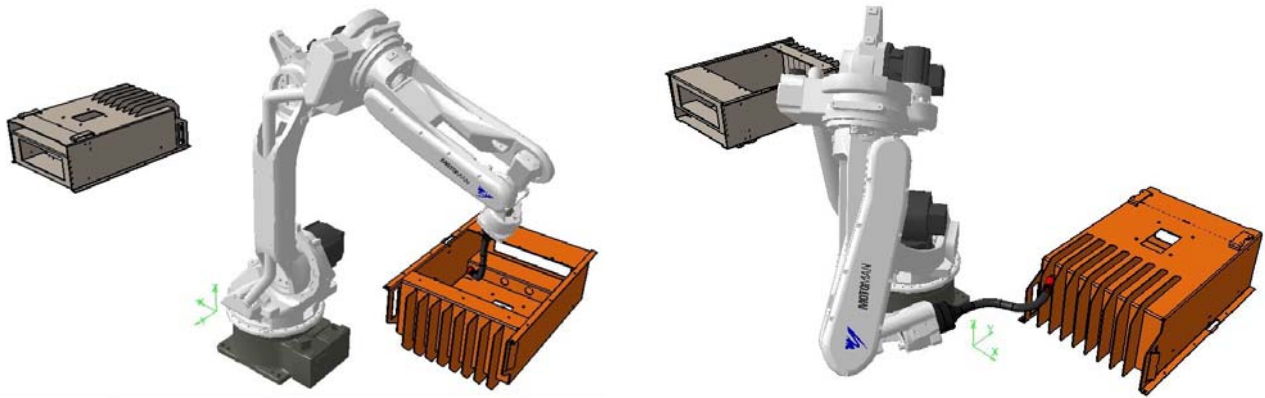
Slika 8: Fotografije eksperimentalne instalacije za optičku triangulaciju strukturane svetlosti za ekstremno brzu akviziciju prostorne geometrije okruženja: a) eksperimentalna oprema razvijena kroz samogradnju (etapa 1) i b) fotografije probnih ispitivanja razvijenog sistema za kodiranje svetlosnog izvora.



Slika 9: Virtuelni model robotske tehnološke ćelije za završnu montažu sklopa papuče bagera iz proizvodnog programa kompanije Kolubara Metal (9 sinhronih servo osa; preuzeto iz Studije izvodljivosti koja se nalazi u završnoj fazi realizacije, po bilateralnom ugovoru Mašinskog fakulteta i Kolubara - Metal).



Slika 10: Virtuelni model robotske tehnološke ćelije za završnu montažu familije sklopova doboša kamionskog miksera za beton koji proizvodi kompanija Goša a.d. Simičevo prema dokumentaciji i za potrebe kompanije SCHWING-STETTER GmbH, Nemačka (Kompanija Goša je proglašena za izvoznika godine u 2011.). Virtuelni model je izrađen za potrebe preliminarnih analiza izvodljivosti robotizacije montaže ovog vrlo delikatnog sklopa. Sistem je tako koncipiran da robot malog dohvata ulazi u unutrašnjost doboša i obavlja zadatak. Programiranje kretanja robota je ekstremno komplikovano zbog ograničenja prostora i neprekidno se zahteva provera kolizije bilo kog dela robota sa okruženjem. Virtuelni model ovakvog sistema čini ovaj zadatak izvodljivim. Postojeća montaža se izvodi manuelno u izuzetno teškim uslovima, opasnim po zdrvlje radnika (prikazano na priloženoj fotografiji). U ovim aktivnostima je bila uključena kompanija Yaskawa MOTOMAN iz Japana, vodeći svetski proizvođač robota.



Slika 11: Virtuelni model robotske tehnološke ćelije za završnu montažu sklopa ložišta peći na pelet iz proizvodnog programa kompanije Milan Blagojević iz Smedereva. Virtuelni model je izrađen za potrebe preliminarnih analiza izvodljivosti robotizacije montaže ovog sklopa i praktično je demonstriran na Sajmu tehnike u Beogradu, maja meseca 2011. godine (na fotografiji se vide dva mlada istraživača na projektu TR35007, doktoranti Nikola Lukić i Ivan Danilov, koji su programirali robotski sistem, prenoseći virtuelni model robotske ćelije razvijen u CAD okruženju u fizički prostor upravljačkog sistema robota).

Drugi problem, slične prirode odnosi se na zatvorenost standardnih razvojnih CAD sistema za dogradnju. U tom smislu uspostavljen je kontakt sa predstavnikom Dassault Systèmes SolidWorks Corp. gde je posle dužih pregovora dobijena saglasnost za dostavljanje projektnom timu TR35007 sistemskog razvojnog okruženja za dogradnju Solid Works CAD paketa. Plan je da se u standardni grafički paket ugradi dodatni modul, kao posebna funkcionalna celina koja će omogućiti simulaciju robotskog sistema (složena kinematska simulacija, uključujući i redundantne konfiguracije) i akvizicija + vizuelizacija senzorskih podataka – prostorna digitalizacija objekata proizvoljne geometrijske forme spregom robota i optičkih triangulacionih senzora baziranih na laserskoj ili strukturiranoj (kodiranoj) svetlosti. Ovo je zadatak vrhunske tehničke kompleksnosti, a Dassault Systèmes SolidWorks Corp. je izrazila spremnost da u slučaju pozitivnog ishoda uvrsti ovaj softverski modul u svoju standardnu ponudu.

3.6. Izgradnja WEB portala projekta

Za potrebe interne komunikacije istraživačkih timova, diseminacije rezultata i edukacije koncipiran je i izgrađen WEB portal projekta TR35007.

3.7. Diseminacija rezultata projekta

Ova aktivnost pripada radnom paketu TR35007-RP_5 - Diseminacija i transfer znanja u industrijsko okruženje i obrazovanje inženjera.

Kao platforma za diseminaciju rezultata projekta TR35007 iskorišćen je programski okvir za transfer tehnologije i organizacionih/funkcionalnih model kroz uspostavljanje bliske saradnje na prostoru Evropske unije u okviru programa Evropskih tehnoloških platformi sa programski komplementarnim individualnim tehnološkim platformama: Future Manufacturing Technologies - ManuFUTURE, European Robotics Platform - EUROP, European Platform on Micro - and Nanomanufacturing - MINAM, Advanced Research and Technology for Embedded Intelligence and Systems - ARTEMIS, European Platform on Smart Systems Integration - EPoSS, koristeći instrumente nacionalnog i regionalnog nivoa.

U sklopu prethodnog, ostvarene su sledeće aktivnosti diseminacije ostvarene su kroz kontekst Programa Nacionalnih tehnoloških platformi Srbije [7]. U toku 2011. godine organizovana su dva skupa (detalji na www.ntp.rs):

Forum 1: NACIONALNE TEHNOLOŠKE PLATFORME SRBIJE - Novi formalni okvir za reinženjering industrije u sklopu evropskih integracija
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 17. februar 2011.



Forum 2: NACIONALNE TEHNOLOŠKE PLATFORME SRBIJE - Univerzitet i njegova uloga u transformaciji tehnoloških osnova industrije Srbije
Rektorat Univerziteta u Beogradu, 01. jun 2011.



Na Savetovanju proizvodnog mašinstva Srbije koji je kao vodeći nacionalni skup za oblast proizvodnih tehnologija u 2011. godini po prvi put održan kao međunarodni skup, organizovana je specijalna plenarna sesija posvećena programu Nacionalnih tehnoloških platformi, gde je saopšten uvodni referat sa temom:

NATIONAL TECHNOLOGY PLATFORMS OF SERBIA, Petar B. Petrović, Vladimir R. Milačić, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

U okviru skupa: **MANUFuture** - Future Manufacturing Technologies of Europe – **Manufuture 2011** Conference: West and East Europe in global High Added Value manufacturing - facts of today and challenges of tomorrow, Wroclaw, Poland, 24-25 oktobar 2011., saopšten je referat po pozivu na sesiji: West-East Europe cooperation support and interaction - WS2: SMEs in transforming European economies, sa temom:

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izložen je osnovni istraživački okvir, sadržaj istraživanja, ciljevi i pregled ostvarenih rezultata na projektu TR35007 koji zajednički realizuju Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka iz Novog Sada i kompanija IKARBUS iz Beograda. Sprovedene istraživačko-razvojne aktivnosti stvaraju prostor za dalji rad u narednim istraživačkim godinama, u skladu sa postavljenim planom i programom istraživačkih aktivnosti. Od posebnog je značaja što ostvareni rezultati stvaraju prostor za njihovu primenu u industrijskim uslovima. U tom smislu, planirane su dve demonstracione instalacije. U kompaniji Ikarbus: razvoj modularnog sistema za CNC konturno rezanje limova, kao ključne inovacije postojeće tehnologije u okviru ove kompanije koja ima cilj da povećanje produktivnosti i kvaliteta za proizvodnju autobusa. U kompaniji Kolubara Metal, koja je član Poslovno interesne grupe projekta TR35007, u toku je realizacija studije izvodljivosti uvođenja robotskog zavarivanja kojom treba da se stvore preduslovi za sistemsko unapređenje tehnologije zavarivanja, kao ključne tehnologije za izradu metalnih konstrukcija.

Reference

- [1] Aschhoff, B., Crass, D., Cremers, K., Grimpe, C., and Rammer, C., European Competitiveness in Key Enabling Technologies - FINAL REPORT, Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim, Germany, 2010.
- [2] European commission, Directorate-general for research, Directorate G – Industrial technologies, FACTORIES OF THE FUTURE - PPP Strategic Multi-annual Roadmap, 2010, ISBN 978-92-79-15227-6.
- [3] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Recognition of Contact States in Robotized Assembly Using Qualitative Wavelet Based Features and Support Vector Machines, Scientific paper printed in „Proceedings of the 36th International MATADOR Conference“, Edited by Hinduja Srichand and Li Lin, Published by Springer Verlag London Ltd, ISBN: 978-1-84996-431-9, pp. 305-308, 1st Edition, 2010, DOI: 10.1007/978-1-84996-432-6_69
- [4] Jakovljević, Ž., Petrović P. B., "Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži", Mašinski fakultet u Beogradu, 2011, ISBN: 978-86-7083-750-8.
- [5] Jovane, F., Westkämper, E., and Williams, D., THE MANUFUTURE ROAD - Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing, 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-77011-4.
- [6] Petrovic, P., Jakovljevic, Z., Milacic, V., Context sensitive recognition of abrupt changes in cutting process, Expert Systems with Applications 37, 2010, pp: 3721–3729, 10.1016/j.eswa.2009.11.053
- [7] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Hodolic, J., Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machines, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp: 1-19, DOI 10.1007/s00170-011-3501-5, ISSN 0268-3768
- [8] Petrovic, P., B., Milacic, V., R., National Technology Platforms of Serbia, Proceedings, 34th International Conference on Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, 2011, pp. 15-25, ISBN: 978-86-6055-019-6.
- [9] Pilipović, M., Danilov, I., Lukić, N., Petrović, P.B., Virtual Manufacturing - Advanced Manufacturing Examples, Proceedings, 34th International Conference on Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, 2011, pp. 217-220, ISBN: 978-86-6055-019-6.

INTELLIGENT ROBOTIC SYSTEMS FOR EXTREMELY DIVERSIFIED PRODUCTION – TR35007

Abstract

This paper outlines the results of research conducted on the four-year project TR35007 jointly implemented by Mechanical Engineering Faculty University of Belgrade, Faculty of Technical Sciences in Novi Sad and Belgrade Ikarbus company. This project is financially supported by the Ministry of Education and Science within four-year cycle of research projects for technological development, from 2011 to 2014. The research framework of this project, the main objectives imposed to the research team and project organization structured by work packages are given first. In the second part, this paper outlines the main results achieved in the first research year, with appropriate description and basic details of the technical and organizational nature.



Бојан Бабић¹, Зоран Миљковић², Угљеша Бугарић³, Божица Бојовић⁴, Најдан Вуковић⁵,
Марко Митић⁶, Милица Петровић⁷

ПРИМЕНА ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА ОД ЛИМА ЗАСНОВАНА НА ЕКОЛОШКИМ ПРИНЦИПИМА - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА НА ПРОЈЕКТУ TP-35004⁸

Резиме

У раду је представљен део резултата који су настали током прве године истраживања на пројекту „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (евид. бр. TP-35004) Министарства просвете и науке Републике Србије. Пројектним активностима су обухваћена два основна правца истраживања: испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије и развој алгоритама за управљање интелигентних робота, са акцентом на примени еколошких принципа који подразумевају уштеду енергије, материјала и средстава за подмазивање. Приказани резултати су укључени у предавања и лабораторијске вежбе на предметима Катедре за производно машинство, а њихова применљивост верификована је и кроз сарадњу са корисницима из домаће индустрије, ФМП д.о.о. из Београда и OPTIX д.о.о. из Земуна.

Кључне речи: интелигентни технолошки системи, вештачке неуронске мреже, метода скенирајуће микроскопије, микротрибологија, хибридни управљачки алгоритам, калибрисана камера, емпиријско управљање, генетички алгоритми.

1. УВОД

Иновативни приступ у одређивању параметара производње делова од лима, као и у управљању интелигентних робота при реализацији задатака из домена производног машинства предмет је истраживања пројектног тима са Машинског факултета Универзитета у Београду, Катедре за производно машинство, у оквиру пројекта TP-35004. Основни циљеви истраживања на пројекту су: 1) снимање стања површине лима применом метода скенирајуће микроскопије (Atomic Force Microscopy); 2) испитивање трења у микро и нано подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy); 3) развој подсистема за предикцију транспортних путева мобилног робота у оквиру технолошког окружења сходно пројектованим технолошким процесима

¹ Др Бојан Бабић, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-274, e-mail: bbabic@mas.bg.ac.rs

² Др Зоран Миљковић, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-468, e-mail: zmiljkovic@mas.bg.ac.rs

³ Др Угљеша Бугарић, ванредни професор, Катедра за индустријско инжењерство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, e-mail: ubugaric@mas.bg.ac.rs

⁴ Др Божица Бојовић, доцент, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-236, e-mail: bbojovic@mas.bg.ac.rs

⁵ Најдан Вуковић, дипл. маш. инж., Истраживач – сарадник, студент докторских студија, Иновациони центар, Универзитет у Београду - Машински факултет, 011/3302-414, e-mail: nvukovic@mas.bg.ac.rs

⁶ Марко Митић, дипл. маш. инж., Истраживач – сарадник, Стипендиста Министарства просвете и науке, студент докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, 011/3302-414, e-mail: mmitic@mas.bg.ac.rs

⁷ Милица Петровић, дипл. маш. инж., асистент, студенткиња докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-264, e-mail: mmpetrovic@mas.bg.ac.rs

⁸ Рад је настао у оквиру истраживања на пројекту „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (евид. бр. TP-35004) Министарства просвете и науке Републике Србије.

базираног на примени система вештачких неуронских мрежа; 4) анализа примене концепта машинског учења у развоју система препознавања на бази камере, уз манипулацију делова помоћу хватача мобилног робота; 5) развој напредних алгоритама за одређивање положаја мобилног робота у технолошком окружењу; 6) имплементација и тестирање развијеног система препознавања на бази камере мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.

Као исходи истраживања на овом пројекту постигнути су следећи научноистраживачки резултати:

- један рад публикован у истакнутом међународном часопису категорије M22,
- два рада публикована у међународном часопису категорије M23,
- два рада у публикована у водећем часопису националног значаја категорије M51,
- три методе категорије M85,
- девет конференција међународног значаја категорије M33,
- четири конференције националног значаја категорије M63.

Резултати истраживања на овом пројекту представљени су у шест поглавља. Након уводног поглавља, у другом поглављу је представљена методологија за испитивање трења у микро подручју применом методе скенирајуће микроскопије. Треће поглавље обухвата приказ развијеног хибридног управљачког алгорита за управљање и естимацију положаја интелигентног мобилног робота, а четврто хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере. У петом поглављу су представљени резултати оптимизације транспортних токова материјала применом генетичких алгоритама. На крају рада дат је закључак.

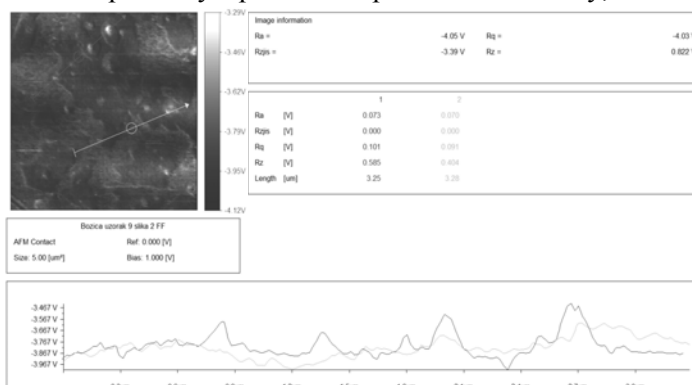
2. ИСПИТИВАЊЕ ТРЕЊА У МИКРО ПОДРУЧЈУ ПРИМЕНОМ МЕТОДА СКЕНИРАЈУЋЕ МИКРОСКОПИЈЕ

Истраживања на пројекту TR-35004 у једном делу се односе и на испитивање специфичности које се јављају у микротрибологији, односно на понашање силе трења при непромењеној нормалној сили, услед промене топографије површине која се посматра. Методологија предложена у [1] обухвата аквизицију фрикционог сигнала микроскопијом сила трења и утврђивање одступања услед топографије инжењерске површине. Ова метода пружа поступак за квалитативну и квантитативну карактеризацију инжењерске површине и описана је кроз следећих пет корака:

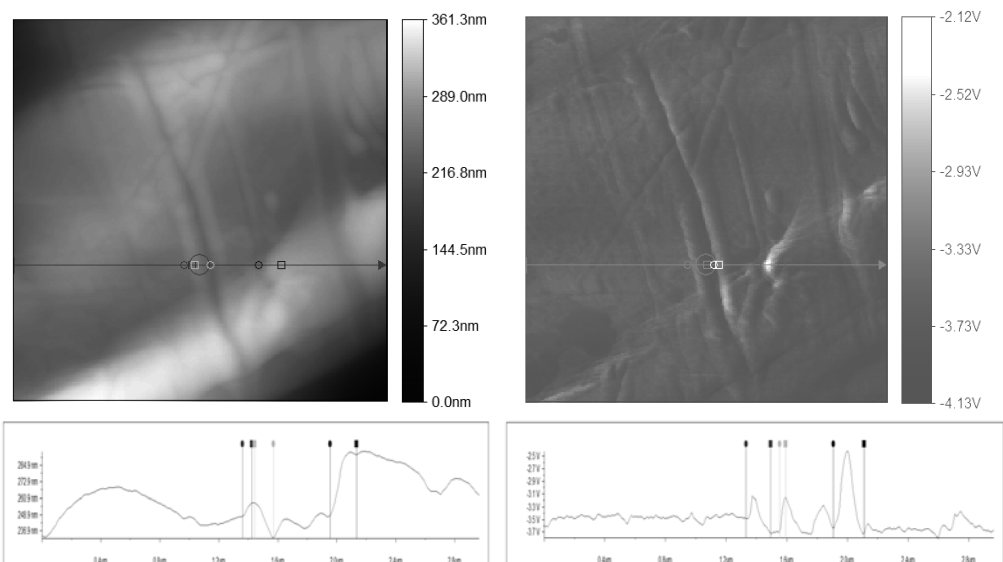
1. Избор величине скениране површине, јер од ње зависи величина стварне контактне површине, односно интензитет силе трења;
2. Аквизиција топографских и фрикционих сигнала применом AFM и FFM микроскопије на микроскопском нивоу, која подразумева, с једне стране, високу осетљивост карактеристичну за нано скале, а с друге стране, велике контактне површине са вишеструким контактним зонама;
3. Одређивање распона фрикционог сигнала, који указује на степен утицаја топографских промена на посматраној скали, као што је приказано на слици 1;
4. Детектовање (слика 2) и компензација (слика 3) просторног помераја, који на микроскопском нивоу одговара вредности полупречника врха пипка;
5. Селектовање региона са сигнификантним променама фрикционог сигнала, које су проузроковане топографским променама површине узорка на микроскопском нивоу, слика 4.

Новом методологијом се појашњавају промене фрикционог сигнала узроковане променом нагиба у случају узвишења и бразда и продубљује разумевање основних принципа, који важе код микро триболошких појава.

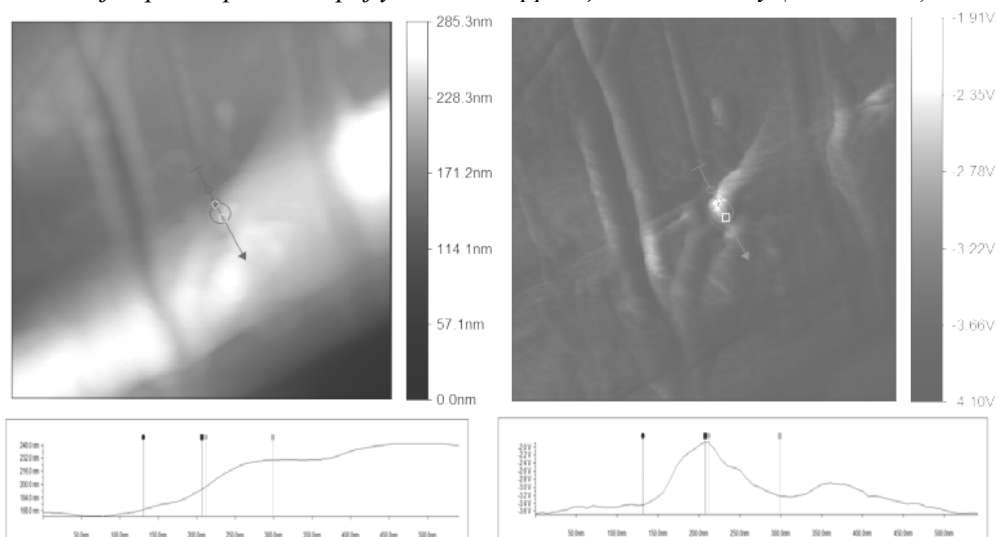
Овде приказана примена нове методе на лименке, представља резултат истраживачких напора у првој истраживачкој години.



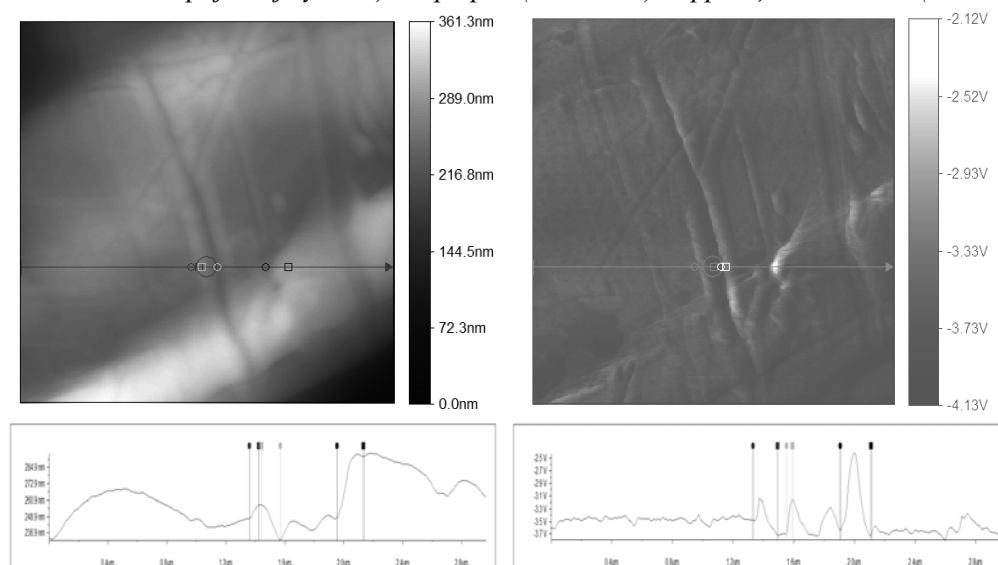
Слика 1: Промена сигнала силе у зависности од топографије



Слика 2: Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, даје просторни померај уочљив на фриксионом сигналу (доле десно)



Слика 3: Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, компензованог помераја даје усклађен профил (доле лево) и фриксиони сигнал (доле десно)

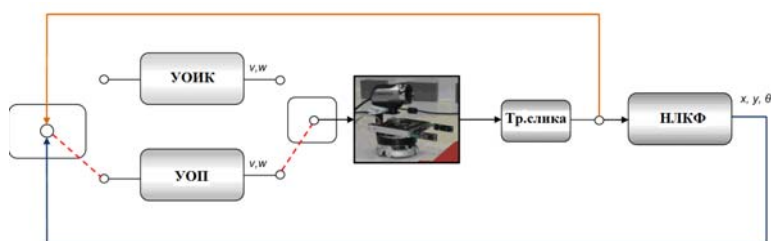


Слика 4: Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, пролази кроз карактеристичне регионе

3. ХИБРИДНИ УПРАВЉАЧКИ АЛГОРИТАМ ЗА УПРАВЉАЊЕ И ЕСТИМАЦИЈУ ПОЛОЖАЈА ИНТЕЛИГЕНТНОГ МОБИЛНОГ РОБОТА БАЗИРАНОГ НА КАЛИБРИСАНОЈ КАМЕРИ

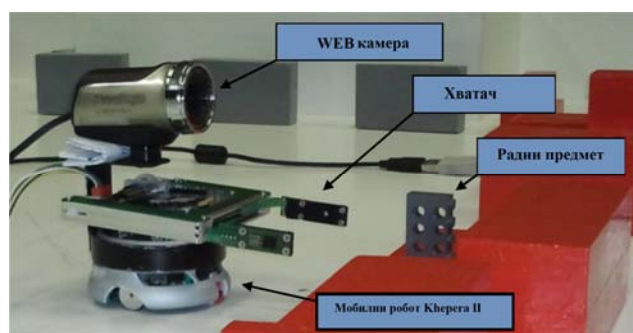
Модерно схватање унутрашњег транспорта на бази аутоматски вођених робоколица (АВР) сврстава овај вид транспорта у област мобилних робота, с обзиром да имају способност прикупљања и процесирања информација из окружења, оцене стања, планирање на основу прикупљених информација и деловање. Конвенционални вид унутрашњег транспорта базиран на АВР одвија се у оквиру технолошких система коришћењем додатне транспортне инфраструктуре. Конвенционална транспортна решења на бази АВР нису флексибилна у погледу промене положаја транспортних чворова.

Дакле, неопходно је развити видове унутрашњег транспорта који не зависе од додатне инфраструктуре. Да би се обезбедила флексибилност АВР неопходно је успоставити сензорски подсистем за прикупљање информација из технолошког окружења. Нови хибридни управљачки алгоритам користи камеру као основни сензор за аквизицију информација које се користе за управљање и естимацију положаја мобилног робота и сачињавају две основне управљачке петље (слика 5): управљање на основу положаја (УОП) и управљање на основу информација од камере (управљање на основу повратне информације од камере - УОИК) [2].



Слика 5: Блок дијаграм тока информација хибридног управљачког алгоритма

робота у жељени положај ради наставка кретања ка машини алатке или међускладишту и користи камеру у циљу управљања кретањем и генерисања адекватних управљачких команди. Након инкременталног кретања робот читава нову слику објеката у окружењу (*тренутна слика*). Уколико је активна УОИК петља очитана слика се користи за поређење детектованих позиција карактеристичних објеката и генерисање управљачких команди. Након тога, *иста слика* се прослеђује НЛКФ модулу (неуронски линеаризовани Калманов филтар) ради оцене положаја робота након извршеног кретања. Уколико је УОП петља активна, робот читава нову слику која се користи *искључиво* за оцену положаја применом НЛКФ алгоритма естимације. Пошто је НЛКФ стално активан, робот у сваком тренутку „зна“ свој положај.



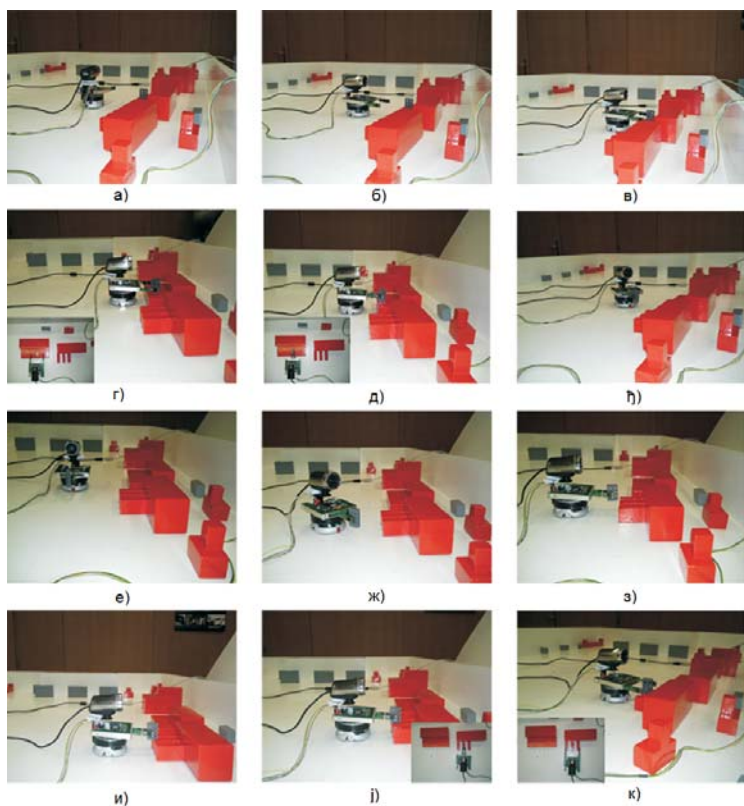
Слика 6: Мобилни робот са хватачем и камером у лабораторијском моделу технолошког окружења

УОП петља основног управљачког алгоритма служи за глобалну навигацију/управљање робота од тренутног положаја до жељеног положаја, који се налази непосредно испред машине алатке или међускладишта. Овакав вид управљања је могуће спровести на глобалном нивоу када непрецизност у управљачком систему може бити коригована током кретања. УОИК петља се активира након доласка

Нови хибридни управљачки алгоритам примењен је помоћу софтверског кода сопственог развоја у MATLAB® програмском окружењу. Десктоп рачунар (2,20 GHz; 1 GB RAM) је коришћен као централна управљачка јединица. Комуникација између рачунара и робота се извршава путем RS232 кабла, док је USB кабл коришћен за комуникацију између рачунара и (WEB) камере. Коришћени су мобилни робот *Khepera II*, WEB камера и роботска рука *Khepera Gripper Turret* – хватач *KheGrip* (слика 6).

Анализом постављеног транспортног задатка види се да га сачињавају следећи елементарни задаци (слика 7): кретање од

почетног положаја до првог циљног положаја (УОП петља); кретање од првог циљног положаја до прве машине алатке и преузимање радног предмета (УОИК петља); кретање од прве машине алатке до другог циљног положаја (УОП петља); кретање од другог циљног положаја до друге машине алатке и постављање радног предмета на жељену позицију (УОИК петља).



Слика 7: а) – б) Први део кретања робота (УОП); б) – в) Кретање на основу УОИК петље према положају који је дефинисан првом циљном сликом. Робот прилази радном предмету; г) – д) Робот је пришао радном предмету. Обратите пажњу да је хватач отворен на г) и затворен на д); е) – ж) Након приступања радном предмету и успешног хватања, робот наставља кретање ка другом циљном положају према управљачким командама УОП петље; з) – к) Други део кретања на основу УОИК петље. Робот прилази машини алатке и позиционира радни предмет. Обратите пажњу да је хватач на ј) затворен, а на к) отворен. Крај експеримента.

Робот треба два пута да изведе *глобално* кретање на основу УОП петље и два пута *локално* кретање на основу информација добијених УОИК петљом. Пре почетка кретања неопходно је дефинисати два циљна положаја (за УОП петљу) и две циљне слике (за УОИК петљу). Два циљна положаја се једноставно дефинишу у спољашњем координатном систему, док се циљне слике одређују аквизицијом информације очитане са камере након што је робот постављен испред машине алатке ради приступања радном предмету. Приказ експеримента је дат на слици 7.

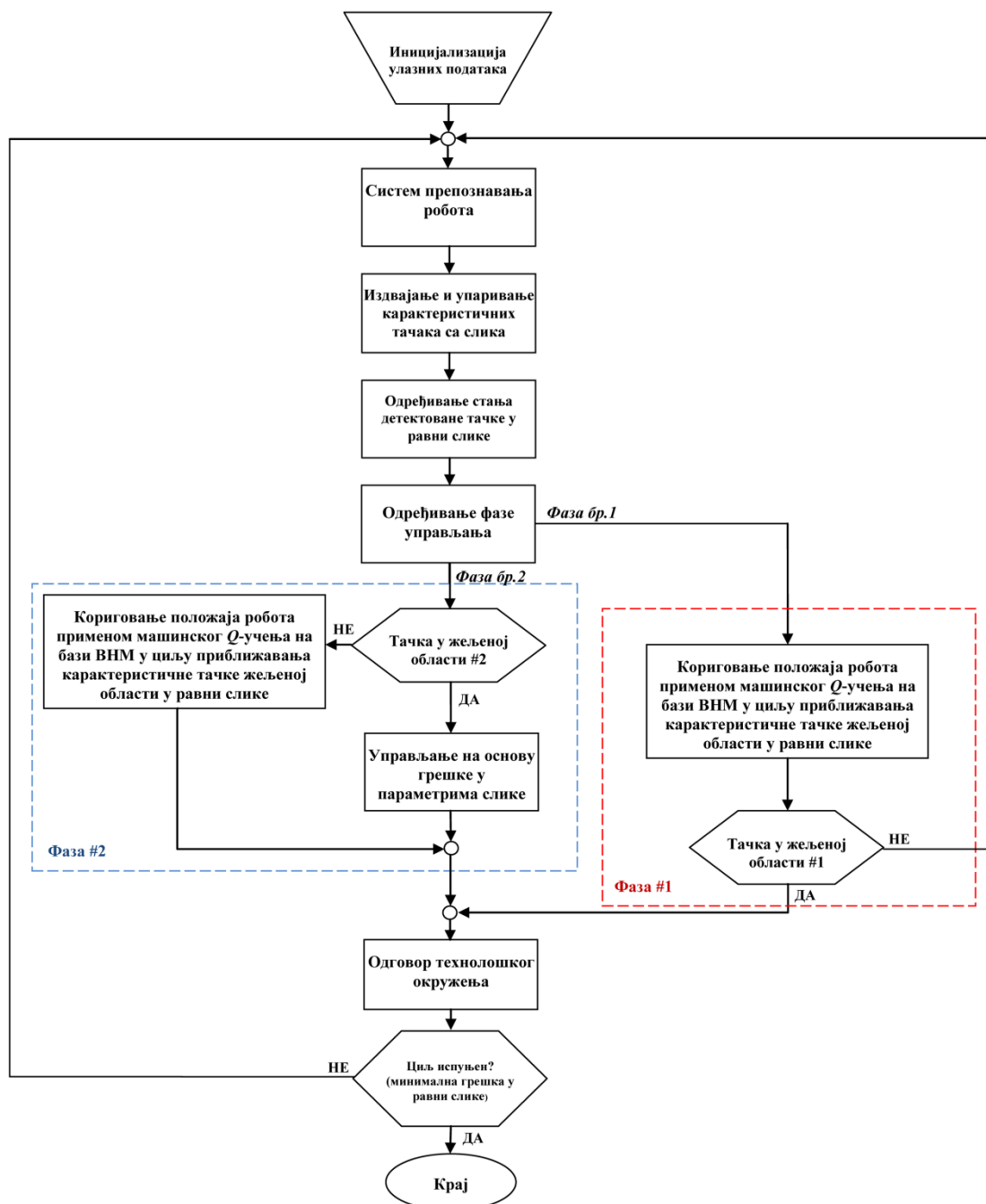
Хибридни управљачки алгоритам обезбеђује следеће предности:

- Овакав приступ раздваја почетни транспортни задатак на два дела: кретање од почетног положаја до циљног положаја (глобално) и кретање од циљног положаја до машине алатке/ међускладишта (локално). На овај начин је елиминисана потреба за потпуном информацијом о распореду објеката у технолошком окружењу;
- Раздвајањем почетног транспортног проблема на два подпроблема успешно је решен случај у коме карактеристични објекти нису у видном пољу камере (енг. *Field of View*).

Почетне информације које су потребне за несметано функционисање развијеног хибридног управљачког алгоритма су жељени (циљни) положај и жељена (циљна) слика. Развијени хибридни управљачки алгоритам је тестиран у лабораторијском моделу технолошког окружења коришћењем мобилног робота *Khepera II*, WEB камере и хватача *Khe Gripper*. Експериментални резултати потврђују да је применом две петље (управљање на основу положаја и управљање на основу информације од камере) могуће остварити симултану естимацију положаја и управљање на основу жељеног положаја или жељене слике. Распрезање полазног проблема је од посебне важности за обављање унутрашњег транспорта у технолошком окружењу, с обзиром да развијени хибридни управљачки алгоритам не изискује додатну транспортну инфраструктуру или вештачке карактеристичне објекте (маркере) постављање у радном окружењу.

4. ХИБРИДНИ ЕМПИРИЈСКИ УПРАВЉАЧКИ СИСТЕМ ИНТЕЛИГЕНТНОГ РОБОТА ВЕРТИКАЛНЕ ЗГЛОБНЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ БАЗИРАН НА ИНФОРМАЦИЈАМА ОД КАМЕРЕ

Истраживања у оквиру пројекта технолошког развоја TP-35004 делом се односе и на развој интелигентних система способних да уче и да се прилагођавају неодређеностима у радном окружењу. Развијени хибридни емпиријски управљачки систем робота, детаљно дат у [3], базиран је на информацијама добијеним од камере и обухвата две фазе управљања (слика 8). Прва фаза подразумева кориговање оријентације камере у простору применом машинског Q -учења ојачавањем [4] на бази вештачких неуронских мрежа, док се друга фаза односи на кориговање положаја (позиције и оријентације) камере приликом смањења разлике параметара тренутне и циљне слике. Друга фаза обухвата два подсистема управљања: класични подсистем управљања на основу грешке у параметрима слике [5] и „корекциони“ подсистем на бази машинског Q -учења.



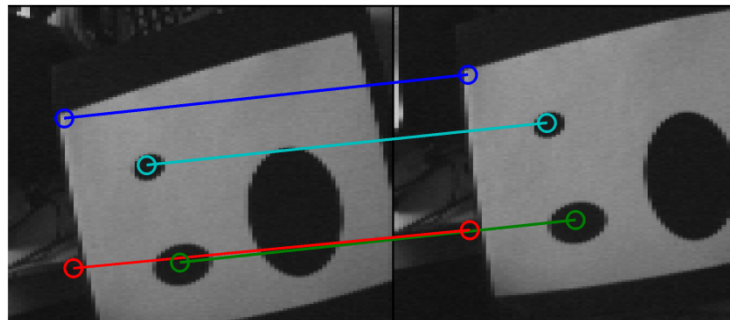
Слика 8: Управљачки алгоритам хибридног емпиријског управљачког система

Прва фаза управљања емпиријског система базираног на информацијама добијеним од камере се односи на кориговање грешке оријентације камере у простору. Корекција положаја роботског

система остварена је применом машинског Q -учења на бази ВНМ са дефинисаном базом карактеристичних вредности за обучавање [6]. Крајњи циљ ове фазе је такав положај робота у коме карактеристична „тачка“ у тренутној слици припада првој жељеној области. У другој фази управљања разликују се два подсистема управљања у зависности од положаја карактеристичне „тачке“. У случају да се она налази у другој жељеној области врши се корекција позиције камере у простору применом класичног управљања на основу грешке у параметрима слике. Уколико се у неком тренутку карактеристична „тачка“ нађе изван ове области, било услед поремећаја у параметрима слике или произвољних спољашњих поремећаја, корекција оријентације камере се остварује уз примену машинског Q -учења на бази ВНМ („корекциони“ управљачки систем). Ова фаза (као и комплетан циклус) се завршава када је разлика између тренутне и циљне слике минимална, односно када је разлика у положајима карактеристичних „тачака“ у равни обе слике испод претходно прописане границе (слика 9). Остварени резултати имају за крајњи циљ увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима.



а)



б)

Слика 9: а) Роботски систем; б) Упарене карактеристичне „тачке“ у току експеримента

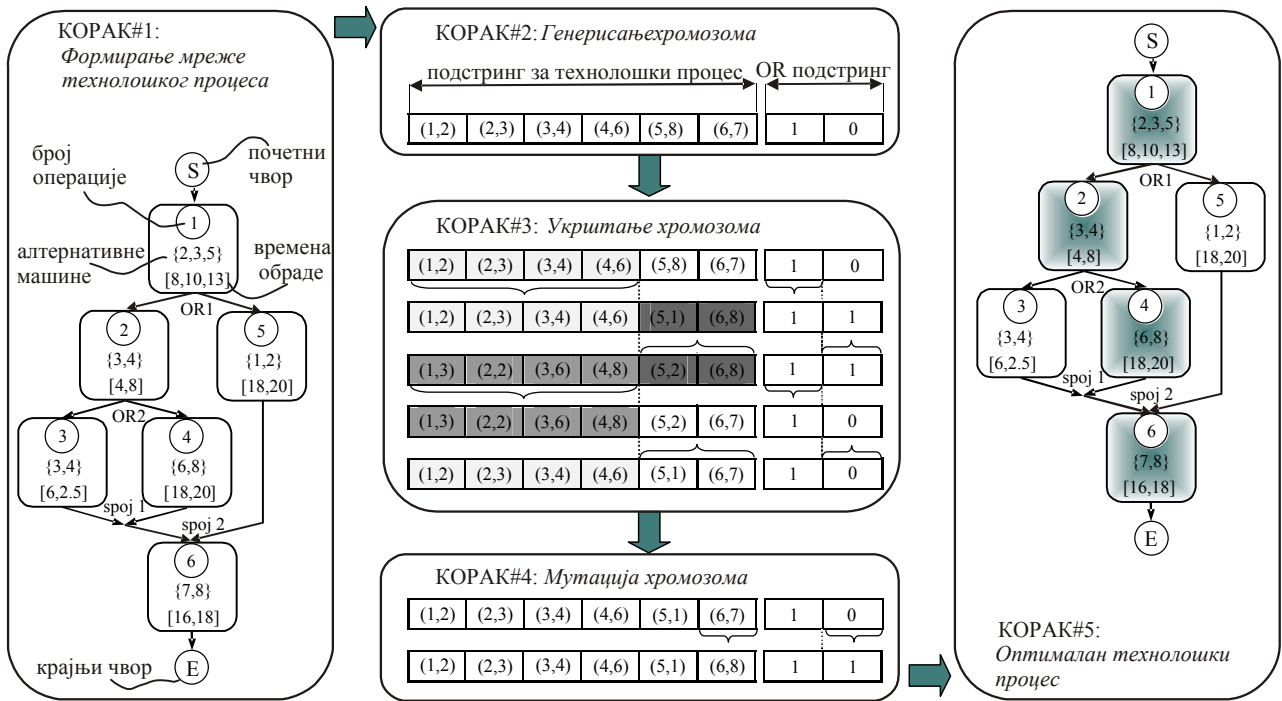
5. ГЕНЕРИСАЊЕ ОПТИМАЛНИХ ТРАНСПОРТНИХ ТОКОВА МАТЕРИЈАЛА

Развој подсистема за генерисање оптималних транспортних путева мобилног робота у оквиру технолошког окружења сходно пројектованим технолошким процесима извршен је у две фазе. Прва фаза (слика 10) подразумева одабир оптималних технолошких процеса применом генетичких алгоритама и представљена је са следећих пет корака:

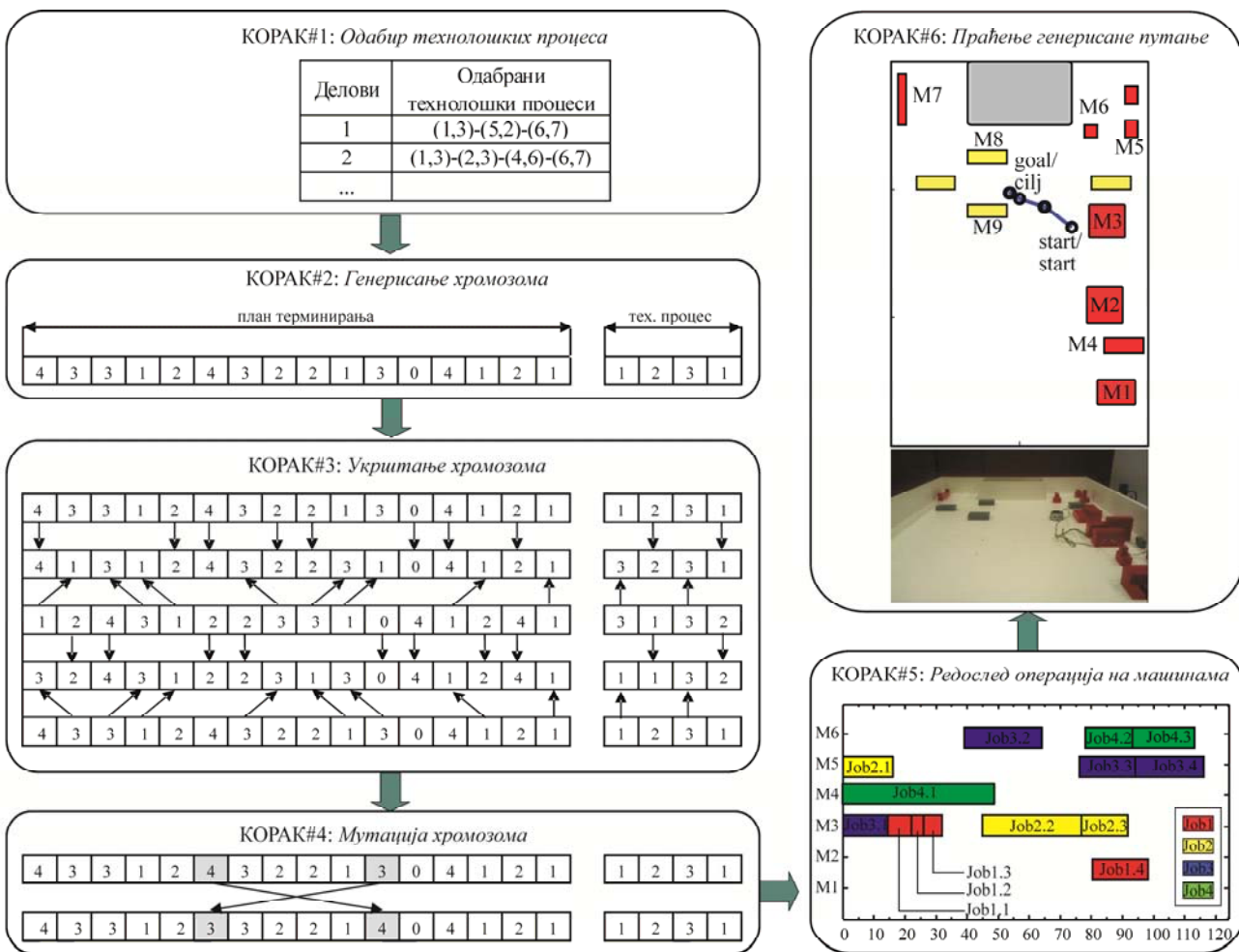
- корак#1: представљање операција, машина и времена обраде помоћу мрежа технолошког процеса;
- корак#2: генерисање подстринга за технолошки процес (главни подстринг) и OR подстринга (помоћни подстринг) хромозома на основу података из мреже технолошког поступка [7];
- корак#3: укрштање хромозома у популацији;
- корак#4: мутација хромозома у популацији;
- корак#5: добијање оптималних технолошких процеса за израду дела, на основу минималног производног времена као оптимизационог критеријума.

У другој фази (слика 11) се на основу одабраних оптималних технолошких процеса за делове одређује оптимални редослед технолошких операција делова на машинама и тестира праћење добијених путања према следећим корацима:

- корак#1: одабир оптималних технолошких процеса;
- корак#2: генерисање подстринга за план терминирања и подстринга за технолошки процес хромозома [7];
- корак#3: укрштање хромозома у популацији;
- корак#4: мутација хромозома у популацији;
- корак#5: добијање оптималног редослед технолошких операција делова на машинама;
- корак#6: тестирање праћења оптималних транспортних токова материјала помоћу *Khepera II* мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.



Слика 10: Кораци при генерисању оптималног технолошког процеса



Слика 11: Кораци при генерисању оптималног редоследа технолошких операција на машинама

6. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада представљени су основни циљеви и кључни резултати истраживања остварени на пројекту „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (евид. бр. ТР-35004) Министарства просвете и науке Републике Србије. Први од приказаних резултата представља нову методологију за испитивање трења у микро подручју применом методе скенирајуће микроскопије. Примена нове методе омогућава једноставан и ефикасан начин утврђивања распона фрикционог сигнала снимљеног коришћењем FFM микроскопије, на критичној величини скениране површине, уз анализу узрока одступања вредности силе трења. Други резултат представља развијени алгоритам за управљање на основу положаја мобилног робота и управљање на основу информације од калибрисане камере. Примена овог резултата омогућава раздвајање иницијалног транспортног задатка на глобални и локални део, чиме се на очигледан начин елиминише потреба за специфичном транспортном инфраструктуром. Развијени хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран је такође на информацијама од камере и обезбеђује увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима оквиру технолошких система за производњу делова од лима. На крају је представљена методологија за одређивање оптималних транспортних токова материјала, као и праћење генерисаних путања у лабораторијском моделу технолошког окружења. Остварени резултати током спровођења планираних пројектних активности омогућавају даљи наставак истраживања у складу са усвојеним циљевима пројекта.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бојовић,Б., Миљковић,З., Бабић,Б., Матија,Л., **Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy), Техничко решење (нова метода М85)**, ТР-35004, 2011.
- [2] Вуковић,Н., Миљковић,З., Митић,М., Бабић,Б., Петровић,М., **Хибридни управљачки алгоритам за управљање и естимацију положаја интелигентног мобилног робота базираног на калибрисаној камери, Техничко решење (нова метода М85)**, ТР-35004, 2011.
- [3] Митић, М., Миљковић, З., Вуковић, Н., Бабић, Б., Лазаревић, И., **Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере, Техничко решење (нова метода М85)** ТР-35004, 2011.
- [4] Sutton, R. S., Barto, A. G., **Reinforcement Learning: An Introduction**, MIT Press, 1998.
- [5] Hutchinson, S., Hager G., Corke P., **A Tutorial on Visual Servo Control**, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, pp. 651–670, 1996.
- [6] Carreras, M., Yuh J., Battle J., Ridao P., **Application of SONQL for Real-Time Learning of Robot Behaviours**, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 53, Issue 8, pp. 628–642, 2007.
- [7] Shao, X., Li, X., Gao, L., Zhang, C., **Integration of process planning and scheduling-A modified genetic algorithm-based approach**, Computers & Operations Research, 6 (2009) 36, 2082-2096.

APPLICATION OF THE ECOLOGICALLY BASED APPROACHES TO IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS FOR PRODUCTION OF SHEET METAL PARTS – OVERVIEW OF RESEARCH RESULTS WITHIN THE PROJECT TR-35004

Abstract

This paper presents a part of results conducted within the project „An innovative ecologically based approach to implementation of intelligent manufacturing systems for production of sheet metal parts“ (TR35004), supported by the Serbian Government - the Ministry of Education and Science. The two primary areas of research covered by the project activities are: an examination of friction in micro area by using scanning microscopy method and development of algorithms for intelligent robots control, prioritizing ecological principles of energy, material, and lubricant saving. The presented results are included in lectures and laboratory exercises at the Production Engineering Department courses and verified through the collaboration with participants from the domestic industry, FMP d.o.o. Belgrade and OPTIX d.o.o. Zemun.

Keywords: *intelligent manufacturing systems, artificial neural networks, scanning microscopy method, microtribology, hybrid control algorithm, calibrated camera, empirical control, genetic algorithms.*



Lj. Tanović, P. Bojanić, M. Glavonjić, D. Milutinović, V. Majstorović, R. Puzović,
B. Kokotović, M. Popović, S. Živanović, N. Slavković, G. Mladenović, S. Stojadinović¹

RAZVOJ NOVE GENERACIJE DOMAĆIH OBRADNIH SISTEMA² REZULTATI ISTRAŽIVANJA ZA 2011. GODINU

Rezime

Predmet istraživanja je nova generacija domaćih obradnih sistema, zajedno sa proizvodnim tehnologijama, koje su potrebne za razvoj tih obradnih sistema i za njihov nesmetani rad. Ključne oblasti istraživanja u ovim tehnologijama su mašine alatke, roboti, alati, tehnološki procesi i digitalni kvalitet. Istraživanja su usmerena ka tehnologijama otvorene arhitekture, u pogledu sistema upravljanja i programiranja, ali i u pogledu struktura ovih sistema, prateći aktuelna istraživanja u ovim oblastima. Tako se obezbeđuju fleksibilnost tehnoloških resursa i agilnost kompanija, kojima su i namenjeni ovi novi obradni sistemi, sa svojim pratećim tehnologijama. Ovde se daje pregled rezultata istraživanja za 2011. godinu.

Ključne reči: obradni sistem, tehnologije, mašina alatka, obrada robotom, DELTA robot, mikrorezanje, digitalni kvalitet

1. UVOD

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

Mašine. Specifičnost mašina alatki i robota nove generacije je dvostruka: omogućavaju fleksibilnu proizvodnju zasnovanu na znanju, a i sami su kompleksni sistemi zasnovani na znanju. Istraživanja u oblasti mašina alatki i robota nove generacije odnose se na razvoj ovih sistema u domenu serijskih i u domenu paralelnih struktura. U domenu serijske i hibridne kinematike istražuje se razvoj višeosnih mašina alatki i robota za višeosnu obradu rezanjem. Osvajanje tehnologije višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina danas je još uvek veoma izazovan istraživački zadatak, kako u pogledu razvoja novih mašina i robota, tako i u razvoju sistema za upravljanje i programiranje. I u domenu paralelne kinematike istražuju se mašine alatke i roboti, koji se danas mogu eksplicitno smatrati mašinama nove generacije, jer predstavljaju najznačajniji pomak u ovoj oblasti od pojave numeričkog upravljanja. Istražuju se i razvijaju jedna specifična kompleksna petoosna mašina alatka sa hibridnom kinematikom, jedna troosna glodalica sa paralelnom kinematikom i jedan specifičan robot sa paralelnom kinematikom.

Tehnologije. Istraživanjima u domenu reznih alata ide se u ova dva pravca: (1) razvoj novih konstrukcija, koji obuhvata nove oblike, novu geometriju i koncept modularnog sistema projektovanja i (2) razvoj i primena novih alatnih materijala, prevashodno na bazi sintetičkih dijamanta i kubnog bornitrida. U procesu transformacije polaznog materijala, ili pripremake, u gotove proizvode, u pogonima metaloprerađivačke industrije koriste se metali i nove sorte prevlaka, kao i nemetali na bazi keramike i kamena, tipa mermera i granita. Analizira se i interakcija mašine i procesa u obradnom sistemu za objašnjavanje fenomena koji se javljaju u procesima obrade novih materijala. Najvažnija mera te interakcije su sile rezanja. Posebno se

¹ Prof dr Ljubodrag Tanović, ltanovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Pavao Bojanić, pbojanic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Miloš Glavonjić, mglavonjic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Dragan Milutinović, dmilutinovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Vidosav Majstorović, vmajstorovic@mas.bg.ac.rs, Prof dr Radovan Puzović, rpuzovic@mas.bg.ac.rs, mr Branko Kokotović, bkokotovic@mas.bg.ac.rs, mr Mihajlo Popović, mpopovic@mas.bg.ac.rs, doc dr Saša Živanović, szivanovic@mas.bg.ac.rs, Nikola Slavković, dipl.mas.inž, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, Goran Mladenović, dipl. maš.inž, gmladenovic@mas.bg.ac.rs, Slavenko Stojadinović, dipl. maš.inž., sstojadinovic@mas.bg.ac.rs, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

² Rezultati istraživanja na projektu TR35022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, za 2011. godinu

istražuje proces brušenja odabranih specifičnih nemetalnih materijala do dobijanja adekvatnih modela. Ti modeli se potom mogu koristiti i kao paradigma virtuelne proizvodnje, a onda i digitalne fabrike.

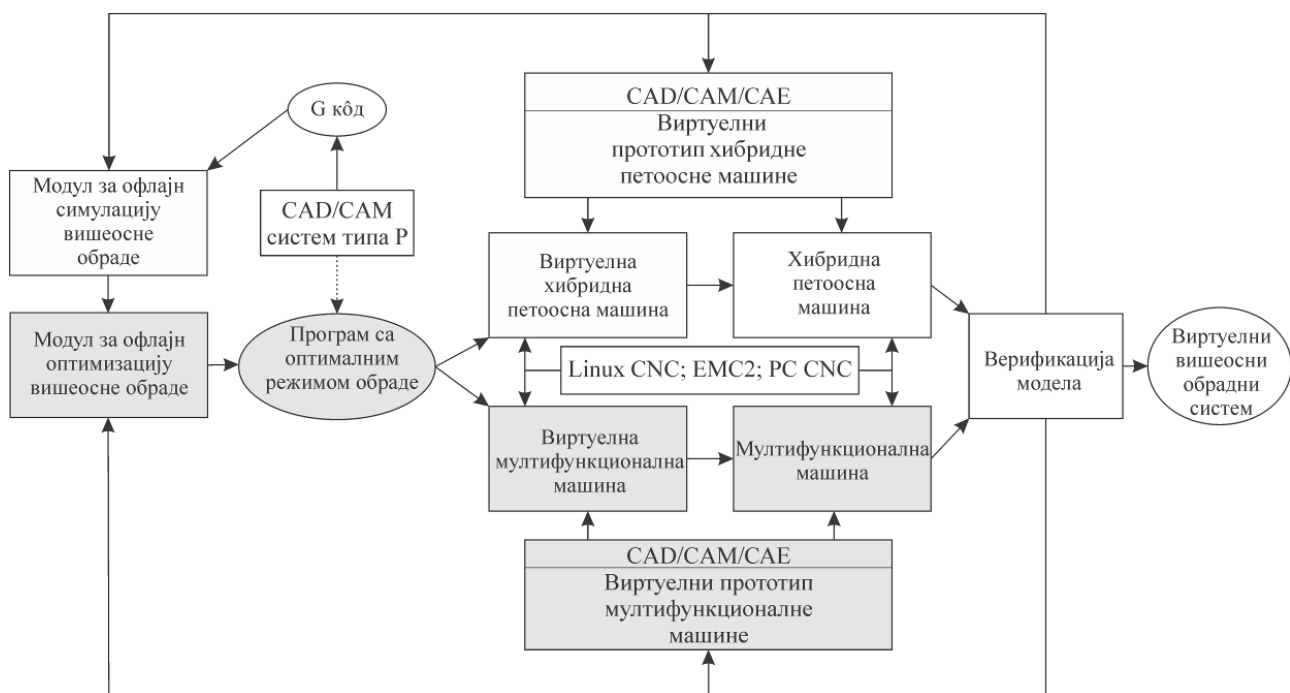
Kvalitet. Digitalni kvalitet obuhvata virtuelnu simulaciju i inspekciju kompleksne metrologije u digitalnoj kompaniji. Razvoj sistema digitalnog kvaliteta, zasnovanog na znanju, baziran je na konceptu ontologije. Predmet ovog istraživanja je digitalna kompanija, koja integriše generisanje, memorisanje i isporuku svih relevantnih podataka o proizvodu i procesu u njegovom životnom veku - od najranijeg planiranja do proizvodnje za pojedinačnog kupca. Koncept digitalne kompanije podržava model kooperativnog inženjerstva, koje se razvilo iz modela simultanog inženjerstva, pa omogućava umrežavanje tehnoloških resursa nove generacije, koji se, kao *mašine* i kao *tehnologije* istražuju i razvijaju u ovom projektu.

Sadržaj istraživanja. Projekat se realizuje kroz ovih šest tema: **Tema 1:** Multifunkcionalna mašina alatka. Istraživanje obuhvata: (1)koncipiranje multifunkcionalne petoosne rekonfigurabilne stone mašine alatke, (2)projektovanje i izradu mašine, (3)konfigurisanje i izradu sistema za upravljanje i programiranje i (4)probni rad. **Tema 2:** Virtuelna proizvodnja i obrada robotima. Istraživanje obuhvata: (1)razvoj modula za off-line simulaciju višeosne obrade, (2)razvoj modula za off-line optimizaciju višeosne obrade, (3)modeliranje statičke popustljivosti robota za obradu, (4)modeliranje struktura obradnog sistema za višeosnu obradu na bazi robota i (5)eksperimentalnu identifikaciju parametara u cilju analize popustljivosti i ponašanja robota u procesu višeosne obrade glodanjem. **Tema 3:** Istraživanje i razvoj mini laboratorijske i edukacione stone troosne glodalice sa paralelnom kinematikom. Istraživanje obuhvata: (1)kinematičko modeliranje, (2)razvoj sistema upravljanja otvorene arhitekture na PC platformi, (3)konfigurisanje virtuelne mašine za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja, (4)definisanje projektnih parametara i projektovanje mašine i (5)razvoj prototipa. **Tema 4:** Istraživanje i razvoj prototipa paralelnog DELTA robota za pakovanje proizvoda konditorske i farmaceutske industrije i montažu u mikroelektronici. Istraživanje obuhvata: (1)analizu paralelnih mehanizama tipa DELTA, (2)kinematičko modeliranje, (3)statičku i dinamičku analizu i razvoj simulacionih i upravljačkih algoritama i (4)projektovanje i razvoj prototipa DELTA robota. **Tema 5:** Istraživanje interakcije između reznog alata i savremenih konstrukcionih materijala na bazi prevlaka, keramike i kamena (granita i mermera). Istraživanje obuhvata: (1)izradu stenda za izvođenje procesa mikrorezanja, (2)određivanje relevantnih fizičko-mehaničkih svojstava ispitivanih materijala, (3)brzu izradu etalon alata na modularnom principu i (4)primenu CAD/CAM sistema u brzjoj izradi alata. **Tema 6:** Digitalna kompanija/kvalitet-ontološki prilaz. Istraživanje obuhvata: (1)modeliranje i razvoj koncepta upravljanja lancima snabdevanja u digitalnoj kompaniji, (2)savremene pristupe za 3D digitalno kreiranje i izradu proizvoda sa složenom geometrijom i (3)digitalni kvalitet.

2. RAZVOJ MODULA ZA OFLAJN SIMULACIJU VIŠEOSNE OBRADNE

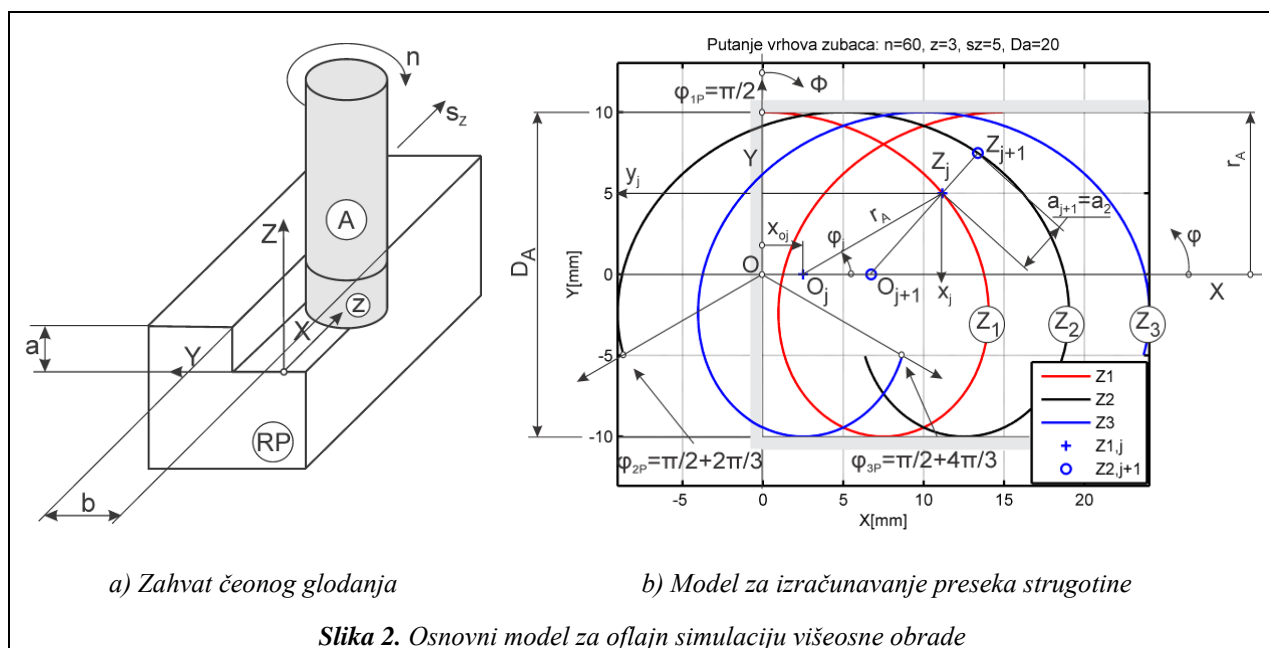
Celina *Virtuelna proizvodnja* u temi 2 ima dve tačke: (i) *Razvoj modula za oflajn simulaciju višeosne obrade* (realizovanu u 2011. godini) i (ii) *Razvoj modula za oflajn optimizaciju višeosne obrade* (po planu istraživanja realizuje se u 2012. godini), slika 1. Završni rezultat ove celine je virtuelni višeosni obradni sistem. Elementi ovog istraživanja su sledeći:

- Oflajn simulacija višeosne obrade vrši se za program (G kôd), napravljen pomoću CAD/CAM sistema tipa P. To je sistem koji se koristi za programiranje mašinske obrade u virtuelnom i stvarnom višeosnom obradnom sistemu. Za simulaciju obrade koristi se poznati mehanistički model: sile rezanja se izračunavaju po proširenim izrazima stepenog oblika.
- Potom se koristi modul za oflajn optimizaciju višeosne obrade. Izlaz iz tog modula je nova verzija programa (G kôda) sa optimalnim režimom obrade. Kriterijum za optimizaciju režima može biti ili maksimalna zapreminska proizvodnost, ili konstantna sila, odnosno, konstantan moment rezanja. Za potrebe testiranja sistema može se koristiti i program koji je napravljen u CAD/CAM sistemu tipa R, gde je već izvršena neka optimizacija režima obrade, koju taj sistem nudi.
- Verifikacija modula za oflajn simulaciju višeosne obrade i neke procedure optimizacije režima obrade sada se vrši na virtuelnom prototipu, virtuelnoj hibridnoj i stvarnoj hibridnoj petoosnoj mašini, koje su dobijene kao rezultati istraživanja u prethodnim projektima.
- Kompletiranje jednog virtuelnog obradnog sistema teče ovako: (i) pomoću CAD/CAM/SAE sistema, namenjenog za projektovanje proizvoda i tehnologija, kompletira se virtuelni prototip zadate mašine; (ii) konfiguriše se virtuelna mašina, koja se upravlja našim sistemom otvorene arhitekture tipa PC CNC (Linux CNC, EMC2); (iii) sprovodi se verifikacija programa sa optimalnim režimom obrade na virtuelnoj mašini; (iv) pokreće se i stvarna mašina, ako postoji, za završnu verifikaciju sistema za optimizaciju višeosne obrade; (v) za verifikaciju modela koristi se i kinematički model virtuelnog prototipa u okruženju CAD/CAM/CAE, pomoću kojeg se vrše probe dobijenog programa. U svetlim pravougaonicima na slici 1. su dati obavljeni poslovi.



Slika 1. Plan istraživanja za celinu Virtuelna proizvodnja u temi 2

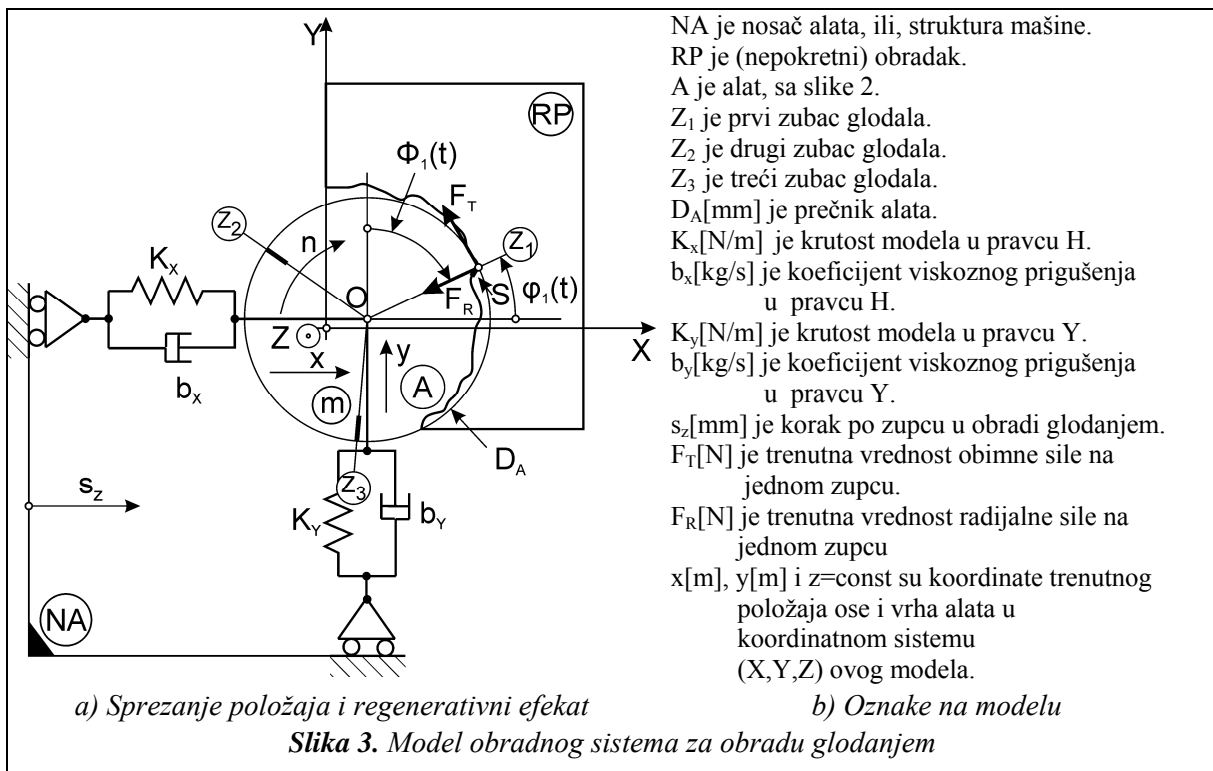
Predmet istraživanja je višeosna obrada čeonim glodanjem. Za probe je korišćeno vretenasto glodalo sa zavojnim zupcima, slika 2a). U toku obrade sistem može biti stabilan, kada se presek strugotine može odrediti po modelu pokazanom na slici 2b). Ako proces nije stabilan, onda je potrebno uračunati i relativno kretanje alata u odnosu na obradak, uključujući i slučaj da zupci alata i izađu iz zahvata sa obratkom, zbog velike amplitude oscilovanja u pravcu normale na obrađenu površinu.



Slika 2. Osnovni model za oflajn simulaciju višeosne obrade

Naš virtuelni obradni sistem ima noseću strukturu tipa sprežanja položaja, sa dva uzajamno ortogonalna stepena slobode i proces sa regenerativnim efektom, slika 3.

Model za određivanje trenutne dubine rezanja po slici 2b) dat je jednačinama (a), a mehanistički model za otpore rezanja na zupcu sa rednim brojem j dat je u sistemu jednačina (b). Funkcija $g_j(\phi_j(t))$ služi za odabiranje slučaja kada zubac nije u zahvatu zbog jake oscilacije, ili zato što je izašao iz zahvata ($g_j(\phi_j(t)) = 0$) i slučaja kada je zubac u zahvatu ($g_j(\phi_j(t)) = 1$). Trenutna debljina strugotine ima svoj statički i svoj dinamički deo, jednakost (s) i izračunava se po pažljivo pripremljenoj proceduri.

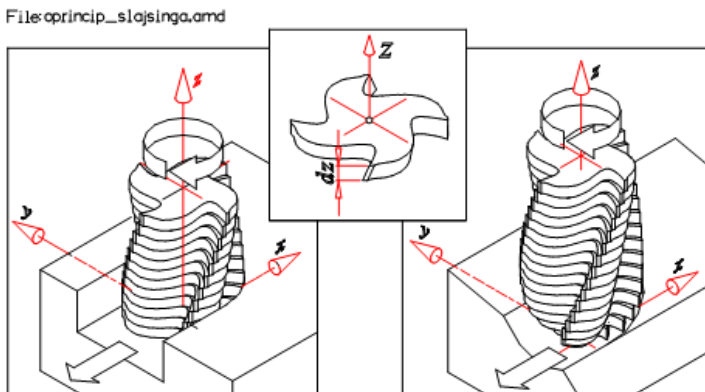


Pobuda modela noseće strukture sa slike 3a) su trenutne vrednosti ukupnih sila u pravcima X i Y: $F_x(t)$ i $F_y(t)$, respektivno. Diferencijalne jednačine kretanja pod dejstvom tih sila su sistem (d). Oznake mera i konstanta modela sa slike 3a) popisane su na slici 3b). Njihov bliži opis je sledeći:

$$\begin{aligned}
 x_j &= x_{oj} + r_A \cos(\varphi_{jP} - \omega_A t_j), & (a) \quad F_{Tj} &= a \cdot (K_{TC} \cdot a_j(t)^{x_i} + K_{TE}) \cdot g_j(\phi_j(t)), & (b) \\
 y_j &= r_A \sin(\varphi_{jP} - \omega_A t_j), \quad x_{oj} = v_s t_j. & (s) \quad F_{Rj} &= a \cdot (K_{RC} \cdot a_j(t)^{x_i} + K_{RE}) \cdot g_j(\phi_j(t)) \\
 a_j(t) &= a_{jS}(t) + a_{jD}(t) & (d) \quad m\ddot{x} + b_x \dot{x} + K_x x &= F_x(t) \text{ i } m\ddot{y} + b_y \dot{y} + K_y y = F_y(t)
 \end{aligned}$$

F_{Tj} [N] je trenutna obimna sila na zupcu Z_j ; F_{Rj} [N] je trenutna vrednost radijalne sile na zupcu Z_j ; a [mm] je dubina rezanja, slike 2 i 3; K_{TC} [N/mm²] je koeficijent rezanja za obimnu silu, K_{RC} [N/mm²] je koeficijent rezanja za radijalnu silu; $a_j(t)$ [mm] je trenutna debljina strugotine na zupcu Z_j ; x_i je eksponent za debljinu strugotine; K_{TE} [N/mm] je koeficijent gubitaka za trenutnu obimnu silu; K_{RE} [N/mm] je koeficijent gubitaka za trenutnu radijalnu silu; $g_j(\phi_j(t))$ je pravilo – funkcija odabiranja rezultata izračunavanja trenutnih sila ($g_j(\phi_j(t)) = 1$ ako je $a_j(t) > 0$ i ako je $\phi_j(t)$ u granicama širine glodanja (b) sa slike 3, inače je $g_j(\phi_j(t)) = 0$).

Po ovako postavljenom modelu, za potrebe simulacije procesa obrade glodanjem, najviše posla se obavlja u određivanju trenutne debljine strugotine. To se vrši po tačnijem modelu, pokazanom na slici 3a), a ređe po približnom, pokazanom na slici 2b). Izračunavaju se dve komponente te debljine. Prva je statička ($a_{jS}(t)$), a druga dinamička ($a_{jD}(t)$), pa sabiraju, kao u jednakosti (s).



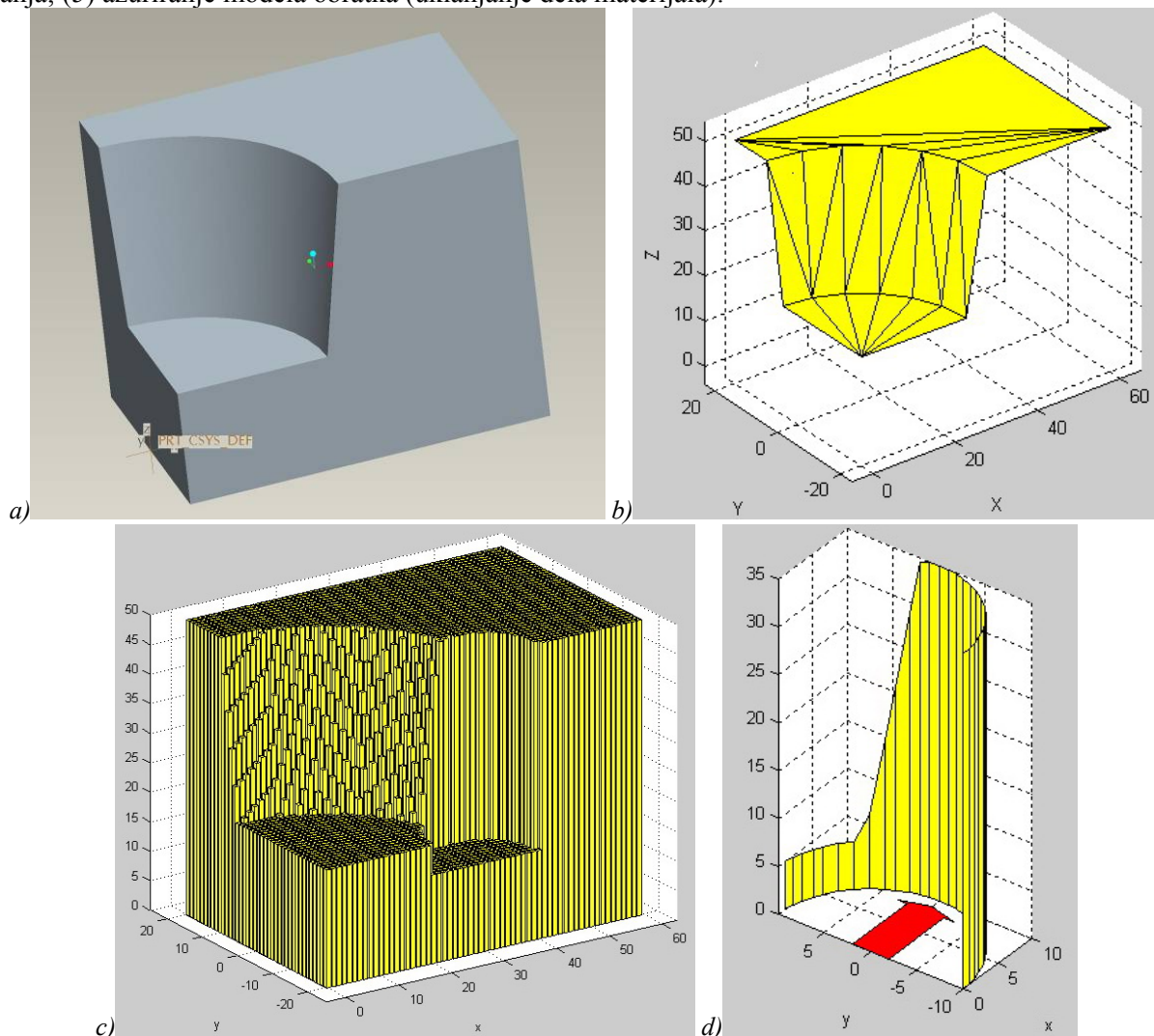
Slika 4. Princip diskretizacije reznog dela alata na diskove

Za višeosnu obradu oblici glodala mogu biti raznoliki: loptasti, torusni, konusni, ravni itd. Zbog toga je uobičajeno da se jedno čeonu glodalo izdela na slog tankih segmenata debljine dz , slika 4. Na svaki od tih segmenata primenjuju se računice, slične već datim (b) i (s), za izračunavanje trenutnih vrednosti sila, uzimajući u obzir i lučnu poziciju svakog zupca, ali i ugao obrtanja

glodala, oblik i mere priprema i preuzeti program (G kôd), čiji režim obrade treba poboljšati. Simulacija trenutnih vrednosti komponenta sile rezanja i momenta pri obradi glodanjem polazi od diskretizovanog reznog dela alata.

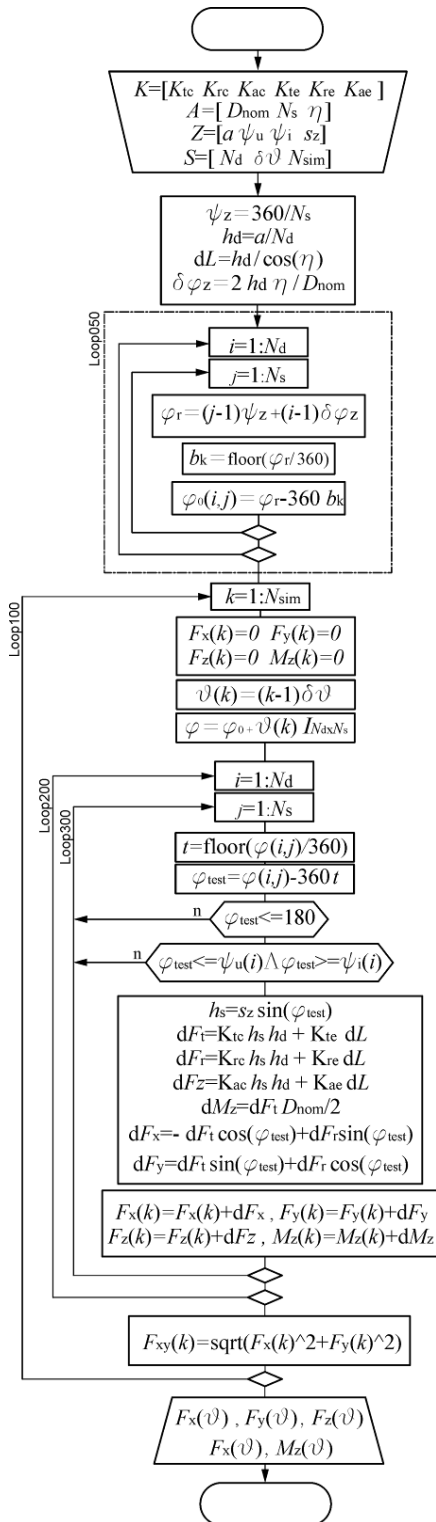
Diskretizacija (slika 4) podrazumeva da se, ako je o vretenastim glodalima reč, rezni deo izdeli, duž ose alata, na diskove konačne debljine. Elementarni delovi sečiva, koji odgovaraju takvim diskovima, mogu se, bez obzira na tip glodala, uz dovoljno poverenja, smatrati pravolinijskim, sa definisanim uglovima reznog klina. Diskretizacija alata je dobar način da se simulacija obrade, sa stanovišta sile rezanja, primeni i na alate proizvoljne makrogeometrije (vretenasta, lotasta, torusna i sl.). Plan sile rezanja za svako elementarno sečivo odgovara modelu kosog rezanja. Do komponenta sile, koja deluje na deo sečiva, koji odgovara jednom disku, dolazi se ili kalibracijom (eksperimentalno, u testovima obrade sa razmatranim alatom i materijalom obratka), ili na osnovu koeficijenta sile rezanja iz jednostavnijih testova ortogonalnog rezanja i transformacija plana sile iz ortogonalnog u koso rezanje. U istraživanju, u okviru ovog projekta, korišćen je drugi navedeni pristup, iz razloga manjeg potrebnog broja eksperimenata u odnosu na moguću raznorodnost geometrije alata, za koju se obrada simulira, slika 5.

Karakteristični koraci u simulaciji NC obrade, koja za cilj ima predikciju sile rezanja, podrazumeva sledeće osnovne korake: (1) dekompozicija putanje alata, na osnovu izvornog G kôda, generisanog u nekom od dostupnih CAD/CAM sistema tipa R i arhiviranje tako dekomponovane putanje u formatu pogodnom za primenu u modulu za simulaciju; (2) formiranje modela priprema u digitalnom obliku, pogodnom za simulaciju; (3) lociranje alata u odnosu na obradak, u tačkama koje su određene putanjom alata u programu; (4) rekonstrukcija površine kontakta alata i obratka i izračunavanje trenutnih vrednosti komponenta sile rezanja; (5) ažuriranje modela obratka (uklanjanje dela materijala).

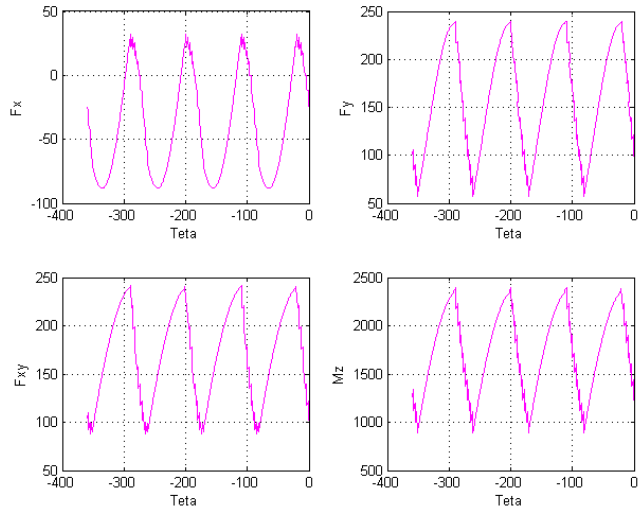


a) solid model priprema, b) redukovani STL model proipremka, c) ažurirana Z-mapa obratka, d) rekonstruisana kontaktna površina alata u zahvatu

Slika 5. Faze u formiranju diskretizovanog modela obratka i njegovo ažuriranje



Slika 6. Dijagram toka određivanja trenutnih vrednosti komponenata sile glodanja na jednom njegovom obrtu



Slika 7. Simulirana promena komponenata sile i momenta glodanja na jednom njegovom obrtu

Simulacija, kojom se dobija promena trenutnih vrednosti komponenata sile i momenta rezanja, na jednom punom obrtu alata, izvodi se saglasno dijagramu toka pokazanom na slici 6. Radi preglednosti, pokazan je dijagram toka koji se odnosi na obradu ravnim vretenastim glodalom i na zahvat sa zahvaćenim pravougaonim profilom nedeformisane strugotine. Skup ulaznih parametara čini: podskup atributa alata (A: prečnik, broj zubaca, ugao zavojnice zupca), podskup koeficijenata komponentnih sile rezanja (K), podskup parametara zahvata (Z: korak po zupcu, vektori ulaznih i izlaznih uglova za svaki disk alata, saglasno zahvaćenoj površi) i, konačno, podskup parametara same simulacije (S: rezolucija diskretizacije alata na diskove i ugaona rezolucija emulacije obrta alata). Prva petlja (Loop050) izračunava inicijalne položaje sečiva svakog diska alata. Unutrašnja petlja (Loop300) izračunava doprinos komponentama sile i momenta svakog pojedinačnog sečiva na određenom disku. Petljom (Loop200) se taj postupak ponavlja za sve diskove. Sumiranjem se dobijaju trenutne vrednosti sile i momenta u određenom trenutku (jedna ugaona pozicija pri obrtanju glodala). Petljom (Loop100) se postupak ponavlja za sve ugaone položaje pri obrtanju alata. Primer identifikovanih promena ovih veličina za jedan skup ulaznih parametara pokazan je na slici 7. Uobičajeno je da se za praktične analize ne koristi čitav profil promene komponenata sile i momenta, na punom obrtu, već da se vrši ekstrakcija relevantnih vrednosti. Za zahvate grube obrade, to je maksimalna sila u ravni (X,Y), i maksimalna vrednost obrtnog momenta. Za analize u domenu završnih obrada (odstupanja oblika i kvalitet obrađene površi) to su maksimalne vrednosti komponenata sile po pravcima X, odnosno Y.

Simulacija NC obrade glodanjem je, u ovom slučaju, zasnovana na diskretnom modelu obratka, čija se geometrija aproksimira pomoću takozvane Z-mape. Neke karakteristične faze manipulacije modelom priprema, i kasnije obratka, pokazane su na slici 5.

Razvijenom aplikacijom u Matlab-u omogućeno je generisanje mapa za jednostavnije oblike priprema, uz mogućnost da se, u slučaju složenijeg oblika priprema, može prihvatiti i STL datoteka, kao izlaz iz nekog od solid modelera. Program najpre redukuje STL model, uklanjajući sve vertikalne trouglove, a zatim generiše Z-mapu priprema, sa izabranom rezolucijom. Saglasno putanji alata, njegova obvojnica se pomera

u odgovarajući položaj u odnosu na model obratka. U takvom međusobnom položaju se vrši rekonstrukcija površi zahvata alata i obratka, imajući u vidu pravac i smer vektora brzine pomoćnog kretanja. Površ kontakta se aproksimira skupom pravougaonika na poluobimu obvojnice alata. U analiziranom položaju alata u odnosu na obradak uklanja se deo materijala zahvaćen obvojnicom alata, radi ažuriranja geometrije obratka. Uz dodatne, prethodno definisane parametre, rekonstruisana površ zahvata je osnova za simulaciju komponenta sile rezanja u datoj fazi rada NC programa. Postupak se nastavlja ciklično, pomeranjem alata u sledeću tačku na putanji alata, sve do okončanja ukupne putanje.

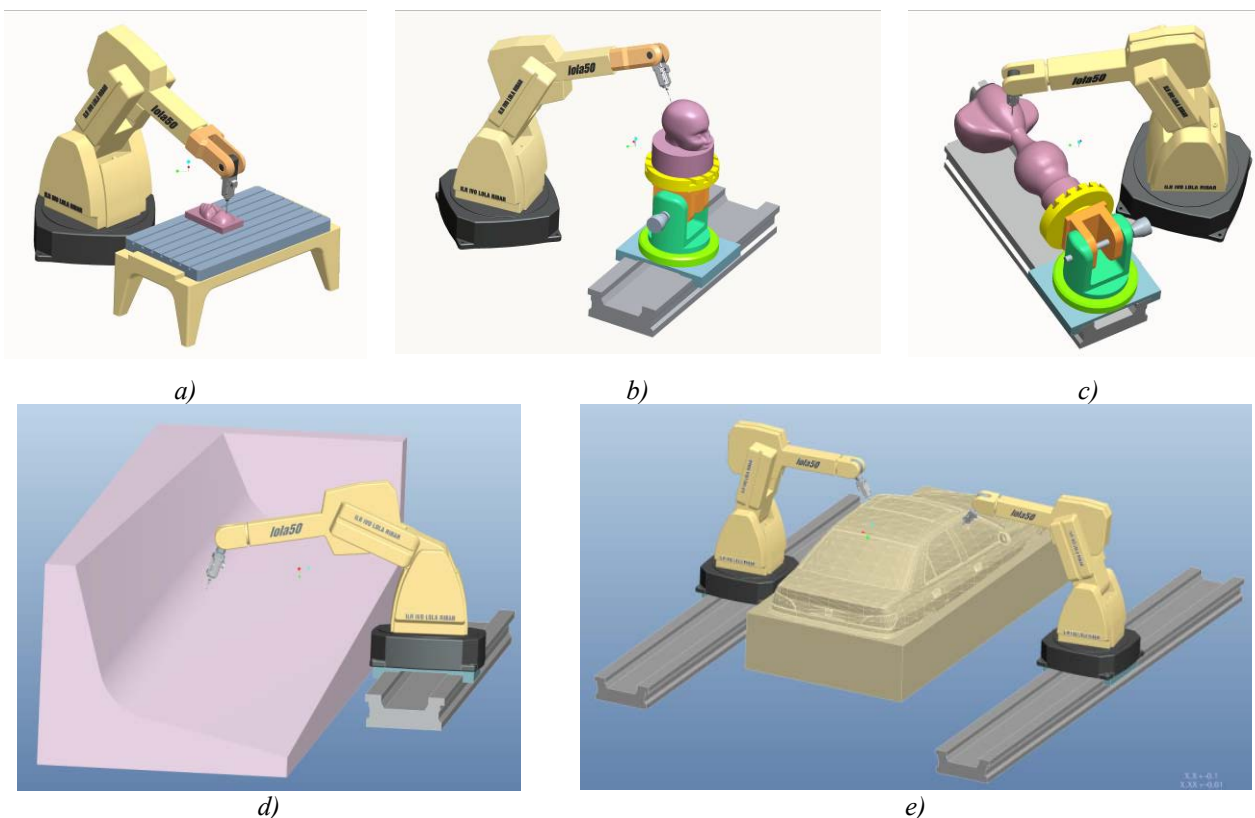
U analiziranoj tački, na putanji alata, vrši se simulacija jednog obrta glodala. Rekonstruisana površ kontakta je dovoljna da se pri simulaciji odrede ulazni i izlazni ugao zahvata, za svaki disk, kojim je alat diskretizovan. Kako sam G kôd ne sadrži podatke o pripremkama i trenutnim presecima strugotine, potrebno je da se ova simulacija započne pogodno zadatim pripremkom (slika 5a) da bi se mogli pratiti oblik i mere kontakta alata i obratka u toku simulacije obrade. Pomoću Z-mape se profil površi za obradu u novom prolazu dobija pomoću profila glodala i preostalog pripremkama.

3. MODELIRANJE STRUKTURA OBRADNIH SISTEMA ZA VIŠEOSNU OBRADU NA BAZI ROBOTA

Potrebu za obradnim sistemima na bazi robota, odnosno potrebu za tehnologijom višeosne obrade složenih estetskih i funkcionalnih površina, imaju preduzeća u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrada drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenja metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izradi alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljske lopatica, branika i sl.). Takođe, značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.

Obradni sistemi na bazi robota za izabrane klase delova treba da obezbede brzu izradu, na jednom mestu, složenih delova velikih gabarita od mekših materijala srednje i niže klase tačnosti sa složenim površinama generisanim raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva.

Ovakvi sistemi bi imali višestruko nižu cenu od postojećih petoosnih mašina alatki i zadovoljili bi zahteve u pogledu obrade srednje i niže klase tačnosti. Postavka konceptata obradnih sistema na bazi robota, koji su predmet istraživanja na ovom projektu, pokazani su na slici 8.



Slika 8. CAD modeli obradnih sistema za višeosnu obradu na bazi robota

Kinematičko modeliranje obradnih sistema na bazi robota, pokazanih na slici 8, u cilju simulacija, razvoja rekonfigurabilnog upravljačkog sistema i projektovanja dodatnih obrtnih i translatorskih osa je osnovni rezultat u ovoj istraživačkoj godini. Kao primeri za ovu fazu istraživanja se navode kinematički modeli varijanti sa slika 8b) i 8d), koji su i fizički u fazi realizacije.

Kinematičko modeliranje ovih obradnih sistema izvršeno je po konvenciji za petoosne vertikalne glodalice (X,Y,Z,A,B) koristeći Denavit-Hartenberg-ov pristup, slika 9.

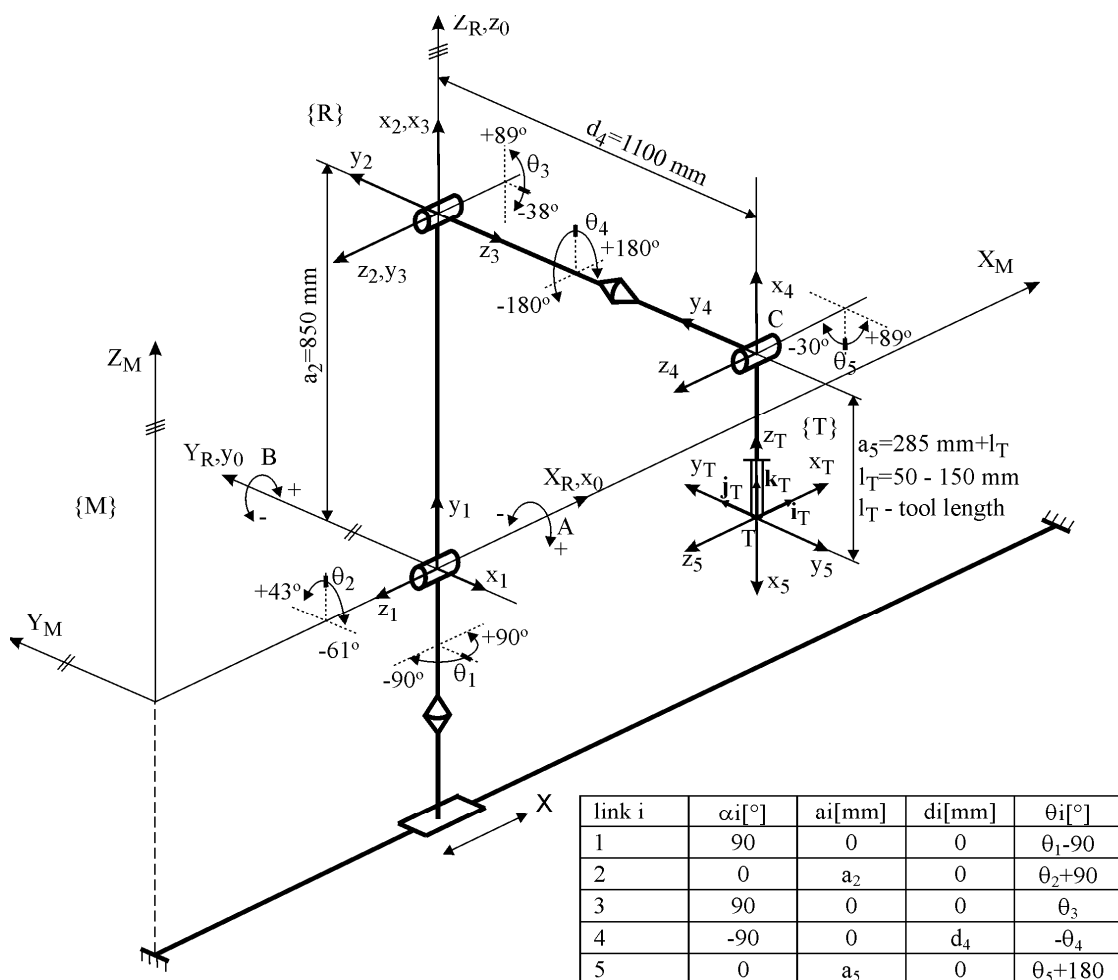
Činjenica da sistemi treba da omoguće korišćenje postojećih CAD/CAM sistema i programiranje u G-kôdu, to je pored koordinatnih sistema koji se odnose na sam robot $\{O\}$, $\{R\}$, $Tx_5y_5z_5$, neophodno uvesti i koordinatne sisteme koji se odnose na bazu obradnog sistema $\{M\}$ i vrh alata $\{T\}$.

Kako je

$${}^R_T T = {}^0_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A \cdot {}^5_T T$$

odnosno,

$${}^M_T T = {}^M_R R \cdot {}^R_T T = \begin{bmatrix} {}^M_R R & \mathbf{p}_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & X_M \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & Y_M \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & Z_M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



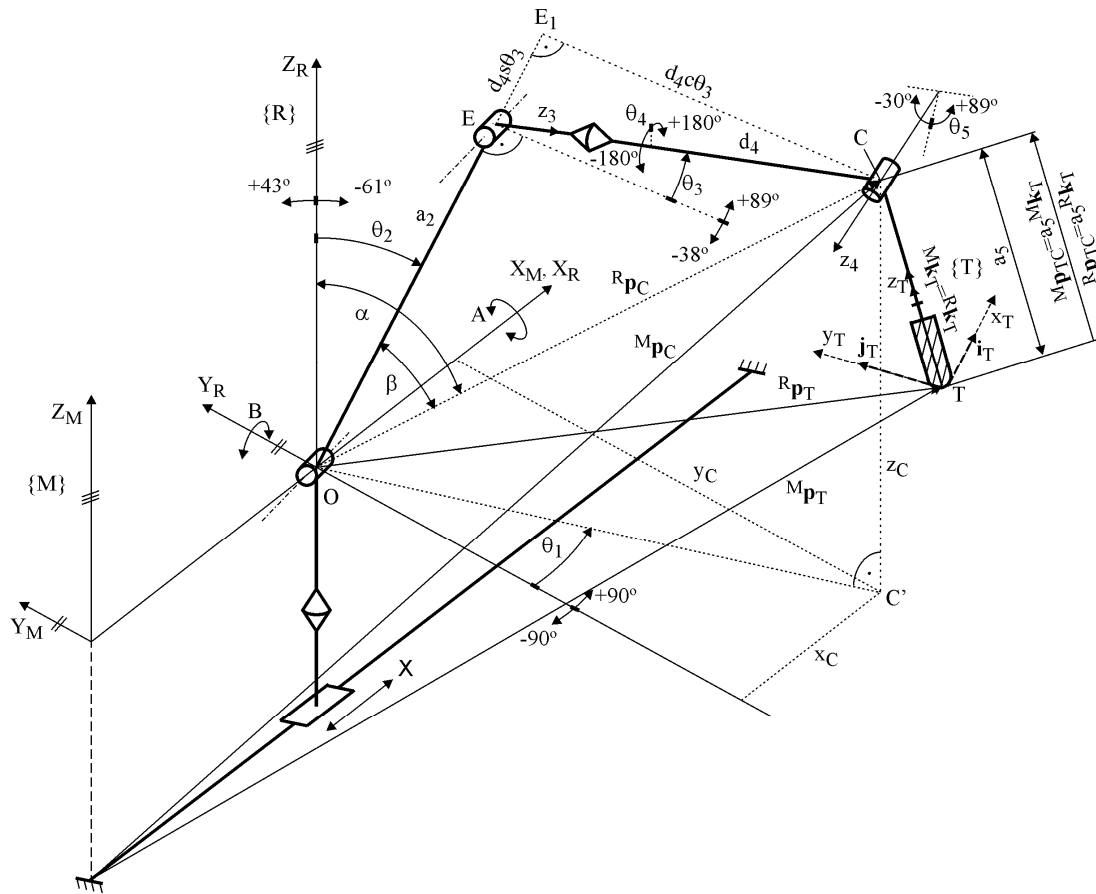
Slika 9. Kinematički model obradnog sistema na bazi robota sa slike 8d)

to su na osnovu modela kinematičkog dekuplovanja, slika 10, rešeni direktni i inverzni kinematički problem obradnog sistema sa slike 9, koji su zbog obimnosti izostavljeni.

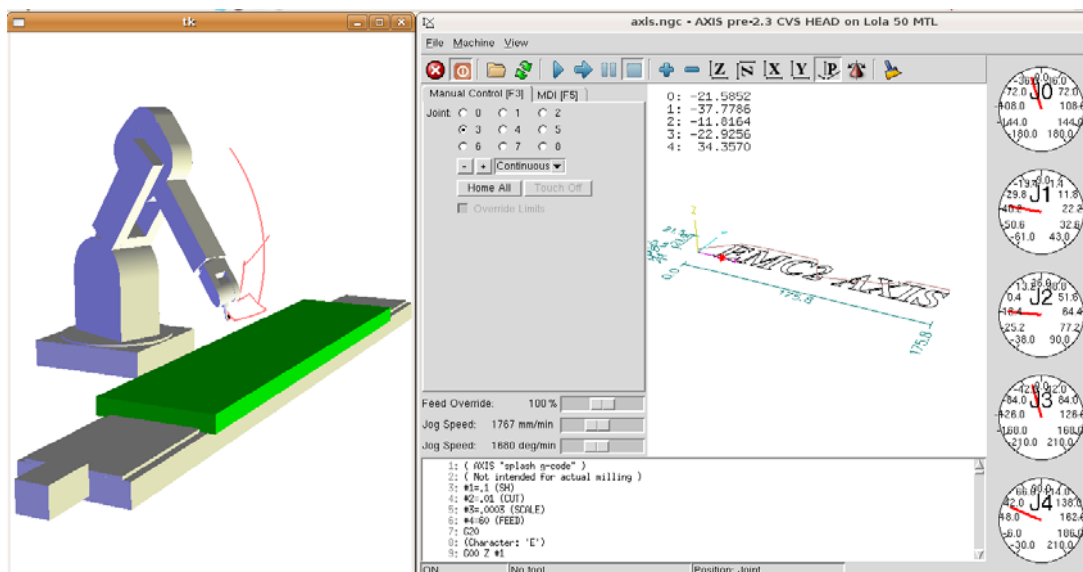
Osnovu postavljenog pristupa kinematičkog modeliranja čini specifičan način rešavanja inverzne kinematike ove, u suštini redundantne strukture, tako što rotacija osnove robota θ_1 učestvuje samo u ostvarivanju zahtevane orijentacije alata, dok dodatna translatorna osa X ostvaruje poziciju alata X_M .

Kinematičko modeliranje obradnih sistema na bazi robota sa slike 8, odnosno, rešenja direktnog i inverznog kinematičkog problema, osnova su za izbor projektnih parametara, analizu radnog prostora, simulacije i rekonfigurabilno upravljanje, čiji je razvoj u toku.

Pored CAD modela obradnih sistema na bazi robota sa slike 8 izvršeno kinematičko modeliranje je predstavljalo osnovu i za razvoj virtuelnih obradnih sistema na bazi robota u objektno orijentisanom jeziku Python, slika 11, koji omogućavaju realističnu simulaciju i verifikaciju programa višeosne obrade pomoću robota.



Slika 10. Model kinematičkog dekuplovanja



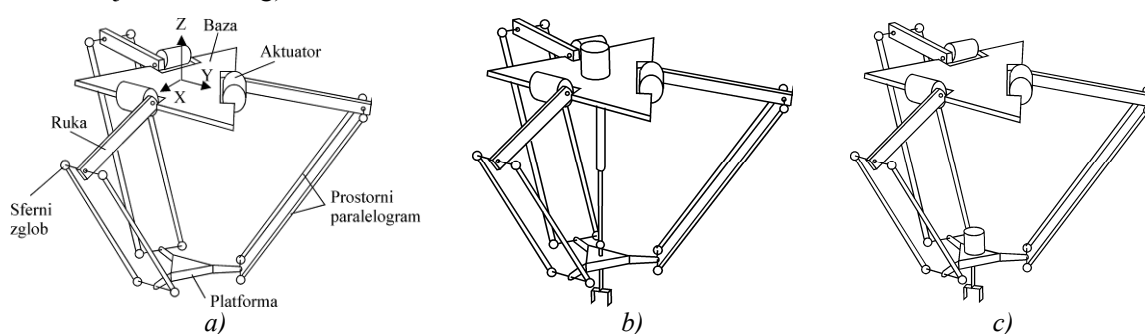
Slika 11. Virtuelni obradni sistem na bazi robota sa slike 8b,c)

4. ANALIZA PARALELNIH MEHANIZAMA TIPRA DELTA I KINEMATIČKO MODELIRANJE

Ova istraživanja pokrivaju prve dve tačke Teme 4: Istraživanje i razvoj prototipa paralelnog DELTA robota za pakovanje proizvoda konditorske i farmaceutske industrije i montažu u mikroelektronici.

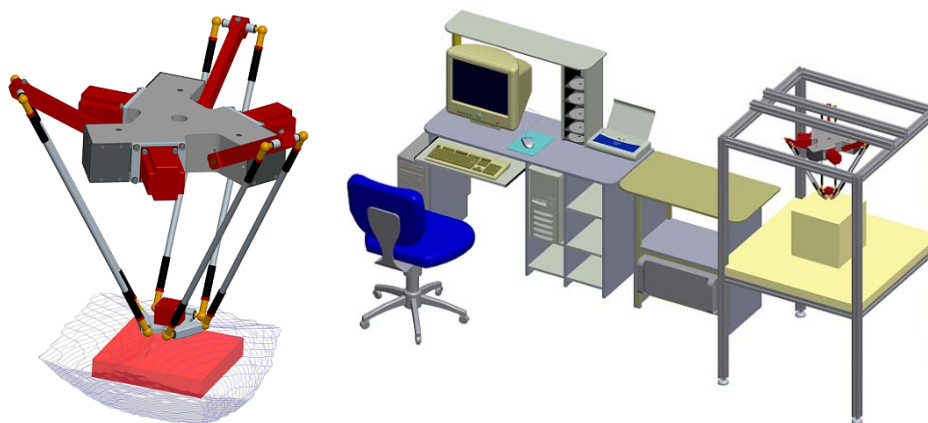
DELTA robot je osnova savremenih linija i sistema za manipulaciju i pakovanje proizvoda prehrambene, konditorske i farmaceutske industrije. Takođe ima primenu i u montaži u mikroelektronici. Zahtevani standardi produktivnosti, pouzdanosti i higijene u ovim industrijama potiskuju postojeće serijske robote iz procesa proizvodnje.

DELTA paralelni koncept je razvijen sa idejom da nema potrebe koristiti robote sa motorima od po nekoliko kilovata za manipulaciju delovima mase od nekoliko grama. Originalni shematski prikaz DELTA robota pokazan je na slici 12. Ovakva, na prvi pogled kompleksna struktura mehanizma sa većim brojem segmenata, slika 12a), omogućava da pokretna ploča ima samo 3 stepena slobode. Četvrti stepen slobode, odnosno orijentacija, obezbeđuje se aktuatorom na nepokretnoj ploči, čiji se moment prenosi pomoću dva kardanska zgloba i teleskopskog vratila, slika 12b), ili pomoću aktuatora na unutrašnjoj strani platforme, slika 12c). Sa aspekta kinematičkih mogućnosti DELTA robot može biti posmatran kao SCARA robot, s tim što mu je odnos nosivost/masa višestruko veći kao i brzine nego kod SCARA robota (brzine vrha preko 10 m/s, uz ubrzanja i iznad 10g).



Slika 12. DELTA mehanizam sa obrtnim zglobovima

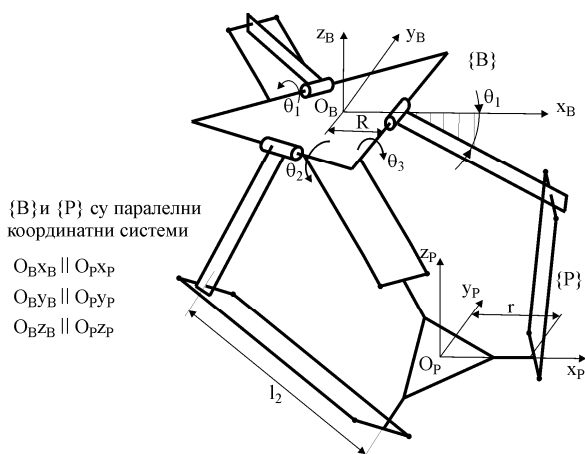
Na složenost modeliranja, projektovanja i izrade ukazuje činjenica da mali broj proizvođača robota uključuje DELTA robot u svoj proizvodni program. S obzirom na potrebe za ovakvim robotima i u domaćoj industriji, kao i za potrebe nastave i istraživanja, pokrenut je projekat razvoja domaćeg DELTA robota koji je u toku. Na slici 13 pokazan je CAD model usvojenog koncepta DELTA robota sa radnim prostorom i okruženjem, čiji će prototip biti jedan od praktičnih rezultata ovog projekta.



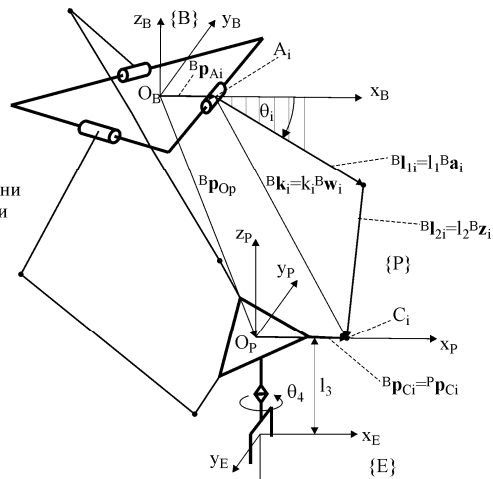
Slika 13. Postavljeni koncept domaćeg DELTA robota

Osnovu za projektovanje, upravljanje i izradu DELTA robota (u ovom projektu) sa izuzetnim karakteristikama čini razvoj kinematičkih modela koji su veoma složeni. Naša dosadašnja istraživanja su rezultirala razvojem kinematičkog modela DELTA robota na bazi minimalnog broja parametara, što ga čini efikasnijim od postojećih pristupa ne samo u pogledu upravljanja već i u pogledu efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju čiji je razvoj takođe u toku.

Slika 14 predstavlja geometrijski model osnovne strukture DELTA mehanizma sa tri stepena slobode sa osnovnim parametrima i koordinatnim sistemima {B} i {P} pridruženih bazi i platformi, respektivno.



Slika 14. Geometrijski model DELTA mehanizma



Slika 15. Kinematički model DELTA mehanizma

Kinematički model DELTA robota, pokazan na slici 15 omogućava kinematičko modeliranje na bazi minimalnog broja parametara. Ovo znači da su inverzni i direktni kinematički problem rešeni analitički, ali omogućavaju i paralelno procesiranje, što znači da će upravljački sistem moći da realizuje izuzetno brza CP kretanja sa izuzetno velikim ubrzanjima. Postavljeni pristup modeliranja takođe omogućava i izračunavanje ukupne Jakobijan matrice, kao i Jakobijan matrica inverzne i direktne kinematike. Vektori \mathbf{v} definisani u koordinatnim sistemima $\{B\}$ i $\{P\}$ su označeni sa ${}^B\mathbf{v}$ i ${}^P\mathbf{v}$. Vektori položaja centara obrtnih zglobova na bazi su ${}^B\mathbf{p}_{Ai}$ dok su vektori položaja središta između centara zglobova na platformi ${}^B\mathbf{p}_{Ci} = {}^P\mathbf{p}_{Ci}$, $i=1,2,3$. Vektor spoljašnjih koordinata ${}^B\mathbf{p}_{Op} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$ predstavlja koordinate centra O_p pokretne platforme dok vektor unutrašnjih koordinata čine upravljana ugaona zakretanja spojki ramena $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$. Jedinичni vektori ${}^B\mathbf{a}_i$, ${}^B\mathbf{z}_i$, ${}^B\mathbf{w}_i$, $i=1,2,3$ se koriste kao pomoćni vektori. Iz kinematičkog modela sa slike 2.4 postavljene su sledeće dve vektorske jednačine:

$$k_i {}^B\mathbf{w}_i = {}^B\mathbf{p}_{Op} + {}^{B=P}\mathbf{p}_{Ci} - {}^B\mathbf{p}_{Ai} \quad (1)$$

$$k_i {}^B\mathbf{w}_i = l_1 \cdot {}^B\mathbf{a}_i + l_2 \cdot {}^B\mathbf{z}_i \quad (2)$$

Kvadriranjem druge jednačine se dobija skalarna jednačina

$$l_1^2 - 2l_1 ({}^B\mathbf{a}_i \cdot k_i \cdot {}^B\mathbf{w}_i) + k_i^2 - l_2^2 = 0 \quad (3)$$

iz koje su izračunavanjem i zamenom vektora $k_i \cdot {}^B\mathbf{w}_i$ rešeni inverzni kinematički problem, odnosno, vektor unutrašnjih koordinata $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ i direktni kinematički problem, odnosno, vektor spoljašnjih koordinata ${}^B\mathbf{p}_{Op} = [x_p \ y_p \ z_p]^T$, tj. vektor položaja centra platforme O_p . Rešenja, koja su ovde zbog obimnosti izostavljena, osnova su za izbor projektnih parametara, analizu radnog prostora i upravljanje, čiji je razvoj u toku.

4. SISTEM ANALIZA SAVREMENIH KONSTRUKCIONIH MATERIJALA I IZRADA STENDA ZA IZVOĐENJE PROCESA MIKROREZANJA

4.1 Klasifikovanje arhitektonsko-građevinskog kamena

Razmatrani su osnovni aktuelni problemi klasifikovanja arhitektonsko građevinskog kamena, (AG kamena) kroz kompleksnu klasifikaciju zasnovanu na sledećim kriterijumima: obliku i dimenzijama, obradi i nameni proizvoda od kamena. Treba napomenuti da u današnje vreme u svetu i kod nas postoji više klasifikacija nemetalnih mineralnih sirovina, ali sa druge strane ne postoji neka univerzalna i opšte prihvaćena klasifikacija, već se ona ostvaruje na različite načine u zavisnosti od toga kojoj svrsi služi i na kojim kriterijumima se temelji.

Važno je reći da su u predloženoj klasifikaciji granice između pojedinih grupa, podgrupa kao i jedinica nižeg reda, umnogome konvencionalne i da su moguće različite kombinacije između pojedinih predstavnika. Tako, na primer, lomljen kamen (pogotovo ako je prirodno pločast) čini prelaz od neoblikovanog ka oblikovanom kamenu; rezne površine (vezne i vidne) kod istog komada kamena mogu biti različito obrađene – na primer, sečenje se može kombinovati sa razdvajanjem ili odlamanjem.

Klasifikacije arhitektonsko građevinskog kamena:

I Prema obliku i dimenzijama:

1. neoblikovan (nedimenzioniran) kamen
2. oblikovan (dimenzioniran) kamen

II Prema obradi:

1. neobrađen kamen
2. obrađen kamen

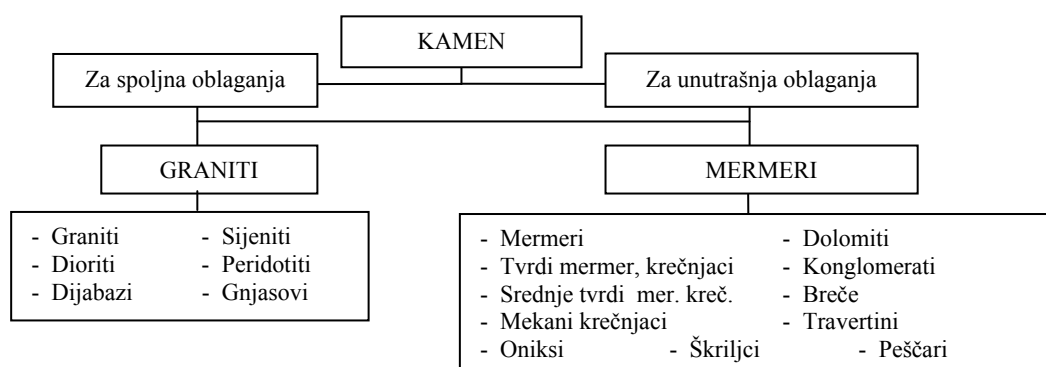
III Prema nameni:

1. tehnički kamen
2. ukrasni (arhitektonski) kamen

4.2 Komercijalna klasifikacija AG kamena

Pod arhitektonskim kamenom podrazumeva se kamen koji, pored osnovne funkcionalne uloge, ima izraženo dekorativno svojstvo, sadržano u opštem izgledu, obliku i rasporedu bojenih elemenata površine kamene ploče. U zidanim kamenim konstrukcijama, kamen predstavlja osnovni funkcionalni element gradnje, dok u betonskim ili čeličnim konstrukcijama, kamen predstavlja samo oblogu funkcionalnog elementa. U ovom poslednjem slučaju, kamenu je namenjene uloge: zaštite, izgleda i dekorativnog elementa.

Kada se kamen primenjuje kao konstrukcioni element, on se izrađuje u masivnim komadima, a kada predstavlja oblogu funkcionalnog elementa, izrađuje se u tanjim kamenim pločama debljine 2-4 cm. Na slici 16 data je opšta klasifikacija arhitektonskog kamena.



Slika 16. Opšta klasifikacija arhitektonskog kamena

Pod GRANITOM se podrazumevaju ne samo graniti nego i sve druge tvrde silikantne stene (magnatske i metamorfne), koje se standardnim tehnološkim postupkom obrade poliraju.

Pod MERMEROM se podrazumevaju, pored pravih mermera i sve druge karbonantne stene, pa i netipične stene, koje se lako i dobro poliraju.

4.3 Osvrt na strukturu genetskih tipova ležišta mineralnih sirovina Srbije

Savremena primena prirodnog kamena sve više je zastupljena plemenitim vrstama visokih estetskih kvaliteta i načina obrade kako podnih površina, tako i u primeni kod urbanog inventara i na fasadama zgrada. Korišćenje više vrsta različitih boja, oblika, veličina i stvaranje raznolikih matrica urbanog partera predstavlja više od običnog popločavanja. Kod nas su karakteristična sledeća ležišta AG kamena vrste kamena: mermer "Venčac plavi" i "Venčac beli"; granit "Bukuljski", granit "Ploče"- Arandelovac; mermer "Venčac roze" – Brezovac; AG kamen područja "Granit-Pešćar" - Ljig; dacit "Ljuta stena" – Ljig; AG kamen područja Novog Pazara; mermerna breča "Grab" – Guča; roze mermer "Suva Čuprija" – Novi Pazar; dolomit "Bela ruža" – Novi Pazar – beli; mermer "Plavi tok" – Užice; crveni krečnjak "Sirogojno" – Užički revir; krečnjak "Skržuti" – Užički revir; krečnjak crni "Yu porto" – Užice; AG kamen "Crna Reka" - Žagubica; AG kamen, mermer, gabro, granit i sijenit - lokaliteta Bor; granit "Ravno Bučje" – Knjaževac; crveni krečnjak "Tijovac" Knjaževac; AG kamen "Koral" – Lazovi (Kosjerić); daciti i dacito-andenziti "Vidačevica" – Planina Rudnik; gabropegmatiti – područje Porečke Reke; mikrocrveni krečnjak "Labukovo" – Niški revir; AG kamen biomikritksi krečnjak "Virovo" – Arilje; bazalt "Crni Vrh" – Kučevo; granit "Jošanica" – Jošanička Banja; oniks "Sijarina oniks" – Sijarinska Banja; AG kamen – područje Istočne i Jugoistočne Srbije; gnjasevi i migmatiti – donji kompleks Srpsko-Makedonskog područja; mermerne breče "Dečani" – lokalitet Peći; lerzolititi "Drenovac"- područje Orahovca; krečnjaci buloške formacije – područje Zapadne Srbije; crvene krečnjačke breče "Jabuka" – Prijepolje.

4.4 Određivanje fizičko mehaničkih svojstava kamena na bazi mermera i granita

Mehanika stena, kao naučna disciplina, proučava stenske materijale, u cilju upoznavanja njihovih fizičko-mehaničkih i tehnoloških svojstava:

Specifična težina mermera i granita. Ispitivanjem uzoraka granita i mermera oblika kocki dobijene su srednje vrednosti specifičnih težina, pri čemu je merenje ponavljano tri puta respektivno (tabela 1):

Specifična težina γ

Tabela 1

	Dimenzije			Masa uzorka	Zapremina uzorka	Specifična težina
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>			
Granit	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[kN/m ³]
“Jošanica”	50.00	50.00	49.00	375.16	122.50	30.04
“Bukovik”	50.00	50.00	48.00	312.17	120.00	25.22
Mermer						
“Venčac beli”	50.00	50.00	48.00	322.92	120.00	26.40
“Plavi tok”	49.00	50.00	48.00	319.59	117.60	26.66

Čvrstoća na pritisak. Čvrstoća na pritisak pri jednoaksijalnom opterećenju je, zapravo, odnos sile koja je dovela uzorak do loma i površine uzorka koja je bila izložena dejstvu sile. Ispitivanje ovog mehaničkog svojstva vrši se, po pravilu, na probnim uzorcima pravilnog oblika, valjaka ili kocke, različitih dimenzija, iz uslova da je odnos visine i prečnika valjka za čvrste stenske materijale 1, a za plastične materijale 2. Za razmatrane materijale je prikazana u tabeli 2.

Čvrstoća na pritisak σ_c

Tabela 2

Granit “Jošanica”		Sila koja dovodi do loma	Površina poprečnog preseka	Čvrstoća na pritisak
Dimenzije				
<i>a</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>F</i> [N]	<i>A</i> [m ²]	σ_c [MN/m ²]
50	50	600000	0.0025	240.00
Granit “Bukovik”				
49	49	262000	0.002401	109.12
Mermer “Venčac – beli”				
50	50	172000	0.0025	68.80
Mermer “Plavi tok”				
50	50	196000	0.002475	79.19

Čvrstoća na zatezanje. Čvrstoća na zatezanje probnog tela oblika kocke određuje se kao: $\sigma_t = 0,734 \cdot \frac{F}{d \cdot a}$, gde je: *d*[m] - dijagonala kvadrata, osa simetrije kocke i *a*[m] - stranica kocke, a vrednosti za navedene materijale date su u tabeli 3.

Čvrstoća na zatezanje σ_t

Tabela 3

Granit “Jošanica”		Sila koja dovodi do loma	Površina poprečnog preseka	Čvrstoća na istezanje
Dimenzije				
<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>F</i> [N]	<i>A</i> [m ²]	σ_t [MN/m ²]
50	50	60000	0.003405995	17.62
Granit “Bukovik”				
50	50	35000	0.003405995	10.28
Mermer “Venčac – beli”				
50	50	33000	0.003405995	9.69
Mermer “Plavi tok”				
50	50	28000	0.003405995	8.22

Ispitivanje mikrotvrdoće ukrasnog kamena “Knoop” metodom. Merenje mikrotvrdoće *Knoop* metodom vrši se utiskivanjem dijamantskim utiskivačem sa piramidalnim vrhom koji na površini materijala ostavlja romboidalni otisak sa lako merljivom dužom dijagonalom. Rezultati mikrotvrdoće po *Knoop-u* navedenih vrsta kamena prikazani su u tabeli 4.

Uzorak	NK	NK25	NK50	NK75	NK75/NK25
Granit "Jošanica"	4166	2000	4300	200	3.1
Granit "Bukovik"	3566	1900	3900	4900	2.6
Mermer "Venčac-beli"	2766	1800	2700	3800	2.1
Mermer "Plavi tok"	3066	2100	3100	4000	1.9

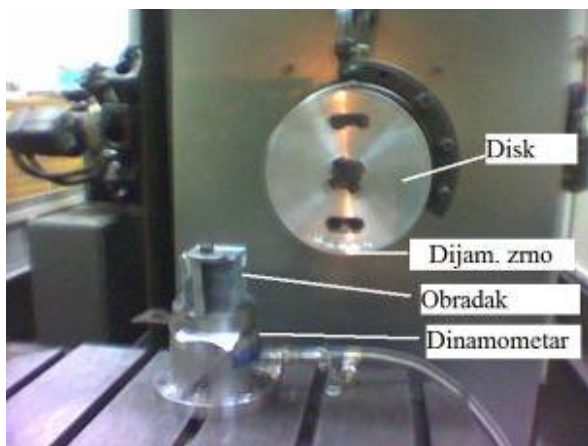
Dobijeni rezultati ukazuju da relativno jednobraznu tvrdoću imaju mermer "Venčac beli" i mermer "Plavi tok", što je u saglasnosti sa malim razlikama u tvrdoći glavnih minerala koji grade ova vrste kamena.

4.5 Izvođenje procesa mikrorezanja granita i mermera sa lokaliteta RS

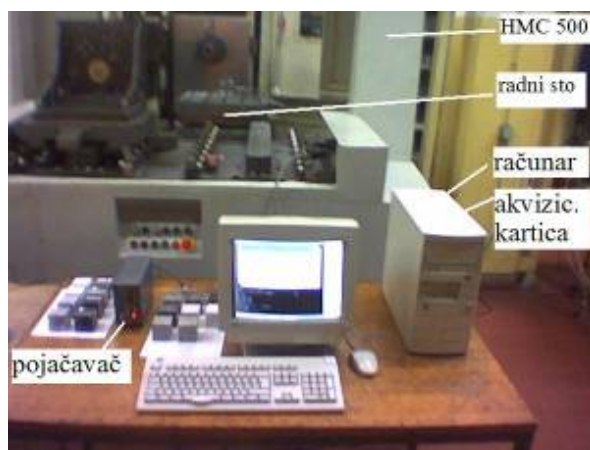
Važan aspekt ovoga istraživanja je da rezultati eksperimenta budu primenljivi za proces brušenja. Eksperiment mikrorezanja je izvođen na uzorcima postavljenim na stendu, koji se nalazi na mašini HMC 500. Obradak je oblika kocke stranice $a = 50$ mm, gde su sve strane predhodno ispolirane. U prva dva eksperimenta obradak stoji pod nagibom 1:90, a u preostalim pod nagibom 1:190, gde visinska razlika na polovini dužine odgovara maksimalnoj dubini rezanja. U trećem eksperimentu obrađivana površina je postavljena paralelno u odnosu na dinamometar. Dijamantsko zrno je oblika konusa sa uglom pri vrhu od 120° . Postavlja se i učvršćuje kruto na aluminijumski disk na rastojanju $r_z=75$ mm, koji je dinamički balansirani na specijalnom uređaju. Na radnom stolu HMC 500 postavlja se dinamometar i na njega uzorci od kamena na kojima se izvodi proces mikrorezanja. Pomoćnim kretanjem radnog stola brzinom $v_p = 5$ m/min uspostavlja se proces mikrorezanja sa promenom dubine rezanja. Kod eksperimenta mikrorezanja sa glavnim uzdužnim translatorskim kretanjem brzine radnog stola iznosile su: $v_p = 1 - 2 - 4 - 5$ m/min. Obimne brzine tocila kod ostalih eksperimenata iznosile su: $v_s = 7,85 - 11,1 - 17,7 - 22$ m/s.

Za izvođenje eksperimenta korišćeni su sledeći merni pribori i uređaji (slike 17 i 18):

- dvokomponentni dinamometar Kistler 9271 posredstvom koga je merena komponenta otpora prodiranja F_n
- pojačavač tipa Kistler 5007
- akviziciona kartica $\pm 10V$, 105 kHz
- računar Intel Pentium II, sa operativnim sistemom Quinex za zapis podataka merenja u realnom vremenu
- Laptop računar, HP Compaq nx9010 Intel Pentium IV za grafički prikaz dijagrama otpora rezanja F_n
- Laserski mikroskop LSM 510 sa Axioskop F32mot konfokalnom sekcijom, proizvođač Carl Zeiss, za merenje tragova i veličine prslina pri mikrorezanju.



Slika 17. Mikrorezanje izdvojenim dijamantskim zrnom



Slika 18. Izgled platforme sa mernom opremom za izvođenje eksperimenta

4.6 Analiza uticaja brzine rezanja i dubine rezanja na sile nastale pri mikrorezanju

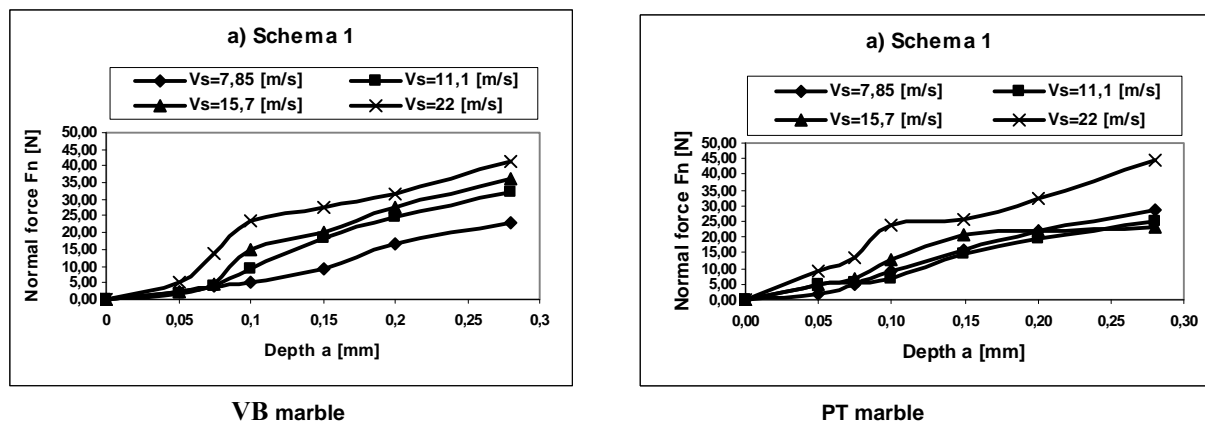
Primena dijamanta, kao abrazivnoga materijala, u poređenju sa ranije korišćenim abrazivnim materijalima, ograničena je, pre svega, relativno visokom cenom i odsustvom jasnih preporuka u pogledu izbora karakteristika toga alata i optimalnih režima za konkretne uslove obrade. Zato je neophodno analizirati pojave nastale u zoni kontakta alata sa obrađivanim materijalom, a to podrazumeva:

- određivanje uslova maksimalnog intenziteta skidanja materijala dijamantskim zrnom i

b) utvrđivanje normalne komponente otpora rezanja, koja deluje na dijamantsko zrno u zavisnosti od uslova njegovog rada, oblika i fizičkomehaničkih svojstava obrađivanoga materijala.

Na slici 19 prikazan je dijagram zavisnosti promene komponente otpora rezanja (F_n) u funkciji dubine prodiranja zrna pri mikrorezanju mermera, a na slici 20 granita.

Na osnovu dobijenih zavisnosti zaključuje se da sa porastom brzine prodiranja zrna raste otpor rezanja kod obe vrste mermera s tim da je veći pri obradi mermera PT u odnosu na VB, a kao posledica veće tvrdoće i čvrstoće.



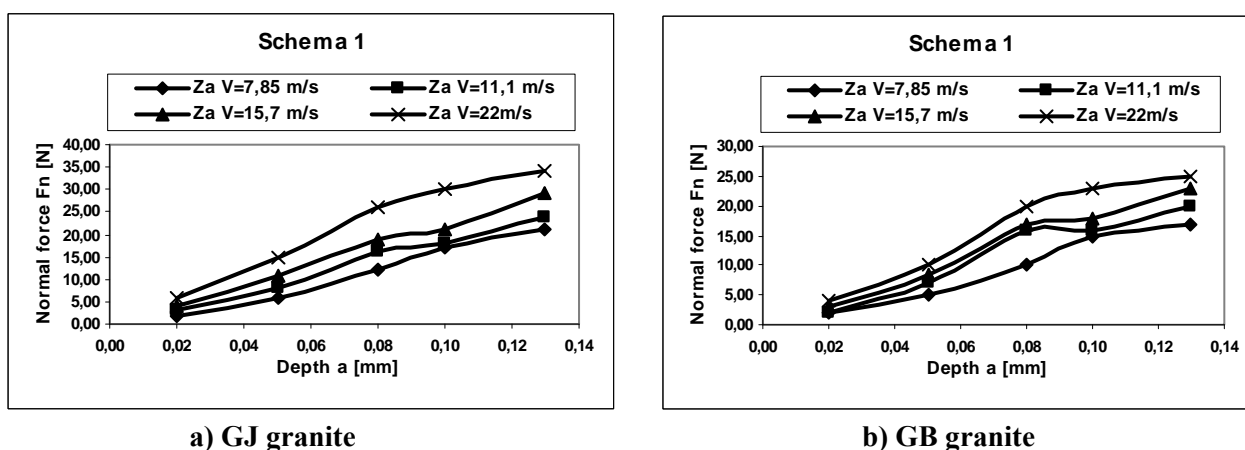
Slika 19. Promena komponente otpora rezanja F_n pri mikrorezanju mermera "Venčac beli-VB marble" i "Plavi tok- PT marble" u funkciji brzine i dubine prodiranja zrna

Nelinearnost promene F_n je posledica nejednorodnosti mermera. Takođe, povećanjem dubine prodiranja zrna povećava se sila rezanja uz konstataciju da na mestima gde postoji pad to je posledica prisustva meke faze u mermeru, ili manje stvarne dubine prodiranja nastale kao posledica prisustva mikroudubljenja od prethodne obrade.

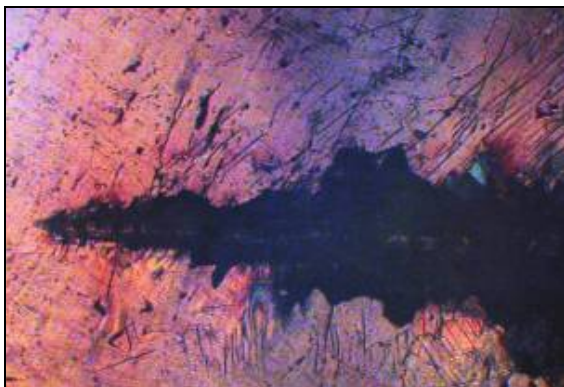
Prisustvo plastičnih deformacija pri mikrorezanju mermera VB je manje izraženo u odnosu na PT za sve šeme mikrorezanja, što se odnosi i na prisustvo radijalnih prslina. Pri dubini prodiranja reznog zrna $a=0.05$ mm u mermeru VB izmerene su radijalne prsline u dužini 0.35-0.38 mm.

Pri obradi mermera PT već pri dubini prodiranja zrna od 0.02 mm dolazi do krzanja duž traga zrna, što nije slučaj sa obradom mermera VB, kod koga se ova pojava uočava pri dubini 0.025 mm (slika 21).

Kod obe vrste mermera, povećanje brzine dovodi do porasta radijalnih prslina i krzanja duž traga reznog zrna, što dovodi do smanjenja granične dubine prodiranja zrna. Porast brzine rezanja $V_s = 7.85-11.1$ m/s kod mermera VB dovodi do smanjenja granične dubine sa 0.030 mm na 0.025 mm.



Slika 20. Promena komponente otpora rezanja F_n pri mikrorezanju granita "Jošanica- GJ granite" i "Bukovik- GB granite" u funkciji brzine i dubine prodiranja zrna



Slika 21. Nastanak krtog razaranja pri mikrorezanju mermera „Plavi Tok“ brzinom $v=7,85$ m/s sa povećanjem dubine prodiranja zrna (uvećanje 63 x)

Granit GB ima manju tvrdoću u odnosu na GJ, pa su pri mikrorezanju, pri jednakim dubinama prodiranja, manje izražene radijalne prskotine kod GB za obe šeme mikrorezanja. Analizom tragova na granitu zapaža se izraženije krzanje kod GB, kao posledica krupnije strukture i većeg izvaljivanja zrna (slika 22).

Merenjem je utvrđena granična dubina prodiranja zrna kod GJ od 0.020mm ($V_s=7.85$ m/s) i da se ona smanjuje na 0.015 mm, sa porastom brzine na 15.7 m/s. Radijalne prskotine, pri graničnoj dubini prodiranja, imaju dužinu 0.35 – 0.30 mm, za navedeni opseg brzina prodiranja.

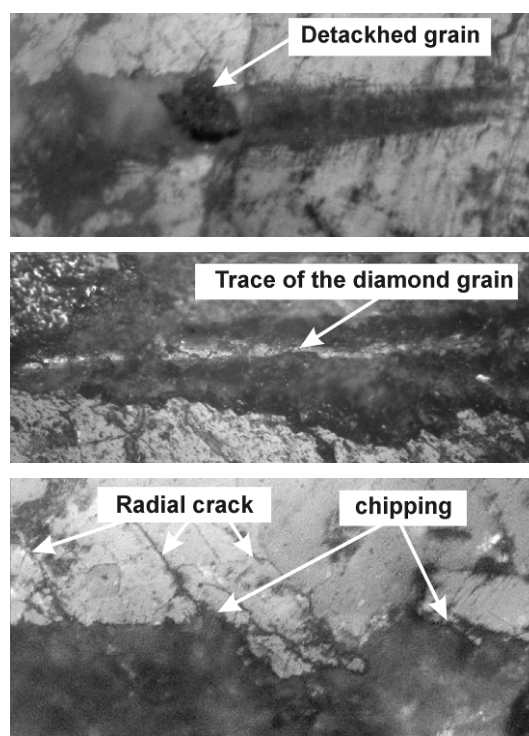
Pri istim uslovima prodiranja, kod GB granična dubina prodiranja je nešto veća i kreće se od 0.022mm ($V_s= 7.85$ m/s) do 0.018 mm ($V_s=15.7$ m/s), a izmerene dužine radijalnih prskotina 0.28-0.23 mm.

Zaključci o rezultatima u aktivnosti 4

Sumirajući izvedena istraživanja, moguće je konstatovati da je realizovan pristup višeparametarskog razvoja i primene dijamantskih alata u tehnologiji obrade brušenjem mermera i granita.

Prikazan je naučno baziran model za rešavanje problema određivanja optimalnih vrednosti režima obrade brušenja kamena uz primenu eksperimentalnih ispitivanja. Karakteristike ovog modela su sledeće:

- Eksperimentalno utvrđena fizičko-mehanička svojstva kamena potvrđuju svoje srazmerno učešće u obradljivosti ovih materijala.
- Režim brušenja pokazuje veliki uticaj na promenu izlaznih karakteristika procesa brušenja F_n , tako da dubina ima najveći, a brzina rezanja manji uticaj
- Dobijene funkcije obradljivosti pri mikrorezanju granita "Jošanica", "Bukovik" i mermera "Venčac Beli" i "Plavi Tok", mogu se usvojiti za opisivanje promena komponenti otpora pri daljoj analizi brušenja, u razmatranim oblastima varijacije režima obrade i mogu poslužiti za upravljanje procesom brušenja navedenih vrsta mermera i granita.



Slika 22. Fenomeni procesa mikrorezanja GB granita

5. MODELIRANJE I RAZVOJ KONCEPTA DIGITALNOG KVALITETA U DIGITALNOJ KOMPANJI

Digitalno inženjerstvo predstavlja paradigmu modeliranja inženjerskih sistema na početku ovog veka. Proizvod se posmatra u životnom veku, a njegov digitalni model se posmatra integrisano (projektovanje, planiranje, proizvodnja, korišćenje, povlačenje iz upotrebe). Lanci snabdevanja se odnose na prva tri elementa integrisanog digitalnog modela. Naša istraživanja se odnose na razvoj inteligentnog CAI modela, čija osnovna stuktura obuhvata: bazu znanja, inference engine, interpreter ulaza i izlaza, kao i korisnički interfejs. Ove godine naša istraživanja su bila orijentisana na razvoj modela baze znanja. Na odabranim primerima su testirani elementi EO za prizmatične delove, koji imaju tolerancije: dužina, oblika, položaja i uglova, a urađeni su korišćenjem sofvera *protege*. Takođe se posebno napominje da su ova istraživanja deo EU programa Manufuture, koji naša zemlja realizuje kroz kolaborativna istraživanja Manufuture Serbia, kao i poznate svetske naučne organizacije: CIRP, IFIP i IMEKO. Ovde su, u skraćenom obliku, prikazani

ostvareni rezultati, koji su prikazani i na međunarodnim konferencijama u organizaciji, ili pod pokroviteljstvom CIRP-a, IFIP-a i EU Manufuture Programa.

5.1 Cilj istraživanja

Razvoj inteligentnog sistema za CAI (Computer aided inspection) na numerički upravljanim mernim mašinama (NUMM) se zasniva na razvoju koncepta baze znanja zasnovanog na inženjerskoj ontologiji (EO). U ovom istraživanju EO razvoj baze znanja se koristi u dva prilaza. Prvi, ili ontološki prilaz, sastoji se od sagledavanja realnih primena nove paradigme - koncepta nazvanog inženjerska ontologija u domenu proizvodne metrologije, dok drugi ili geometrijski, odnosi se na analizu geometrije mernih delova na NUMM kroz definisanje i opis osnovnih geometrijskih primitiva u obliku pogodnom za potpun opis u metrološkom smislu. Zadatak ontološkog prilaza je da definiše domen, u ovom slučaju koordinatna metrologija, a zatim klase, individue i osobine klasa i individua domena. Globalno, geometrijski pristup predstavlja most između CAD i CAI, koji se naziva CAIP. Cilj istraživanja je razvoj inteligentnog sistema za CAI kroz integraciju rezultata ova dva prilaza.

Trenutni pristupi pretraživanju, deljenju i ponovnoj upotrebi inženjerskih informacija baziran na statističkim metodama i ključnim rečima su neefikasne u razumevanju inženjerskih sadržaja, jer oni nisu dizajnirani da budu direktno primenjeni na inženjerski domen. Na osnovu sprovedene analize trenutnog stanja metodologija za razvoj EO u sprovedenim istraživanjima je predložen postupak razvoja EO na konceptualnom nivou u šest koraka, u cilju razvoja nove metodologije za razvoj EO. Prilikom kreiranja koncepta akcenat je na definisanju osnovnih komponenti EO, kao što su klase, individue i osobine.

U sprovedenim istraživanjima su definisani metrološki primitivi kao klase ili koncepti inženjerske ontologije u domenu proizvodne metrologije u cilju razvoja (armature oko koje će se graditi baza znanja za metrološke informacije o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela) informacionog modela za CAI zasnovanog na EO.

Ontološki prilaz. U odnosu na filozofiju, pojam ontologije u inženjstvu ima drugačije značenje i prvenstveno se odnosi na predstavljanje znanja. Pored potrebe za ponovnom upotrebom znanja jedne oblasti, javlja se i potreba za deljenjem znanja između više različitih korisnika, najčešće softverskih agenata. Istraživanja u oblasti veštačke inteligencije i predstavljanja znanja, pojam ontologije vezuju za mogućnost ponovne upotrebe i deljenja znanja neke oblasti, ističući da je osnovna namena inženjerske ontologije (EO) prenos i razmena znanja. Međutim jedno je izvesno, ontologija je pronašla svoje mesto u oblastima u kojima je semantika baza komunikacije među ljudima i sistemima. Neki od razloga koji podstiču razvoj metodologija za razvoj EO, pa samim tim i EO, su:

- inženjeri danas retko čine napor da pronađu inženjerske sadržaje izvan pretrage preko ključnih reči, istovremeno sve više ignorišući ponovnu upotrebu znanja zato što odgovarajući alati za pretragu inženjerskih informacija nisu dovoljno razvijeni.
- u industrijskom sektoru, projektanti provode 20-30% vremena u komunikaciji i preuzimanju informacija.

Osnovni cilj ontološkog prilaza je da razmatri trenutno stanje razvoja EO i predlaži postupak njenog razvoja na konceptualnom nivou u domenu proizvodne metrologije.

Geometrijski prilaz. Kao što je poznato, merni predmeti čije se merenje ili inspekcija vrši na NUMM određeni su idealnom i realnom geometrijom. Idealna geometrija sa stanovišta proizvodne metrologije (merenja delova u proizvodnji) definisana je CAD modelom mernog predmeta i opisana osnovnim metrološkim primitivima: tačkom, pravom, krugom, ravni, sferom, cilindrom, konusom, elipsom i torusom. Složeni i izvedeni geometrijski oblici se dobijaju komponovanjem osnovnih metroloških primitiva. S druge strane, realna geometrija predstavlja stvarni oblik mernog predmeta. Opisivanje tolerancija dužina, uglova, oblika i položaja se vrši preko navedenih osnovnih metroloških elemenata idealne geometrije. Stvarna mera se dobija kao rezultat poređenja realne i idealne geometrije. Poređenje ove dve geometrije predstavlja i osnovu razvoja softvera za NUMM. Geometrijske podloge na kojima se zasniva većina softvera za NUMM su osnovni metrološki primitivi. Suština metrološkog softvera je interpretacija metroloških primitiva u obliku koji je pogodan za njihovu identifikaciju.

Kao što je poznato proces merenja na NUMM se zasniva na korišćenju četiri koordinatna sistema: merne mašine, mernog senzora i mernog predmeta (dva). Za geometrijski pristup bitan je i koordinatni sistemi merenja mernog predmeta koji je nosilac jednog dela metroloških informacija jer se pomoću njega opisuje položaj i orijentacija svih idealnih metroloških primitiva koje sadrži jedan metrološki deo.

5.2 Rezultati istraživanja

Ključni rezultati do kojih se došlo nakon sprovedenih istraživanja su metod za razvoj EO u domenu proizvodne metrologije i opis geometrijskih primitiva kao koncepata inženjerske ontologije.

Predloženi metod razvoja EO. Ontološko inženjerstvo je još uvek u ranoj fazi razvoja i da još uvek nema detaljno razrađene metodologije razvoja ontologije, kao i karakteristike ontologije koje treba imati u vidu pri razvoju ontologije. U pogledu metodologije za razvoj ontologije karakteristično je da većina istraživačkih grupa pre nego što razvije ontologiju napravi svoju metodologiju, tako da predloženi koncept razvoja svake metodologije može biti prihvaćen tek nakon razvoja ontologije i njene uspešne primene. Sumarno trenutne metode za razvoj ontologije zahtevaju velike napore u cilju njihove integracije od onih koji se bave njenim razvojem, usvajanjem i odražavanjem. Veoma malo pokušaja je napravljeno ka sistematizovanom ocenjivanju kompletnosti i tačnosti postojećih ontologija. Kao što je rečeno, razvoju EO predhodi razvoj metodologije ili postupka po kome se razvija IO. U ovim istraživanjima definisan je postupak razvoja jedne edukacione inženjerske ontologije u sedam koraka i izvršena je implementacija u softverskom paketu *Protege*. Pre nego što se krene u definisanje korak po korak, treba definisati osnovne ekomponente EO. Osnovne komponente EO su:

- individue,
- osobine,
- klase.

Prema tome, razvoj ontologije je iterativan proces, koji u praktičnom smislu obuhvata definisanje klasa i hijerarhije klasa gde klasa opisuje koncepte određene oblasti i može se sastojati iz jedne ili više podklasa, kao i definisanje osobina i individua određenog domena.

Korak 1: Određivanje oblasti i obima ontologije – obuhvata definisanje:

- domena ontologije,
- cilja/svrhe ontologije,
- načina održavanja.

Jedan od načina da se utvrdi obim ontologije jeste da se napravi lista pitanja na koja bi baza znanja na osnovu ontologije trebalo da da odgovore. Ova pitanja kasnije treba da daju odgovor na: Da li ontologija sadrži dovoljno informacija za odgovore na ova pitanja? Da li odgovori na zahtevaju posebni nivo detalja ili zastupanje određene oblasti? Odgovori na ova pitanja pomažu da se poboljša ontologija u ranim fazama razvoja i da se ograniči obim informacionog modela određenog domena.

Korak 2: Razmotriti mogućnosti postojećih ontologija: odnosi se na analizu mogućnosti prilagođavanja ili usvajanja razvijenih IO, pre svega sa stanovišta obima i domena primene.

Korak 3: Nabranje bitnih termina odabranog domena: u ovom delu razvoja IO potrebno je nabrojati sve moguće termine koji će se koristiti u razvoju ontologije. Ovaj korak predstavlja pripremu za sledeća dva koraka koji su jedni od najvažnijih koraka u razvoju jedne ontologije. Naime, jedan deo ovih termina postaće nazivi klasa dok preostali naziv osobina pojedinih klasa, a jedan deo će ostati neupotrebljen jer se ispostavlja da zbog ograničenja obima nisu bitni.

Korak 4. Definisane klase i njihove hijerarhije.

Korak 5. Definisane individua i osobina: kao što je rečeno, jedan deo definisanih termina će predstavljati osobine klasa. Osobina je relacija između dve individue i one mogu biti ili tranzitivne ili simetrične. Često se nazivaju i slotovi. Nastale kao posledica činjenice da sama klasa neće obezbediti dovoljan sadržaj informacija, opisuju unutrašnju strukturu koncepata.

Individue predstavljaju objekte oblasti od interesa i predstavljaju najniži mogući nivo predstavljanja u ontologiji. U istraživanjima se definišu dva glavna tipa osobina, i to osobine objekata i osobine podataka. Osobine objekata su relacije između dve individue i one mogu biti:

- Inverzne osobine: svaka osobina objekta može imati odgovarajuću inverznu osobinu. Ako neka osobina vezuje individuu a sa individuom b , kaže se da je njena inverzna osobina osobina koja vezuje individuu b sa individuom a .
- Funkcionalne osobine: ako je osobina funkcionalna, za datu individuu, tada može imati najviše jednu individuu koja je u relaciji sa tom individuom preko te osobine.
- Tranzitivne osobine: ako je osobina tranzitivna, i osobina relacija između individua a i b , kao i između individua b i c , onda možemo zaključiti da je individua a u relaciji sa individuom c preko osobine P .

- Simetrične osobine: ako je osobina P simetrična, i osobina relacije između individua a i b , onda je individua b takođe u relaciji sa individuom a preko osobine P . Ako je osobina tranzitivna onda je njena inverzna osobina takođe tranzitivna. Ako je osobina tranzitivna onda ona ne može biti funkcionalna.
- Antisimetrične osobine: ako je osobina P antisimetrična, i osobina relacije između individua a i b , onda individua b ne može biti u relaciji sa a preko osobine P .
- Osobina refleksije: za osobinu P se kaže da je refleksivna kada je ona relacija samo osobine a .
- Antirefektivne osobine: ako je osobina P antirefektivna, može se opisati kao osobina koja je relacija između individua a sa individuom b , gde individua a i individua b nisu iste.

Osobine mogu biti različitog tipa, npr. brojna vrednost ili string itd. Pod aspektim osobina podrazumevamo sledeće: (i) **Kardinalnost**: Pojam kardinalnosti u ovom kontekstu definiše koliko različitih vrednosti može imati jedna osobina. Neki sistemi prave razliku između jednostruke i višestruke kardinalnosti. (ii) **Tip osobina**: *string* je najjednostavniji tip osobine, a sastoji se iz nisa brojačanih ili slovničkih simbola; *broj* opisuje osobine sa numeričkim vrednostima; *Bulove operacije* kao što su „da“ i „ne“; *osobina* koja je deo lanca nabiranja, npr. treća, peta itd; i *slučajevi*.

Korak 6. Kreiranje instansi: zadnji korak u razvoju ontologije se odnosi na kreiranje pojedinačnih instansi klasa. Definisane pojedinačnih instansi zahteva: (1) izbor klasa; (2) kreiranje pojedinačnih instansi tih klasa; (3) određivanje tipa osobine.

Definisanje geometrijskih primitiva kao klasa EO. Kao što je rečeno, idealna geometrija metrološkog modela dela se dobija uz pomoć osnovnih metroloških primitiva ili idealnih geometrijskih oblika, koji su određeni svojim parametrima. Ovi parametri jednoznačno određuju svaki metrološki primitiv u odnosu na koordinatni sistem mernog predmeta. Skup ovih parametara predstavlja skup metroloških informacija o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela.

Polazeći od pretpostavke da se osnovni metrološki primitivi mogu predstaviti kao koncepti ili klase inženjerske ontologije na primeru metrološkog modela dela koji sadrži sve osnovne metrološke primitive predstavljen je njegov opis sa aspekta inženjerske ontologije. Drugim rečima, data je mini – ontologija odnosno ontologija metrološkog dela, kako bi se ispitalo šta su potencijalne osobine i individue ako se zna šta su klase ili koncepti.

Model informacija o idealnoj geometriji zasnovan na ontološkom pristupu se može podeliti na:

- skup metroloških informacija o idealnoj geometriji u odnosu na koordinatni sistem mernog dela,
- skup metroloških informacija o izvedenim geometrijskim karakteristikama na mernim predmetima (skup informacija o odnosima između koordinatnog sistema zadatka i koordinatnog sistema mernog predmeta).

5.3 Zaključak i dalja istraživanja

Istraživanja izvršena ove godine, dozvoljavaju nam da definišemo sledeće zaključke: (i) za bazu znanja inteligentnog CAI modela moguće je koristiti OE i razviti poseban koncept metroloških karakteristika kao više-nivovski model, (ii) iz CAD modela proizvoda se mogu definisati geometrijski primitivi, koji čine bazu za razvoj metroloških primitiva, i (iii) integracijom geometrijsko-metroloških primitiva, definiše se koncept baze znanja za ovaj model, kao deo integrisane baze znanja u lancu snabdevanja inženjerskog proizvoda.

U sledećoj godini naša istraživanja će biti usmerena ka: (i) geometrijskom strukturisanju CAD modela proizvoda radi definisanja geometrijskih karakteristika, i (ii) razvoju koncepta automatskog generisanja/pretraživanja OE za kompleksne inženjerske proizvode, klase krivih linija i površina. Sve ovo će biti deo integrisanog digitalnog modela proizvoda, u njegovom životnom veku.

6. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Predstavljeni rezultati istraživanja su nastali tokom realizacije projekta tehnološkog razvoja Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji je podržan od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Vlade Republike Srbije.

7. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovih istraživanja je ojačavanje tehnologija u domaćim malim i srednjim preduzećima, radi podizanja konkurentnosti privrede Republike Srbije. Dati su prikazi *očekivanih ključnih rezultata* i *značaja istraživanja*, kao glavnih elemenata, pomoću kojih se mogu opisati ciljevi istraživanja u ovom projektu.

Očekuje se doprinos tehničkom progresu, koji je nezamisliv bez novih koncepcija mašina i alata i bez usavršavanja tehnologija obrade. Republika Srbija može da ima proizvodne kapacitete za proizvodnju mašina alatki i reznog alata. Uz primenjenu nauku i sistematizovano znanje treba da podigne privredu na kvalitativno viši nivo, koji će biti baziran na znanju, što je definisano Strategijom održivog razvoja Republike Srbije. Ova istraživanja i razvoj nove generacije obradnih sistema treba da doprinesu podizanju tehnološkog nivoa i konkurentnosti domaće industrije, naročito u inovativnim malim i srednjim preduzećima, koja su već iskazala interes za ove sisteme. Ciljevi ovog projekta su sledeći pojedinačni doprinosi razvoju domaće industrije: (1) razvoj novih domaćih obradnih sistema za izradu složenih proizvoda i za obradu složenih delova niže klase tačnosti, (2) znanja o višeosnim obradnim sistemima i o objektnom programiranju tih sistema, (3) razvoj domaćih mini obradnih sistema sa paralelnom kinematikom, (4) razvoj domaćih sistema za pakovanje i montažu na bazi robota sa paralelnom kinematikom, (5) povećavanje proizvodnosti i bolje energetske dejstvo alata na obradak i maksimalno iskorišćenje sistema mašina alatka- obradak-alat, obradom bez ekoloških posledica i (6) povećanje agilnosti i fleksibilnosti domaćih kompanija u pogledu kvaliteta na osnovu kreiranog digitalnog modela kvaliteta, zasnovanog na ontološkom modelu. Pripremaju se sledeći ključni rezultati: (1) Kompleksni program izlaska industrije Srbije na strana tržišta. (2) Program revitalizacije industrije mašina alatki u Srbiji. (3) Savremeni obrazovno-istraživački centri. (4) Laboratorijski prototip stone petoosne mašine alatke nove generacije. (5) Mini laboratorijska i edukaciona stona troosna glodalica sa paralelnom kinematikom. (6) Laboratorijski prototip DELTA robota sa 3+1 stepen slobode. (7) Mreža centara tehnološke izvrsnosti u obradi čelika, keramike, abraziva i supertvrđih sintetičkih materijala. (8) Sistem specijalizovanih proizvođača alata različitih oblika, konkurentnih na svetskom tržištu po tehničkom i intelektualnom nivou. (9) Stend za izvođenje procesa mikrorezanja i za sistem analizu obradljivosti raznorodnih materijala. (10) Konstruktivno-tehnološki centri savremenog kompjuterskog projektovanja i programiranja. (11) Jezik i formalna ontologije za rešavanje problema proizvodnog preduzeća iz domena kvaliteta, kao i integracija sa drugim ontologijama. (12) Model digitalne kompanije i njen digitalni model kvaliteta, kao preventiva u otklanjanju interoperabilnosti između pojedinih podsistema kompanije u pogledu kvaliteta.

Značaj istraživanja u ovom projektu je u razvoju i implementaciji jedne strategije bazirane na istraživanju i inoviranju radi ubrzavanja reinženjeringa industrije putem uvođenja nove generacije obradnih sistema. Cilj je doprinos razvoju domaće industrije bazirane na znanju i uključivanje u aktuelne programe istraživanja u svetu.

Lj. Tanović, P. Bojanić, M. Glavonjić, D. Milutinović, V. Majstorović, R. Puzović,
B. Kokotović, M. Popović, S. Živanović, N. Slavković, G. Mladenović, S. Stojadinović

The development of a new generation of domestic machining systems The results of research activities in 2011.

Resume

The subject of research activities is a new generation of domestic machining systems, together with manufacturing technologies that are needed for development of these machining systems and for their undisturbed functioning. The key research areas in these technologies are machine tools, robots, tools, manufacturing processes and digital quality. The research activities are focused to the open architecture technologies regarding the control systems and programming, but regarding the structures of these systems, up to date research in these areas is followed. In this way we provide the flexibility of manufacturing resources and agility of the company for which these new manufacturing systems together with accompanying technologies are developed. In this paper we give a review of the research results in 2011.

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

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



31. simpozijum

CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA

Beograd, maj 2012.

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

Radojević, Z., Radojević, M., Radojević, D. CIM SISTEM – NEOPHODNOST DANAŠNJEG INVESTIRANJA.....	1.1
Marković, D., Pokrajac, S., Simonović, V., Marković, I., Kosanić, N. EKONOMSKI POKAZATELJI U FUNKCIJI MENADŽMENTA INOVACIJOM GPS TEHNOLOGIJE U POLJOPRIVREDI SRBIJE	1.5
Bracanović, Z. UTICAJI FAKTORA KONKURENTSKE PREDNOSTI NA ODABIR STRATEGIJE PREDUZEĆA.....	1.11
Jovanović, J., Milanović, D., Pokrajac, S., Đukić, R. GLOBALNO SAGLEDAVANJE PROIZVODNIH I FINANSIJSKIH EFEKATA POSLOVNO-PROIZVODNIH SISTEMA.....	1.17
Josipović, S., Pokrajac, S., Dondur, N. DRUŠTVENI TROŠKOVI KORIŠĆENJA ENERGIJE VETRA.....	1.23
Slavković, G., Spasić, Ž. MODELIRANJE DINAMIKE SISTEMA NA PRIMERU UNIVERZITETA	1.28





Z. Radojević¹, M. Radojević², D. Radojević³

CIM SISTEM – NEOPHODNOST DANAŠNJEG INVESTIRANJA

Rezime:

Investicije su neophodan uslov za ostvarenje progressa. Svaki uslužni i proizvodni sistem se razvija i da bi ostvario povećanje postojećeg kapaciteta neophodno je proširenje uz ulaganje finansijskih sredstava. Kvalitetan proizvod ili celu uslugu možemo ostvariti, pre svega kvalitetnom pripremom proizvodnje ukoliko upotrebimo najsavremeniji CIM sistem, koji nam obezbeđuje kvalitetan proizvod ili uslugu, što je zahtev svakog investicionog programa. Iz toga proizilazi prikazani naslov. Znači ne može se sačiniti kvalitetan investicioni program ukoliko nismo primenili savremeni CIM sistem.

Ključne reči: investicija, CIM sistem, progres, kvalitet, proizvod, usluga

1. Uvod

Zahvaljujući investicijama ostvaruje se tehnološki progres koji utiče na zadovoljenje ljudskih potreba, jer se stvara efikasniji tehnološki proces, čiji je učinak uvek veći od postojećeg.

Ako uzmemo u obzir da se poboljšanje tehnološkog procesa ostvaruje kroz investicije i kupovinu nove opreme koja je produktivnija od postojeće, onda se javlja neophodnost znanja iz oblasti investiranja. Sačiniti neophodnu tehno-ekonomsku analizu pri nekoj inovaciji ili kupovini savremene opreme, uči nas da svaki svoj predlog možemo sagledati kroz uloženi novac. Iz napred iznetog proizilazi da najnovija dostignuća u razvoju ne bi mogla da se ostvare bez investiranja. Pod razvojem podrazumevamo: razvoj proizvoda, razvoj opreme, razvoj alata, razvoj pomoćnih pribora, razvoj konstrukcije, tehnologije i sl.

Mnogi autori slično definišu pojam investicija i investiranja, ali se svi slažu sa osnovnom pretpostavkom da investicije odnosno investiranje predstavlja podnošenje žrtava u sadašnjosti da bi se dobile određene koristi u budućnosti.

„Veoma značajna karakteristika procesa investiranja je neizvesnost, koja obavezno prati ovaj proces. Efekti koji se očekuju u budućnosti su neizvesni jer je i sama budućnost neizvesna. Ulaganja, odnosno izdaci učinjeni u sadašnjosti, daju samo nadu da će se u budućnosti ostvariti takvi efekti koji će biti veći od učinjenih izdataka.“ (1)

U svakodnevnoj praksi pod investiranjem podrazumevamo:

- novčana sredstva koja se ulažu u određeni projekat. Pod projektom podrazumevamo tehnološki proces proizvodnje koji reprodukuje određenu količinu proizvoda. Sem tehnološkog procesa podrazumevamo razne alate i pomoćne pribore koji ubrzavaju proizvodni proces,
- proces transformacije novčanih sredstava u proizvodna dobra,
- investiranjem dobijamo veću količinu proizvoda koja zadovoljava zahteve tržišta, a samim tim i društvo postaje bogatije.

Proces investiranja je kompleksan, dinamičan proces, čija efikasna realizacija zavisi od kvalitetno smišljenog usmeravanja i vođenja ka definisanom cilju. Realizacija investicija zavisi od procesa upravljanja. Upravljanje je proces koji se odvija kroz nekoliko faza: planiranje, organizovanje, kadrovanje, vođenje i kontrolisanje.

(1) Dr Zoran Radojević, Fakultet organizacionih nauka - Beograd, Jove Ilića 154, 062/294-037, zovime1@gmail.com

(2) Dr Miroslav Radojević, 064/8675-910, zovime1@gmail.com

(3) Ms Darko Radojević, Kompanija „Dunav osiguranje“ a.d.o. - Beograd, Makedonska 4, 064/1313-833, zovime1@gmail.com

Proces investiranja sastoji se iz sledećih faza:

- prethodne (preinvesticione) analize (predstudija izvodljivosti),
- izrade investicionog programa,
- donošenje odluke o realizaciji investicije,
- izrada tehničke dokumentacije,
- realizacija investicije – izgradnja investicionog objekta, ili nabavka potrebne opreme, i dr.,
- puštanje u rad i probna proizvodnja.

U toku procesa investiranja vrši se: obezbeđivanje sredstava za realizaciju investicije, ugovaranje sa bankom za dobijanje potrebnih sredstava, ugovaranje i kupovina licence ili samo opreme, obuka kadrova, druge značajne aktivnosti za realizaciju investicije.

Upravljanje procesom investiranja obuhvata smišljeno i efikasno vođenje i usmeravanje ka definisanom cilju, znači ka efikasnoj realizaciji određenog investicionog projekta, na koji se proces investiranja odnosi.

Bez obzira na složenost izbora investicionog projekta i nemogućnost brzog merenja i upoređivanja investicija, investicione odluke donosile su se na osnovu intuicije i empirije, a manje na osnovu egzaktnih proračuna.

Korišćenje odgovarajućih metodologija za pripremu i ocenu investicionih projekata je jedini ispravan put za poboljšanje efikasnosti investicionih projekata, jedini ispravan put za poboljšanje efikasnosti investicionih odluka i ukupne efikasnosti realizacije investicionih projekata.

Sada ćemo detaljnije opisati razvojnu funkciju unutra proizvodno/uslužnog sistema.

2. Razvojna funkcija

Pri projektovanju novog proizvodnog sistema ili unapređenju i proširenju postojećeg, najvažnije za budućnost je sačiniti kvalitetnu funkciju razvoja, koja će omogućiti dobar položaj proizvodnog sistema na izvoznom tržištu gde uvek treba prevazići konkurenciju. To omogućava stabilnost na tržištu i unapred predvidiv kvalitetan stratejski razvoj. Zbog toga ćemo detaljno opisati razvojnu funkciju bez obzira na delatnosti proizvodnog sistema.

Razvojna funkcija je jedna od najvažnijih funkcija u proizvodno-uslužnom sistemu. Ona potpomaže unapređenje postojećeg proizvodno/uslužnog procesa, stvara nove proizvode/usluge i unapređuje mnoge podsisteme koji omogućuju poboljšanje postojećeg poslovanja, odnosno stvara veću dobit (profit).

Kvalitetan razvoj obezbeđuje dug život proizvodnog/uslužnog sistema sa tehničkog i ekonomskog aspekta.

Razvojna funkcija se najčešće sastoji od sledećih podfunkcija:

- razvoj proizvoda,
- razvoj kapaciteta,
- razvoj tehnologija,
- razvoj sistema kvaliteta ISO 9000/ 2000,
- prototipske radionice koja opslužuje razvoj proizvoda/usluga i razvoj tehnologije,
- razvoj marketinga,
- razvoj menadžmenta.

RAZVOJ PROIZVODA/USLUGE ima zadatak i cilj da postojeći proizvod/uslugu unapredi po obliku, kvalitetu materijala, funkciji, težini, dizajnu i tehnologiji izrade, što će doneti nižu cenu koštanja proizvoda/usluge od postojeće. Ovaj razvoj se može odnositi na delove ili elemente proizvoda, što u krajnjoj liniji ostvaruje postavljeni cilj, jer smanjuje cenu koštanja proizvoda/usluge. Ovo se ostvaruje uz određeno znanje grupe inženjera različitih profila, koji koriste model integrisane fleksibilne proizvodnje (CIM sistem), a koji se odnosi na razvoj proizvoda uz pomoć računara CAE – Computer Aided Engeneering.

RAZVOJ KAPACITETA se odnosi na izbor količine mašina, uređaja i opreme čija je produktivnost veća od postojeće. Sem iskazanog uvek se pravi tehno-ekonomska analiza koja nam pokazuje za koliko vremena se isplate uložena sredstva. Sigurno ekonomska analiza nam omogućuje da krenemo u investicioni zahvat, ako su troškovi proizvodnje/usluga manji, nego ako radimo sa postojećim mašinama, uređajima, opremom i obratno. Ako se opredelimo za investiciona ulaganja, onda koristimo metodologiju koja je propisana za nabavku investicionih sredstava, a koristimo metode koje pokazuju opravdanost investicionih ulaganja. Isto se odnosi i na prostor u kome će se obavljati proizvodni/uslužni proces ili će pomagati realizaciji istog (fabričke hale, uslužni prostor, skladišta i dr.)

RAZVOJ TEHNOLOGIJE ima prevashodni zadatak da skрати vreme proizvodnje-usluge. To se postiže na različite načine:

- izradom pomoćnih pribora, koji skraćuju vreme trajanja tehnoloških operacija. Pri ovome se vodi računa da se u što kraćem roku isplate uložena sredstva,
- konstruisanjem uređaja koji ubrzava vreme trajanja tehnoloških operacija pri čemu se vodi računa o ekonomičnosti,
- spajanjem više tehnoloških operacija u jednu, čije je vreme trajanja kraće od zbira pojedinačnih,
- boljom organizacijom na radnom mestu pri čemu se skraćuje vreme trajanja tehnološke operacije,
- tehničkim rešenjima međuoperacijskog transporta, pri čemu se gubici vremena svode na minimum uz mala ulaganja,
- unifikacijom i standardizacijom elemenata proizvoda, čija je cena visoke serije niska,
- mehanizacija tehnološke linije za proizvodnju, koja se najčešće susreće u serijskoj proizvodnji, jer su velika ulaganja, pa se isplati samo ako se proizvodi veliki broj jedinica proizvoda,
- automatizacija tehnološke linije za proizvodnju/usluge koja se najčešće susreće u masovnoj proizvodnji.

Kod fleksibilne proizvodnje problem tehnologije se rešava znanjem zakonitosti grupne tehnologije. Suština grupne tehnologije (ili obrade) sastoji se u klasifikaciji delova u grupe, koje pri obradi zahtevaju istovrsnu opremu i zajedničku pripremu i reglažu mašina.

RAZVOJ SISTEMA KVALITETA ISO 9000/2000 je posledica da se svi ponuđači, ili izvođači radova dovedu u približno isti kvalitet. To garantuje da će svi izvođači radova morati da rade po kvalitetu koji je propisao međunarodni standard. Kvalitet projekta (proizvoda/usluge) ogleda se kroz sledećih deset faza:

- određivanje tehničkih, funkcionalnih svojstava i glavnih parametara proizvoda/usluga,
- izrada idejnog (konceptijskog) rešenja proizvoda,
- izrada stila (dizajna) proizvoda (izrada modela u pogodnoj razmeri, najčešće u prirodnoj veličini 1:1),
- proračunavanje vitalnih elemenata, agregata i integralnog proizvoda/usluge,
- projektovanje (konstruisanje) proizvoda/usluge u celini i njihovih agregata, sklopova i elemenata (izrada konstrukcijske dokumentacije za prototip proizvoda/usluge),
- izrada prototipova proizvoda/usluge,
- ispitivanje prototipova proizvoda/usluge (laboratorijska, pogonska i ambijentalna u uobučajenim eksploatacionim uslovima),
- izrada radioničke (proizvodne) konstrukcijske dokumentacije za proizvod i tehničko odobrenje proizvoda/usluge,
- izrada raznovrsne tehničke dokumentacije za proizvod/uslugu radi komercijalne upotrebe (uputstva za upotrebu, uputstvo za održavanje, katalog rezervnih delova, slike, šeme i fotografije za propagadne publikacije i dr.),
- praćenje proizvodnje/usluge i eksploatacija proizvoda/usluge i sprovođenje potrebnih konstrukcijskih poboljšanja.

U svim navedenim fazama sprovodi se niz aktivnosti u vezi sa kvalitetom.

PROTOTIPSKA RADIONICA je prostor u kome se vrši proba i ispitivanje proizvoda/usluge, koji je projektovan u razvoju. Ovo se odnosi na delove ili elemente proizvoda/usluge. Posle ispitivanja delova, elemenata ili proizvoda/usluge, ukoliko se pokažu zadovoljavajući ili očekivani rezultati verifikuje se postojeća dokumentacija, izradi se kompletna radionička dokumentacija u birou za projektovanje i konstruisanje, izvrši se kompletno tehničko pripremanje proizvodnje i pusti se nulta serija u proizvodnju/uslugu. Uočeni nedostaci u nultoj seriji se otklone i nastavlja se dalja proizvodnja/usluga. To ne znači da je završeno sa razvojem tog proizvoda/usluge, već se dalje razvija taj proizvod i usavršava, sve dok ne prestane proizvodnja/usluga takvog proizvoda/usluge. Kod razvoja tehnologije najčešće se u prototipskoj radionici izrađuju ili improvizuju alati, pomoćni pribori, mehanizmi i drugo, što zavisi od tehničkih mogućnosti radionice. Ukoliko ne može da se realizuje zamišljeni projekat u prototipskoj radionici, angažuje se usluga kod drugog proizvodnog sistema. Prototipska radionica, sem za izradu prototipa proizvoda, alata, pomoćnih pribora i dr., najčešće služi i kao laboratorija za ispitivanje elemenata, koje je projektovao kadar razvojne funkcije ili podsistem razvoja, koji je u sastavu poslovno-proizvodnog sistema.

RAZVOJ MARKETINGA se odnosi na iznalaženje metoda, tehnika i načina, kako da se proširi tržište, koje absorbuje naše proizvode/usluge. Sem toga, ovde se vrši istraživanje za novi proizvod/uslugu, koji bi dopunio postojeći proizvodni/uslužni program, ako se osnovni proizvod/usluga manje prodaje, bilo zbog smanjenog tržišta ili zbog ekspanzije konkurencije, koja je napravila kvalitetniji i jeftiniji proizvod/uslugu. Tada odeljenje za razvoj marketinga alarmira situaciju menadžmentu proizvodno/uslužnog sistema kroz razne aktivnosti.

RAZVOJ MENADŽMENTA se odnosi na unapređenje upravljanja (planiranje, organizovanje, vođenje, kadrovanje i kontrolu) i rukovođenja u proizvodno/uslužnom poslovnom sistemu.

Sada ćemo prikazati i kompjuterizaciju u industriji koja govori o kompjuterski integrisanim tehnološkim sistemima, ili skraćemo CIM sistemima (Computer Integrated Manufacturing)

3. CIM sistem

„Osnovni elementi sistema odnose se na projektovanje proizvoda, planiranje proizvodnje, upravljanje proizvodnjom, proizvodnu opremu i proizvodne procese. Primarni ulaz obuhvata koncepte proizvoda (kreativne aktivnosti) i potrebe za određenim proizvodima (zahtevi tržišta) dok su završeni proizvodi primarni izlaz sistema. Povratna sprega predstavlja informacioni tok o troškovima kao i karakteristikama i mogućnostima svakog od definisanih osnovnih elemenata sistema u ostvarivanju proizvodnih programa. Prema Špur-u (Spur), CIM je integracija informacionih tokova svih oblasti u proizvodnji u kojoj informacione tehnologije imaju ključnu ulogu.“(2)

Danas možemo reći da se kompletan informacioni sistem u proizvodno/uslužnom sistemu sprovodi uz pomoć računara. Tako integrisani informacioni sistem nam omogućuje da jeftinije i kvalitetnije brzo dolazimo do željene informacije. Svi upravljački procesi i podprocesu odvijaju se preko primanja, obrade, prenosa i korišćenja informacija. Upravljački proces u bilo kom proizvodno/uslužnom sistemu ostvaruje se donošenjem odluka, kao i njihovim pretvaranjem u akcije. Upravljački proces uvek je ispunjen određenim informacijama, koje prima i predaje, odnosno sadrži stalne složene veze i tokove. Velika složenost upravljanja proizvodnim/uslužnim sistemom i neizvesnost parametara koji opisuju proces proizvodnje/usluga zahteva da se u formiranju informacionog sistema koji je automatizovan za obradu podataka i donošenje odluka. Integracijom CAD i CAM sistema ideja je da se na osnovu modela predmeta koji se stvara u računaru, automatski dobija tehnologija obrade na CNC mašinama, programi za mašine i robote. Iz ovoga se vidi da je proces integracije dosta složen, koji se rešava u zavisnosti od tehnološkog procesa proizvodnje/usluge. Tok integracije podataka je u CAE (Computer Aided Engeneering) sistem koji se sastoji od podsistema: CAP (Computer Aided Planing), CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) i CAQ (Computer Aided Quality).

4. Zaključak

Kroz ovaj rad pokušali smo da prikazemo mesto, ulogu i značaj CIM sistema pri investiranju u izgradnju novog ili proširenju postojećeg proizvodno-uslužnog sistema. Sem prikazanog sažetog znanja iz investicija, posebno je prikazana razvojna funkcija koja prati od početka (rađanja) proizvoda/usluge do njihovog umiranja (prestanak proizvodnje/usluge proizvoda). Znači, sem stvaranja proizvoda/usluge, neophodno je pratiti njegov razvoj kako proizvoda/usluge tako i proizvodnog procesa. Na kraju je u najvažnijim crtama prikazan CIM sistem sa svim njegovim karakteristikama.

Literatura

1. JOVANOVIĆ dr PETAR, „Upravljanje investicijama“, Grafoslog, Beograd, 2001.
2. MILAČIĆ dr VLADIMIR, SPASIĆ dr ŽARKO, „Kompjuterski integrisani tehnološki sistemi CIM - sistemi“, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Jupiter - zajednica, Beograd, 1990.
3. RADOJEVIĆ dr ZORAN, „Operacioni menadžment“, ATM Knjiga, Beograd, 2010.

Summary:

Investment is a necessary condition for achieving progress. Each utility and production system develops in order to increase the existing capacity it is necessary to make some expansion by investing funds. A quality product or service can be achieved, primarily by preparing high-quality production - if we use the most advanced CIM system, which provides us with a quality product or service, which is a prerequisite of any investment program. The title hereof stems from this idea. So, one can not make a quality investment program, unless modern CIM systems are applied.

Keywords: investment, CIM system, progress, quality, product, service



D. Marković, S. Pokrajac, V. Simonović, I. Marković, N. Kosanić¹

EKONOMSKI POKAZATELJI U FUNKCIJI MENADŽMENTA INOVACIJOM GPS TEHNOLOGIJE U POLJOPRIVREDI SRBIJE²

Sažetak:

U ovom radu ispitan je stepen ušteta pri primeni najsavremenijih tehničkih sistema za satelitsko navođenje i automatsko upravljanje pri obavljanju poljoprivrednih operacija tokom cele sezone. Uzorno imanje bila je Poljoprivredna korporacija Beograd koja se prostire na oko 21.000 hektara obradive površine. Analiziran je uticaj oblika parcele i pravca kretanja agregata traktor-priključna mašina pri kalkulisanju ušteta usled smanjenja preklopa susednih prohoda. Izvršena je analiza ušteta po kulturama (kukuruz, pšenica, soja, šećerna repa i detelina) i po operacijama za svaku kulturu pojedinačno, prema tehnologiji proizvodnje primenjenoj na uzornom imanju. Posebno je analizirana funkcionalna zavisnost ekonomskih ušteta u gorivu i inputima za operacije distribucije mineralnog hraniva i hemijske zaštite biljaka.

Ključne reči: pšenica, satelitsko navođenje, uklapanje prohoda, gorivo, inputi, uštete.

1. UVOD

Brzi napredak u elektronici, računarstvu i računarskim tehnologijama inspirisao je ponovni interes u razvoju sistema vođenja vozila. Sadašnji predlozi uglavnom su bazirani na mašinskom vidu i satelitskom pozicioniranju (Karadžić et al, 2007).

Najdirektnija posledica opremanja traktora i drugih mašina opremom za satelitsko pozicioniranje i automatsko upravljanje je preciznije uklapanje prohoda. Ovo podrazumeva preciznije vođenje mašina po pravcu i smanjenje preklopa (sledstveno i smanjenje broja prohoda po parceli) tokom obavljanja određene operacije.

Iz preciznijeg vođenja mašina po pravcu proističu sledeće direktne prednosti i uštete: smanjenje gubitaka i oštećenja biljne mase i kvalitetnija struktura. Iz smanjenja broja prohoda po parceli proističu sledeće direktne prednosti i uštete: smanjenje poljoprivrednih inputa, smanjenje potrošnje goriva, poboljšanje ekoloških uslova, poboljšanje ergonomskih uslova, povećanje produktivnosti rada. Stepem navedenih direktnih prednosti i ušteta pri određenoj poljoprivrednoj operaciji zavisi od samih zahteva operacije.

Samo korišćenje satelitske navigacije donosi i dve indirektno prednosti i uštete koje se odnose na sve poljoprivredne operacije. Prva indirektna prednost je mogućnost rada noću što je naročito bitno pri ograničenim vremenskim rokovima za obavljanje određenih poljoprivrednih operacija. To ograničenje prevashodno potiče od loših meteoroloških prilika. Preklop pri podrivanju/tanjiranju i manuelnom navođenju danju je 10-20 cm, a noću 40-50cm (Aniama, 2007; Auernhammer, 2001). Pri korišćenju preciznog navođenja uz pomoć satelitskog navođenja preklop može da se svede na 5- 10 cm u svim uslovima (Renschler et al, 2002). Druga indirektna prednost se odnosi na to što većina sistema za satelitsko navođenje ima integrisane i druge funkcije, koje mogu dobro da posluže za menadžment, knjigovodstvo, razne dokumentacije i planiranje proizvodnje u narednom periodu (Luck et al, 2010; Petrovački et al, 2007.).

¹ Dragan Marković, Slobodan Pokrajac, Vojislav Simonović, Ivana Marković, Nedžad Kosanić, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16, E-mail: dmarkovic@mas.bg.ac.rs

² Rezultati istraživanja su deo projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, program Tehnološki razvoj, pod nazivom „Istraživanje i razvoj opreme i sistema za industrijsku proizvodnju, skladištenje i preradu povrća i voća“, broj TR 35043.

Uslovi u Srbiji dozvoljavaju preciznost od 2 do 3 cm primenom Agros servisa i kinematske metode pozicioniranja (Gavrić et al, 2006.).

2. MATERIJAL I METOD

Ušteda (ekonomska dobit), koja se ostvaruje primenom satelitskog pozicioniranja i automatskog upravljanja, nije ista za sve biljne vrste i primenjene agrotehničke mere odnosno proizvodne tehnologije. Pri proračunu potencijalnih ušteda u proizvodnji na imanjima PKB korišćeni su podaci preuzeti iz evidencije za proteklu sezonu odnosno 2011. godinu, a za proračun je odabrano 5 najzastupljenijih biljnih vrsta, i to:

1. merkantilni kukuruz/silažni kukuruz (ukupno 6573 ha)
2. merkantilna pšenica/merkantilni ječam (ukupno 6049 ha)
3. merkantilna soja (ukupno 2384 ha)
4. šećerna repa (ukupno 1247 ha)
5. lucerka (ukupno 2705 ha)

Pored biljne vrste navedena je zasejana površina prema podacima preuzetim iz *plana setve po kulturama za period 2010/11*, a navedene biljne vrste zauzimaju ukupno 18959 ha odnosno 88% od ukupno zasejanih 21491 ha u redovnoj i drugoj setvi na imanjima PKB.

Za proračun ušteda pri primeni tehnike u domenu satelitskog pozicioniranja i automatskih upravljanja traktorima i drugim mašinama na imanjima PKB korišćen je tabelarni program GPS AgroKalkulator v.1 koji je razvijen u okviru studije Isplativost primene GPS navođenja i uklapanja prohoda u poljoprivredi Vojvodine, a raspoloživ u Pokrajinskom sekretarijatu za poljoprivredu, vodoprivredu i šumarstvo.

U pojedinim poljoprivrednim operacijama (poput DMH i zaštite biljaka) koristi se više sredstava tj. inputa (i_1, i_2, \dots, i_n) istovremeno, čija je količina po hektaru k_1, k_2, \dots, k_n , a nabavna cena po jedinici c_1, c_2, \dots, c_n . U proračun je potrebno ubaciti ukupnu količinu po hektaru (ukoliko je potrebno podeljenu s brojem zahvata) sa prosečnom cenom srazmernom količinama odgovarajućih inputa. Ovom prilikom korišćena je sledeća relacija za izračunavanje srednje cene smeše:

$$c_s = \frac{k_1 \cdot c_1 + k_2 \cdot c_2 + \dots + k_n \cdot c_n}{\sum_{j=1}^n k_j}$$

Širine zahvata priključnih mašina korišćene u proračunu odgovaraju realnim širinama zahvata mašina koje se inače koriste na imanjima PKB. Koefficient iskorišćenja mašina je velik, 85%, jer se smatra da se u transportu i na uvratinama ne troši više od 15% vremena. Cena goriva za traktore je 1 €/l, a cena goriva za poljoprivredne avione 1,6 €/l. U tabeli 1 prikazani su radni zahvati korišćenih priključnih mašina na imanjima PKB, preklopi sa i bez navođenja, kao i radne brzine sa i bez navođenja.

Tab. 1 Karakteristike korišćenih mašina

mašina	širina zahvata mašine [m]	preklop [m]		brzina [km/h]	
		bez navigacije	GPS navigacija	bez navigacije	GPS navigacija
podrivač	6	0,5	0,3	7	7,5
tanjirača	6	0,5	0,3	9	9,5
drljača	6	0,5	0,3	10	10,5
setvospremač	6	0,5	0,3	10	10,5
valci Cambridge	6	0,5	0,3	8	8,5
sejalica	6	0,2	0,02	8	8,5
prskalica	18	1,5	0,5	9	9,5
rasipač	24	2	0,5	10	10,5
avion	30	4	2	150	155
kombajn	9	0,9	0,5	6	6,5

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Uticaj oblika parcele

Najpre je ispitano kako ušteda zavisi od oblika parcele. Svaka parcela se aproksimira pravougaonom parcelom jednake površine i najbližijeg oblika. Potrebno je ispitati kako oblik parcela istih površina manifestovan kroz dužinu i širinu parcele utiče na stepen ušteda, kao i pravac kretanja traktora tokom operacije. Oblik parcele manifestuje se koeficijentom r koji se predstavlja kao količnik dužine a i širine b parcele: $r = a/b$. Ako je širina zahvata priključne mašine d , onda je broj prohoda po dužini parcele $n_a = b/d$, a broj prohoda po širini parcele $n_b = a/d$. Ako se sa p označi smanjenje preklopa tokom operacije pri kojoj se koristi satelitsko navođenje, onda je ukupna površina koja nije tretirana dva puta pri susednim prohodima: $P_a = bpa/d$ odnosno $P_b = apb/d$. Iz ovog proizilazi da je ušteda usled smanjenja dvostrukog tretiranja delova parcele nezavisna od pravca kretanja agregata traktor-priključna mašina, te da traktor treba voditi dužim pravcem, jer se smanjuje broj uvratina na kojima se manevriše agregatom.

Nastanak oplazina, usled manje tačnosti navođenja, takođe ima efekta na ekonomske pokazatelje traktorskih sistema za obradu zemljišta jer se na tim mestima zemljište uopšte ne obradi u toku prohoda ili se sledeće operacije rade na neobrađenom delu zemljišta, a to onda prouzrokuje, na primer manji prinos. Pošto se površina oplazina teško meri, uvek se pretpostavlja da se primenjuje preklap, koji sa sigurnošću eliminiše nastanak oplazina (Zhang et al, 2006.).

3.2. Analiza ušteda za pšenicu

Proračun potencijalnih ušteda u proizvodnji merkantilne pšenice i ječma uz primenu satelitskog pozicioniranja i automatskog upravljanja na traktorima i drugim mašinama izveden je prema podacima istorije polja imanja na kome je gajen ječam na površini 90 hektara.

Ušteda u proizvodnji merkantilne pšenice i ječma uz primenu satelitskog pozicioniranja postiže se pre svega pri sledećim operacijama:

1. Ljuštenje strnjišta tanjiračom, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 120,11 € ili 1,33 € po hektaru za ovu operaciju.
2. Podrivanje, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 158,16 € ili 1,76 € po hektaru za ovu operaciju.
3. Tanjiranje, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli za dva prohoda je 244,17 € ili 2,71 € po hektaru za ovu operaciju.
4. Distribucija mineralnog hraniva rasturačem, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i u količini rasutog mineralnog hraniva i količini potrošenog goriva. Dodatna prednost može biti mogućnost lokacijski specifične distribucije (Turan et al, 2009). Cena đubriva je 0,3 €/kg za NPK i 0,26 €/kg za ureu, norma po hektaru je 120 kg odnosno 102 kg. Procenjena ušteda na ovoj parceli za dva prohoda je 511,45 € ili 5,68 € po hektaru za ovu operaciju.
5. Setvospremiranje, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 86,33 € ili 0,96 € po hektaru za ovu operaciju.
6. Drljanje, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 83,44 € ili 0,93 € po hektaru za ovu operaciju.
7. Setva, najznačajniji efekat je u uštedi semena, te održavanju pravca, te ekvidistantnosti i paralelnosti redova, što omogućava pravilnu strukturu biljaka na parceli, iako kod strnjina ovo nije toliko značajno kao kod okopavina. Cena semena je 0,29€/kg, setvena norma je 214 kg po hektaru. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 327,62 € ili 3,64 € po hektaru za ovu operaciju.
8. Valjanje – kemberidž valjcima, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i količini potrošenog goriva. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 85,92 € ili 0,95 € po hektaru za ovu operaciju.
9. Distribucija mineralnog hraniva avionom, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i u količini rasutog mineralnog hraniva i količini potrošenog goriva. Cena đubriva (urea) je 0,26 €/kg, norma po hektaru je 102 kg. Procenjena ušteda na ovoj parceli je 229,96 € ili 2,56 € po hektaru za ovu operaciju.
10. Zaštita useva avionom, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i u količini potrošenog sredstva za zaštitu i količini goriva. Dodatna prednost može biti mogućnost lokacijski specifične zaštite.

Cena sredstava za zaštitu je 31,75 €/l, dok je norma po hektaru (nekoliko komponenti) 0,66l. Procenjena ušteda na ovoj parceli za dva prohoda je 353,02 € ili 3,92 € po hektaru za ovu operaciju.

11. Žetva, najznačajniji efekat je u smanjenju preklopa, a sledstveno i u količini potrošenog goriva, uz merenje prinosa kao opciju. Procenjena ušteda na ovoj parceli za dva prohoda je 173,42 € ili 1,93 € po hektaru za ovu operaciju (Marković et al, 2008).

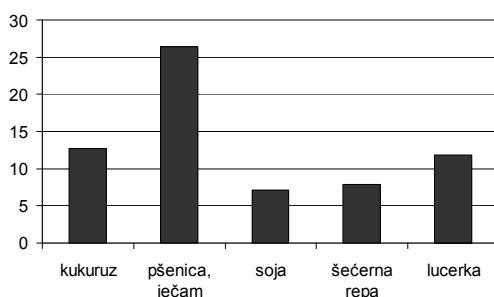
Vođenje agregata pri setvi zahteva najprecizniji signal i obavezno automatsko upravljanje traktorom da bi se ostvario željeni efekat, pre svega u održavanju preciznog pravca. Najznačajniji efekat je u uštedi semena, održavanju pravca, te ekvidistantnosti i paralelnosti redova, što omogućava pravilnu strukturu biljaka na parceli, iako kod strnjina ovo nije toliko značajno kao kod okopavina.

Pri operaciji presovanje/baliranje u proizvodnji strnjina primena satelitskog pozicioniranja nema značajniji uticaj.

Ukupna ušteda na ovoj parceli je 2.370 € ili 26 € po hektaru.

3.3. Uporedna analiza rezultata i isplativost

Realne uštede za pet najzastupljenijih kultura na imanjima PKB neznatno variraju oko proračunate, i to kao posledica različitog oblika parcela, ali je uočljiva tendencija porasta uštede pri porastu širine parcele u odnosu na površinu. Poznajući strukturu setve i proračunate uštede po hektaru (dijagram, slika 1) moguće je izračunati uštedu po kulturama i ukupnu uštedu za pet navedenih kultura (Tabela 3).



Sl. 1 Dijagram sa uporednim prikazom potencijalnih ušteda po hektaru za pet ispitivanih biljnih vrsta

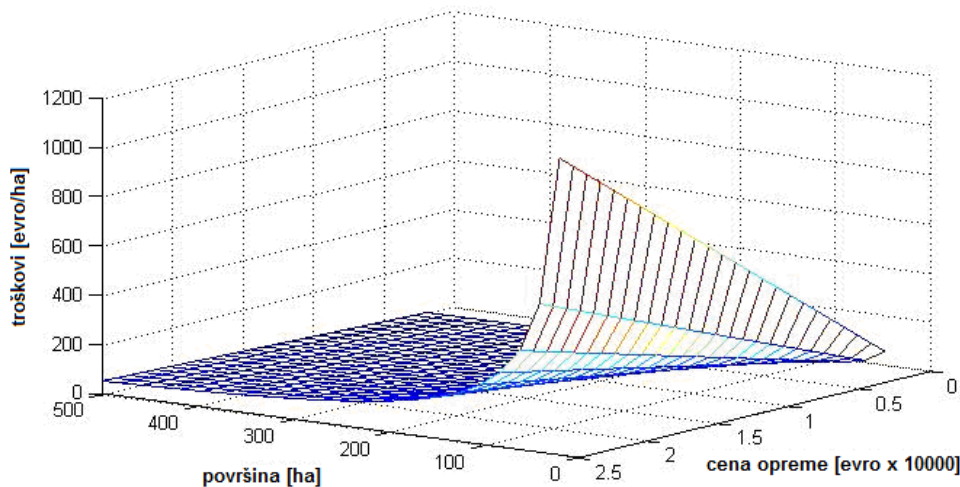
Tab. 3 Prikaz ušteda po hektaru, ukupnih ušteda po kulturama i ukupne uštede za sve kulture u sezoni 2009/10.

kultura	površina pod kulturom	ušteda za kulturu po hektaru	ukupna ušteda za kulturu
kukuruz	6573	12,72€	82.097€
pšenica i ječam	6049	26,37€	159.512€
soja	2384	7,13€	16.450€
šećerna repa	1247	7,93€	9.639€
lucerka	2705	11,82€	31.973€
ukupna ušteda za sve kulture:			301.980€

Kao konačan rezultat analize potencijalnih ušteda pri korišćenju satelitskog pozicioniranja na imanjima PKB, i pri automatskom upravljanju traktorima i drugim mašinama, dobija se suma od 301.980 evra po sezoni. Prosečna ušteda po hektaru pri strukturi setve u sezoni 2009/10. bila je 15,92 €/ha. Ovo je direktna ušteda u inputima i gorivu. Svakako treba imati u vidu i povećanje produktivnosti, mogućnost ušteda zbog mogućeg noćnog rada korišćenjem satelitskog pozicioniranja, mogućnost ostvarivanja koncepta precizne poljoprivredne proizvodnje kroz menadžment, knjigovodstvo, razne dokumentacije i planiranje proizvodnje u narednom periodu, poboljšanje uslova rada za rukovaoce mašinama, i najzad, mogućnost doprinosa ekološkoj zaštiti u okviru gradskog „zelenog prstena“.

Troškovi uređaja su fiksnog karaktera. Bez obzira na eksploatacione pokazatelje kupljenog uređaja, troškovi uređaja na godišnjem nivou ostaju isti. S druge strane, troškovi uređaja, izraženi po jedinici površine, opadaju s povećanjem površine na kojoj se primenjuju. Na slici 2 prikazano je formiranje troškova po jedinici površine (1 ha), u zavisnosti od veličine površine na kojoj se navigacioni uređaji primenjuju. Uređaj za navigaciju ili kompletan sistem koji se koristi za navigaciju i upravljanje traktorom je isplativ pri

primeni za površinu na kojoj su troškovi manji od projektovane potencijalne uštede. Rastom površine, koja se obrađuje primenom satelitskog navođenja opadaju jedinični troškovi uređaja. Pri tome treba imati u vidu i to koliko hektara jedan traktor, u toku godine, može da obradi. Za različite operacije koriste različiti traktori. Montažno demontažni uređaji mogu da se premeštaju s jednog traktora na drugi, ali ukoliko se neke operacije odvijaju istovremeno, potrebna je nabavka dva ili više uređaja, što utiče na ekonomske pokazatelje.



Sl. 2 Troškovi uređaja izraženi po jedinici površine u zavisnosti od veličine površine na kojoj se primenjuje sistem za navođenje

4. ZAKLJUČAK

Savremena poljoprivreda u razvijenim zemljama suočena je sa zahtevima da se ostvari što viši kvalitet, da se proizvodi po što nižim cenama i da bude što manje uticaja na životnu sredinu. Primena satelitskog navođenja poljoprivrednih mašina omogućava ispunjavanje svih navedenih zahteva.

Analizom mogućih ušteda zaključeno je da za proizvodne tehnologije koje se koriste u PKB veću uštedu je moguće ostvariti za uskoredne kulture u odnosu na širokoredne, a analiza je dala odgovor i na pitanje pri kojim operacijama je korišćenje satelitskog pozicioniranja i automatskog upravljanja svrsishodno i ekonomski opravdano. Najveća ušteda se ostvaruje pri proizvodnji kultura koja zauzimaju najveću površinu u PKB (strnine i kukuruz), i pri proizvodnim tehnologijama koje zahtevaju veći broj operacija. Najznačajnije uštede se ostvaruju pri DMH i zaštiti biljaka i iznose oko 1-6 €/ha u zavisnosti od norme, od vrste đubriva odnosno sredstva za zaštitu i primene rasturača/prskalice ili aviona, dok su uštede pri operacijama obrade tla prosečno oko 1 €/ha, a za setvu oko 4 €/ha. Opseg uštede zavisi od primenjene tehnologije proizvodnje odnosno broja operacija i zahteva operacija. Povećanjem širine zahvata mašina povećava se nepreciznost i prekop, te je primena satelitskog navođenja ekonomski isplativija u tim slučajevima.

Analiza upravljanja investicijom izložena u ovom radu ukazala je na nekoliko **mehanizama i strateških prednosti** PKB Korporacije u Srbiji i šire u regionu u slučaju implementacije satelitskog navođenja na traktore i ostale samohodne poljoprivredne mašine:

- novina u načinu uklapanja prohoda i menadžmentu podacima, što ni jedna druga Korporacija u Srbiji ne može ponuditi,
- novina u procesu primene tehnologija poljoprivredne proizvodnje – brže i po nižoj ceni,
- kompleksnost koja podrazumeva opremu i postupke koje će drugi proizvođači teško dostići,
- tajming koji doprinosi da kao posledica prvog implementiranog satelitskog sistema na traktore u Srbiji PKB Korporacija postane cenjenija i sinonim razvoja u oblasti poljoprivredne mehanizacije, proizvodnje i primene informacionih tehnologija,
- robustan dizajn koji nudi platformu na kojoj se mogu graditi varijacije i druge generacije navigacionih i upravljačkih sistema,
- postavljanje novih pravila što podrazumeva kao stratešku prednost drugačiji način na koji se vrši konkretno uklapanje prohoda, a dotadašnje načine uklapanja prohoda (markiranti, stalni tragovi, markeri, pena) čini viškom,
- rekonfiguracija sistema u pronalaženju novog načina na koji se delovi sistema mogu uklopiti da funkcionišu zajedno, a uklapanje prohoda informaciono praćeno svakako pruža izvanrednu bazu za

celokupan menadžment parcelama, imanjima i celom Korporacijom, i to u segmentima planiranja i praćenja inputa, energenata, radnih sati rukovaoca i ekoloških efekata,

- suština ove inovacije je u traženju novih načina uklapanja prohoda i sticanja strateške prednosti – tako da će uvek postojati prostor za nove načine sticanja i zadržavanja kompetitivne prednosti.

LITERATURA

1. Amiama C. 2007. Design and field test of an automatic data acquisition system in a self-propelled forage harvester. *Electron. Agric.* 61: 192-200.
2. Auernhammer H. 2001. Precision farming—the environmental challenge, *Comput. Electron. Agric.* 30: 31–43.
3. Gavrić, M., Martinov, M. 2006. Postupci i tačnost primene GPS u poljoprivredi, *Savremena poljoprivredna tehnika*, 32(1-2): 96-102.
4. Luck J, Pitla S, Shearer S, Mueller T, Dillon C, Fulton J, Higgins S. 2010. Potential for pesticide and nutrient saving via map-based automatic boom section control of spray nozzles. *Comput. Electron. Agric.* 70: 19-26.
5. Marković D, Simonović V. 2008. Automatizacija žitnih kombajna – stanje i perspektive, *Savremena poljoprivredna tehnika*, 34 (3-4): 245-251.
6. Renschler C.S, Flanagan D.C, Engel B.A, Kramer L.A, Sudduth KA. 2002. Site-specific decision-making absed on RTK GPS survey and six alternative elevation data sources: watershed topography and delineation. *Trans. ASAE* 45 (6): 1883-1895.
7. Turan J, Findura P. 2009. Uklapanje prohoda pri raspodeli mineralnog đubriva, *Savremena poljoprivredna tehnika*, 35 (1-2): 9-15.
8. Zhang N, Wang M, Wang, N. 2002. Precision agriculture – worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* 36: 113-13.

ECONOMIC INDICATORS IN MENAGMENNT INOVATION OF GPS TECHNOLOGIES APPLICATION IN SERBIA AGRICULTURAL

Summary:

This paper examined the level of savings in the application of modern technical systems for satellite guidance and control over performing agricultural operations throughout the season. The exemplary property was Agricultural Corporation Belgrade (PKB), which covers about 21.000 hectares of arable land. The effects of plot shape and direction of movement of tractor-attachment units in calculating the savings from reduced overlapping of adjacent passes were studied. The analysis was carried out of savings per crop (maize, wheat, soybean, sugar beet and alfalfa) and the operations for each crop separately, based on the manufacturing technology applied to an exemplary property. In particular, the analysis involved the functional dependence of the economic savings in fuel and inputs for the operations such as mineral fertilizers distribution and chemical plant protection.

Keywords: wheat, precision farming, satellite navigation, pass fitting, plot, fuel, inputs, savings.



Z. Bracanović¹

UTICAJI FAKTORA KONKURENTSKE PREDNOSTI NA ODABIR STRATEGIJE PREDUZEĆA

Rezime:

Da bi se ostvarili vrhunski rezultati, preduzeće mora da usvoji jednu ili više strategija. Strategija je interna konfiguracija određenih aktivnosti koje preduzeće čini posebnim u odnosu na konkurentska preduzeća. Skup aktivnosti tako se projektuje da daje određenu kombinaciju vrednosti. Inplementacijom aktivnosti preduzeće čini strategiju operativnom. Zato je važno da svi zaposleni budu upoznati sa strategijom i da je razumeju. To je jedan od uslova sticanja konkurentske prednosti koja preduzeće vodi ka uspehu odnosno ka postizanju pozicije održive profitabilnosti u okviru privrednog segmenta u kome je preduzeće aktivno. Promene u privrednom segmentu direktno utiču na strategiju preduzeća, tako da preduzeće mora da prati trendove faktora konkurentnosti koji određuju profitabilnost privrednog segmenta.

Ključne reči: aktivnosti, vrednosti, privredni segment, konkurentska prednost, strategija.

UVOD

U ovom radu biće dat osvrt na značenje konkurentske prednosti preduzeća kao i pet faktora konkurentske prednosti sa relevantnim elementima koji ih bliže određuju. Transparentno će biti prikazan algoritam aktivnosti na osnovu kojeg menadžment preduzeća vrši odabir odgovarajuće strategije preduzeća za atraktivan privredni segment. Takođe će biti reči o konkurentskim strategijama koje omogućavaju preduzeću stabilnu poziciju na tržištu.

Na našim prostorima još uvek menadžment preduzeća malo posvećuje pažnju odabiru konkurentske strategije kao i konkurentskim faktorima koji definišu konkurentsku prednost preduzeća. Realno gledajući mnoga preduzeća ne znaju kako da se suprotstave konkurentima u privrednom segmentu i na koji način da zauzmu vodeću poziciju na tržištu. Šta, kako i kada uraditi, su pitanja menadžmenta većine preduzeća na našim prostorima.

1. KONKURENTSKA PREDNOST

Za ostvarivanje vrhunskih rezultata preduzeća nije samo dovoljno prikazati udeo i veličinu tržišta koje preduzeće zauzima jer to je samo posledica konkurentske prednosti. Objašnjenje konkurentske prednosti preduzeća je u osnovi njegova posebnost i jedinstvenost među konkurentima u jednom ili više privrednih segmenata. Obzirom da je preduzeće više dimenzionalno što podrazumeva da iz toga proizilazi aktivnosti što je obeležje konkurentske prednosti kao i mnoge veze među njima. Odatle i činjenica da stabilne konkurentske pozicije su stalne aktivnosti koje stvaraju vrednosti za kupca a koje su veoma fleksibilne.

Konkurentska prednost je skup veoma različitih aktivnosti koji sistemski vezane i raspoređene projektuju strategiju preduzeća. Da bi preduzeće u nekom privrednom segmentu koegzistiralo mora da obavlja niz aktivnosti kao što su proizvodnja, distribucija, servisiranje proizvoda, zadovoljavanje kupca kao i edukovanje zaposlenih. Sve ove aktivnosti su u funkciji marketinga, istraživanja i razvoja proizvoda što dovodi do jasnog uvida nastajanja troškova i vrednosti za kupca, koji su osnovni parametri konkurentske prednosti.

Prateći troškove preduzeća koji nastaju prilikom nabavke, proizvodnje, distribucije, prodaje, servisiranja proizvoda a sve u funkciji ostvarenja vrednosti za kupca a samim tim i povećanja profitabilnosti i stabilnosti preduzeća. Na osnovi praćenja svih pomenutih aktivnosti menadžment preduzeća formira strategiju

¹ Mr Zlata Bracanović dipl.inž.razvoja

Institut IMR-a, Patrijarha Dimitrija 7-13, Beograd, e-mail: zlabracanovic@yahoo.com;
institut-imr@Eunet.rs; tel: 011-3564-031.

preduzeća koja može biti zasebna za svaku poslovnu jedinica kao i jedna jedinstvena konkurentska strategija na nivou celog preduzeća. Pod strategijom se podrazumeva skup konfiguracija aktivnosti što svako preduzeće definiše u smisli posebnosti. Sa dobro osmišljenom i implementiranom strategijom preduzeće obezbeđuje stabilnost u poslovanju. Konfiguracija aktivnosti uključuje različite nivoe korišćenja materijalnih i ljudskih resursa i samim tim odgovarajuće organizacione procese. Na takav način strategija postaje aktivna i operativna.

Svako preduzeće definiše i ograničava skup aktivnosti, resursa i sposobnosti. Aktivnosti bliže određuju relevantne resurse i sposobnosti a jedinstvene su za svako preduzeće. Tako određen skup aktivnosti dovodi do primene strategije koja se prema tržišnim uslovima i promenama u okruženju mora modifikovati kako bi konkurentska prednost preduzeća i dalje bila stabilna. Menadžment preduzeća je odgovoran za stvaranje, sticanje i održivost konkurentske prednosti koja je osnova za formiranje strategije preduzeća. Naravno i svi zaposleni moraju da shvate da su deo strategije preduzeća bez obzira koliki je njihov udeo u aktivnostima.

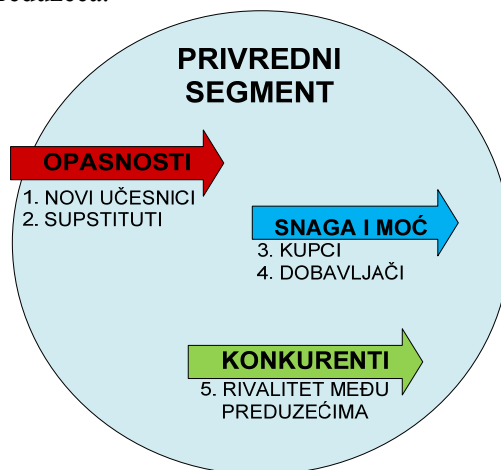
Preduzeće kreira svoju delatnost, vrši odabir privrednog segmenta u kome će da posluje, analizira strukturu privrednog segmenta a potom na osnovu faktora konkurentnosti sagledava svoju poziciju u tom privrednom segmentu. Pozicija preduzeća je određena konkurentskom prednošću a nastaje u osnovi iz sposobnosti menadžmenta preduzeća stvaranjem vrednosti za kupce. Praktično to znači što manje ulaganja u proizvod i sve što ga karakteriše, a povećavati broj kupaca tog proizvoda.

2. FAKTORI KONKURENTSKE PREDNOSTI

Faktori konkurentske prednosti karakterišu svaki privredni segment i kao takvi su i njegov sastavni deo. U okviru privrednog segmenta preduzećima neprestno preti opasnost od dolaska novih konkurenata i supstituta proizvoda. Istovremeno poslovanje preduzeća je ograničeno snagom i moći kupca a tekođe i razvojem konkurentskih preduzeća.

Privredni segmenti su različiti a ta različitost varira od pet faktora konkurentnosti i menja se u skladu sa razvojem. Atraktivnosti privrednog segmenta doprinosi pogodnost ako su svih pet faktora konkurentnosti povoljni. U takvom privrednom segmentu veliki broj konkurenata ostvaruje značajnije prihode. Na suprot tome ako postoji izdvajanje jednog od pet faktora konkurentnosti mali broj preduzeća ostvaruje zadovoljavajuće prihode bez obzira na uloženi trud menadžmenta.

Privredni segment sačinjavaju preduzeća koja u okviru njega posluju kao i nova preduzeća koja planiraju svoj ulazak u privredni segment sa kupcima i dobavljačima što je prikazano na slici 1. Profitabilnost privrednog segmenta određuju faktori konkurentnosti odnosno imaju uticaj na formiranje cene proizvoda, troškove kao i potrebna investiciona ulaganja preduzeća.



Slika 1. – Privredni segment sa činiocima

Bez obzira u kom privrednom segmentu preduzeće posluje ili namerava da ostvari svoj ulazak, bez obzira kojom se delatnošću bavi da li proizvodi ili vrši uslugu i da li je na domaćem ili međunarodnom tržištu za uspešnu konkurentske prevlast važno je analiziranje **pet konkurentskih faktora** sa pripadajućim elementima koji ga bliže definišu :

- **OPASNOSTI : 1- Ulazak novih konkurenata na tržište**
 - Proizvodi zaštićeni patentom.
 - Prepoznatljivost brenda.
 - Pristup distributivnim kanalima.

- Troškovne prednosti (manje kamatne stope, druge pogodnosti).
- Troškovi prelaska na drugi proizvod.
- Očekivane promene u okruženju.
- Državna politika.

2- Opasnost od supstitucije

- Promena cena za posmatrani proizvod.
- Troškovi zamene proizvoda.
- Kupovna moć kupca.

➤ **SNAGA I MOĆ : 3- Snaga i moć kupca**

- Broj kupaca.
- Razlike u proizvodima.
- Koncentracija kupaca po proizvodu i geografski.
- Informisanost kupaca.
- Sklonost kupca ka supstititu.
- Uticaj cene na kvalitet i druge performanse.
- Kupovna moć kupca.
- Utacaji na promene odluka.

4- Snaga i moć dobavljača

- Razlika ulaznih karakteristika.
- Troškovi supstituta (za ulaznu komponentu i preduzeće).
- Koncentracija dobavljača geografski.
- Uticaj ulaznih komponenti na cene.
- Opasnost od integriteta preduzeća.
- Obim proizvodnje.

➤ **KONKURENTI : 5-Rivalitet među postojećim konkurentima**

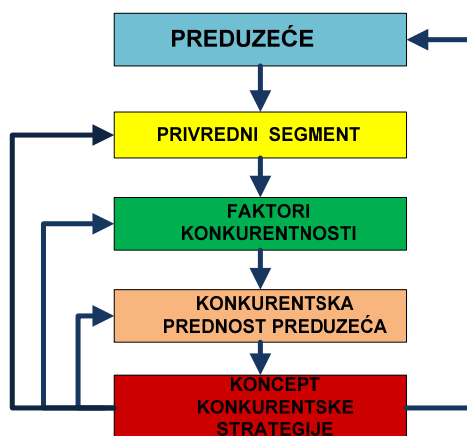
- Tendencija rasta industrije.
- Razlike u proizvodima.
- Prepoznatljivost brenda.
- Troškovi supstituta.
- Prezasićenja tržišta.
- Potrebe za većim ulaganjima.
- Opasnost od izlaska sa tržišta.

Pri formiranju svoje konkurentske strategije preduzeće mora da navedene faktore konkurentnosti sa sigurnošću analizira i definiše, jer u suprotnom strategije preduzeća gubi na valjanosti. Naravno nimalo nije jednostavno detaljno analizirati konkurente jer se važni podaci poverljivo čuvaju.

3. KONKURENTSKA STRATEGIJA POSLOVANJA

Definisanje, usvajanje kao i inplementacija konkurentske strategije poslovanja preduzeća su smernice poslovanja svakog preduzeća koje ga visoko pozicioniraju u okviru privrednog segmenta i na tržištu. Istovremeno stabilnost i održivost pozicije preduzeća na tržištu zavisi od konkurentne prednosti što podrazumeva veliki broj prednosti u odnosu na konkurente. Prednosti mogu da budu izražene kroz troškove ili kroz diferencijaciju odnosno poređenje i različitost, što je u osnovi dobro izbalansiran uticaj pet faktora konkurentnosti za posmatrani privredni segment.

U zavisnosti o kakvom je privrednom segmentu reč da li je privredni segment veliki i atraktivan ili specijalan i manje atraktivan, razlikuju se strategije koje treba preduzeće da primeni. Na slici 2. dat je prikaz algoritma aktivnosti koji menadžment preduzeća mora da sledi vršeći istovremeno konstantno praćenje, usklađivanje, poređenje i analiziranje uz uvek prisutnu i stalna fleksibilnost na sve promene u okruženju.



Slika 2.- Algoritam stalnih aktivnosti menadžmenta preduzeća

Preduzeće može da se opredeli za tri koncepta konkurentske strategije polazeći od osnovnog pokazatelja svoje konkurentske prednosti.

1. Smanjenje troškova
2. Diferencijacija
3. Fokusiranje

3.1. Strategija Smanjenje Troškova

Kada se je reč o smanjenju troškova ne misli se na jednostavno poređenje radne snage i ulazne sirovine, već se ta smanjenja odnose na analizu aktivnosti koje stvaraju vrednosti. Preduzeće obavlja aktivnosti u okviru svog privrednog segmenta svaka aktivnost ima svoju strukturu troškova kao i odnos između aktivnosti u preduzeću i izvan njega. Suština ovog koncepta strategije je da preduzeće smanji troškove za iste aktivnosti i tako ostvari prednost u odnosu na svoje konkurente.

Preduzeće koje se opredeli za smanjivanje troškova mora da ima bliskost i paritet sa svojim konkurentima po osnovu performansi proizvoda. Ovaj koncept konkurentne strategije odnosno smanjenje troškova dobro je da usvoji preduzeće koje ima ili namerava da ostvari :

- Širok obim poslovanja
- Pokriva više privrednih segmenata
- Posluje u srodnim segmentima

Širina poslovanja je važna za postizanje prednosti u smanjenju troškova. Prednost u smanjenju troškova je zavisna od strukture privrednog segmenta što uključuje :

- Ekonomiju obima
- Patentiranu tehnologiju
- Povlašćen pristup sirovinama.

3.2. Strategija Diferencijacija

Koncept ove strategije je za svaki privredni segment drugačiji i u okviru samog segmenta može biti više diferencijacija. To znači da preduzeće može da izdvoji više osobina za poređenje i što više izdvoji od svojih konkurenata time ima veću mogućnost za ostvarivanje jedinstvenog položaja.

Diferencijacija odnosno poređenje se može ostvariti kroz proizvod, načine prodaje, kroz marketinške aktivnosti. Prednosti ove strategij diferenciranja je u tome što preduzeće može da nekoliko svojih karakteristika poredi sa konkurentima, što daje širinu u poslovanju kao i mogućnost primene dodatnih strategija.

3.3. Strategija Fokusiranje

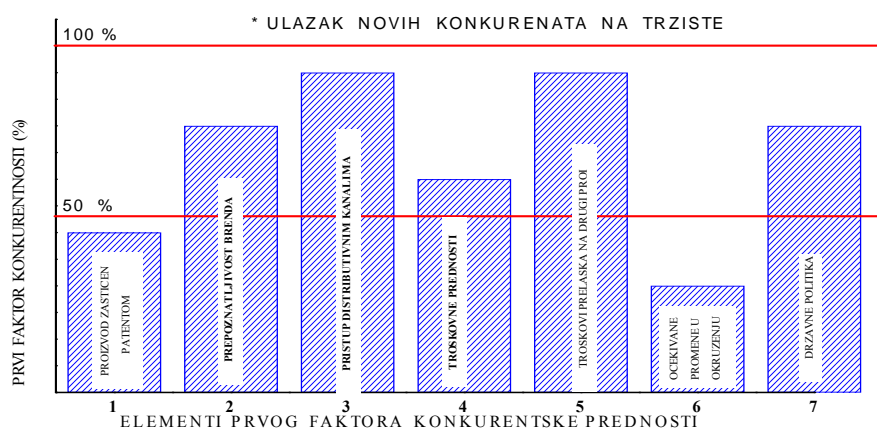
Strategija fokusiranja se zasniva na odabiru jednog uskog dela privrednog segmenta. Preduzeće može da prilagođavanjem i optimiziranjem svoje strategije doprinosi stvaranju konkurentske prednosti u okviru malog dela privrednog segmenta. Suština kocepta strategije fokusiranja ima dve pravca delovanja a to je :

- ***Fokusiranje na smanjenje troškova** je mogućnost da preduzeće u nekim drugim privrednim segmentima pokušava da upotrebi razliku u troškovima.
- ***Fokusiranje na diferencijaciju** gde preduzeće samo bira i postavlja svoja pravila tako što vrši odabir ciljnih segmenta odnosno zadovoljava kupce sa izuzetnim zahtevima.

Prednosti ove strategije fokusiranja je što preduzeće može da izabere više ciljanih pravaca kao i iskoristi mogućnost fokusiranja na smanjenje troškova čime obezbeđuje natprosečne rezultate. To praktično znači da postoji mogućnost da u istoj privrednoj grani za nekoliko strategija fokusiranja jer aktivnost privrednog segmenta nije podjednako profitabilna. Privredna grana je spektar proizvoda i kupaca i kao takva ima više različitih segmenata što strategiji fokusiranja daje široke prednosti.

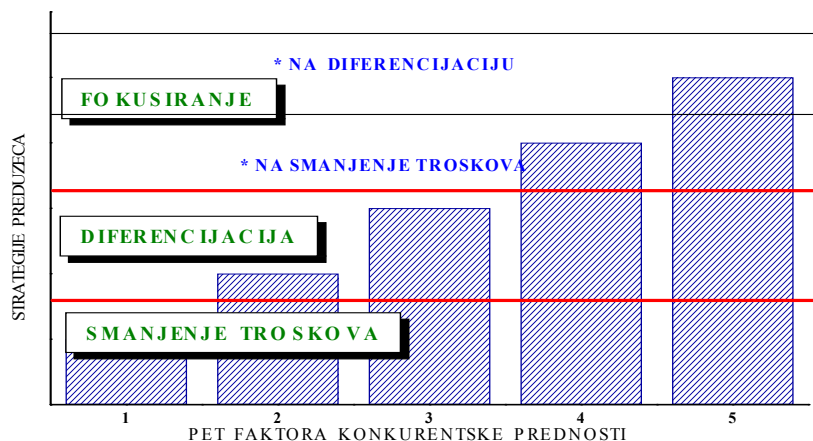
4. ANALIZA FAKTORA KONKURENTSKE PREDNOSTI

Analiza faktora konkurentske prednosti sagledava se u okviru jednog segmenta. U zavisnosti od delatnosti preduzeća mogu da se analiziraju i ostali segmenti u kojima preduzeće posluje ili planira da posluje. Karakteristika privrednog segmenta dobija se kroz analizu elemenata pripadajućeg faktora konkurentnosti. Na slici 3. dat je primer analize prvog faktora konkurentnosti odnosno analiza ulaska novih konkurenata na tržište kroz elemente koji ga sačinjavaju. Pripadajući elementi prvog faktora konkurentnost su : proizvod zaštićen petentom, prepoznatljivost brenda, pristup distributivnim kanalima, troškovi prednosti, troškovi prelaska na drugi proizvod, očekivane promene u okruženju i državna politika. Na ovakav način analiziramo sve faktore konkurentnosti u okviru jednog segmenta. Tako se dobija kompleksna slika privrednog segmenta sa potrebnim parametrima.



Slika 3. - Analize prvog faktora konkurentnosti sa pripadajućim elementima

Kakao bi se odabrala adekvatna strategija poslovanja preduzeća koristi se analiza pet faktora konkurentnosti odnosno učešće svakog faktora konkurentnosti u privrenom segmentu i međusobni odnos faktora konkurentnosti u okviru tog privrednog segmenta. N slici 4. dat je primer zastupljenost i učešća svakog faktora konkurentnosti kroz strategije poslovanja preduzeća.



Slika 4.- Način odabira strategije poslovanja preduzeća

Naravno, ovo je samo primer načina odabira strategije poslovanja preduzeća. U svakom slučaju bitno je naglasiti: gde su faktori konkurentnosti izbalansirani odnosno približni po učešću u strategiji poslovanja preduzeća, da je ta strategija odgovarajuća za posmatrano preduzeća a privredni segment povoljan za poslovanje pomenutog preduzeća.

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Usled ekonomske krize i tranzicionog perioda koji je još uvek aktivan na našim prostorima preduzeća beleže pad poslovanja ili u blažoj varijanti stagnaciju svojih aktivnosti. Sada je pred preduzećima veliki zadatak da na osnovu svoje delatnosti odaberu privredni segment, analiziraju pet faktora konkurentnosti, izdvoje svoju konkurentsku prednost i inplementiraju odgovarajuću konkurentsku strategiju.

Preduzeće koje želi da bude uspešno i stabilno u svom poslovanju potrebno je da izbere privredni segment gde su pet faktora konkurentnosti izbalansirani jer samo u takvim uslovima, sa konkurentskom prednošću i adekvatnom strategijom, može da ostvari značajne prihode.

Strategija preduzeća se formira na osnovu pet faktora konkurentnosti a ima za cilj da preduzeće izdvoji od konkurenta, ukazujući i izdvajajući konkurentsku prednost odnosno posebnost i jedinstvenost preduzeća, što jača pozicije preduzeća na tržištu.

Literatura

1. Porter Michael E., (2007), "Competitive Advantage", Boston,.
2. Elmuti D., Kathewala Y., Monippallil M., (2005), *Outsourcing to Gain a Competitive Advantage, Industrial*.
3. Tompson, J.L., (2002), *Strategic management: Awareness And Chang, 4th ed.,Thompson Press,London.*
4. Zlata Bracanović; (2010), "Uticaj lanca vrednosti preduzeća i kupca na diferencijaciju",13. *nternacionalna Konferencija upravljanje kvalitetom i pouzdanošću ICDQM, Beograd*
5. Z.Bracanović, S.Stanisavljević, M.Nikolić, (2011),"Creation Of New Knowledge In Functional Competence Enterprises"; *I international symposium engineering management and competitiveness EMC, Zrenjanin.*

IMPACTS OF FACTORS IN CHOOSING THE ADVANTAGES OF COMPETITIVE STRATEGY OF THE COMPANY

Summary:

In order to achieve top results, the company must adopt one or more strategies. Strategy is an internal configuration of certain activities that the company makes special in relation to competing companies. A set of activities that is designed to provide a specific combination of values. Implementation activities of the company makes the operating strategy. It is therefore important that all employees are familiar with the strategy and to understand it. It is one of the conditions of competitive advantage which the company leads to success and to achieve sustainable profitability in the position of the business segments in which the companies use. Changes in the economy segment directly influence the strategy of the company, so that the company must follow trends konkutentnosti factors that determine the profitability of economic segment.

Key words: activities, values, economic segment, competitive advantage, strategy.



J. R. Jovanović^{1,2,3}, D. L.J. Milanović², S. Pokrajac², R. D. Đukić^{1,3}

GLOBALNO SAGLEDAVANJE PROIZVODNIH I FINANSIJSKIH EFEKATA POSLOVNO- PROIZVODNIH SISTEMA

Rezime:

U radu je prikazana metodologija za iskazivanje proizvodnih i finansijskih efekata kod složenih poslovno-proizvodnih sistema. Matematički modeli omogućavaju istraživanje proizvodne funkcije, blagovremeno uočavanje proizvodno-programskih i ekonomskih trendova, i primenu simulacionih procesa u strategijskom menadžmentu.

Ključne reči: proizvod, proizvodnja, reprezentant, modeli, simulacije, strategijski menadžment

1. UVOD

Održiv razvoj proizvodnih sistema omogućavaju organizacija, tehnologija, marketing i proizvodna doktrina čiji uticaj i delovanje, saglasno situacionom pristupu, optimizira menadžment kao vezivno i integrativno sredstvo. Složeni poslovno-proizvodni sistemi (SPPS) spadaju u grupu materijalnih, organizacionih, složenih, dinamičkih i stohastičkih sistema i kao takvi teže sopstvenoj degeneraciji ukoliko se kontinualno ne obezbeđuju adekvatni inputi. Složenost uslovljava struktura, veliki broj proizvoda, inputa, procesa i komplikovanost funkcije upravljanja. Od 1990. pa do danas opstao je relativno mali broj ovih sistema, pri čemu je izražen nesklad tehničko-tehnološkog i organizacionog nivoa naših preduzeća u odnosu na slična iz razvijenijih zemalja sveta.

Zbog širine i heterogenosti proizvodnog programa potrebno je definisati modele za iskazivanje proizvodnih i finansijskih efekata preko odgovarajućih pokazatelja usvojenog proizvoda reprezentanta. Blagovremenim uočavanjem i analizom proizvodnih trendova mogu se sprečiti promašaji u programskoj orijentaciji, sagledati ekonomska kretanja istraživanjem prelomne tačke poslovanja i primeniti odgovarajuća softverska rešenja iz oblasti strategijskog menadžmenta. U radu je prikazana metodologija, uticajni faktori i rezultati istraživanja proizvodne funkcije u kompaniji "Sloboda" Čačak u cilju sagledavanja i projektovanja programskih i finansijskih trendova.

2. ANALIZA UTICAJNIH FAKTORA

Namena, složenost i karakteristike proizvodnog programa kompanije "Sloboda" zahtevaju prisustvo različitih tehnoloških disciplina i proizvodnih tehnologija koje obezbeđuju zaokruženu proizvodnju sredstava naoružanja. Ovaj vid proizvodnje svojevremeno je zasnovan u cilju razvoja, proizvodnje i remonta protivavionske municije kao osnovnog namenskog programa. U proteklih šezdeset četiri godine rada namenski program je proširen tako da sada sadrži preko 140 artikala. Osnovne karakteristike asortimana koje su od značaja za istraživanje proizvodne funkcije su: više varijanti proizvoda (bojevi, manevarski, vežbovni, školski), veliki broj artikala različite namene i za različite sisteme naoružanja, veliki broj delova (pozicija, elemenata, spojeva, podsklopova, sklopova) koji se kreću u rasponu od 12-117, veliki broj tehnoloških nivoa ugradnje vertikalni od 3-7 i horizontalni od 4-22, učešće delova iz kooperacije kreće se prosečno oko 15% u odnosu na ukupan broj delova u artiklu, manji broj ključnih delova ugrađuje se u više artikala limitirajući njihovu proizvodnju i prioritet isporuke. Razvoj i osvajanje proizvodnje završava se sa izradom i ispitivanjem nulte serije proizvoda, kada se detaljno analizira funkcija proizvoda u svetlu njegove namene i dostignuti stepen podudarnosti svojstava proizvoda sa zahtevima i standardima iz tehničke dokumentacije. Neguje se praksa nastavljanja primene procedura nulte serije na nekoliko serija redovne proizvodnje kako bi

¹ Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, mail: jelena.jovanovic@vstss.com, radisav.djukic@vstss.com

² Mašinski fakultet u Beogradu, mail: dljmilanovic@mas.bg.ac.rs, spokrajac@mas.bg.ac.rs

³ Kabinet za proizvodni i inženjerski menadžment, Kompanija „Sloboda“ Čačak, mail: radisav.djukic@vstss.com

se u potpunosti ovladalo "proizvodnim umećem" i "ekonomičnošću izrade" preduzimanjem korektivnih mera za poboljšanje postupaka rada, tehnologije, alata itd. Ovakav pristup razvoju pokazao se dovoljno širok i delotvoran jer produžava proces stvaralačkog učešća konstruktora i tehnologa pri kreiranju novog proizvoda. Sa druge strane omogućeno je učešće u razvoju stručnjaka iz proizvodnje, kontrole, logistike i marketinga. Važno je istaći da karakter i namena proizvoda zahtevaju najveći mogući nivo kvaliteta i pouzdanosti ali i učešće drugih fabrika koje proizvode specifične delove (barut, kapsle) ili sredstva za korišćenje proizvoda (pištolje, puške, topove).

Tehničko-tehnološke karakteristike proističu iz proizvodnog programa, postojeće proizvodne opreme, definisanih procedura i kadrova koji izvršavaju i vode proces izrade. Namensku proizvodnju čine sledeća tehnološka područja rada: mašinska obrada plastičnom deformacijom koja uključuje sve vrste obrade počev od hladnog kovanja, istiskivanja, izvlačenja sa i bez redukcije zida, presovanja, savijanja, peglanja, kalibrisanja, obrtnog istiskivanja, probijanja, prosecanja i izrade opruga; mašinska obrada rezanjem koja obuhvata struganje, glodanje, bušenje, brušenje, provlačenje, izradu navoja ili kombinaciju više vrsta obrade na složenijim delovima; termička obrada (žarenje, napuštanje, kaljenje i dr.) za međuoperacijsku pripremu delova i izradu alata; površinska zaštita (galvanska–kadmijumovanje, niklovanje, kalaisanje, bakrenje, tvrda i obična anodna oksidacija, cinkovanje; hemijska–fosfatiranje, hromatiziranje, niklovanje; lakovanje–osnovno i završno) i hemijska priprema (fosfatiranje i bajcovanje) za međuoperacijsku pripremu delova; izrada smeša (pripalna, traserna, usporačka, dimna, osvetljavajuća) i eksplozivnog sastava proizvoda uključujući i laboraciju proizvoda; prerada drveta u cilju izrade ambalaže (sanduka) za pakovanje; održavanje sopstvenih sredstava rada na izdvojenom mašinskom parku, koje uključuje odgovornost za snabdevanje energijom i fluidima; izrada i oštrenje specijalnih i nestandardnih alata na izdvojenom i zaokruženom mašinskom parku. Oprema koja se sastoji od mašina za obradu deformacijom i najvećim delom za obradu rezanjem je univerzalne prirode i ima izraženu fleksibilnost pri izvršavanju većine proizvodnih operacija. Sa aspekta realizacije proizvodnih planova to omogućava projektovanje viševarijantnih tehnoloških rešenja (alternativa) čime se otklanjaju uska grla u proizvodnji i istovremeno otvara mogućnost za realizaciju proizvodnog programa i optimizacione procese. Imajući u vidu širinu asortimana, namenu proizvoda, tehničko-tehnološke karakteristike i zastupljene tehnologije proizvodni program je podeljen u osam grupa (tabela 1 i 2).

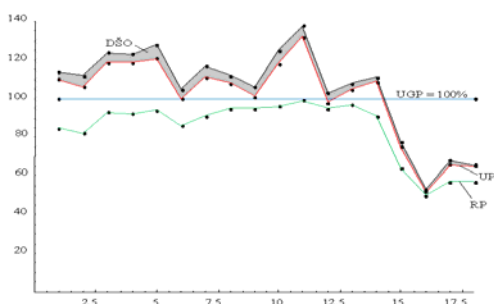
Tabela 1: Prikaz proizvodnog programa po grupama proizvoda – proizvodnim linijama

Proizvodni program			Broj artikala	Interna oznaka $X_{i,j}$	Varijante izrade proizvoda
Oznaka grupe	Naziv grupa proizvoda	Godina poč.proizv.			
1	2	3	4	5	6
1	PA i A municija kalibra 20 i 23 mm	1952	36	$i = 1,36$ $j = 1$	bojeva, manevarska, vežbovna, opitna, školska
2	PA i A municija kalibra 30, 37 i 40 mm	1952	32	$i = 1,32$ $j = 2$	bojeva više vrsta, manevarska i vežbovna
3	Tromblonske mine i rezervna sredstva	1960	14	$i = 1,14$ $j = 3$	bojeve, osvetljavajuće, dimne, vežbovne, rezer. stabilizatori
4	Ručna rak. protivoklopna sredstva kal. 64–120 mm	1979	9	$i = 1,9$ $J = 4$	bojeva kumulativna i vežbovna
5	Signalna osvetljavajuća i protivgradna sredstva	1955	27	$i = 1,27$ $j = 5$	signalna municija, vatromet, osvetlj. baklje, i protivgr. raketa
6	Program kooperacije u okviru INVO	1951	10	$i = 1,10$ $j = 6$	eksplozivna punjenja, usporači, traseri i delovi
7	Program tržišne kooperacije	1949 1982	6	$i = 1,6$ $j = 7$	proizvodi i delovi za potrebe metaloprerađivačke, elektronske drvnoprerađivačke industrije
8	Program tenkovske i art. municije i PA 57 mm	1955 1991	8	$i = 1,8$ $j = 8$	bojeva (više vrsta i kalibara)
UKUPNO:			142	$X_i, i = 142$	-

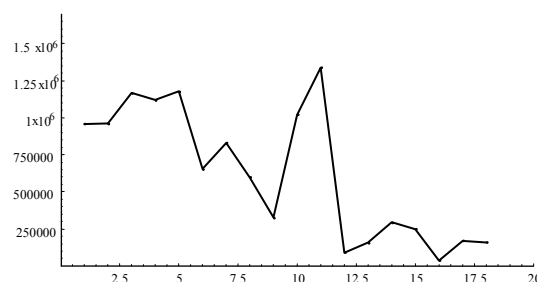
Program vojne i tržišne kooperacije obuhvata nekoliko stotina delova, različitih količina koje, bez obzira na vrstu i količinu, u zavisnosti od namene, uslovno tretiramo kao skup proizvoda u okviru 6. i 7. grupe. Za potrebe istraživanja proizvodne funkcije izvršena je analiza uticajnih faktora u vremenskom intervalu koji obuhvata poslovni ciklus, u trajanju od 18 godina. Na slici 1 prikazana su kretanja, ukupne i robne proizvodnje i izgubljenih norma časova zbog dorade i škarta (u %) u odnosu na ugovoren nivo (100%).

Tabela 2: Dinamika razvoja proizvoda merena ukupnim brojem proizvoda u proizvodnom programu, (zbirno i po grupama) i zastupljenim tehnologijama (%)

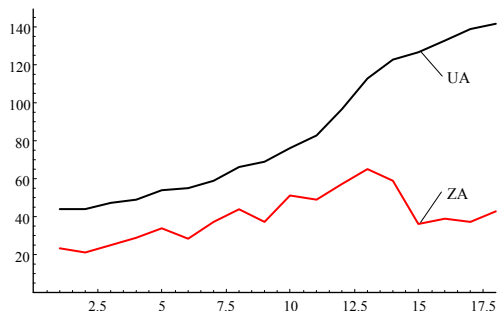
Broj artikala u proizvodnom programu (kom)				Zastupljenost tehnologija (%)				
Grupa	t_1	t_{18}	Priraštaj	Deform.	Rezanje	Zaštita	Pirotehn.	Ostalo
1	2	3	4=3-2	5	6	7	8	9
1.	18	36	18	3 - 16	15 - 38	5 - 12	21 - 34	1 - 7
2.	7	32	25	7 - 18	20 - 37	3 - 13	18 - 33	
3.	12	14	2	0 - 17	19 - 61	1 - 10	12 - 38	
4.	0	9	9	0 - 18	40 - 67	3 - 9	16 - 30	
5.	4	27	23	6 - 22	3 - 12	1 - 5	61 - 75	
6.	2	10	8	0 - 5	0 - 42	0 - 1	68 - 95	
7.	1	6	5	0 - 97	0 - 95	0 - 5	0 - 45	
8.	0	8	8	10 - 22	23 - 41	6 - 14	25 - 31	
Σ	44	142	98	16	42	7	31	4



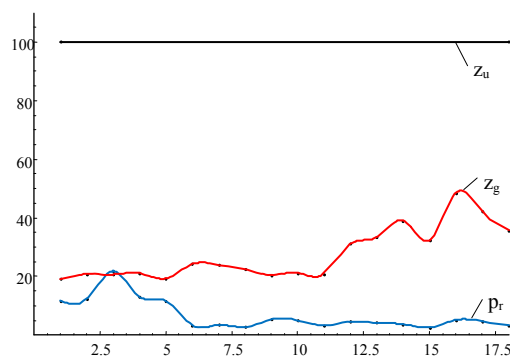
Slika 1: Ukupna (UP), robna proizvodnja (RP) i izgubljeni nč zbog dorade, škarta i opita (DŠO) u odnosu na ugovorenu proizvodnju (UGP)-100%



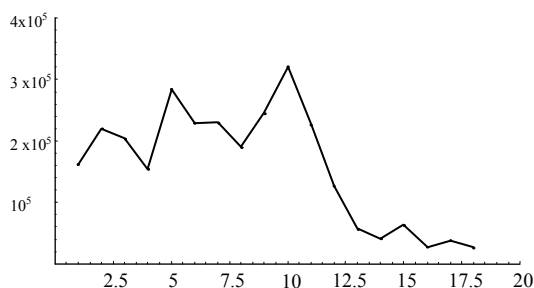
Slika 4: Kretanje nedovršene proizvodnje u (nč/god), izračunate po tekućim normativima vremena



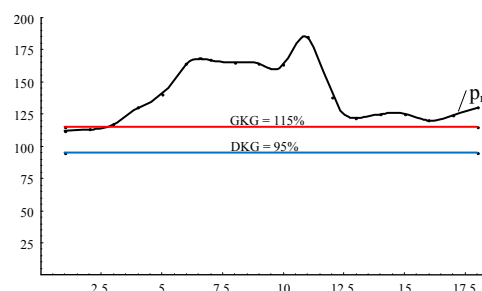
Slika 2: Ukupan (UA) i zastupljen (ZA) broj artikala u proizvodnom programu (kom/god)



Slika 5: Ukupni gubici (z_g) i prekovremni rad (p_r) u odnosu na ukupan broj radnika (z_u)-100%



Slika 3: Kretanje izgubljenih (nč/god) zbog dorade, škarta, opita i revizija



Slika 6: Procentualno kretanje godišnjeg izvršenja norme sa ucrtanim kontrolnim granicama

U prvih 14 godina realizacija ugovorenih obaveza iznosi od 82-99, a ukupan obim proizvodnje od 100-132%, što ukazuje na značajne zalihe u nedovršenoj proizvodnji. U zadnje četiri godine svi analizirani pokazatelji beleže osetno manje vrednosti ispod 100 %, tj. ukupna proizvodnja iznosi 52-75, a robna 50-64 % u odnosu na ugovorenu. Ukupan broj proizvoda povećao se za 98, sa 44 na 142, što svedoči o dinamičnom razvoju kako bi sistem odgovorio zahtevima i izazovima iz okruženja. Na slici 2 prikazan je ukupan i zastupljen broj artikala u proizvodnim programima preduzeća u analiziranom periodu. Sa aspekta

zastupljenosti artikala u godišnjim proizvodnim programima (slika 2) jasno uočavamo dva vremenska perioda. U prvih 14 godina (t_1-t_{14}) zastupljenost se kreće u rasponu od 48–67, a u zadnje četiri godine ($t_{15}-t_{18}$) od 27–30%. Negativan trend zastupljenosti posledica je političkog i ekonomskog razdruživanja, sankcija i blokade, razaranja privrede i infrastrukture, što je imalo za posledicu gubitak kupaca, kooperanata i dobavljača. Kontinuirano poboljšanje performansi i inovativnost kao deo poslovne strategije preduzeća direktno utiče na diverzifikaciju proizvodnog programa čime se uvećavaju šanse za adaptivnost, opstanak i dalji razvoj PPS-a. Procenat otpisanosti proizvodne opreme u analiziranom vremenskom periodu je visok pri čemu je 50% opreme staro preko 30 godina dok je 14% mlađe od deset godina. Starosna struktura mašina koje predstavljaju nosioce proizvodnih kapaciteta (agregatne i CNC mašine, automati, specijalne mašine) je osetno bolja. Starosna struktura opreme nepovoljno se odražava na stepen korišćenja proizvodnih kapaciteta i opravdava postojanje organizacione celine zadužene za remont i održavanje.

Kretanje nedovršene proizvodnje, kao pokazatelj kvaliteta planiranja i upravljanja i odraz proizvodne problematike, prikazano je na slici 4. Gubitke za kvalitet čine: škart (po obradi i materijalu), dorada, popravke i revizija, pozicija, sklopova i finalnih proizvoda koji se ispitivanjima razaraju i uništavaju. Na slici 3 dat je dijagramski prikaz izgubljenih norma časova za kvalitet. U analiziranom periodu od 18 godina kreću se u rasponu od 2–5,8% u odnosu na godišnji obim proizvodnje (fizički pokazatelj), odnosno od 3–4,9% u odnosu na ukupan prihod (ekonomski pokazatelj). Područje faktora vezanih za ljudske resurse obuhvata: ukupan broj i kvalifikacionu strukturu zaposlenih, analizu uzroka i obima odsustvovanja sa posla, normiranje rada i sistem nagrađivanja. Na slici 5 prikazani su podaci o kretanju ukupnih gubitaka i prekovremenog rada u odnosu na ukupan broj radnika (100%), a na slici 6 kretanja izvršenja norme proizvodnih celina u %.

3. PROIZVOD REPREZENTANT

Izuzetno širok asortiman nepovoljno utiče na korišćenje raspoloživih proizvodnih kapaciteta i optimizaciju proizvodne funkcije. Značajan organizacioni problem koji se tiče problematike planiranja i upravljanja proizvodnjom je vremenska norma. Prosečna ostvarenja norme (slika 6) pokazuju da su normativi nerealni, ustanovljeni iskustveno i precenjeni. Sa stanovišta organizacije proizvodnje i korišćenja kapaciteta posebno je nepovoljno što su prisutne značajne oscilacije i to kako u pogledu količina pojedinih artikala tako i u pogledu njihove zastupljenosti u godišnjim proizvodnim programima. "Sloboda" mora da bude spremna za proizvodnju svih proizvoda (142) iako u analiziranom periodu godišnji planovi obuhvataju 27-67%. Širina i oscilacije u asortimanu proizvodnje upućuju na izbor proizvoda reprezentanta u okviru svake grupe proizvoda ili na nivou proizvodnog programa kao celine, koji bi poslužio kao osnova za makroekonomske analize i utvrđivanje kritične tačke poslovanja (tačke rentabilnosti), analizu i predviđanje budućih trendova proizvodne i programske orijentacije. Kriterijumi za izbor reprezentanta mogu biti brojni ali su svakako najznačajniji sledeći: značaj u ukupnom obimu proizvodnje, značaj u ukupnom prihodu, složenost i namena proizvoda, primenjene tehnologije i stepen angažovanja kapaciteta u procesu proizvodnje, broj uskih grla u proizvodnji, značaj u strukturi proizvodnog programa sa aspekta životnog i proizvodnog ciklusa, stabilnost u proizvodnom programu i stabilnost vremenske norme u analiziranom vremenskom periodu. Poštujući navedene kriterijume izvršen je izbor proizvoda reprezentanata a korišćenjem relacija (1)-(13) izvršeni su odgovarajući proračuni.

Uopšteno posmatrano proizvodni program (PP) čini konačan broj (n) proizvoda (X_i), pri čemu je obim realizovane proizvodnje determinisan količinom (Q_i) i vremenskom normom (t_{ni}), relacije (1) i (2). Polazeći od formula za izračunavanje ostvarene proizvodnje (T_{os}), relacije (4) i (5), usvajajući za reprezentant proizvod X_j (6) koji pripada proizvodnom programu (3) i uvodeći koeficijente k_i (7) i p_i (8) dobijamo formulu (9) kojom se vrši proračun količina (Q_i) svih proizvoda (X_i) u ekvivalentnu količinu (Q_r) usvojenog proizvoda reprezentanta (X_r).

$$PP = \{X_i, Q_i \mid i = \overline{1, n}\} \quad (1)$$

$$X_i = \{(Q_i, t_{ni}) \mid i = \overline{1, n}\} \quad (2)$$

$$X_r \in \{X_i \mid i = \overline{1, n}\} \Rightarrow t_{nr} \in \{t_{ni} \mid i = \overline{1, n}\} \quad (3)$$

$$T_{os} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot t_{ni} = Q_1 \cdot t_{n1} + Q_2 \cdot t_{n2} + \dots + Q_j \cdot t_{nj} + \dots + Q_n \cdot t_{nn} \quad (4)$$

$$T_{os} = Q_r \cdot t_{nr} \quad (5)$$

$$\{X_r\} = \{X_j\} \Rightarrow \{t_{nr}\} = \{t_{nj}\} \quad (6)$$

$$Q_1 \cdot t_{n_1} + Q_2 \cdot t_{n_2} + \dots + Q_j \cdot t_{n_j} + \dots + Q_n \cdot t_{n_n} = Q_r \cdot t_{n_j} / t_{n_j}, \quad k_i = \frac{t_{n_i}}{t_{n_j}}, i = \overline{1, n} \quad (7)$$

$$Q_r = Q_1 \cdot k_1 + Q_2 \cdot k_2 + \dots + Q_j \cdot k_j + \dots + Q_n \cdot k_n = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot k_i, \quad p_i = \frac{Q_i}{Q_j}, i = \overline{1, n} \quad (8)$$

$$Q_r = Q_j \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot p_i, (X_r = X_j) \left(\frac{\text{kom}}{\text{god}} \right) \quad (9)$$

$$T_{os} = Q_r \cdot t_{n_j} \left(\frac{\text{nč}}{\text{god}} \right) \quad (10)$$

$$\forall Q_j = 0 \Rightarrow (Q \neq 0 \wedge Q = 1) \quad (11)$$

$$Q_r = Q \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot p_i - Q = Q \left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot p_i - 1 \right) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot p_i - 1 \left(\frac{\text{kom}}{\text{god}} \right) \quad (12)$$

$$T_{os} = \left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot p_i - 1 \right) \cdot t_{n_j} \left(\frac{\text{nč}}{\text{god}} \right) \quad (13)$$

Koeficijentima k_i i p_i relativizujemo uticaj vremenske norme (unutrašnji faktor) i količina proizvoda (spoljašnji faktor), pri čemu se kumulativni efekat izražava zbirom proizvoda (9). Ovo je od značaja kada se kumulativni efekti proizvodnje prate u dužem vremenskom periodu da bi se izbegao uticaj nereálnih normativa vremena, što je u konkretnom slučaju prisutno. Ako se u nekom vremenskom periodu ili godini ne proizvodi proizvod reprezentant ($Q_j=0$), a potrebno je iskazati ukupnu proizvodnju preko njegove ekvivalentne količine tada, imajući u vidu relaciju (8), usvajamo količinu $Q=1$ i koristimo relacije (11)-(13). Analizirajući ekonomske pokazatelje jasno uočavamo dva perioda sa aspekta finansijskih rezultata poslovanja. U prvih jedanaest godina (t_1-t_{11}) preduzeće je ostvarilo nadprosečne rezultate, a u zadnjih sedam godina ($t_{12}-t_{18}$) posluje na ivici rentabilnosti. Da bi ostvarene rezultate poslovanja detaljnije analizirali i poredili, neophodno je da uspostavimo funkcionalne veze između obima proizvodnje i odgovarajućih finansijskih veličina, relacije (14)-(17):

$$C_p = W_{cp} \cdot Q_r \left(\frac{\text{din}}{\text{god}} \right), \quad W_{cp} = \frac{C_p}{Q_n} \left(\frac{\text{din}}{\text{kom}} \right) \quad (14)$$

$$C_k = T_m + T_r + T_{ot} \left(\frac{\text{din}}{\text{god}} \right), \quad C_k = T_c + W_v \cdot Q_r \left(\frac{\text{din}}{\text{god}} \right) \quad (15)$$

$$T_c = 0,8 \cdot T_{ot} = \text{const} \left(\frac{\text{din}}{\text{god}} \right), \quad W_v = \frac{T_m + T_r + 0,2 \cdot T_{ot}}{Q_n} = \frac{T_v}{Q_n} \left(\frac{\text{din}}{\text{kom}} \right) \quad (16)$$

$$C_p = C_k (D=0) \Rightarrow Q_k = \frac{Q_n \cdot T_c}{C_p - T_v} = \frac{T_c}{W_{cp} - W_v} = \frac{Q}{1 + \frac{D}{T_c}} \left(\frac{\text{din}}{\text{god}} \right) \quad (17)$$

4. PROIZVODNA FUNKCIJA I RENTABILNOST POSLOVANJA

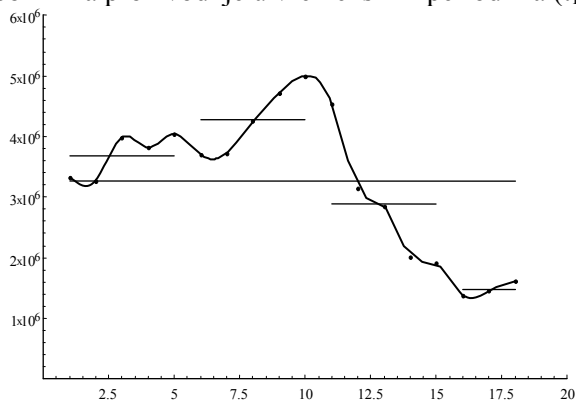
Koristeći formule (9) i (10) odnosno (12) i (13) preračunali smo godišnje efekte robne proizvodnje svih artikala na ekvivalentne efekte odabranog proizvoda reprezentanata. Aktuelni trend, sa ucrtanim prosecima u odgovarajućim vremenskim periodima (t_1-t_5 , t_6-t_{10} , $t_{11}-t_{15}$ i $t_{16}-t_{18}$), prikazan je na slici 7. Detaljno je analizirana i proučena struktura ukupnog prihoda i izvršeno grupisanje troškova vodeći računa o njihovoj prirodi, makroekonomskim kretanjima, uticaju tržišta i cenama. Da bi ostvarene rezultate poslovanja detaljnije analizirali i poredili neophodno je uspostaviti konkretne funkcionalne veze između obima proizvodnje, ukupnog prihoda i troškova poslovanja. Funkcionalne zavisnosti koje oslikavaju prosečne uslove privređivanja u vremenskim periodima (t_1-t_{11}) i ($t_{12}-t_{18}$) definisane su relacijama (18)-(20):

$$C_{p_1} = 632,13 \cdot Q_r, \quad C_{k_1} = 0,336 \cdot 10^9 + 193,85 \cdot Q_r, \quad Q_{n_1} = 4033956 \left(\frac{\text{kom}}{\text{god}} \right) \quad (18)$$

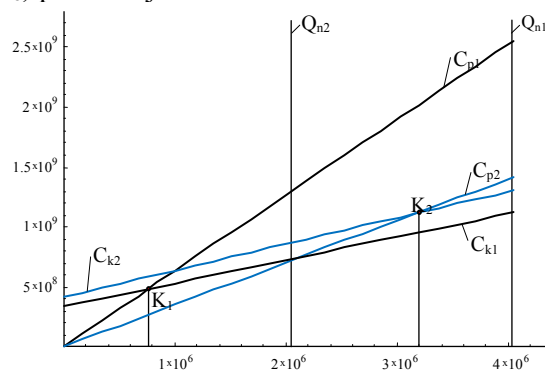
$$C_{p_2} = 350,43 \cdot Q_r, \quad C_{k_2} = 0,419 \cdot 10^9 + 219,14 \cdot Q_r, \quad Q_{n_2} = 2\,048\,937 \left(\text{kom/god} \right) \quad (19)$$

$$Q_{k_1} = 766\,633 \left(\text{kom/god} \right), \quad Q_{k_2} = 3\,191\,408 \left(\text{kom/god} \right) \quad (20)$$

Dijagram prosečnih vrednosti ukupnih prihoda i troškova poslovanja, sa ucrtanim nominalnim i kritičnim obimima proizvodnje u vremenskim periodima (t_1-t_{11}) i ($t_{12}-t_{18}$) prikazan je na slici 8.



Slika 7: Proizvodna funkcija sa odgovarajućim prosecima u (nč/god) proizvoda reprezentanata



Slika 8: Q-C dijagram sa ucrtanim vrednostima prihoda (C_{p1} , C_{p2}), troškova (C_{k1} , C_{k2}) i kritičnim tačkama poslovanja (K_1 , K_2) u vremenskim periodima (t_1-t_{11}) i ($t_{12}-t_{18}$) karakterističnim za poslovni ciklus

5. ZAKLJUČAK

Globalni pokazatelji poslovanja PPS-a prikazani su na slikama 7 i 8. Izuzetno dobri rezultati poslovanja u prvih jedanaest godina (t_1-t_{11}) posledica su značajnog učešća izvoza u ukupnom prihodu koji se kretao u rasponu od 30-49% ($Q_{n1} > Q_{k1}$, slika 8). U zadnjih sedam godina ($t_{12}-t_{18}$) poslovnog ciklusa PPS je poslovao sa gubitkom prvenstveno zbog raspada države (najvažnija unutrašnja determinanta), sankcija i blokada (najvažnije spoljašnje determinante). Poslovanje sa gubitkom (tačka K_2 , slika 8) posledica je smanjenog obima proizvodnje ($Q_{n2} < Q_{k2}$, slika 8) zbog otežanog snabdevanja proizvodnje i onemogućenog izvoza.

6. LITERATURA

- [1] Đukić R., Žižović M., Milanović D., Jovanović J., Istraživanje tendencija proizvodne orijentacije u uslovima neizvesnosti, 36. Jupiter konferencija, 38. Simpozijum: Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala, Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 2010.
- [2] Đukić R., Milanović D., Klarin M., Jovanović M., Determinante dinamičkog upravljanja poslovno - proizvodnim sistemima, Tehnika i praksa, broj 1, VŠTSS Čačak, Čačak, 2010.
- [3] Jovanović J., Milanović D. D., Đukić R., Jovićević I., Ibrahimović V., Orlović B., Fetić S., Analiza proizvodnog ciklusa i dinamike angažovanja obrtnih sredstava, Tehnika i praksa, broj 6, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Čačak, 2011.
- [4] Đukić R., Jovanović J., Prikaz alternativnih trendova programske orijentacije i odabranih kriterijuma za odlučivanje, Kvalitet, vol. 18, broj 11-12, strana 78-80, 2008.
- [5] Blagojević N., Đukić R., Kritična tačka poslovanja u Grafičko trgovinskom preduzeću «Laser» Kraljevo, XIII Međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, CENTAR CPA&G– Tehnološko-metaluški fakultet Beograd, Zlatibor, 2007.

A GLOBAL OVERVIEW OF PRODUCTION AND FINANCIAL EFFECTS IN BUSINESS SYSTEMS

Abstract:

This paper deals with the methodology for presentation of production and financial effects of complex business systems. Mathematical models allow the study of production function, analysis of production and economic trends as well as the application of simulation processes in strategic management.

Key words: product, production, representative, models, simulations, strategic management



S. Josipović, S. Pokrajac, N. Dondur¹

DRUŠTVENI TROŠKOVI KORIŠĆENJA ENERGIJE VETRA

Rezime:

Energija je danas ograničavajući faktor održivog privrednog rasta i razvoja. Narasli ekološki problemi, nekontrolisano trošenje i rasipanje limitiranih rezervi fosilnih goriva, eksplozivni rast populacije, povećanje potrošnje energije su osnovni generatori povećanja proizvodnje „obnovljive“ energije. Energija vetra beleži značajan rast tokom poslednje decenije kao jedan od najekonomičnijih obnovljivih energetske izvora. Studije Evropske asocijacije za energiju vetra (European Wind Energy Association - EWEA) pokazuju da ukoliko bi eksternalije (zagađenje životne sredine, emisija CO₂, SO₂, NO_x i dr.) bile uključene u sadašnje tržišne cene vetroelektrična energija bila bi konkurentnija na tržištu. Takođe, povećanje potrošnje obnovljivih energetske izvora (posebno energije vetra i solarne energije) je od suštinske važnosti za smanjenje emisije štetnih gasova koji se javljaju pri proizvodnji električne energije pomoću fosilnih goriva.

Ključne reči: obnovljivi izvori energije, energija vetra, energetska efikasnost.

1. UVOD

Najvažniji zadatak u oblasti energetike danas ogleda se u promovisanju koncepta *održivog energetske razvoja*. Prema ovom konceptu potrebno je zadovoljiti energetske potrebe sadašnjih generacija na način koji ne ugrožava životnu sredinu i bez bojazni za ugrožavanjem mogućnosti zadovoljenja potreba budućih generacija i njihovog prava na život u očuvanoj životnoj sredini. Za ostvarenje ovog cilja potrebno je u kratkom roku racionalno koristiti energiju, a u dugom povećati proizvodnju energije oslanjanjem na obnovljive energetske izvore koji sve više dobijaju na značaju kao delimična zamena za fosilna goriva. Diversifikaciju energetske izvora uslovljava nesigurna budućnost rezervi fosilnih energetske izvora, visoke i nepredvidive cene električne energije dobijene iz konvencionalnih izvora, sve teži pristup nalazištima nafte i gasa (što direktno utiče na rast troškova investiranja) i veća potrošnja fosilnih goriva koja izaziva klimatske poremećaje.

Obnovljivi izvori energije su zaslužni za napredak globalnog sektora čiste energije tokom poslednje decenije. Pozitivni efekti njihovog korišćenja ogledaju se u smanjenju emisije štetnih gasova iz proizvodnje i korišćenja električne energije, obezbeđenju veće sigurnosti i diversifikovanosti energetske ponude, veće supstitucije konvencionalnih goriva kao i smanjenju zavisnosti od promenljivosti i rasta cena fosilnih izvora energije na tržištu.

Energija vetra kao održiv, obnovljiv i ekološki čist izvor energije počinje sve više da se koristi u svetu. Tokom poslednje decenije energija vetra predstavlja jedan od najekonomičnijih obnovljivih energetske izvora. Moderni vetrogeneratori su povezani na distribucioni sistem za direktnu prodaju električne energije potrošačima. Prema procenama Svetske asocijacije za energiju vetra (World Wind Energy Association – WWEA) ukupno instalirani kapaciteti vetrogeneratora u svetu mogu da zadovolje oko 2,5% globalne tražnje za električnom energijom. Podsticanje razvoja vetroindustrije ima za cilj bolje iskorišćenje domaćih energetske potencijala, usporavanje stope rasta uvoza energenata, stvaranje dodatne aktivnosti za domaću industriju, otvaranje novih radnih mesta (u sektoru malih i srednjih preduzeća), razvoj brojnih industrijske grana (mašinska, metalska, građevinska industrija itd.), bolju zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi.

¹ Sonja Josipović, master ekonomista, saradnik u nastavi Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, sgrbic@mas.bg.ac.rs, Prof. dr Slobodan Pokrajac, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, spokrajac@mas.bg.ac.rs, Prof. dr Nikola Dondur, vanredni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, ndondur@mas.bg.ac.rs.

2. STRUKTURA INTERNIH TROŠKOVA PROIZVODNJE VETROELEKTRIČNE ENERGIJE

Tokom poslednje dve decenije prisutan je trend rasta snage vetrogeneratora kao i njihove efikasnosti i ekonomičnosti. Tehnološka unapređenja omogućila su smanjenje troškova proizvodnje vetroelektrične energije i do 50%. Efikasnost vetrogeneratora povećana je usled boljih načina postavke, gradnje viših tornjeva, proizvodnje rotora veće površine i dr. Navedena usavršavanja omogućila su veću proizvodnju električne energije pri nepromenjenoj snazi vetrogeneratora. Ekonomski optimalna veličina vetrogeneratora još nije utvrđena, ali je uočena tendencija smanjivanja troškova proizvodnje električne energije sa rastom instaliranih kapaciteta. Većina vetroelektrana počinje sa radom na brzini vetra od 4 do 5 m/sek. (tehnologije se razvijaju ka nižem pragu uključenja) i dostiže maksimum snage na oko 15 m/sek.

Interni troškovi proizvodnje vetroelektrične energije uslovljeni su sledećim faktorima:

1. **Tehnički vek trajanja projekta** - za tipične evropske vetrenjače iznosi oko 20 godina;
2. **Troškovi kapitala** - Evropski projekti korišćenja energije vetra obično se finansiraju 10 - 20% iz sopstvenih sredstava, 80 - 90% bankarskim kreditima na vremenski rok od 8 - 12 godina;
3. **Investicioni troškovi** koje čine:
 - ex-works troškovi vetrogeneratora,
 - troškovi pripreme projekta²,
 - troškovi izgradnje nosećeg temelja vetrogeneratora,
 - troškovi instaliranja posle utemeljenja,
 - troškovi priključenja vetrogeneratora na prenosnu mrežu itd.
4. **Troškovi rada i održavanja** - čine ih troškovi obezbeđenja zemljišta, servisa, osiguranja, administracije, potrošnih delova i dr. Godišnji troškovi rada i održavanja čine 2 - 3% ex-works troškova vetrogeneratora;
5. **Prosečna godišnja brzina vetra na posmatranoj lokaciji** - kao opšte načelo koristi se sledeće pravilo: snaga vetrogeneratora se povećava sa trećim stepenom brzine vetra, dok troškovi proizvodnje energije na isti način opadaju. Energetski autput vetrogeneratora može se proceniti pomoću sledeće formule:

$$E = b V^3 \text{ kWh/m}^3$$

E - godišnja proizvodnja

b - performance faktor

V - prosečna brzina vetra

6. **Dizajn** – razvoj većih turbina, gradnja viših tornjeva, većih površina rotora i dr. povećava proizvodnju električne energije [2].

Moderne vetrenjače imaju snagu od 1 do 3 MW, rotore prečnika i do 120 m, a visinu stubova između 80 i 120 m. Najveći napredak vidljiv je u oblikovanju lopatica rotora, korišćenim materijalima i upravljačkim mehanizmima. Veličina vetrenjača uslovljena je sledećim faktorima: tehnička pitanja vezana za fizičke karakteristike lokacije, potencijal energije vetra, kapacitet lokalnih prenosnih ili distributivnih mreža i pitanja vezana za predeo, nasleđe i politike plana razvoja.

U tabeli br. 1 prikazana je struktura troškova izgradnje tipične vetroturbine snage od 2 MW instalirane na području Evrope. Troškovi vetrogeneratora učestvuju sa oko 76% u ukupnim troškovima, troškovi mrežne konekcija sa oko 9% i troškovi temelja sa oko 7%. Troškovi obezbeđenja zemljišta za vetroturbinu zanačajno variraju od projekta do projekta tako da je brojka navedena u tabeli samo primer. Troškovi ostalih komponenti (servisa, kamata i dr.) čine mali deo ukupnih troškova. Tokom prve dve godine rada vetroturbine obično važi garancija proizvođača tako da troškovi rada i održavanja čine mali procenat ukupnih investicionih troškova (što odgovara trošku od 0,3 – 0,4 € centi/kWh). Nakon ovog perioda sledi rast tako da ovi troškovi na kraju šeste godine iznose nešto manje od 5% ukupnih investicionih troškova [2].

² Troškovi pripreme projekta uglavnom zavise od lokalnih okolnosti kao što su: zemljište, putevi, blizina prenosne elektro-mreže itd. Obično su lokacije sa povoljnim uslovima za gradnju farme vetrenjača udaljene od drumskih i energetskih magistrala što utiče na povećanje investicionih troškova.

Tabela br. 1. Struktura troškova vetroturbine snage 2 MW instalirane u Evropi (€²⁰⁰⁶)

	INVESTICIJA (1 000 € / MW)	UČEŠĆE U UKUPNIM TROŠKOVIMA (%)
Generator (ex works)	928	75,6
Priključenje na mrežu	109	8,9
Temelj	80	6,5
Zemljište	48	3,9
Električne instalacije	18	1,5
Menadžment	15	1,2
Finansijski troškovi	15	1,2
Infrastruktura	11	0,9
Servis	4	0,3
Ukupno	1227	100

Izvor: [2]

Osnovni uslov za planiranje izgradnje vetroelektrane je postojanje tehnički iskoristivog energetskog potencijala vetra. Kako bi se vetroenergetski potencijal u potpunosti iskoristio, investiranje u farme vetrenjača kreće se u dva pravca:

1. Pronalaženje manje vetrovitih mesta (3,5 - 5 m/sek.) na kojima bi trebalo postavljati jeftinije vetrenjače ili vetrenjače većih jediničnih snaga, kako bi troškovi proizvodnje vetroelektrične energije bili što prihvatljiviji;
2. Korišćenje off-shore lokacija (vetrenjača na morskoj površini) koje obezbeđuju veću proizvodnju vetroelektrične energije ali zahtevaju i veće investicione troškove.

3. EKSTERNI TROŠKOVI PROIZVODNJE I KORIŠĆENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Emisije štetnih gasova koje se javljaju usled proizvodnje električne energije pomoću konvencionalnih izvora predstavljaju pretnju za ostvarenje održivog energetskog razvoja. Korišćenje energije vetra, kao i drugih obnovljivih izvora energije, nema za posledicu emisije CO₂, SO₂ i NO_x što predstavlja osnovu za dugoročno održiv sistem snabdevanja električnom energijom. Prema projekcijama EWEA 2020. god. vetroenergetski kapaciteti na području EU ukupne snage od 180 GW obezbediće godišnje 428 TWh električne energije i godišnju uštedu od 215 mil. tona CO₂, 261.000 tona SO₂ i 333.000 tona NO_x. Takođe projekcije ukazuju da bi korišćenjem energije vetra bili izbegnuti eksterni troškovi od oko 25 mlrd. € godišnje [4]. U tabeli br. 2 prikazani su najznačajniji rezultati vetroindustrije u svetu ostvoreni do kraja 2010. god.

Tabela br. 2. Najznačajniji rezultati vetroindustrije na kraju 2010. god.

Novi instalirani kapaciteti	39 GW
Ukupno instalirani kapaciteti	198 GW
Snaga vetroturbine	na kopnu: 1.5 - 3.5 MW na moru: 1.5 - 5 MW
Troškovi (U.S. centi/kWh)	na kopnu: 5 - 9 na moru: 10 - 20
Top 3 zemlje - novi instalirani kapaciteti	Kina (19 GW), SAD (6 GW), Nemačka (2 GW)
Top 3 zemlje - ukupno instalirani kapaciteti	Kina (45 GW), SAD (40 GW), Nemačka (27 GW)
Top 3 zemlje - učešće vetroelektrične energije u ukupnoj proizvodnji	Danska (20%), Portugalija (18%), Nemačka (9%)
Broj radnih mesta	630.000

Izvor: [6] i [8]

Visoki eksterni troškovi korišćenja konvencionalnih goriva nisu sadržani u finalnoj tržišnoj ceni električne energije.³ Eksterni troškovi se mogu podeliti u tri kategorije:

- **Skriiveni troškovi** – snosi ih vlada, obuhvataju subvencije industriji za proizvodnju električne energije, istraživačke i razvojne troškove, poreska oslobođenja i dr.
- **Troškovi nastali usled emisije štetnih gasova (bez emisije CO₂)**
- **Troškovi globalnog zagrevanja (emisija CO₂).**

Najdetaljnija analiza internih, eksternih i društvenih troškova proizvodnje i korišćenja električne energije dobijene iz konvencionalnih energetske izvora i energije vetra realizovana je kroz projekat ExternE Evropske Komisije. Najznačajniji rezultati istraživanja su:

1. Interni troškovi proizvodnje i korišćenja električne energije iz konvencionalnih energetske izvora niži su od internih troškova proizvodnje i korišćenja vetroelektrične energije.
2. Za razliku od vetro-tehnologija, tehnologije konvencionalnih goriva (pre svega fosilnih goriva) prouzrokuju značajne eksterne troškove. Ekonomska šteta koja se može pripisati konvencionalnim gorivima značajno prevazilazi onu od vetra. Prema rezultatima istraživanja fosilna goriva imaju značajne eksterne troškove, a u okviru ove kategorije prirodni gas ima najniže eksterne troškove.
3. Ukoliko bi eksternalije bile uključene u sadašnje tržišne cene, tržišna cena vetroelektrične energije bila bi praktično nepromenjena, dok bi niža tržišna cena električne energije dobijene korišćenjem konvencionalnih goriva bila značajno povećana.⁴ Poređenjem društvenih troškova utvrđeno je da je ukupan društveni trošak vetroelektrične energije mnogo manji u poređenju sa ukupnim društvenim troškom električne energije dobijene korišćenjem konvencionalnih goriva. Kao rezultat obnovljive (čiste) tehnologije bile bi konkurentnije na tržištu [3].

Rezultati projekta ExternE Evropske Komisije ukazuju da se cene mogu iskoristiti kao osnovni i najmoćniji mehanizam podsticanja većeg korišćenja energije vetra i drugih obnovljivih energetske izvora. Racionalna upotreba energije, povećanje energetske efikasnosti, veće korišćenje obnovljivih energetske izvora danas postaju ključni elementi energetske politike ne samo razvijenih već i ostalih zemalja sveta. Eksterni troškovi energije postaju važan pokazatelj prilikom donošenja odluka u vezi sa energetske politikom, pošto ukazuju na štetan uticaj fosilnih goriva po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

4. ZAKLJUČAK

Struktura potrošnje primarne energije u svetu menjala se sa napretkom u proizvodnim procesima, sa primenom naučnih saznanja, tehničko-tehnološkim i ekonomskim parametrima vezanim za otkrivanje, eksploataciju i transportovanje goriva i efikasnošću korišćenja energije. Promena strukture ukazuje na okretanje čistijim, obnovljivim energetske izvorima, kao i prirodnom gasu, odnosno smanjenje učešća nafte i gasa, pre svega usled njihovih ekoloških nedostataka. Osnovni razlog ovih promena jeste uključivanje ekologije i ekoloških troškova u buduće rezultate energetske razvoja sveta. Budući energetske razvoj biće zasnovan na korišćenju energetske izvora sa malim sadržajem ugljenika i ostalih štetnih supstanci a to su upravo obnovljivi izvori energije. Prema prognozama fosilna goriva će i dalje imati dominantno učešće u globalnom energetske miksu na kraju 2035. god. od 74% ali će ono biti manje u odnosu na 2008. god. kada je iznosilo 81% [5].

Eksterni troškovi proizvodnje električne energije treba da budu ključan pokazatelj prilikom donošenja odluka u vezi sa energetske politikom zemalja. Među svim obnovljivim energetske izvorima energija vetra je rangirana kao jedna od najjeftinijih opcija za smanjenje emisije CO₂, ali i emisije drugih zagađujućih materija. Svaki kWh proizveden obnovljivim izvorima energije zamenjuje kWh koji bi bio proizveden u elektranama na fosilna goriva što ima za rezultat redukciju negativnih uticaja na životnu sredinu, a naročito emisije CO₂ u atmosferu.

³ Za razliku od eksternih troškova interni troškovi su uključeni u tržišne cene. Eksterni i interni troškovi zajedno čine tzv. društvene troškove.

⁴ Procenjeno je da bi se troškovi proizvodnje električne energije iz uglja i nafte udvostručili, a troškovi proizvodnje električne energije iz gasa povećali za 30% kada bi se u troškove proizvodnje uključili troškovi oštećenja životne sredine i zdravlja ljudi (tj. eksterni troškovi).

Veće korišćenje vetroenergije i drugih obnovljivih energetske izvora doprinosi ne samo smanjenju emisije štetnih gasova već i obezbeđenju veće sigurnosti i diversifikovanosti energetske ponude, supstitucije konvencionalnih goriva (posebno nafte i gasa) i smanjenju zavisnosti od promenljivosti i rasta cena fosilnih izvora energije na tržištu. Pored povećanja udela energije iz obnovljivih izvora za održivi energetski razvoj potrebno je razviti nove tehnologije u oblasti obnovljivih izvora i povećati energetske efikasnost i međunarodnu saradnju u cilju brige i podizanja na viši nivo energetske bezbednosti.

Imajući u vidu brojne prednosti vetroenergije kao obnovljivog energetske izvora, posebno ekološke, ali i ekonomske (pre svega zbog relativno jeftinog održavanja, iako su početna ulaganja velika), kao i činjenicu da na području Srbije postoje povoljne "ruže vetrova", ovom energetskom izvoru kod nas treba posvetiti daleko veću pažnju. Hronični nedostatak sredstava za investicije može se donekle ublažiti primenom modela javno-privatnog partnerstva kojim se udružuju sredstva iz javnih i privatnih izvora. Osim dobijanja jeftine električne energije iz vetrogeneratora, masovnija orijentacija na vetroenergiju daće i značajan impuls domaćoj mašingradnji, elektromašingradnji, građevinskoj industriji i drugim granama, što predstavlja važan doprinos procesu šire reindustrijalizacije naše zemlje i uopšte obnove proizvodnog sektora naše privrede.

LITERATURA

- [1] EWEA (2009): „*Wind Energy – The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power*“.
- [2] EWEA, (2009): „*The Economics of Wind Energy*“.
(http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/00_POLICY_document/Economics_of_Wind_Energy_March_2009.pdf)
- [3] EWEA, (2004): „*Support Schemes for Renewable Energy: A Comparative Analysis of Payment Mechanisms*“.
(http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/projects/rexpansion/050620_ewea_report.pdf)
- [4] EWEA, (2004): „*Wind Energy and the Environment*“,
(http://www.enerverde.eu/cms/download/factsheet_environment2.pdf)
- [5] IEA, (2010): „*World Energy Outlook 2009*“.
(<http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2009sum.pdf>)
- [6] REN21. (2011): „*Renewables 2011 Global Status Report*“, Paris: REN21 Secretariat.
(http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2011_Master18.pdf)
- [7] S. Josipović (2011): „*Energija vetra kao alternativni energetski izvor*“, master rad, Ekonomski fakultet Univerzitet u Beogradu.
- [8] WWEA (2011): „*World Wind Energy Report 2010*.”
(http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf)

SOCIAL COST OF USING WIND ENERGY

Summary:

Energy is still a limiting factor for sustainable economic growth and development. Grown ecological problems, uncontrolled spending, and wastage of limited reserves of fossil fuels, explosive population growth, increasing energy consumption are the main generators of increasing production of "renewable" energy. Wind energy recorded significant growth over the last decade as one of the most economical renewable energy sources. Studies of the European Wind Energy Association - EWEA show that if externalities (pollution, emissions of CO₂, SO₂, NO_x, etc.) were included in the current market price wind electricity would be competitive in the market. Increasing the consumption of renewable energy sources (particularly wind energy and solar energy) is essential for reducing greenhouse gas emissions that occur as a result of electricity generation using fossil fuels and to ensure sustainable energy development. Rational use of energy, energy efficiency and greater use of energy resources today are the key elements of energy policy not only developed but also other countries.

Key words: renewable energy, wind energy, energy efficiency.



G. Slavković¹, Ž. Spasić²

MODELIRANJE DINAMIKE SISTEMA NA PRIMERU UNIVERZITETA

Rezime:

Kompleksni sistemi se verbalno relativno jednostavno definišu, ali je stroga matematička ili formalna definicija svih relacija u njima skoro nemoguća. Shvatanje njihovog ponašanja zahteva razvoj, ili upotrebu, novih naučnih dostignuća i računarske simulacije. Povećanjem mogućnosti računara, nastala je veća zainteresovanost za proučavanje kompleksnih sistema. Univerzitet, koji ima tri grupe aktivnosti (nastava, istraživanje i menadžment ukupnim poslovanjem), je kompleksan obrazovno-istraživačko-poslovni sistem sa velikim brojem komponenti koje treba da se integrišu u upravljivi sistem i modelira se primenom metoda i tehnika iz oblasti teorije kompleksnih sistema. Za hibridni kontroler sa povratnom spregom objekat upravljanja je integrisani sistem kvaliteta univerziteta sa svojim obrazovno-poslovnim okruženjem. Projektovanjem odgovarajućih procedura kvaliteta koje se odnose na ovu problematiku uz korišćenje metode modeliranja dinamike sistema u okviru hibridnog kontrolera, dobija se mogućnost donošenja odluka uz primenu optimalnih rešenja.

1. UVODNA RAZMATRANJA

Kompleksni sistemi se verbalno relativno jednostavno definišu, ali stroga matematička ili formalna definicija svih relacija u njima praktično je nemoguća. Primena teorije kompleksnih sistema daje nove mogućnosti za projektovanje i upravljanje sistema koji u sebi imaju kompleksnost koja prevazilazi mogućnosti klasičnih naučnih pristupa. Ne postoji jedna određena naučna oblast koja matematički opisuje sve aspekte funkcionisanja kompleksnih sistema, već se koristi veći broj matematičkih disciplina za pojedine karakteristike kompleksnih sistema.

Modeliranje dinamike sistema je jedan od pristupa proučavanju kompleksnih sistema. Zasnova je na teoriji nelinearne dinamike i upravljanja sistemima sa povratnom spregom. Upravljanje je složen teorijski i praktičan zadatak koji podrazumeva primenu na određenom objektu upravljanja. Objekt upravljanja je univerzitet sa svojim obrazovno-poslovnim okruženjem i on kao kompleksni sistem može da bude organizovan i upravljan na različite načine.

Univerzitet, koji ima tri grupe aktivnosti (nastava, istraživanje i menadžment ukupnim poslovanjem), je dinamički sistem sa dinamičkim promenama mnogobrojnih funkcija tokom poslovanja i vremena. Podaci i informacije nisu signali sa vremenskim funkcijama i zakonitostima, niti sistem univerziteta može da se opiše konzistentnim sistemom jednačina. To su pre svega diskretni podaci proistekli iz redovnih akademskih aktivnosti univerziteta. Iz tog razloga univerzitet se modelira primenom metoda i tehnika iz oblasti teorije kompleksnih sistema. U osnovi sistema upravljanja se nalazi integrisani sistem kvaliteta digitalnog univerziteta sa odgovarajućom informaciono-komunikacionom infrastrukturom, podržanom od strane hibridnog kontrolera, koji treba da obezbedi upravljanje univerzitetom po svim nivoima. Projektovanjem odgovarajućih procedura kvaliteta koje se odnose na ovu problematiku uz korišćenje metode modeliranja dinamike sistema u okviru hibridnog kontrolera, dobija se mogućnost donošenja odluka uz primenu optimalnih rešenja, radi obezbeđivanja kontinualnog unapređenja kvaliteta univerzitetskih aktivnosti.

¹ Dr Goran Slavković, dipl. inž. maš. i elektro., gslavkovic@mas.bg.ac.rs

² Prof. Dr Žarko Spasić, dipl. inž. maš., zspasic@mas.bg.ac.rs

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

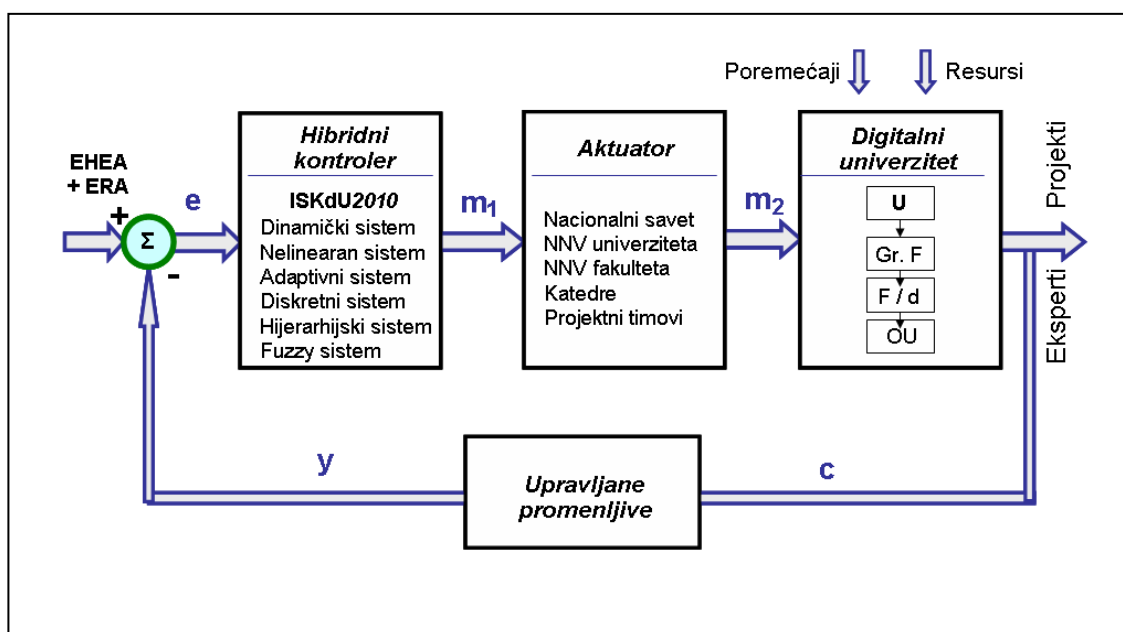
2. UNIVERZITET - KOMPLEKSNI SISTEM

Kompleksni sistem obuhvata veliki broj veoma snažno interagujućih elemenata, procesa ili agenata. Kompleksni sistemi se verbalno relativno jednostavno definišu, ali je stroga matematička ili formalna definicija svih relacija u njemu skoro nemoguća ([7], [8], [12]). Uprkos teškom razumevanju problematike kompleksnih sistema, povećanjem mogućnosti računara, nastala je veća zainteresovanost za proučavanje kompleksnih sistema. Postoji stalna potreba da se brzo i tačno modelira različiti skup sistema [3]. Shvatanje njihovog ponašanja zahteva razvoj, ili upotrebu, novih naučnih dostignuća i računarske simulacije ([2], [6]). Primena teorije kompleksnih sistema daje nove mogućnosti za projektovanje i upravljanje sistema koji u sebi imaju kompleksnost koja prevazilazi mogućnosti klasičnih naučnih pristupa. Ne postoji jedna određena naučna oblast koja matematički opisuje sve aspekte funkcionisanja kompleksnih sistema, već se koristi veći broj matematičkih disciplina za pojedine karakteristike kompleksnih sistema, kao što su teorija informacija, mrežno modeliranje, teorija ćelijskih automata, hijerarhijski procesi odlučivanja, fuzzy logika, genetski algoritmi i ekspertska ljuska ekspertskih sistema. Pošto često uključuje različite teorijske nauke, teorija kompleksnih sistema se posmatra i kao interdisciplinarna nauka. Matematičke tehnike koje se koriste u proučavanju kompleksnih sistema često uključuju i nelinearnu dinamiku, diferencijalne jednačine i analizu vremenskih nizova, ćelijske automate, teoriju grafova i mreža, i zavisno od problema, neke aspekte teorije igara, teoriju informacija i genetske algoritme, pa se mora adekvatno problemu i izabrati pristup.

Univerzitet je kompleksan obrazovno-istraživačko-poslovni sistem sa velikim brojem komponenti koje treba da se integrišu u upravljivi sistem ([1], [11], [12]). Upravljanje je delovanje na ulaze sistema da bi se postigli postavljeni ciljevi na izlazu sistema (efikasnost sistema, efektivnost sistema, kvalitet diplomiranih eksperata, kvalifikacije za tržište rada), sa optimalnim prilagođavanjima promenama i često kontradiktornim zahtevima. Univerziteti sa svojim organizacionim jedinicama predstavljaju kompleksne sisteme sa procesima donošenja odluka na više nivoa. Obrazovno-poslovno okruženje univerziteta čine resorna ministarstva, Vlada, komore, strukovne asocijacije, akademske asocijacije, industrija i privreda. Fleksibilnost hijerarhijskog procesa odlučivanja sa optimizacijom ostvarenih ciljeva obezbeđuje se kroz uspešnu koordinaciju rada donosioca tih odluka (profesori, saradnici, istraživači, dekani, prodekani, rektori, prorektori, studenti i nenastavno osoblje).

3. HIBRIDNI KONTROLER ZA UNIVERZITET – MODELIRANJE PROCESA

Prilikom projektovanja sistema za upravljanje univerzitetom neophodno je definisanje modela i sistema koji će uzeti u obzir sve relevantne elemente značajne za univerzitet ([4], [5], [12], [15]). Modeliranje takvog sistema zahteva teorijske osnove nekoliko disciplina. Hibridni kontroler sa povratnom spregom ([1], [11], [12], [13], [14], [15]) treba da obezbedi upravljanje univerzitetom po svim nivoima (slika 1).



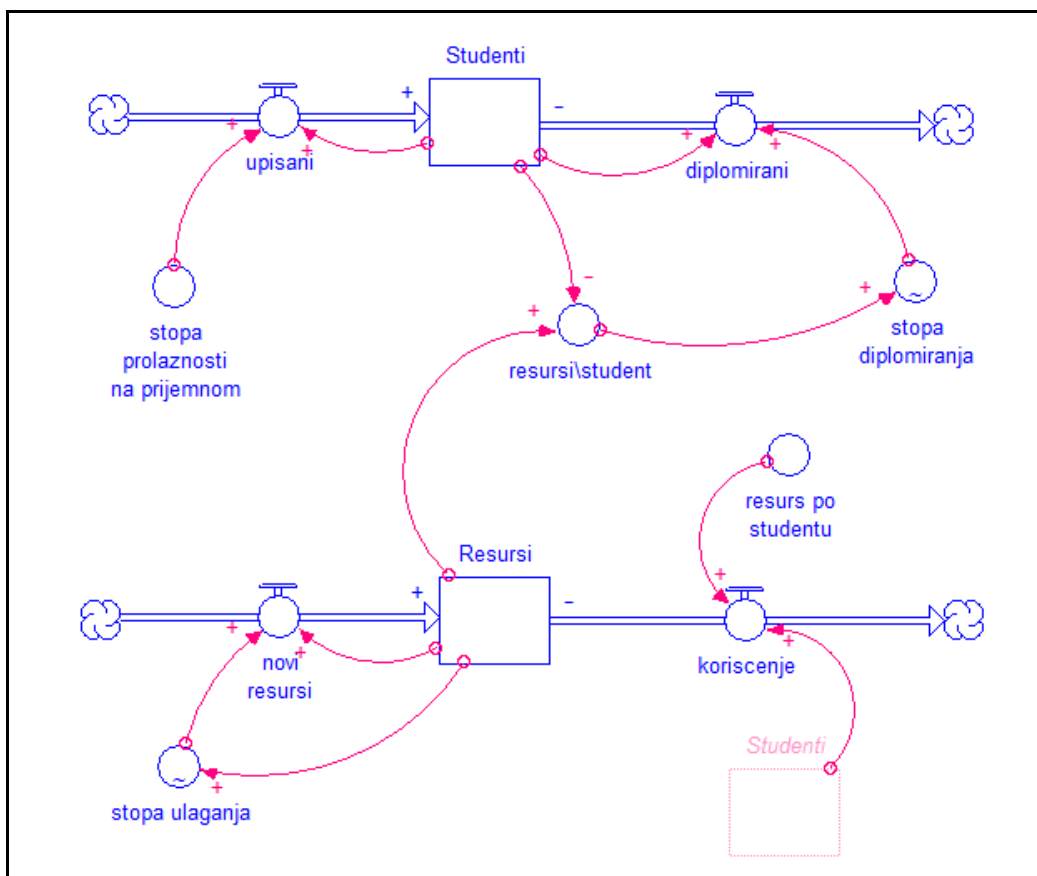
Slika 1. Hibridni kontroler za upravljanje sistemom digitalnog univerziteta [1]

3.1. Modeliranje dinamike sistema

Modeliranje dinamike sistema je pristup proučavanja kompleksnih sistema, kao što su organizacije i zajednice, tehnički i drugi sistemi [9]. Ova metoda podrazumeva korišćenje skupa softverskih programa koji omogućavaju da se prikaže struktura i dinamika kompleksnih sistema na konceptualnom nivou [10]. Cilj je da se poboljša način na koji su performanse modeliranog objekta povezane sa internom strukturom i daljim razvojem. Zasnovana je na teoriji nelinearne dinamike i upravljanja sistemima sa povratnom spregom. Povratna sprega, zajedno sa vremenskom upotrebom resursa, uključujući vremensko kašnjenje i nelinearnost, i čini dinamiku sistema, odnosno njegovo ponašanje. Najsloženija ponašanja sistema najčešće nastaju usled interakcije (povratne sprege) između komponenti sistema, a ne od složenosti samih komponenti. Dinamika sistema nastaje usled dejstva dve vrste povratne sprege: pozitivne povratne sprege (pojačava signal u sistemu) i negativne povratne sprege (smanjuje signal u sistemu).

3.2. Modeliranje dinamike sistema u okviru procedura kvaliteta

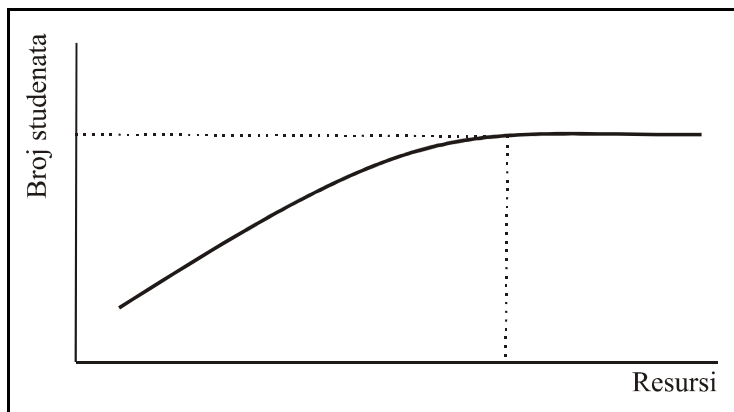
U okviru hibridnog kontrolera se nalaze drugi hibridni kontroleri nižih nivoa upravljanja na univerzitetu. Svaki od tih kontrolera na nižem nivou upravljanja se modelira odgovarajućim softverskim programima iz domena teorije kompleksnih sistema, u zavisnosti kakvi su procesi u pitanju. Kontroleri nižih nivoa upravljanja se razvijaju prema poslovnim funkcijama analiziranog sistema. Projektovanjem odgovarajućih procedura kvaliteta koje se odnose na ovu problematiku uz korišćenje metode modeliranja dinamike sistema u okviru hibridnog kontrolera, dobija se mogućnost donošenja odluka uz primenu optimalnih rešenja. Na slici 2 prikazano je konceptualno rešenje raspoloživih resursa faklteta/univerziteta u odnosu na broj studenata.



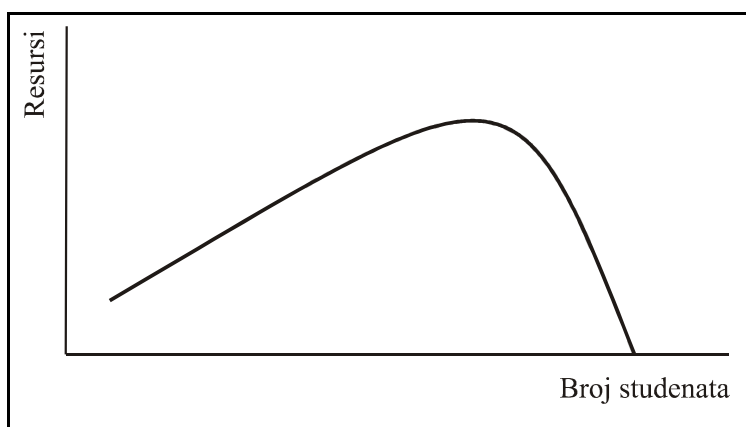
Slika 2. Modeliranje dinamike sistema studenti-resursi

Na primer, na nižem nivou upravljanja za integrisani sistem univerziteta hibridni kontroler bi preslikao poslovnu funkciju 'određivanje optimalnog broja studenata prema raspoloživim resursima' (slika 3). Takav

kontroler nižeg nivoa upravljanja se realizuje modeliranjem dinamike sistema i na osnovu njega je moguće odrediti optimalni broj studenata adekvatno različitim raspoloživim resursima fakulteta. Na taj način se dobija i optimalan broj resursa ukoliko se kao ulazni parametar definiše željeni broj studenata na određenom fakultetu (slika 4). Analizom rukovodstvo univerziteta/fakulteta može da sagleda koje mere je potrebno preduzeti (vezano za proširenje/unapređenje kapaciteta fakulteta) da bi se održao/povećao kvalitet uslova potrebnih za kvalitetnije obrazovanja studenata.



Slika 3. Broj studenata prema raspoloživim resursima



Slika 4. Broj raspoloživih resursa prema broju studenata

Kvalitetnije i uspešnije obrazovanje se ogleda i kroz period potreban za završetak studija. Kada se obezbede optimalni resursi velika je verovatnoća da će studenti završavati studije u propisanom roku. Na isti način, neodgovarajući resursi dovode do produžetka studija na veći broj godina. Ukoliko studije potraju drastično duže od vremena propisanog Statutom fakulteta može se desiti da nakon diplomiranja više ne postoji potreba za tim određenim profilom stručnjaka u privredi, jer su se tokom perioda produženog studiranja i zahtevi za tim profilom iz poslovnog okruženja promenili, usled dinamičkog razvoja samog poslovnog okruženja.

4. ZAKLJUČAK

Jedan od glavnih problema svakog univerziteta i fakulteta je privlačenje kandidata na studije na određenim fakultetima. Fakulteti se trude da obezbede sredstva kako bi unapredili svoje nastavno-istraživačke kapacitete za svoje sadašnje i buduće studente. Obezbeđivanjem kvaliteta obrazovanja se bave mnoge institucije. Ministarstvo pokušava da pronađe i odobri adekvatnu kvotu budžetskih mesta pri upisu na sve državne fakultete, što je veoma teško, jer je potrebno znati i raspoložive resurse fakulteta (u koje, pored ostalog, spadaju kako materijalna sredstva, tako i nastavni kadar) koji mogu da budu na raspolaganju budućim studentima za uspešnije obrazovanje. Iz tog razloga su potrebne i ažurne povratne informacije od svih fakulteta o tome pre raspisivanja konkursa za prijem novih studenata.

5. REFERENCE

- [1] Spasić, Ž., Integrirani sistem kvaliteta digitalnog univerziteta, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [2] Blanchard, S. B., Fabrycky, J. W., Systems Engineering and Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 2006.
- [3] Bleiklie, I., Organizing higher education in a knowledge society, Higher Education, Vol. 49, pp. 31-59, 2005.
- [4] Jankulović A., Spasić Ž., Glavonjić M., Slavković G., Modeliranje CIM/FTS preduzeća primenom IDEF metode, 13. INFO-TEH '98, Zbornik radova JURIT, str. 75-82, Vrnjačka Banja, 1998.
- [5] Jankulović A., Spasić Ž., Pilipović M., Slavković G., Uperedna analiza metodologija modeliranja preduzeća, 13. INFO-TEH '98, Zbornik radova JURIT, str. 67-74, Vrnjačka Banja, 1998.
- [6] Bar-Yam, Y., Dynamics of Complex Systems, Addison-Wesley, 1997.
- [7] August, I. D., Malik, S., Peh, L., Pai, V., Vachharajani, M., Willmann, P., Achieving Structural and Composible Modeling of Complex Systems, International Journal of Parallel Programming, Vol. 33, No. 2/3, 2005.
- [8] Mitchell, M., Complex systems: Network thinking, Artificial Intelligence, Vol. 170, pp. 1194-1212, 2006.
- [9] Hirsch, B. G., Levine, R., Miller, L. R., Using system dynamics modeling to understand the impact of social change initiatives, Am J Community Psychol, Vol. 39, pp. 239-253, 2007.
- [10] Serman, D. J., Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill, USA, 2000.
- [11] Slavković, G., Spasić, Ž., Hibridni kontroler za kompleksne sisteme na primeru univerziteta, 36. JUPITER konferencija, 29. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala, Zbornik radova na CD-u, str. 1.68-1.72, Beograd, 2010.
- [12] Slavković, G., Primena teorije upravljanja kompleksnim sistemima na integrirani sistem kvaliteta u sinergiji univerziteta sa obrazovno-poslovnim okruženjem, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2011.
- [13] Slavković, G., Spasić, Ž., Projektovanje sistema upravljanja univerzitetom primenom teorije kompleksnih sistema, 37. JUPITER konferencija, 30. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala, Zbornik radova na CD-u, str. 1.1-1.6, Beograd, 2011.
- [14] Slavković, G., Spasić, Ž., Hybrid Controller for System Management of Integrated University, 34. International Conference on Production Engineering, pp. 257- 262, Niš, 2011.
- [15] Slavković, G., Spasić, Ž., Methodology of Modeling Hybrid Controller for University Management in Synergy with Industry, FME Transactions, Vol. 40, No. 1, pp. 43-50, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2012.

G. Slavković, Ž. Spasić

DYNAMICS SYSTEM MODELING THE EXAMPLE OF THE UNIVERSITY

Summary:

Complex systems are relatively easy to define verbally, but the rigorous mathematical or formal definition of all relations is almost impossible. Understanding of their behavior requires the development or use of new scientific developments and computer simulations. With growth of computers, there was greater interest in the study of complex systems. University, which has three groups of activities (teaching, research and management of overall business), is a complex educational-research-business system with many components that need to be integrated into a manageable system and modeled by applying the methods and techniques from the theory of complex systems. For the hybrid controller with feedback, facility management is an integrated system of quality of university with its own educational and business environments. By designing the appropriate quality procedures relating to this issue by using system dynamics modeling methods in the hybrid controller, it is possible to get the ability to make decisions with the use of optimal solutions.

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



25. simpozijum

CAD/CAM

Beograd, maj 2012.

CAD/CAM

Borojević, S., Jovišević, V., Lakić-Globočki, G., Sredanović, B. EFEKTI PRIMJENE PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA U PROCESU IZRADE PROGRAMA ZA NUMERIČKE MAŠINE.....	2.1
Radić, N., Trifković, S., Milutinović, M., Jeremić, D. NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE UTICAJA OBLIKA I DIMENZIJA TANKOZIDNIH PROFILA NA VRIJEDNOST LOKALNOG I DISTORZIONOG KRITIČNOG NAPONA.....	2.9
Delić, I., Nasić, E., Mustafić, A. SIMULACIJA HLAĐENJA ALATA ZA INJEKCIONO PRESANJE POLIMERA RASHLADNIM MEDIJEM	2.15
Lovrić, S., Tufekčić, D., Topčić, A., Beganović, M. PRIMJENA BRZE IZRADE PROTOTIPA I REVERZIBILNOG INŽENJERINGA PRI LIVENJU U PIJESKU.....	2.20
Nasić, E., Mustafić, A. FEA SIMULACIJA FAZE INJEKTIRANJA MIM PROCESA	2.26
Blanuša, V., Živković, A., Zeljković, M. RAČUNARSKA ANALIZA TOPLOTNOG PONAŠANJA SKLOPA GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG VALJČASTIM DVOREDIM LEŽAJIMA.....	2.32
Tabaković, S., Bojanić, M., Milojević, Z., Živković, A. MODELIRANJE ELEMENATA SKELETNOG SISTEMA NA OSNOVU DIJAGNOSTIČKIH SNIMAKA.....	2.39
Stupar, S., Peković, O., Trivković, S., Zorić, N. KONCEPTUALNI DIZAJN LAKE AMFIBIJSKE LETELICE.....	2.45
Svorcan, J., Stupar, S., Komarov, D., Zorić, N. AUTOMATIZACIJA PROCESA MODELIRANJA LOPATICA VETROTURBINE U PROGRAMSKOM PAKETU CATIA	2.50
Komarov, D., Stupar, S., Simonović, A., Stanojević, M. PARAMETRIZACIJA ELEMENATA LOPATICE VETROTURBINE PRIMENOM CST METODE.....	2.56
Simonović, A., Dragović, V., Peković, O., Radosavljević, V. PRIMENA INŽENJERSKIH SOFTVERA PRI PROJEKTOVANJU KOMPOZITNIH KOMPONENATA VETROTURBINE	2.62
Mulugeta, B., Simonović, A., Trivković, S., Svorcan, J. DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF HAWT BLADES.....	2.68
Petrašinović, N., Petrašinović, D., Posteljnik, Z., Trivković, S. KONCEPTUALNI DIZAJN HELIKOIDNE VETROTURBINE SA VERTIKALNOM OSOM OBRATANJA	2.74
Posteljnik, Z., Komarov, D., Stanojević, M., Svorcan, J. PROJEKTOVANJE I ANALIZA TERMOIZOLACIONE OBLOGE KORENIH UKRUĆENJA ČELIČNIH DIMNJAKA	2.79

← NAZAD



Stevo Borojević¹, Vid Jovišević², Gordana Globočki-Lakić³, Branislav Sredanović⁴

EFEKTI PRIMJENE PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA U PROCESU IZRADE PROGRAMA ZA NUMERIČKE MAŠINE

Rezime: Osnovni pravac u razvoju automatizacije u proizvodnim sistemima usmeren je na automatizaciju projektovanja proizvoda, tehnoloških procesa i njegove izrade kroz primenu CAD/CAM sistema. U ovom radu prikazane su osnovne karakteristike CAD/CAM programskog sistema CATIA i njegove mogućnosti za programiranje NUMA. U okviru programskog sistema CATIA prikazan je modul *Machining* u kojem je izvršena simulacija obrade i generisanje programa za NUMA na primjeru unutrašnje obrade hidrauličnog cilindra. Ostvareni rezultati dati su u obliku efekata primjene ovog programskog sistema.

Ključne riječi: CATIA, struganje, tehnološki procesi, NC programiranje.

1. UVOD

Primjena NUMA (Numerički Upravljanih Mašina Alatki) zahtjeva dodatne aktivnosti pri projektovanju tehnoloških procesa u odnosu na aktivnosti projektovanja tehnoloških procesa za konvencionalne mašine [1]. Ove dopunske aktivnosti obuhvataju programiranje obradnih procesa, odnosno izradu programa za NUMA. Programi za NUMA sadrže geometrijske i tehnološke informacije koji su potrebne za izradu radnog predmeta. Geometrijske informacije obuhvataju: pravce, smjerove i veličine radnog predmeta i alata, dok tehnološke informacije obuhvataju: veličine glavnih i pomoćnih kretanja, izmjene alata, uključivanje SHP, korekcije putanje alata [2]. Definisane i povezivanje navedenih informacija u logičku cjelinu, na način razumljiv za upravljačku jedinicu mašine, naziva se programiranje. Rezultat programiranja je program, koji se u određenoj formi predaje upravljačkoj jedinici mašine. NU program predstavlja sekvencu blokova, rečenica i riječi kojima su definisane operacije, koje treba da izvedu radni organi NUMA.

Programiranje procesa obrade primjenom računara, u zavisnosti od nivoa podrške računara može biti [3]:

- programiranje primjenom programskih jezika,
- programiranje u pogonu i
- programiranje pomoću CAD/CAM sistema.

Programiranje primjenom programskih jezika vrši se uz podršku računara a po logici programskog jezika odgovarajućeg programskog sistema (APT, COMPACT II, ELAN, MITURN, SICAN NT i dr.).

Programiranje u pogonu je omogućeno modernizacijom upravljačkih jedinica i razvojem softvera za interaktivni dijalog između programera i upravljačke jedinice.

Programiranje pomoću CAD/CAM sistema je bazirano na integraciji funkcija projektovanja proizvoda primjenom računara - CAD i projektovanja tehnologije primjenom računara - CAM. Programiranje pomoću CAD/CAM sistema posebno je pogodno za radne predmete sa složenim kontinualnim geometrijskim površinama, jer takve površine ne zahtijevaju mnogo tehnoloških informacija a geometrija se direktno preuzima iz CAD sistema. Kao rezultat integracije CAD sistema i sistema za programiranje obradnih procesa, obezbjeđena je ekonomičnija proizvodnja radnih predmeta na NUMA jer je objedinjen proces projektovanja radnih predmeta i programiranja njegove obrade.

U ovom radu prikazane su neke od osnovnih obilježja korišćenja CAD/CAM programskog sistema CATIA i mogućnosti izrade programa za NUMA. U okviru programskog sistema CATIA prikazan je modul

¹ Mr Stevo Borojević, Banja Luka, Mašinski fakultet, +387 51 468-320 stevoborojevic@hotmail.com

² Prof. dr Vid Jovišević, Banja Luka, Mašinski fakultet, +387 51 468-320 vid.jovisevic@blic.net

³ Prof. dr Gordana Globočki - Lakić, Banja Luka, Mašinski fakultet, +387 51 468-320 globocki.gordana@gmail.com

⁴ Branislav Sredanović dipl.maš.inž., Banja Luka, Mašinski fakultet, +387 51 468-320 sredanovic@gmail.com

Machining u kojem je izvršena simulacija obrade i generisanje programa za NUMA na primjeru unutrašnje obrade hidrauličnog cilindra.

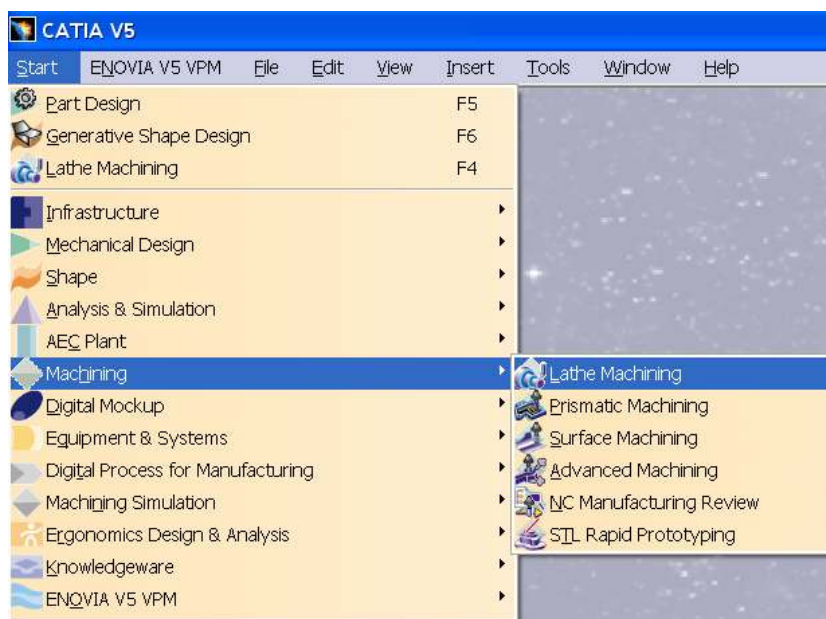
2. PRIKAZ PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA

Programski sistem CATIA [5] (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) jedan je od vodećih svjetskih integrisanih CAD/CAM/CAE programskih sistema. Razvijen je od strane francuske kompanije Dassault Systemes 1977. godine u svrhu zadovoljavanja zahtjeva vazduhoplovne industrije. Daljim razvojem, uz podršku kompanije IBM, CATIA V2/V3/V4 postaje moćan programski sistem. Kompanija Dassault Systemes uvođenjem pete i šeste verzije V5 i V6 postavlja nove standarde donoseći velika poboljšanja u arhitekturi sistema i korisničkom radnom okruženju. CATIA V5 i V6 je program za interaktivno projektovanje nove generacije, koja integriše sve aspekte procesa razvoja proizvoda. To obuhvata simultanu upotrebu podataka i geometrijskih informacija od koncepta proizvoda do definisanja proizvodnog procesa.

U okviru programskog sistema CATIA razvijen je veliki broj modula koji se prvenstveno primjenjuju u zavisnosti od područja interesovanja i zahtjeva korisnika. U ovom radu korišćen je, pored osnovnih modula za projektovanje (*Part Design* i *Skecher*), i modul koji se primjenjuje prilikom izrade programa za procese obrade na NUMA koji se naziva *Machining*. Modul *Machining* sastoji se od nekoliko pod-modula (slika 1) od kojih je u okviru ovog rada korišćen pod-modul *Lathe Machining*.

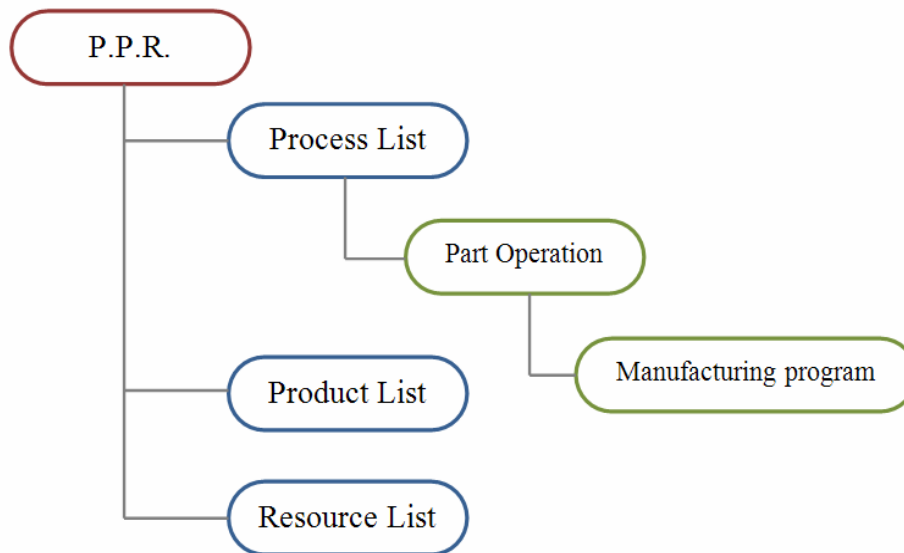
Glavne mogućnosti koje pruža pod-modul *Lathe Machining* su [4]:

- definisanje operacija obrade struganja i bušenja cilindričnih dijelova u 2 ose kod horizontalnih i vertikalnih strugova,
- definisanje uslova obrade pri procesu obrade,
- simulaciju i verifikaciju procesa obrade,
- generisanje NC programa i izradu dokumentacije,
- simulaciju i generisanje programa za strugove sa pogonjenim alatima.



Slika 1. Modul *Machining* i njegovi pripadajući pod-moduli

U okviru modula *Machining* veoma važno mjesto zauzima strukturalno stablo (*Specification tree*) koje predstavlja polaznu i krajnju tačku pri definisanju procesa obrade. Strukturalno stablo modula *Machining* predstavlja integrisani alat pomoću koga se prate svi podaci koji su prethodno definisani u okviru posmatranog procesa obrade.



Slika 2. Šema strukturnog stabla modula Machining

Šema strukturnog stabla modula *Machining*, prikazana na slici 2, obuhvata:

- *P.P.R.- Process Product Resource* (Resursi procesa za proizvod) - Predstavlja prvi nivo stabla koji sadrži naredne strukturne nivoe:
 - *Process list* (Lista procesa) - nivo strukturnog stabla u kome su prikazane osnovne operacije, pomoćne operacije i programi. Nivo *Process list* se sastoji od pod-nivoa strukturnog stabla pod nazivom *Part Operation* (Operacije za proizvod) u kome su prikazane informacije u vidu liste operacija. Pod-nivo *Part Operation* sastoji se od narednog pod-nivoa pod nazivom *Manufacturing program* (Program izrade) u kome su prikazane zahvati koji su definisani u prethodnom pod-nivou. U okviru zahvata se definišu informacije u vidu izmjene alata, režima obrade, koordinatnih sistema.
 - *Product list* (Lista proizvoda) - nivo strukturnog stabla u kome su prikazane informacije u vidu priprema, izratka i pribora;
 - *Resource list* (Lista resursa) - nivo strukturnog stabla u kome je prikazan alat i obradni sistem koji se upotrebljavaju pri definisanju procesa obrade.

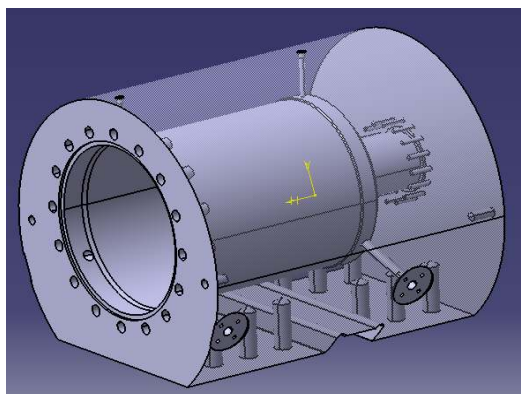
Pored pregleda strukturisanih podataka, strukturno stablo omogućava ponovno pozivanje i izmjenu prethodno definisanih podataka u okviru procesa obrade.

Programski pod-modul *Lathe Machining* nudi široki spektar alata pomoću kojih se vrši definisanje i dalje preciziranje procesa obrade struganjem. Najznačajnija paleta alata su *Machining operations* (Operacije obrade struganjem) i *NC tools* (alati za struganje).

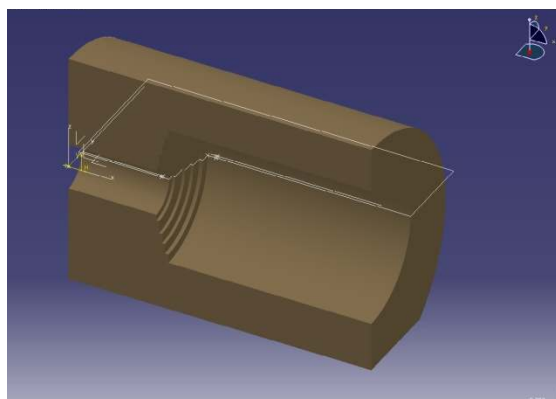
3. PRIPREME ZA IZRADU PROGRAMA

Izrada programa za NUMA korišćenjem pod-modula *Lathe Machining* u okviru modula *Machining* programskog sistema CATIA zahtjeva pripremne aktivnosti. Pripremne aktivnosti obuhvataju izradu čvrstog modela (CAD modela) radnog predmeta, čvrstog modela priprema i projektovanje idejnog tehnološkog procesa obrade [4]. Projektovani CAD model hidrauličnog cilindra je prikazan na slici 3. a CAD model priprema je prikazan na slici 4.

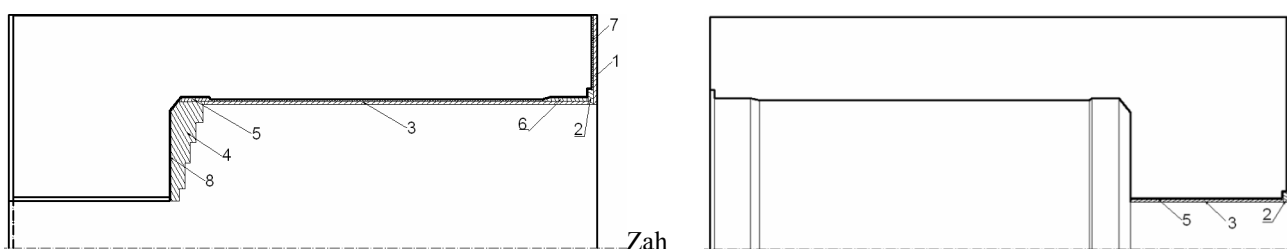
Plan obrade hidrauličnog cilindra je prikazan na slici 5. Kao ulazne informacije za modeliranje hidrauličnog cilindra korišćen je radionički crtež. Na osnovu radioničkog crteža utvrđeno je da su konstrukcione karakteristike hidrauličnog cilindra relativno jednostavne, tako da je isti modeliran u okviru modula *Part Desing*, koji se koristi za zapreminsko modeliranje. U okviru istog modula izvršeno je i modeliranje priprema.



Slika 3. CAD model hidrauličnog cilindra



Slika 4. CAD model priprema za hidraulični cilindar



vati prve operacije:

1. gruba poprečna obrada
2. unutrašnja poprečna obrada
3. unutrašnja gruba uzdužna obrada
4. unutrašnja gruba poprečna obrada
5. unutrašnja izrada žljeba
6. unutrašnja gruba uzdužna obrada
7. fina čeonca obrada
8. unutrašnja fina konturna obrada

Zahvati druge operacije:

1. gruba poprečna obrada
2. unutrašnja poprečna obrada
3. unutrašnja gruba uzdužna obrada
4. fina poprečna obrada
5. unutrašnja fina konturna obrada

Slika 5. Plan obrade hidrauličnog cilindra za operacije struganjem

4. PROCES IZRADE PROGRAMA

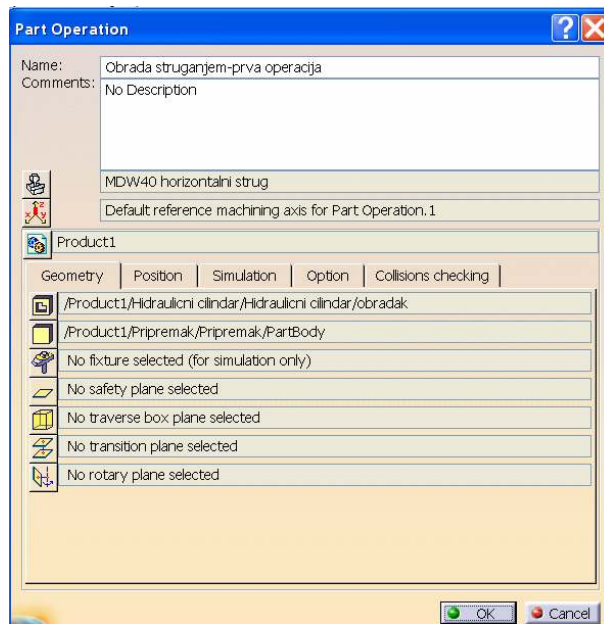
Proces programiranja otpočinje programskim podešavanjem, u okviru modula *Lathe*, a u svrhu generisanja programa za obradu struganjem hidrauličnog cilindra. Obrada struganjem hidrauličnog cilindra obuhvata dvije operacije i ukupno 13 zahvata. U okviru ovog rada, zbog ograničenja prostora prikazana je procedura programskog podešavanja za zahvat grube poprečne obrade u okviru prve operacije struganjem.

Preko strukturnog stabla pokreće se dijalog prozor, pomoću koga je izvršeno definisanje osnovnih parametra procesa obrade (slika 6) i to:

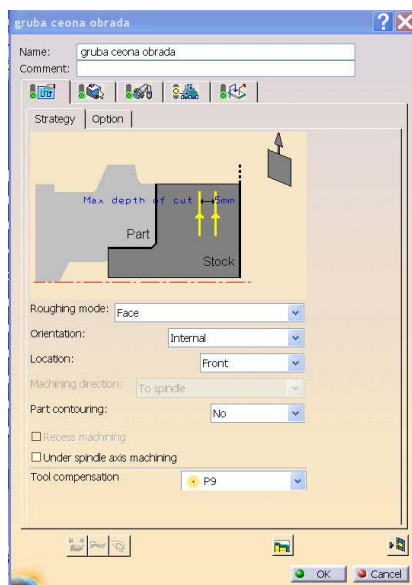
- obradni sistem - NC horizontalni strug MDW 40,
- odgovarajući koordinatni sistem - prethodno definisani koordinatni sistem hidrauličnog cilindra ,
- radni komad - hidraulični cilindar.

Definisanjem parametara u vidu izbora obradnog sistema i koordinatnog sistema izvršene su pripreme neophodne za naredno programsko podešavanje pojedinih zahvata operacije obrade struganjem.

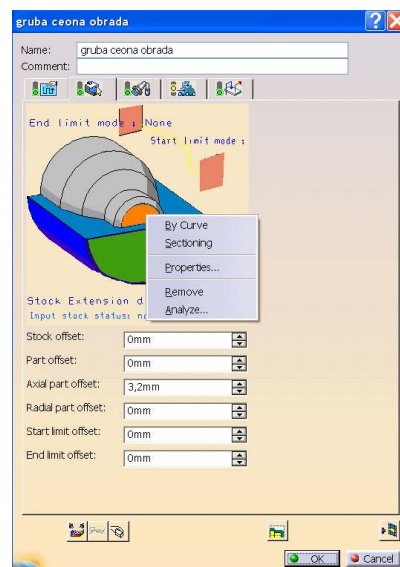
Za programsko podešavanje zahvata grube poprečne obrade struganjem koristi se alat *Rough turning operation*. Dijalog prozor ovog alata sa odgovarajućim opcijama prikazan je na slici 7.



Slika 6. Dijalog prozor za definisanje osnovnih parametra procesa obrade



Slika 7. Dijalog prozor alata Rough turning operation



Slika 8. Dijalog prozor za definisanje konturnih linija izratka i pripremk

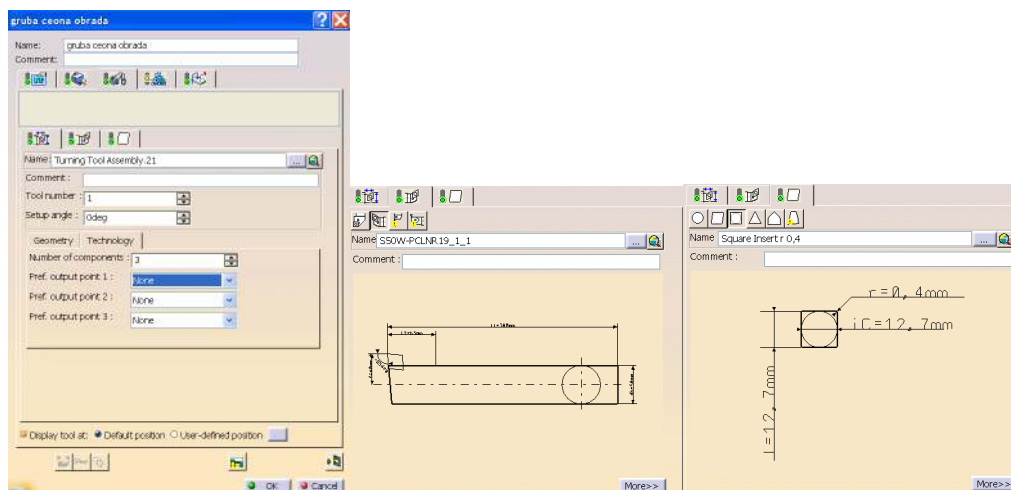
Programsko podešavanje izvođenja zahvata u okviru alata *Rough turning operation* sastoji se od:

- definisanja strategije procesa obrade,
- definisanja referentnih (konturnih) linija radnog komada (izratka) i pripremk,
- definisanja i izbora alata,
- definisanja režima obrade i
- definisanja geometrije i brzine dopunskog kretanja alata u zahvatu.

Definisanje strategije procesa obrade započinje izborom prilaza i kompenzacije alata. Kao strategija obrade za posmatrani zahvat izabrana je poprečna obrada i kompenzacija alata u saglasnosti sa tom vrstom obrade.

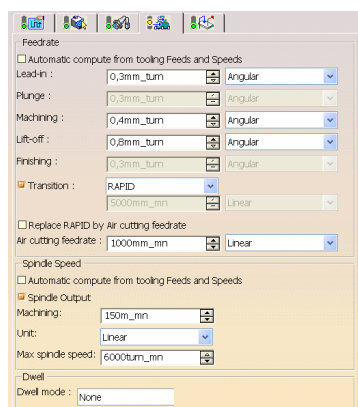
Za zahvat grube poprečne obrade definisane su referentne (konturne) linije hidrauličnog cilindra i odgovarajućeg priprema, te dodaci za finu obradu preko dijalog prozora prikazanog na slici 8.

Definisanje i izbor alata izvodi se preko dijalog prozora prikazanog na slici 9 u okviru koga se nalaze opcije za definisanje referentne kompenzacione tačke, izbor drške alata i izbor rezne pločice. Za posmatrani zahvat izabrana je referentna kompenzaciona tačka P9, koja se nalazi na reznoj pločici, držač alata za poprečnu obradu PCLN i rezna pločica za grubu obradu, kvadratnog poprečnog presjeka sa radijusom vrha od $r=0,4\text{mm}$.

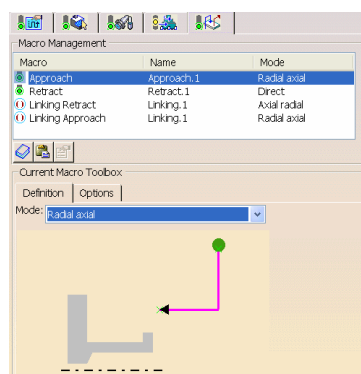


Slika 9. Dijalog prozori za izbor alata, drške alata i rezne pločice

Definisanje režima obrade izvodi se preko dijalog prozora prikazanog na slici 10. Programski sistem CATIA u okviru svog kataloga *Feeds and Speeds* preporučuje režime obrade, koji se zasnivaju na tipu alata. Takav način izbora režima obrade nije adekvatan jer se pri tom ne uzimaju u obzir brojni drugi parametri kao što su: obradni sistem, kvalitet obrade i postojanost alata. U okviru definisanja režima obrade hidrauličnog cilindra korišćeni su podaci iz prethodno projektovanog tehnološkog postupka.



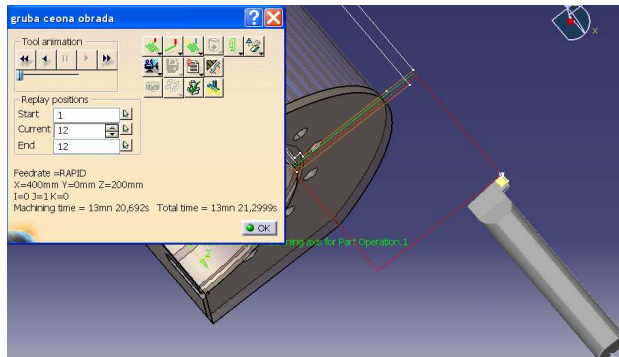
Slika 10. Dijalog prozor za definisanje režima obrade



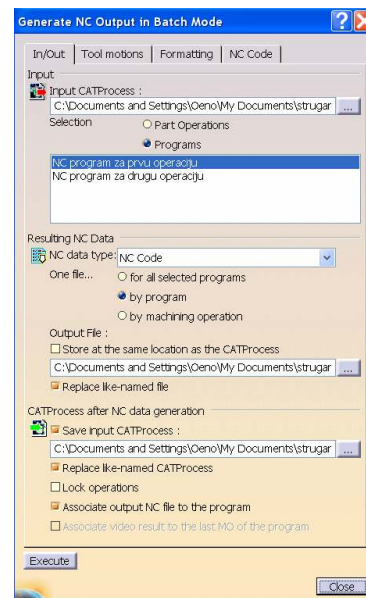
Slika 11. Dijalog prozor za definisanje geometrije i brzine dopunskog kretanja

Definisanje geometrije i brzine dopunskog kretanja alata u zahvatu izvedeno je preko dijalog prozora prikazanog na slici 11. U programskom sistemu CATIA su u tu svrhu predloženi prethodno definisani makroi, međutim postoji i mogućnost njihovog prilagođavanja. Za posmatrani zahvat obrade hidrauličnog cilindra izabran je *Radial axial* način definisanja geometrije i dopunskog kretanja alata.

Nakon definisanja svih neophodnih parametara za izvođenje zahvata grube poprečne obrade struganjem izvršena je simulacija pomenutog zahvata. Segment simulacije zahvata grubog poprečnog struganja hidrauličnog cilindra prikazan je na slici 12.



Slika 12. Segment simulacije zahvata grubog poprečnog struganja



Slika 13. Dijalog prozor za generisanje NC programa

5. GENERISANJE NC PROGRAMA

Dijalog prozor za generisanje NC programa prikazan je na slici 13. Nakon podešavanja neophodnih parametara u okviru dijaloga, generisan je NC program za zahvat grube poprečne obrade struganjem. U okviru ranijih sistemskih podešavanja, izvršen je izbor proizvođača postprocesora- Intelligent Manufacturing Software (IMS).

Na osnovu predhodnih priprema izvršeno je generisanje NC programa za sve zahvate i operacije struganjem hidrauličnog cilindra. Izvod NC programa prikazan je na slici 14.

<u>NC program za prvu operaciju</u>	N130 X798.302 Z8.812 F.8	N280 Z-5.3 F.4
%	N140 G0 X359.326	N290 X390.326 Z-5.088 F10.8
O0	N150 Z3.6	N300 G0 Z20.252
N10 G90 G20 G95 G40	N160 G1 X363.326 F.3	N310 X398.526
N20 G0 X800. Z200.	N170 X797.852 F.4	N320 G1 Z18.252 F.3
N30 M5	N180 X797.428 Z3.812 F.8	N330 Z-5.3 F.4
N40 M9	N190 G0 X800. Z200.	N340 X398.1 Z-5.088 F10.8
N50 G0 X15. Z8.5	N200 G96 S150 M4	N350 G0 Z20.252
N60 G90 G54 T101	N210 X382.976 Z20.252	N360 X406.3
N70 G96 S150 M4	N220 G1 Z18.252 F.3	N370 G1 Z5.6 F.3
N80 X800. Z200.	N230 Z-5.3 F.4	N380 Z-5.3
N90 X359.326	N240 X382.55 Z-5.088 F10.8	N390 X375.2
N100 Z8.6	N250 G0 Z20.252	N400 X374.776 Z-5.088 F10.8
N110 G1 X363.326 F.3	N260 X390.75
N120 X798.726 F.4	N270 G1 Z18.252 F.3	

Slika 14. Izvod generisanog NC programa za operacije struganja hidrauličnog cilindra

6. EFEKTI PRIMJENE PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA

Efekti primjene programskog sistema CATIA identifikovani su na osnovu programiranja operacije struganjem hidrauličnog cilindra za obradu na numeričkom strugu MDW 40 i to:

- primenom odgovarajućeg skupa alatki i modula integrisanih u programskom sistemu CATIA, uveliko je olakšan rad i skraćeno vrijeme pripreme za generisanje NC programa za operacije obrade struganjem,
- odgovarajuće alatke, pri modeliranju procesa obrade, omogućavaju generisanje potpuno novih (korisničko definisanih) relevantnih podataka kao što su: definisanje geometrije reznih pločica, držača

alata, strategije i putanje izvođenja obrade, kompenzacije alata i režima obrade, u odnosu na palete standardnih podataka,

- programski sistem CATIA nudi integrisano rješenje za širok spektar simulacija u oblasti mašinske obrade bez zahtjeva za usaglašavanjem formata i/ili transfera podataka između modula programskog sistema,
- simulacijom procesa obrade struganjem generišu se korisne informacije koje mogu unaprijediti izradu kvalitetnijeg tehnološkog procesa obrade hidrauličnog cilindra,
- video mjerenjem obrađenih površina, u okviru programskog sistema CATIA, vrši se simulacija kontrole dimenzija dobijenih izvođenjem prethodnih procesa obrade struganjem.
- primjenom programskog sistema CATIA, od projektovanja hidrauličnih cilindara do simulacije obrade struganjem, značajno se utiče na povećanje efektivnosti procesa i smanjenje troškova izrade, a samim tim i na povećanje konkurentnosti na tržištu.

7. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane neke od mogućnosti primjene programskog sistema CATIA u automatizaciji projektovanja tehnologije procesa izrade radnih predmeta, kao jedne od ključnih inženjerskih aktivnosti u CIM proizvodnom sistemu. U okviru aktivnosti projektovanja tehnoloških procesa primjenom odgovarajućeg skupa alatki i modula integrisanih u programskom sistemu CATIA znatno je olakšan rad i skraćeno vrijeme pripreme za generisanje NC programa što je prikazano na primjeru operacije obrade struganjem.

Video mjerenjem obrađenih površina, u okviru programskog sistema CATIA, dobijene su vrijednosti dimenzija koje su upoređene sa dimenzijama CAD modela hidrauličnog cilindra. Rezultat mjerenja karakterističnih dimenzija pokazuje odstupanja, koja se kreću u rasponu od 0.01mm do 0.0015mm, što ukazuje da su zadovoljeni postavljeni zahtevi na crtežu.

Za operacije struganja hidrauličnog cilindra prikazano je generisanje NC programa samo za tri osnovne vrste obrade struganjem: gruba obrada, uzdužna i poprečna završna obrada i izrada žljebova, međutim mogućnosti koje pruža programski sistem CATIA u okviru svog modula za struganje su daleko veće. Izbor opcija je veći posebno pri definisanju operacija za strugove sa pogonjenim alatima, kao i povezanjem NC modula za struganje sa srodnim modulom *Machine Tool Builder*, što rezultuje potpunom simulacijom procesa obrade.

8. LITERATURA

- [1] Jovišević V. : Projektovanje tehnoloških procesa, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2005.
- [2] Todić V.: Projektovanje tehnoloških procesa, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
- [3] Babić R. B.: Projektovanje tehnoloških procesa, Mašinski fakultet Beograd, 2004.
- [4] Dassault Systemes, CATIA V5R21, France, 2011, www.3ds.com.
- [5] Christman A.: CATIA V5 CAM from IBM/Dassault Systèmes-A Product Review, CIMdata, 2006.

EFFECTS OF APPLICATION PROGRAM SYSTEM CATIA IN THE PROCES OF PROGRAMING FOR NUMERICAL CONTROLLED MACHINES

Abstract: *The main direction in the development of automation in manufacturing systems is focused on the automation of product design, process planning and its manufacturing processes through the application of CAD / CAM systems.*

In this paper it was shown basic characteristics of CAD / CAM program system CATIA and its capabilities for programming NC machines. In the frame of program system CATIA is was introduced a module Machining in which was performed simulations and generated a programs for NC Lathe in the case of inward turning for hydraulic cylinder. The achieved results are given in the form of the effects for application of this program system.

Keywords: *CATIA, turning, processes planning, NC programming.*

Nebojša Radić, Spasoje Trifković, Miroslav Milutinović, Dejan Jeremić¹

NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE UTICAJA OBLIKA I DIMENZIJA TANKOZIDNIH PROFILA NA VRIJEDNOST LOKALNOG I DISTORZIONOG KRITIČNOG NAPONA

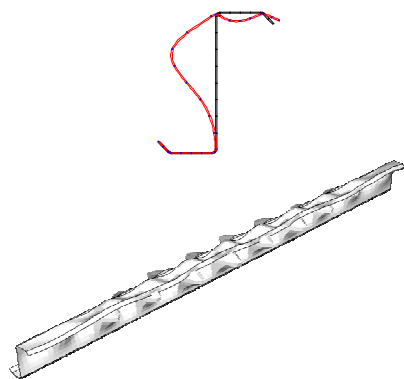
Rezi me

Hladno oblikovani čelični stubovi čiji je poprečni presjek tankih zidova imaju tri karakteristična oblika gubitka stabilnosti: lokalni, distorzioni, i Ojlerov (globalni) oblik gubitka stabilnosti. Pojava tri različita oblika gubitka stabilnosti znatno usložnjava analizu stabilnosti tankozidnih profila, a posebno analizu nosivosti u postkritičnoj fazi. Kod tankozidnih nosača gubitak stabilnosti se dešava u zoni elastičnosti i pri relativno malim vrijednostima kritičnog napona. Zbog toga se kod tankozidnih nosača dozvoljava značajno povećanje opterećenja u postkritičnoj fazi sve dok ne dođe do pojave plastičnih deformacija. U radu je primjenom numeričkih metoda izvršena analiza odnosa lokalnog kritičnog napona i kritičnog napona distorzije. Pokazano je da vrijednosti dva napona mogu biti vrlo bliske ili jednake, a u određenim slučajevima vrijednost kritičnog napona distorzije može biti značajno manja od vrijednosti lokalnog kritičnog napona.

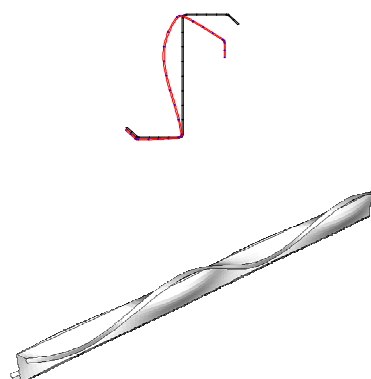
Ključne riječi: tankozidni profil, izvijanje, distorzija, lokalni kritični napon, kritični napon distorzije.

1. UVOD

Tankozidni nosači otvorenog presjeka se zbog male težine široko primjenjuju u različitim inženjerskim konstrukcijama. Jedan od najvećih problema koji se javlja u njihovoj primjeni jeste njihova velika osjetljivost na gubitak stabilnosti u elastičnom području. Pored toga što se gubitak stabilnosti događa pri maloj vrijednosti kritičnog napona dodatnu komplikaciju u analizi predstavlja pojava tri različita karakteristična moda izvijanja. Ti modovi su : lokalni, distorzioni i Ojlerov (globalni). Ova tri moda se međusobno razlikuju po obliku poprečnog presjeka i dužini polutalasa poslije gubitka stabilnosti.



Sl. 1. Lokalno izvijanje

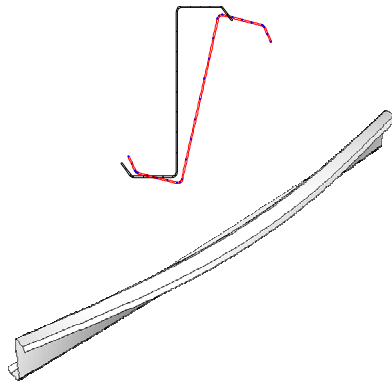


Sl. 2. Distorziona izvijanje

¹ Doc. dr Nebojša Radić, dipl.inž.maš., e-mail: nesor67@yahoo.com, ass Spasoje Trifković, dipl.inž.maš., e-mail: trifkovic_s@yahoo.com, ass Miroslav Milutinović, dipl.inž.maš., e-mail: m.milutinovic82@gmail.com, ass Dejan Jeremić¹, dipl.inž.maš., e-mail: dejan.jeremic@yahoo.com, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Buka Karadžića 30, telefon: 0038757340847

Lokalni mod se javlja na dužini polutalasa koja je manja od najveće karakteristične dimenzije poprečnog presjeka. Lokalno izvijanje uključuje samo rotaciju u tačkama spajanja pojedinih ploča od kojih je sastavljen poprečni presjek. Pri tom nema nikakvih translacija spojnih tačaka. Lokalno izvijanje uključuje distorziju čitavog poprečnog presjeka. Drugim rječima svi dijelovi profila se savijaju u obadvije ravni. Sve to je prikazano na sl.2.

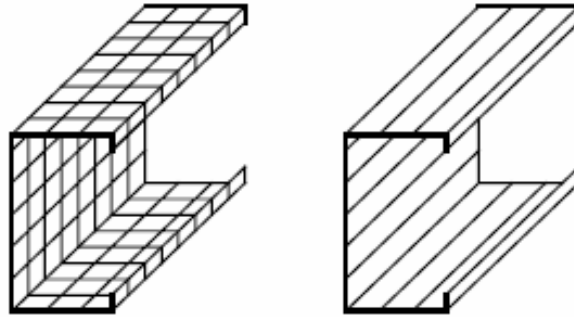
Ojlerov ili globalni mod se dešava na talasnim dužinama koje su znatno veće od talasnih dužina lokalnog i distorzionog moda. Zbog toga se često u literaturi za taj mod koristi izraz dugi mod, a za lokalno izvijanje kratki mod. Za razliku od prethodna dva poprečni presjek ne mijenja oblik. Globalni mod se može manifestovati u vidu savijanja, uvijanja ili kombinacije savijanja i uvijanja zavisno od oblika poprečnog presjeka. Na slici 3. je prikazana kombinacija savijanja i uvijanja gdje dolazi do translacije i rotacije poprečnog presjeka.



Sl. 3. Globalni mod

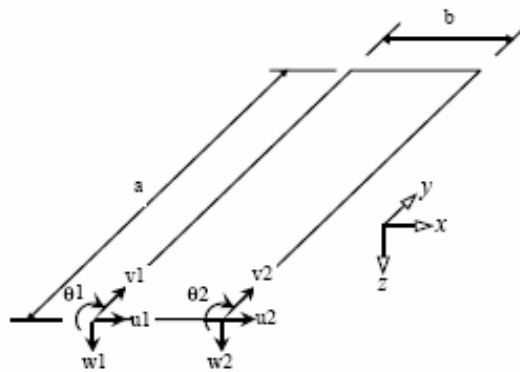
2. ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI KRITIČNOG NAPONA DISTORZIJE

Distorzija predstavlja interaktivni mod između lokalnog i globalnog izvijanja. To se može zaključiti na osnovu oblika deformisanog poprečnog presjeka i dužine polutalasa. Upravo zbog te interakcije distorzija je znatno komplikovanija za analizu i dugo vremena je bila ignorisana u analizi stabilnosti tankozidnih profila. Na osnovu poznatih Vlasovljevih jednačina elastične ravnoteže poslije niza uprošćenja izvedeni su analitički izrazi za izračunavanje kritičnog napona i kritične dužine. Glavni nedostatak ovih izraza je u tome što su oni vrlo komplikovani i što u sebi sadrže dosta geometrijskih karakteristika tankozidnog poprečnog presjeka za čije izračunavanje je potrebno dosta vremena. Poznata su dva izraza za izračunavanje kritičnog napona distorzije. Jedan je izveden od strane Laua i Hancocka 1987. godine, a drugi od strane Schafera 1997. godine. Zbog nabrojanih nedostataka znatno više se koriste numeričke metode za izračunavanje vrijednosti kritičnog napona. Primjena ovih metoda omogućuje znatno intenzivnije i tačnije proučavanje distorzije tankozidnih profila. Može se pokazati da se distorzija kod nekih oblika poprečnih presjeka javlja kao primarni mod sa manjom vrijednosti kritičnog napona u odnosu na lokalno izvijanje. Takođe distorzija se javlja kao mod u čijem obliku se javlja kolaps konstrukcije u postkritičnoj fazi. Najefikasniji način za određivanje vrijednosti kritičnog napona distorzije je primjena numeričkih metoda. Danas se koriste dva numerička metoda : metod konačnih elemenata i metod konačnih traka. Metod konačnih traka (Finite Strip Method) predstavlja najpogodniji i najefikasniji metod za određivanje vrijednosti kritičnog napona i njemu pripadajućeg moda izvijanja. Metod konačnih traka predstavlja specijalizovani metod konačnih elemenata. Teoretske osnove i metodologija kod oba metoda su potpuno identične. Osnovna razlika između ova dva metoda je u načinu diskretizacije profila u podužnom pravcu. Metod konačnih traka je dobio naziv po tome što se samo jedan element (traka) koristi za modeliranje u podužnom pravcu. Na taj način se znatno smanjuje broj elemenata, a ne utiče se bitno na tačnost rješenja s obzirom na to da se izborom pogodnih funkcija oblika dosta tačno aproksimira oblik polutalasa u podužnom pravcu. Razlika u načinu modeliranja primjenom metode konačnih elemenata i metode konačnih traka prikazana je na slici 4.



Sl. 4. Konačni elementi i konačne trake

Primjenom metode konačnih traka znatno se smanjuje broj stepeni slobode i broj jednačina potrebnih za određivanje vrijednosti kritičnog napona. Pravilnim izborom funkcija oblika u podužnom pravcu dobija se veća tačnost rješenja u odnosu na metod konačnih elemenata. Funkcije oblika u poprečnom pravcu su polinomi, a u podužnom pravcu se biraju harmonijske funkcije zavisno od načina oslanjanja nosača. Najčešće se koristi sinusna funkcija koja odgovara konturnim uslovima nosača koji je prosto oslonjen na svojim krajevima.



Sl. 5. Konačna traka, stepeni slobode

Određivanje vrijednosti kritičnog napona se svodi na određivanje sopstvenih vrijednosti problema koji ima isti oblik kao u metodi konačnih elemenata.

$$[K]\{d\} = \lambda[K_g]\{d\} \quad (1)$$

gdje su:

$[K]$ – inicijalna matrica krutosti

$\{d\}$ – vektor pomjeranja

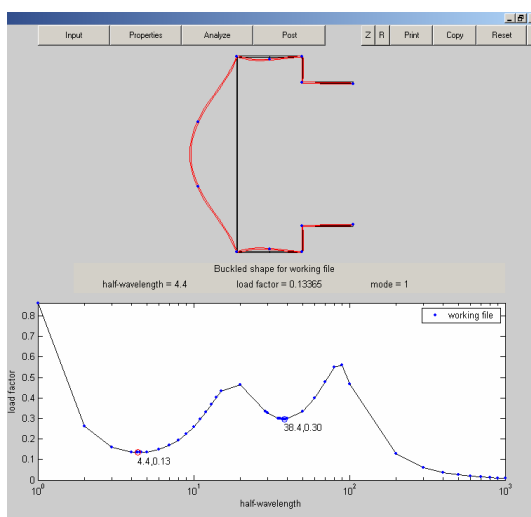
$[K_g]$ – geometrijska matrica krutosti

λ - sopstvena vrijednost

3. PRIMJERI PRORAČUNA

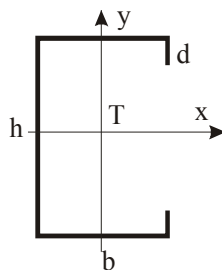
U ovom poglavlju su primjenom računarskog programa CUFSM za C profil koji se široko primjenjuje u građevinskim konstrukcijama izračunate vrijednosti kritičnog napona distorzije i lokalnog kritičnog napona pri čemu je u određenim granicama izvršena varijacija dimenzija poprečnog presjeka na osnovu čega se došlo do zaključaka koji su odnosi dimenzija i oblici profila najpovoljniji

U radu je izvršena analiza profila koji su opterećeni centričnim pritiskom i koji su na svojim krajevima prosto oslonjeni. Računarski program CUFSM predstavlja implementaciju metoda konačnih traka i specijalizovan je isključivo za analizu elastične stabilnosti tankozidnih profila. Za razliku od mnogobrojnih programa koji koriste metod konačnih elemenata CUFSM na kraju analize daje rezultate u vidu krive izvijanja gdje se mogu uočiti tačke u kojima kriva ima minimume i u kojima se nalaze minimalne vrijednosti kritičnog napona za lokalno izvijanje i distorziju. Na osnovu krive izvijanja odmah se uočava odnos između kritičnog napona lokalnog izvijanja i kritičnog napona distorzije i može se zaključiti koji mod odgovara manjoj vrijednosti kritičnog napona. Na apscisnoj osi se može očitati vrijednost dužine polutalasa i odmah uočiti kako izgleda deformisani oblik poprečnog presjeka. Na ordinati krive izvijanja očitava se vrijednost kritičnog napona. Nedostatak programa CUFSM je u tome što se ne može koristiti za nosače koji su promjenjivog poprečnog presjeka i koji na svojim krajevima nisu prosto oslonjeni.



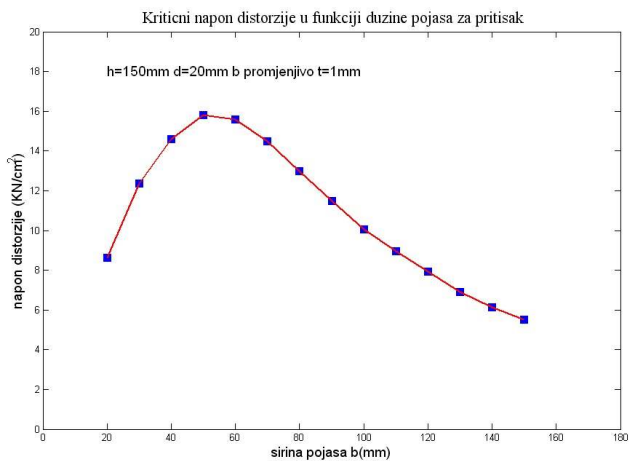
Sl.6 Kriva izvijanja

Na slici br. 6 je prikazan izgled grafičkog prikaza programa CUFSM gdje centralni dio zauzima kriva izvijanja. Rezultati analize “C” profila primjenom programa CUFSM prikazani su u obliku dijagrama na pet narednih slika. Na osnovu tih dijagrama izvedeni su neki najbitniji zaključci o tome kako odnos dimenzija i oblik profila utiče na vrijednost kritičnog napona distorzije.

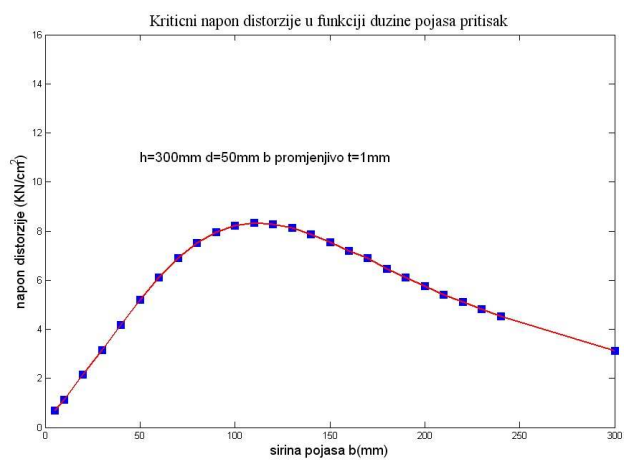


Sl.7 C profil

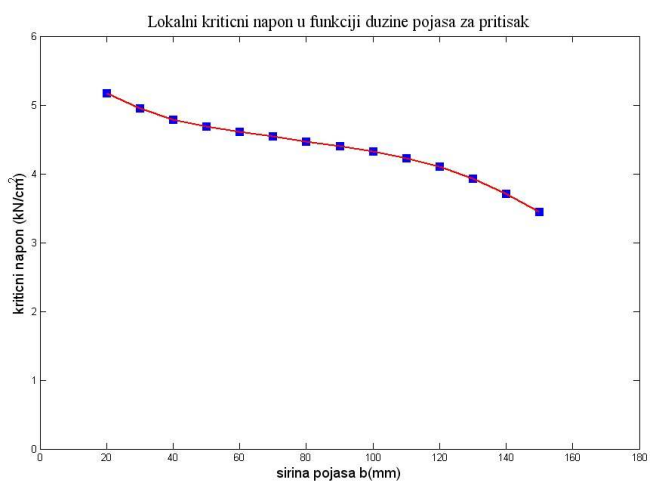
Na slici br. 8 i br. 9 vidi se da sa aspekta vrijednosti kritičnog napona distorzije postoji optimalna vrijednost širine pojasa i da je ona oko jedne trećine verijednosti dužine rebra.Pri tom odnosu je vrijednost kritičnog napona distorzije maksimalna. Na slikama br. 10 i br. 11. vidi se da vrijednost lokalnog kritičnog napona opada sa povećanjem vrijednosti širine pojasa.



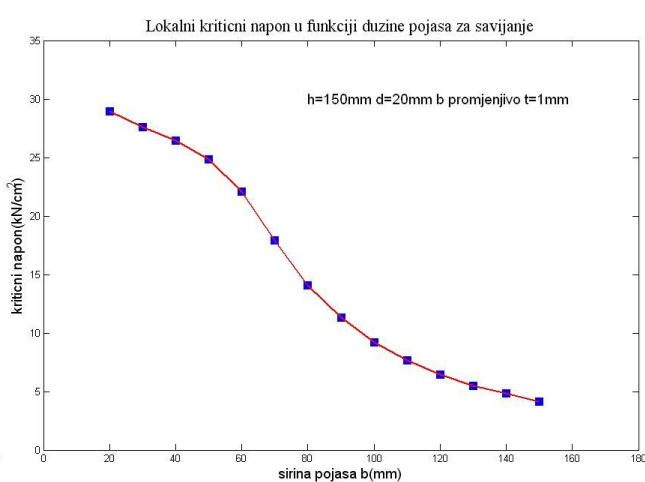
Sl. 8. Napon distorzije u funkciji širine pojasa za $h=150\text{ mm}$ i $d=20\text{ mm}$



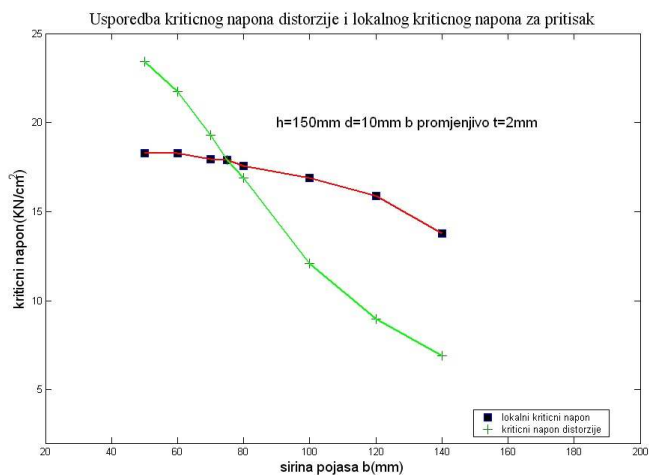
Sl. 9. Napon distorzije u funkciji širine pojasa za $h=300\text{ mm}$ i $d=20\text{ mm}$



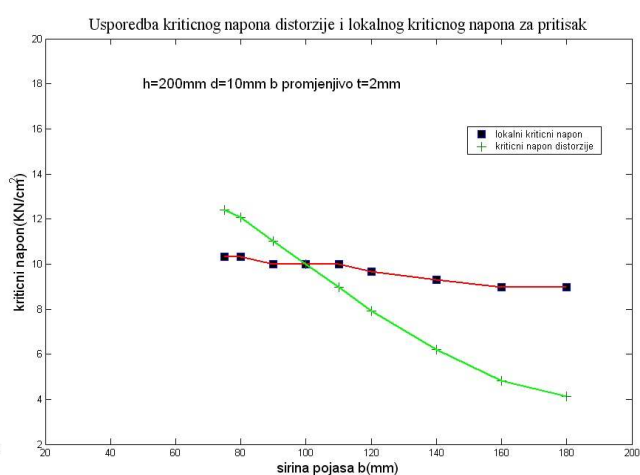
Sl. 10. Lokalni kritični napon u funkciji dužine pojasa za $h=150\text{ mm}$, $d=20\text{ mm}$



Sl. 11. Lokalni kritični u funkciji dužine pojasa za $h=150\text{ mm}$, $d=20\text{ mm}$



Sl. 12. Usporedba kritičnog napona distorzije i lokalnog kritičnog napona za C profil širine rebra $h=150\text{ mmi}$ debljine $t=2\text{ mm}$.



Sl. 13. Usporedba kritičnog napona distorzije i lokalnog kritičnog napona za C profil širine rebra $h = 200\text{ mm}$ i debljinu $t = 2\text{ mm}$

4. ZAKLJUČAK

Kod analize stabilnosti tankozidnih nosača neophodno je uzeti u obzir i distorzioni oblik izvijanja. Na slikama 12. i 13. pokazano je da u određenim slučajevima kada je dužina ruba mala kritični napon distorzije je manji od lokalnog kritičnog napona. Sa povećanjem širine pojasa razlika između dva kritična napona postaje sve veća. U slučaju kada su vrijednosti kritičnog napona distorzije i lokalnog kritičnog napona bliske može doći do njihove interakcije u postkritičnoj fazi koja u značajnoj mjeri utiče na smanjenje nosivosti.

5. LITERATURA

- [1] Timoshenko S., Theory of Elastic Stability, McGraw - Hill Book Company, 1936.
- [2] Brush D.O. and Almroth B.O., Buckling of Bars, Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [3] Cheung, Y.K., and Tam, L.G., Finite Strip Method, CRC Press, 1998
- [4] Yu, W.W., Cold-Formed Steel Design, Wiley, New York, 2000
- [5] Ben Schafer, Elastic Buckling Analysis of Thin-Walled Members by Finite Strip Analysis, 2001., w.w.w.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm
- [6] Ben Schafer, Finite Strip Analysis of Thin-walled Members . In: CUFSM: Cornell University, 2001

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE SHAPE AND SIZE INFLUENCE OF THIN WALL PROFILES ON LOCAL AND DISTORTION CRITICAL STRESS VALUE

Abstract: Cold formed thin wall steel columns have three characteristic forms of stability loss: local, distortion and Euler (global) form. The appearance of these three different forms complicates the stability analysis of thin wall profiles, especially the structural analysis in the post-critical phase. These columns lose stability in field of elasticity and under relatively low values of the critical stress. Therefore, it allows a significant increase the load in post-critical phase until it comes to the appearance of plastic deformation. In this paper, the relation between local and distortion critical stress is analyzed using numerical methods. It is shown, that the values of these two stresses can be very close or equal, and in some cases, the value of distortion critical stress can be significantly smaller than the value of local critical stress.

Keywords: thin wall profile, buckling, distortion, local critical stress, distortion critical stress.

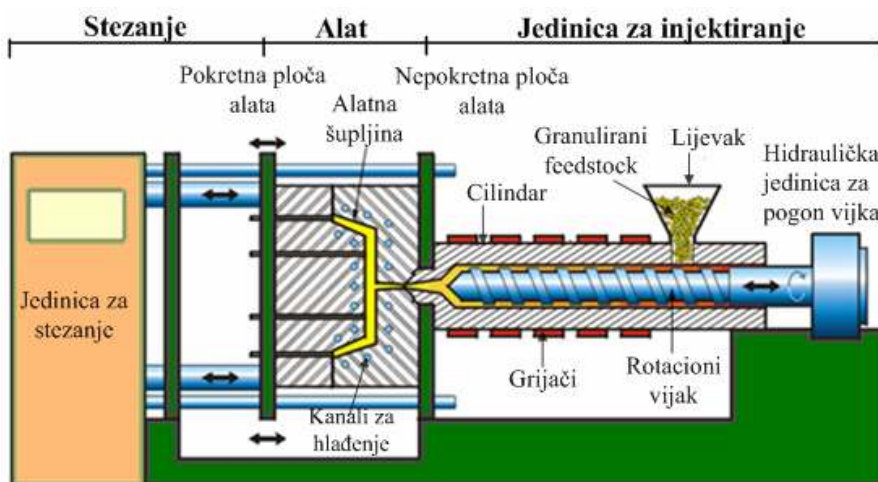
Izudin Delić¹, Edis Nasić², Adnan Mustafić³**SIMULACIJA HLAĐENJA ALATA ZA INJEKCIJONO PRESANJE
POLIMERA RASHLADNIM MEDIJEM***Rezime*

Temperatura stijenke alatne šupljine je od velike važnosti za kvalitet profilirane komponente, dimenzionu tačnost i održavanje procesa. Glavni uticaj na fazu hlađenja ima temperatura alata. Visoke temperature alata produžuju vrijeme očvršćavanja, a time se produžuje i vrijeme trajanja ciklusa odnosno faze injektiranja. Stoga, u ovom radu je sprovedena simulacija hlađenja alata da bi se utvrdile vrijednosti odgovarajućih parametara koji su ključni za proces hlađenja presanog dijela i smanjenje trajanja istog.

Ključne riječi: toplota, hlađenje, simulacija, injekciono presanje, alat

1. UVOD

Injekciono presanje je tehnika odavno primjenjena u plastičnoj industriji i predstavlja proces koji pretvara sirovinu u željeni oblik komponente. Za ovu transformaciju koristi se mašina za injekciono presanje i alat. Generalno mašina za injektiranje i oblikovanje sastoji se od jedinice za stezanje i jedinice za ubrizgavanje. Na slici 1. je prikazana horizontalna mašina za injekciono presanje sa osnovnim komponentama.



Slika 1. Horizontalna mašina za injekciono presanje

Ciklus injektiranja sastoji se od nekoliko koraka. Granulirani feedstock (rastopljeni metal koji se pri simulacijama može poslatrati kao polimerni materijal) doprema se u cilindar vijka preko lijevka koji transportuje feedstock kroz pužni vijak. Kretanjem feedstock-a vrši se njegovo zagrijavanje i topljenje toplotom koja se dovodi grijačima. Nakon toga vrši se translatorno kretanje vijka uz pomoć hidrauličkog sistema i vrši se injektiranje rastopljenog feedstock-a u zatvoreni alat kroz mlaznicu pod visokim pritiskom. Nakon injektiranja slijedi faza djelovanja naknadnog pritiska tokom koje se održava daljna kontrola faze injektiranja, pomoću propisanog profila pritiska održava se pritisak u alatnoj šupljini do potpune popunjenosti šupljine i očvršćavanja ušća. U trenutku očvršćavanja ušća prestaje djelovanje naknadnog pritiska. Profilirana komponenta poprima željeni oblik s tim da je temperatura još previsoka.

¹ Mr.sc.Izudin Delić, viši asistent (izudin.delic@untz.ba), Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, BiH.

² Mr.sc.Edis Nasić, asistent (nasicedis@yahoo.com), Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, BiH.

³ Mr.sc.Adnan Mustafić, viši asistent, (adnan.mustafic@untz.ba), Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, BiH

Dalje se komponenti odvodi toplota i osigurava vrijeme za hlađenje do temperature postojanosti oblika. Hlađenje komponente popraćeno je novom pripremom količine feedstock-a za naredni ciklus. Nakon što je komponenta dovoljno očvrsla i postignuta je temperatura na kojoj je moguće sigurno izvaditi komponentu vrši se otvaranje alata i vađenje komponente. Profilirana komponenta koja se dobija u MIM (injekciono presanje metalnog praha) tehnologiji naziva se "zeleni dio" koji je produkt faze injektiranja. Pri razmatranju ciklusa injekcionog presanja može se zaključiti da se faza injektiranja dijeli u tri faze: fazu punjenja, fazu djelovanja naknadnog pritiska, fazu hlađenja. Svaka od ovih faza ima uticaj na svojstva i homogenost feedstock-a i dimenzijsku stabilnost zelenog dijela nakon vađenja iz alata. U ovom radu detaljnije će se razmatrati faza hlađenja.

2. FAZA HLAĐENJA

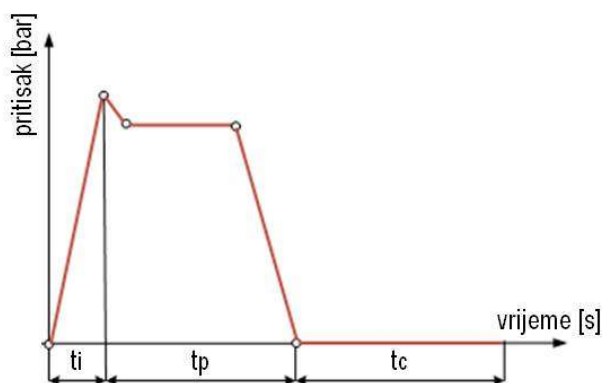
Tokom faze hlađenja rastopljeni feedstock se hladi do potpunog očvršćavanja na temperaturu gdje se može odvojiti i izvaditi iz alatne šupljine. Hlađenje materijala javlja se od početka faze punjenja. Ali zbog veoma kratkog vremena tokom popunjavanja alatne šupljine hlađenje je zanemarivo, tako da se ova faza može smatrati kao dodatno vrijeme koje je potrebno nakon faze djelovanja naknadnog pritiska da se komponenta dovoljno ohladi i očvrstne za vađenje. To ne znači da dio treba biti 100% očvrstnut (u unutrašnjosti komponente materijal ne mora biti u potpunosti očvrstnut). Materijal u središtu komponente dostiže temperature prelaza i postaje solid tokom hlađenja. Faza hlađenja i izjednačenost u pojedinim komponentama utiče na završni kvalitet i troškove proizvodnje. Hlađenje alata i komponenti se najčešće vrši sa vodom uz pomoć temperirala.

Tokom hlađenja alata potrebno je temperaturu alata odvesti pomoću rashladnog medija uz pomoć raznih temperirala. Pri priključivanju alata na temperiralo kroz kanale koji su postavljeni u alatu vrši se protok medija za temperiranje. Pri injekcionom presanju medij za temperiranje dovodi ili odvodi temperaturu sa stijenke alatne šupljine i rastopljenog feedstock-a, pa se temperatura rashladnog medija povećava pri prolasku kroz kanale za hlađenje. Pri temperiranju postoje ulazna i izlazna temperatura medija za temperiranje pri čemu je ulaznu temperaturu moguće podesiti i ulazna temperatura medija predstavlja podesivu veličinu pomoću koje je moguće podešavati temperaturno polje alata. Učinkovitost hlađenja alata izražava se preko izmjene toplote između stijenke alatne šupljine i medija za temperiranje. Izmjena toplote zavisi od toplotne provodljivosti materijala na stijenci alatne šupljine i od protoka medija za temperiranje. Strujanje medija za temperiranje kroz kanale u alatu definiše se kao laminarno, turbulentno i prelazno.

Pri niskim brzinama medija za hlađenje strujanje je laminarno. Međutim kako je medij za hlađenje u pravilu loš provodnik toplote izmjena toplote je neefikasna. Povećanjem brzine protoka medija za hlađenje brzina izmjene toplote se povećava na stijenkama kanala za hlađenje. Za efikasno hlađenje alata i poboljšanje izmjene toplote potrebno je ostvariti turbulentno strujanje medija za hlađenje. Veličina kojom je moguće opisati strujanje rashladnog medija kroz kanale je Reynoldsov broj. Na fazu hlađenja pored rashladne tekućine i brzine protoka utiču svojstva specifičnog toplotnog kapaciteta i toplotne provodljivosti kao i raspored kanala za hlađenje alata.

2.1. Vrijeme hlađenja

Vrijeme hlađenja komponente smatra se kao najduže vrijeme tokom faze injektiranja (slika 2).



Slika 2. Vrijeme ciklusa faze injektiranja

t_i - aktuelno vrijeme injektiranja, t_p - vrijeme djelovanja naknadnog pritiska, t_c – vrijeme hlađenja,

Vrijeme hlađenja počinje istovremeno sa fazom injektiranja, ali zbog veoma kratkog vremena punjenja efekat hlađenja u tom trenutku je veoma mali i zanemariv stoga se u realnim uslovima veoma često vrijeme hlađenja računa sa postizanjem očvršćavanja ušća. To vrijeme dakle predstavlja dodatno vrijeme potrebno za hlađenje komponente do temperature na kojoj je moguće bezbjedno vađenje komponente iz alatne šupljine. Vrijeme hlađenja je veoma važno sa stanovišta trajanja ciklusa stoga je potrebno posvetiti posebnu pažnju pri razmatranju vremena hlađenja. Skraćenje vremena hlađenja skraćuje se vrijeme ciklusa što pospješuje proizvodnost i smanjuje troškove izrade

3. PARAMETRI SIMULACIJE

Mold flow je softverski paket koji je u mogućnosti simulirati fazu injektiranja. Za numeričku simulaciju faze injektiranja MIM procesa pomoću Mold flow-a neophodno je postaviti ulazne podatke kao što su: svojstva materijala, karakteristike alata, karakteristike sistema hlađenja, potrebno je definisati granične vrijednosti za temperaturu alata, temperaturu feedstock-a, te postaviti vrijednosti za temperaturu prelaza i temperaturu izbacivanja. Pored ovih vrijednosti potrebno je definisati i vrijednosti specifičnog toplotnog kapaciteta i termalne konduktivnosti kao i temperature okoline i vrijeme otvaranja alata. Vrijednosti parametara koji su potrebni za simulaciju su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Izabrani parametri za simulaciju

Parametar	Jed.	Vrijed.			
Temperatura alata	°C	120	Brzina injektiranja	cm ³ /s	10
Minimalna temperatura alata	°C	110	Tačka prelaza V/P	%	95
Maksimalna temperatura alata	°C	130	Specifični toplotni kapacitet (C _p)	J/kgC	2528
Temperatura feedstock-a	°C	195	Koeficijent toplotne provodljivosti (k)	W/mC	2,33
Minimalna temperatura feedstock-a	°C	170	Vrijeme injektiranja, djelovanja naknadnog pritiska i hlađenja (t _{ipc})	s	20
Maksimalna temperatura feedstock-a	°C	200	Vrijeme otvaranja alata (t _o)	s	5
Apsolutna maksimalna temperatura feedstock-a	°C	220	Temperatura medija za temperiranje	°C	50
Temperatura prelaza	°C	153	Temperatura okoline (T _o)	°C	20
Temperatura izbacivanja (T _i)	°C	125			

4. REZULTATI I DISKUSIJA

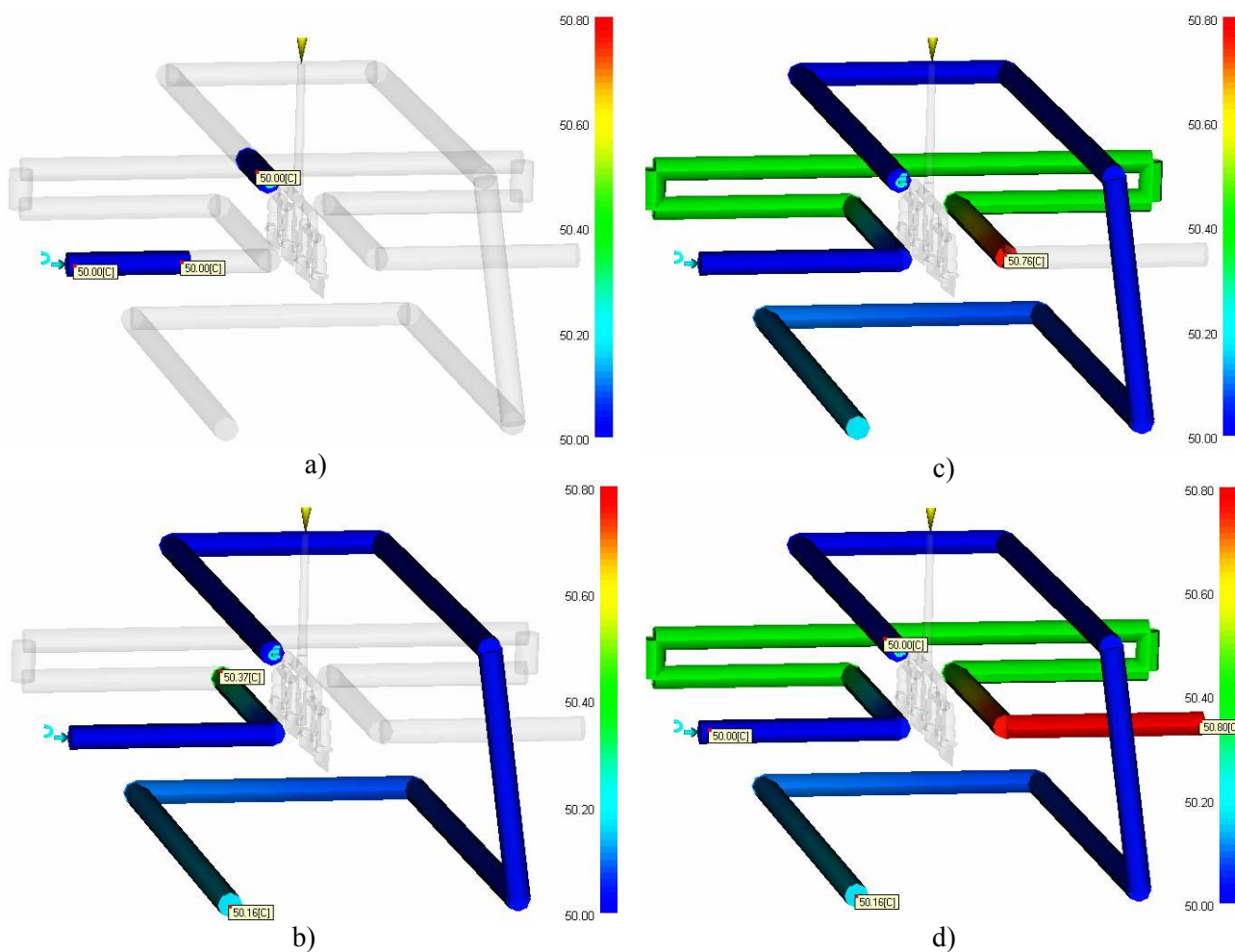
4.1 Analiza rezultata simulacije hlađenja sa aspekta rashladnog medija

Tokom analize potrebno je utvrditi gdje je najveći porast temperature. Kada rashladni medij prolazi kroz jednu liniju temperatura rashladne tekućine se povećava. Temperaturni porast ulazne i izlazne temperature za vrijednost veću od 3°C ukazuje na širi raspon temperatura alatne šupljine koja je od posebnog značaja za proces faze injektiranja.

Nakon izvršene simulacije prikazani su rezultati simulacije hlađenja (slika 3.) koji sadrže promjene temperature rashladnog medija tokom faze hlađenja.

Rezultati simulacije pokazuju protok rashladnog medija unutar kruga hlađenja u određenim vremenskim područjima. Najveće povećanje temperature rashladnog medija događa se na mjestu aktivnih rashladnih kanala u blizini komponenti. Porast ulazne temperature za vrijednost od 0,8 °C do kraja kruga hlađenja predstavlja prihvatljivu vrijednost. Rashladni medij pri protoku kroz "hoss" ne mijenja temperaturu. Protok u svakom krugu je konstantan. Nakon što se postiglo turbulentno strujanje rashladnog medija, povećanje protoka čini malu razliku sa stopom prelaza toplote. Pošto je postavljen turbulentan protok za vrijednost Reynoldsovog broja od 6100 nema promjene strujanja rashladnog medija. Promjena Reynoldsovog broja mogla bi se dogoditi sa smanjenjem prečnika rashladnih kanala u određenim područjima. Ukoliko je vrijednost Reynoldsovog broja manja od 4000 tada se radi o laminarnom strujanju tečnosti koja daje manje učinkovito odvođenje toplote iz unutrašnjosti alatne šupljine. Vrijednost Reynoldsovog broja treba težiti da

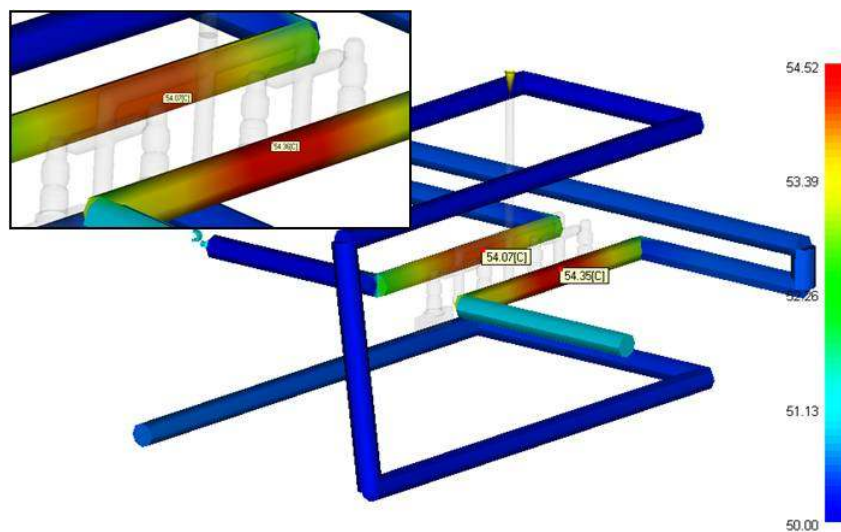
je uvijek veća od 4000 za kanale koji aktivno djeluju u rashladnom dijelu kako bi se osiguralo turbulentno strujanje rashladnog medija unutar kanala za hlađenje, a time i učinkovito hlađenje.



Slika 3. Vrijednost promjena temperature rashladnog medija

4.2 Analiza rezultata simulacije hlađenja sa aspekta stijenki kanala za hlađenje

Temperatura stijenke alatne šupljine je od velike važnosti za kvalitet profilirane komponente, dimenzionu tačnost i održavanje procesa. Glavni uticaj na fazu hlađenja ima temperatura alata.



Slika 4. Vrijednosti temperature na stijenkama kanala za hlađenje

Visoke temperature alata produžuju vrijeme očvršćavanja, a time se produžuje i vrijeme trajanja ciklusa. Također, više temperature alata rezultiraju lakšim popunjavanjima alata zbog manjih otpora tečenja. Kada rastopljeni feedstock sa višom temperaturom dođe u dodir sa stijenkom alatne šupljine koja je niže temperature bilježi se značajan pad temperature što uzrokuje brže očvršćavanje i pojavu unutrašnjih napona tokom injektiranja. Pri injektiranju rastopljenog feedstock-a u trenutku dodira sa stijenkom alatne šupljine na stijenci se javlja maksimalna temperatura u ciklusu. Kako se hlađenjem alata medijem za temperiranje i okolinom alata odvodi toplota temperatura stijenke alatne šupljine opada do temperature otvaranja alata. Nakon otvaranja alata i vađenja komponente iz alatne šupljine temperatura stijenke alatne šupljine i dalje pada do svoje minimalne vrijednosti.

Rezultat simulacije prosječnog ciklusa pokazuje temperaturu od kružnih tokova metala i hlađenja. Raspodjela temperature treba biti ravnomjerno raspoređena na kružne kanale za hlađenje. Temperatura je veća gdje su kanali bliži komponentama i ove toplije regije će povećati temperaturu rashladnog medija, što je i prikazano na slici 4.

5. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu iznešenu problematiku injekcionog presanja, sama faza hlađenja presanog materijala ima veliki značaj u ukupnom procesu presanja. Izvršena simulacija hlađenja omogućuje da se sagleda proces hlađenja sa strane rashladnog medija i sa strane stijenke kanala za hlađenje. Prilikom dizajniranja kanala za hlađenje, potrebno je voditi računa o povećanju temperature rashladnog medija od ulaza do izlaza iz rashladnih kanala koja za čiste polimere ne bi smjela biti veća od 2 – 3⁰C. Kod simulacije hlađenja temperatura na stijenkama kanala ne smije biti veća od ulazne temperature više od 5⁰C. Ako je temperatura suviše visoka u određenim područjima potrebno je dizajnirati veći krug hlađenja, povećati protok rashladnog medija te smanjiti temperaturu medija.

6. LITERATURA

- [1] Rannar L.E.: ON OPTIMIZATION OF INJECTION MOLDING COOLING; Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim, 2008.
- [2] Godec D.: UTICAJ HIBRIDNOG KALUPA NA SVOJSTVA INJEKCIJSKI PREŠANOG PLASTOMERNOG OTPRESKA, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Fakultet Strojstva i brodogradnje, 2005.
- [3] Neimarlija N.: PRIJENOS TOPLOTE, prvo izdanje, Sarajevo 2005.
- [4] Nasić E.: NUMERIČKA SIMULACIJA FAZE INJEKTIRANJA PROCESA INJEKCIJNOG PRESANJA METALNOG PRAHA, Magistarski rad, Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet, 2011.
- [5] Ribero C.J., Viana J.C.: OPTIMIZATION OF INJECTION MOULDED POLYMER AUTOMOTIVE COMPONENTS, New Trends and Developments in Automotive System Engineering, 2011.
- [6] Valeriyovych V.: MOULD FILLING SIMULATIONS DURING POWDER INJECTION MOULDING, Doktorski rad, Bilovol, Juni 2003.
- [7] Ahn S., Chung S.T., Park S.J., German R.M.: METAL POWDER INJECTION MOLDING, ASM Handbook Volume 22 – Modeling and Simulation, Processing of Metallic Materials - 2010.

Izudin Delić, Edis Nasić, Adnan Mustafić

SIMULATION OF COOLING TOOL FOR INJECTION MOLDING OF POLYMERS

Summary

A wall temperature tool is of great importance for the quality of molded components, dimensional accuracy and maintenance of processes. The temperature of the tool has the main effect for the cooling phase. High temperatures of tools extend the time of solidification, thereby extending the duration of the cycle. Therefore, in this paper were carried out simulations of cooling tool to identify parameter values that are crucial to the process of cooling the pressed parts and reducing the duration of the same.

Key words: heat, cooling, simulation, injection molding, tool

Sladjan Lovrić, Džemo Tufekčić, Alan Topčić, Mediha Beganović¹

PRIMJENA BRZE IZRADE PROTOTIPA I REVERZIBILNOG INŽENJERINGA PRI LIVENJU U PIJESKU

Rezime

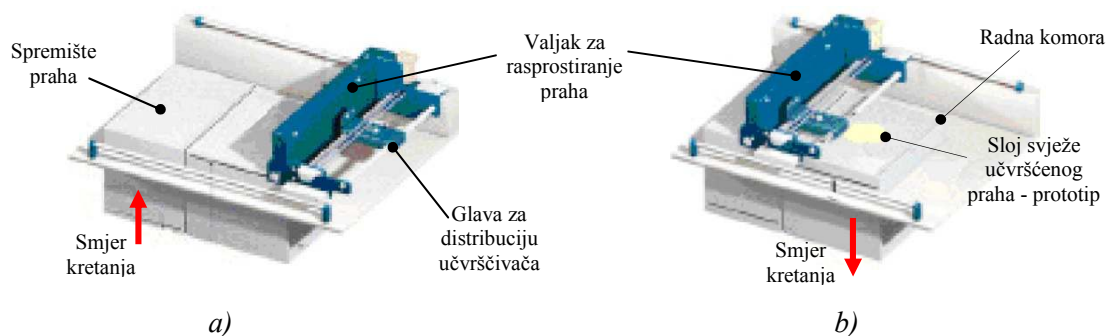
Skraćenje vremena razvoja novih proizvoda i njihovog lansiranja na tržište prisilile su proizvodne kompanije da iznađu nove načine i tehnologije za zadovoljavanje navedenog uslova uz što niže troškove. Jedno od rješenja je implementacija Rapid Prototyping tehnologije i Reverzibilnog inženjeringa u različitim područjima industrijske proizvodnje. Zahvaljujući svojim karakteristikama proces Reverzibilnog inženjeringa i trodimenzionalnog printanja našao je brojne aplikativne primjene, a jedna od njih je i u procesu livenja. U radu su prezentirane mogućnosti primjene i konkretan primjer implementacije reverzibilnog inženjeringa i procesa trodimenzionalnog printanja u livenju.

Ključne riječi: Reverzibilni inženjering, Rapid Prototyping, trodimenzionalno printanje-3DP, livenje u pijesku.

1. UVOD

Sve složeniji uslovi privređivanja prisiljavaju kompanije iz oblasti proizvodnog mašinstva da napuštaju neke od opšte prihvaćenih postulata poslovanja i da svoje procese prilagode novim zahtjevima globalnog okruženja i tržišta. Ti zahtjevi su se drastično promijenili u odnosu na period od prije dvadeset godina, a mogu se uobličiti kroz: smanjenje vijeka trajanja proizvoda, individualizacija proizvoda, stroge uslove zaštite čovjekove okoline, dizajn proizvoda, te time-to-market tj. smanjenje vremena razvoja proizvoda.

Na tržištu postoji niz različitih Rapid Prototyping tehnologija, koje su bazirane na različitim fizičkim, hemijskim, termičkim, i mehaničkim procesima. Širenje tehnologija brze izrade prototipa imaju za posledicu značajan doprinos smanjenju vremena izlaska novog proizvoda na tržište (eng. Time-to-Market). Bitno je naglasiti da je ono što se uopćeno naziva „tehnologije brze izrade prototipova“ ustvari skup tehnologija za brzu slojevitou proizvodnju modela, prototipova, alata i komponenti (slika 1.).



Slika 1. Princip rada 3DP procesa a) faza navlačenje praha, b) faza isprintavanja

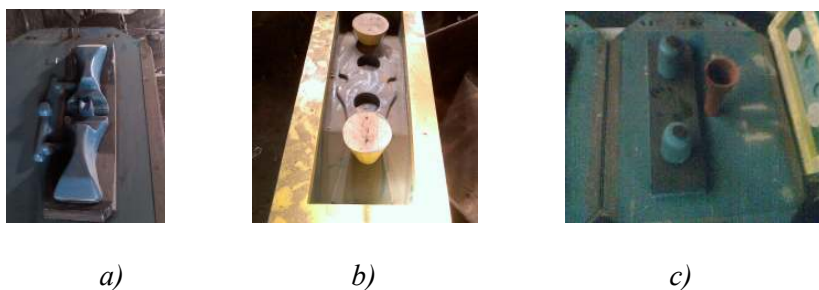
¹ Mr. sc. Sladjan Lovrić, viši asistent (sladjan.lovric@untz.ba), Dr. sc. Džemo Tufekčić, redovni profesor(dzemo.tufekcic@hotmail.com), Dr. sc. Alan Topčić, docent (alan.topcic@untz.ba), Mašinski fakultet, Univerzitetska 4, 75000 Tuzla, Mediha Beganović, dip. ing. maš. (cuprost@bih.net.ba), Srednja Miričina bb 75329 Miričina.

Reverzibilni inženjering predstavlja novi trend u integralnom razvoju proizvoda koji prvenstveno osigurava skraćanje vremena potrebnog za razvoj novog ili redizajn postojećeg proizvoda kroz direktnu transformaciju složenih geometrijskih formi realnih proizvoda u odgovarajući digitalizirani CAD zapis (oblak tačaka). Na ovaj način realni trodimenzionalni objekt-proizvod se može brzo generirati u digitalnoj formi, redizajnirati te transferirati u neki od sistema za brzu izradu prototipa u cilju potvrđivanja dizajna, funkcijskih ispitivanja, analize mogućnosti montaže, proizvodnje alata, itd. U prošlosti, modeliranje površina složenog geometrijskog oblika bio je dug, mukotrpan i naporan posao, koji je zahtijevao mnogo truda i vremena. Uz sve to, konstruktor je morao dobro poznavati metode i načine samog CAD modeliranja. Sada, uz pomoć reverzibilnog inženjeringa, taj posao je postao lakši, jednostavniji i vremenski kraći bez obzira na geometrijsku složenost površina koje se modeliraju.

2. OPIS POSTOJEĆEG TRADICIONALNOG PRISTUPA U PROCESU PROIZVODNJE MODELA I JEZGRE PAPUČE GRABULJASTOG TRANSPORTERA

Proces proizvodnje odlivaka zasnovan na tradicionalnom pristupu otpočinje prijemom tehničke dokumentacije ili uzorka (ukoliko ne postoji tehnička dokumentacija) odlivka koji je neophodno proizvesti. Po prijemu odgovarajućih ulaznih parametara (tehnička dokumentacija ili uzorak) stručne službe unutar livnice (služba za tehničke poslove, služba pripreme materijala, služba projektovanja, služba za izradu modela itd.) izvode analizu dobivenih parametara u cilju dobivanja tehnološke dokumentacije te u skladu sa zaključcima analize pristupa se narednim aktivnostima. U slučaju da je kao ulaz u proces proizvodnje odlivka poslužio dostavljeni uzorak pristupa se snimanju uzorka raspoloživim mjernim sredstvima, te izradi nove tehničke dokumentacije dostavljenog uzorka. U slučaju da je kao ulaz u proces proizvodnje odlivka poslužila dostavljena tehnička dokumentacija na osnovu nje se vrši direktna priprema tehnološke dokumentacija za izradu modela i jezgre.

Nakon uobličavanja tehnološke dokumentacije za proces livenja, dokumentacija se predaje modelaru čime otpočinje proces proizvodnje modela i jezgre. Postupak izrade modela i jezgre, u zavisnosti od geometrijskih karakteristika odlivka, zasniva se na manualnoj ili mašinskoj (konvencionalnoj) proizvodnji modela i jezgre u drvetu (Slika 2.).



Slika 2. a) Model papuče grabuljastog transportera od drveta, b) Jezgra papuče grabuljastog transportera od drveta c) Modelna ploča sa hraniteljima i jezgrom

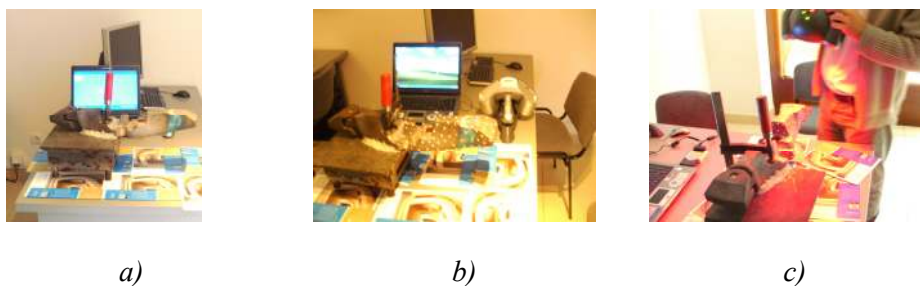
Izradom tehnološke dokumentacije modela i jezgrenika, ista se dostavlja proizvodnom pogonu na pripremu tj. izvodi se operacija kalupovanja u kvarcnom pijesku. Kalupovanje se vrši tako što se u kalupni sanduk stavi model, zatim se na model sipa kvarcni pijesak. Po okončanju operacija kalupovanja u gotovi kalup, smješten u kalupnom sanduku, vrši se usipanje tečnog metala (u konkretnom slučaju 2 % manganski čelik), te se isti u zavisnosti od karakteristika odlivenog dijela (zapremina, masa, oblik, vrsta materijala) ostavlja određeni period da se hladi kako bi se metal ukrotio.

3. PRIMJENA NOVOG SAVREMENOG PRISTUPA U PROCESU PROIZVODNJE MODELA, JEZGRE I ODLIVKA PAPUČE GRABULJASTOG TRANSPORTERA

3.1. Trodimenzionalna digitalizacija uzorka papuče grabuljastog transportera

Trodimenzionalna digitalizacija je početni korak u implementaciji suvremenog pristupa zasnovanog na upotrebi informacionih tehnologija pri proizvodnji odlivaka kada je kao ulazni parametar dat uzorak. Kao što je naglašeno u slučajevima kada ne postoji tehnička dokumentacija dijela koji se treba odliti često se livnici dostavljaju uzorci koje treba odliti, što iziskuje izradu odgovarajuće tehničke dokumentacije dostavljenog uzorka. Za razliku od konvencionalnog pristupa gdje se ova operacija izvodi u modelarnici, sa konvencionalnom mjernom opremom, pristup zasnovan na savremenim metodama trodimenzionalne digitalizacije osigurava gotovo kreiranje apsolutno tačne kopije dijela koji se snima. U okviru procesa trodimenzionalne digitalizacije vrši se akvizicija podataka o prostornim koordinatama tačaka sa površine fizičkog objekta, te njihovo prevođenje u digitalni oblik, odakle i potiče termin trodimenzionalna digitalizacija.

Postupak trodimenzionalne digitalizacije optičkim skeniranjem sastoji se od sljedećih koraka: pozicioniranje uzorka koji se skenira, označavanje uzorka (lijepljenje bijelih papirnih kružića prečnika 5 mm da bi kamere skenera prepoznale uzorak), baždarenje samog optičkog skenera (slika 3.). Po okončanju procesa optičke trodimenzionalne digitalizacije objekta podaci tj. vrijednosti prostornih koordinata prikupljenih tačaka, zapisani su u tekstualnom formatu *.txt.

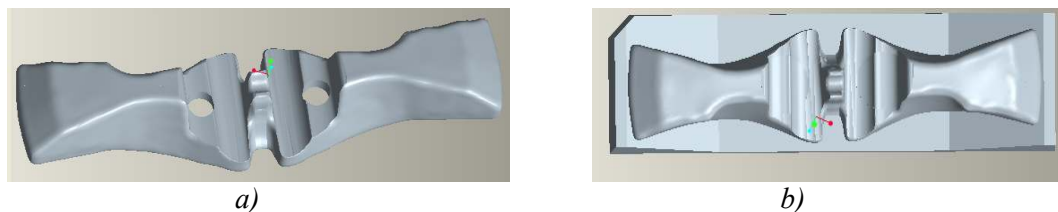


Slika 3. a) Pozicioniranje uzorka, b) Označavanje uzorka, c) Digitalizacija uzorka

Po okončanju procedure prikupljanja podataka procesom trodimenzionalne digitalizacije neophodno je izvršiti preprocesiranje istih u cilju dobivanja upotrebljivog oblaka tačaka za daljnje faze procesa reverzibilnog inženjeringa i brze izrade prototipa.

3.2. Konstrukcija modela i jezgre papuče grabuljastog transportera

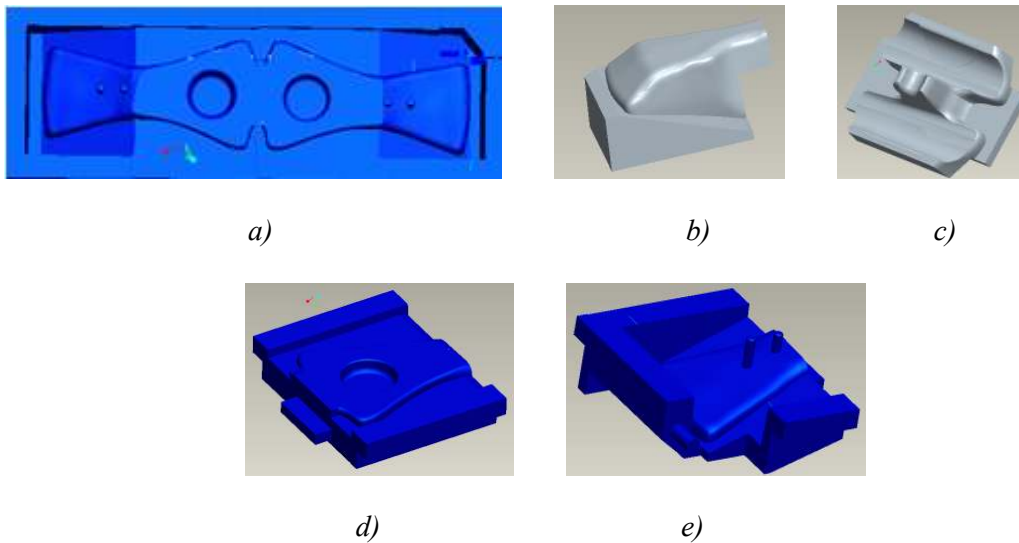
Sljedeća faza zasniva se na pripremi modela i jezgre kalupa za livenje u pijesku, te proizvodnji istih primjenom tehnologija brze izrade prototipa – procesom trodimenzionalnog printanja. U skladu sa zahtjevima procesa livenja, kao polazna osnova za drugu fazu istraživanja poslužio je CAD zapreminski model papuče grabuljastog transportera prikazan na slici 4a.) generiran iz oblaka tačaka dobivenih optičkim skeniranjem.



Slika 4. a) Zapreminski model papuče grabuljastog transportera, b) Redizajnirani model

Nakon redizajna donjeg dijela modela (slika 4b.) izvršeno je modeliranje jezgre potrebne za proces livenja u pijesku (slika 5a.). Poslije konstruisanja modela i jezgre papuče grabuljastog transportera sljedeći

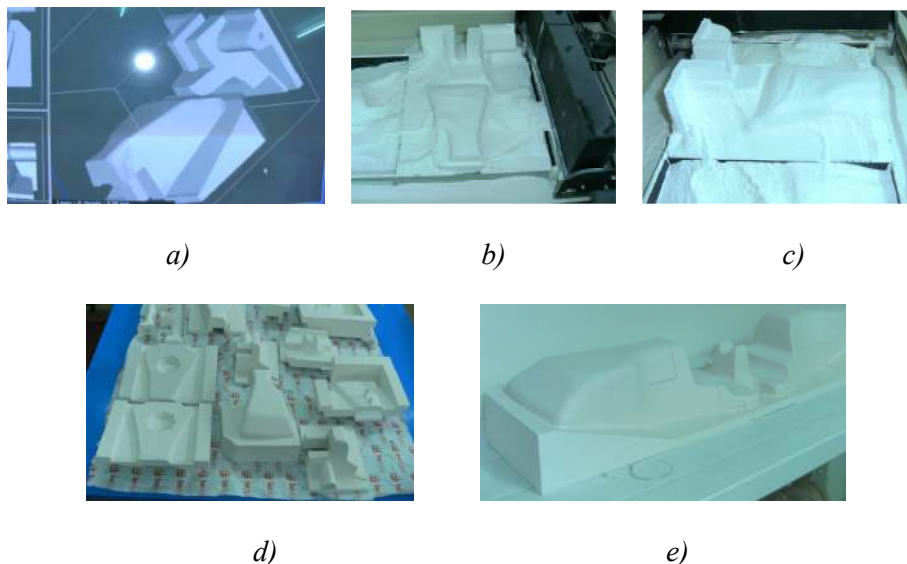
korak je zahtjevao proizvodnju istih procesom brze izrade prototipa tj. procesom trodimenzionalnog printanja. S obzirom na radni prostor raspoložive 3DP-mašine z310+ (203×254×203 mm), kao i gabarite modela i jezgre (567×130×90 mm) izvršeno je dijeljenje modela i jezgre na odgovarajući broj segmenata kako bi se isti mogli izraditi na postojećoj 3DP-mašini (slika 5b,c,d,e.).



Slika 5. a) Jezgra papuče grabuljastog transportera, b,c) Segmenti zapreminskog modela papuče grabuljastog transportera, d,e) Segmenti modelirane jezgre

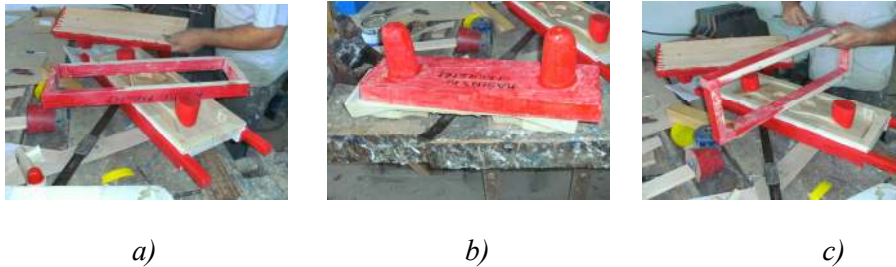
3.3. Proizvodnja redizajniranog modela (r-model), jezgre i odlivka papuče grabuljastog transportera

Nakon završene pripreme CAD datoteka modela i jezgrenika, determiniranja parametara procesa i postprocesuiranja trodimenzionalnog printanja izvršeno je pripremanje CAD podataka tj. njihova transformacija u formu prihvatljivu za RP mašinu (*.stl), te procesuiranje dobivenih podataka u okviru operativnog softvera mašine za trodimenzionalno printanje (slika 6a.).



Slika 6. a) Segmenti redizajniranog modela importovani u softver ZPrint 7.3, b,c) Postupak izrade prototipa redizajniranog modela, d) Prikaz izgleda segmenata jezgre i r-modela, e) Konačan r-model

Nakon proizvodnje RP modela i jezgre (slika 6 b,c,d,e.), pristupa se procesu formiranja kalupa i livenja papuče grabuljastog transportera. Kako bi se proces formiranja kalupa mogao izvršiti u potpunosti bilo je neophodno konstruisati i napraviti dodatne elemente koji su potrebni da bi proces livenja bio uspješan. Ti dodatni elementi su: ručke za držanje i nošenje jezgre (napravljene su od drveta radi uštede materijala zp130), ulivni sistem, gornja ploča sa hraniteljima napravljena od drveta (slika 7.).



Slika 7. a) Prikaz dodatnog okvira od drveta, b) Prikaz hranitelja od drveta, c) Prikaz mjerenja pojedinih segmenata

Poslije izrade dodatnih elemenata pristupa se procesu formiranja kalupa (slika 8.) i livenja. Konačni rezultat procesa livenja, nakon izvršenih operacija postprocesuiranja odlivenog dijela jeste gotovi odlivak papuče grabuljastog transportera (slika 9.).



Slika 8. Postupak livenja papuče grabuljastog transportera.



Slika 9. a,b) Završen odlivak papuče grabuljastog transportera

4. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući karakteristikama procesa, načinu generiranja dijelova i raspoloživim materijalima proces 3DP nametnuo se kao vodeći RP proces u području implementacije u livenju. Naime, građivni materijali na bazi gipsa i keramike omogućili su ne samo direktnu proizvodnju alata za livenje, nego i indirektnu proizvodnju tvrdih kalupa za livenje što predstavlja značajan kvalitativni iskorak u odnosu na ostale RP procese.

U cilju ovladavanja savremenim RE-sistemima, RP tehnologijama i implementacijom istih u različitim područjima metalske industrije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Tuzli izvršena su istraživanja koja u okviru svojih aktivnosti značajnu pažnju poklanjaju promociji i implementaciji procesa RE i RP u livenju. Rezultati nekih do sada izvršenih istraživanja predstavljeni su u okviru rada. Međutim, bitno je naglasiti, da usprkos obećavajućim rezultatima postignutim dosadašnjim aktivnostima, neophodna su daljnja istraživanja kako bi se proces 3DP i RE u potpunosti i na zadovoljavajući način implementirao u livenju osobito s aspekta: tačnosti dobivenih odlivaka, kvaliteta dobivene površine metalnih odlivaka, mogućnosti implementacije alternativnih građivnih materijala, adekvatnog postprocesuiranja 3DP dijelova, te iznalaženja najbolje prakse za pojedine načine primjene proizvedenih 3DP dijelova u livenju.

5. LITERATURA

1. S. Lovrić: "Analiza uskih grla u integralnom razvoju proizvoda", magistarski rad, Tuzla, 2011. godine
2. M. Plančak: „Brza izrada prototipova, modela i alata“, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2004. godine, Srbija
3. A. Topčić, Dž. Tufekčić, A.Fajić, E. Cerjaković: "Implementation of Three Dimensional – 3DP printing process in casting" Zbornik, format A5, stranice 393-398/6 stranica, 15-16. April 2008. Godine Novi sad, Srbija, CIP 658.512.2 (082), COBISS.SR-ID 230213639, ISBN 978-86-7892-104-9
4. A. Topčić, Dž. Tufekčić, R. Šelo: "Rapid Prototyping systems - Features and possibility for use", 1st International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries, ATDC2002, septembar 2002. godine, Slavonski Brod, Hrvatska.

Sladán Lovrić, Džemo Tufekčić, Alan Topčić, Mediha Beganović

IMPLEMENTATION OF RAPID PROTOTYPING AND REVERSE ENGINEERING IN SAND CASTING

Abstract

Shortening of time for development of new products and their introduction on the market have forced production companies to find new ways and technologies for satisfying mentioned claims with minimal expenses. One solution is implementation of Rapid Prototyping technologies and Reverse engineering in different areas of industrial production. Owing to its characteristics, threedimensional printing and Reverse Engineering process has found numerous applications and one of them is its usage in casting. In this paper are presented possibilities, potentials and real examples of usage of threedimensional printing process in casting.

Key words: Reverse engineering, Rapid Prototyping, threedionesional printing-3DP, sand casting

Edis Nasić¹, Adnan Mustafić²**FEA SIMULACIJA FAZE INJEKTIRANJA MIM PROCESA***Rezime*

Reološka zbivanja unutar alatne šupljine te uticaj parametara procesa na svojstva komponente tokom faze injektiranja je veoma teško pratiti i razumjeti. Za razumijevanje faze injektiranja neophodno je koristiti numeričke simulacije. Prednost korištenja FE simulacije je provjera i zadovoljavanje konstrukcije komponente i alata te usporedba i podešavanje različitih kombinacija parametara prije samog pokretanja procesa. Nedostatak primjene simulacija je što FE kod ne može simulirati efekte kao što su segregacija, nagomilavanje čestica metalnog praha te pojave razdvajanja metalnog praha i veziva. U radu je sproveden simulacioni i realni eksperiment uz razmatranje i varijaciju parametara: brzine injektiranja, temperature alata i profila pritiska držanja s ciljem predviđanja popunjavanja alatne šupljine te raspodjele pritiska.

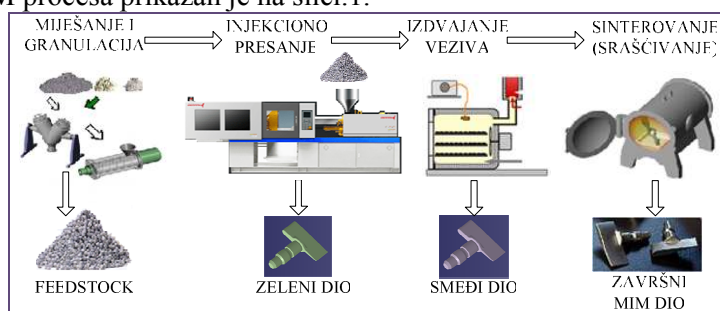
Ključne riječi: Faza injektiranja, FE simulacija, temperatura, pritisak, brzina injektiranja, vrijeme

1. INJEKCIONO PRESANJE METALNOG PRAHA (MIM)

Danas se injekciono presanje metalnog praha (MIM) koristi za proizvodnju dijelova veoma kompleksnih oblika koja u većini slučajeva ne zahtijevaju naknadnu obradu. MIM tehnologija je spoj klasične metalurgije praškastih materijala i tehnologije injekcionog presanja plastike. Princip tehnologije injekcionog presanja plastike omogućava oblikovanje komponente i ostvarivanje kompleksnosti oblika, dok sinterovanje omogućava postizanje mehaničkih svojstava komponente. MIM proces se sastoji od četiri osnovne faze:

- Miješanje i granulacija
- Injekciono presanje
- Izdvajanje veziva
- Sinterovanje

Šematski dijagram MIM procesa prikazan je na slici 1.



Slika.1. Šematski prikaz MIM procesa

MIM proces počinje sa miješanjem metalnog praha u homogenu smjesu koja se u MIM tehnologiji naziva „feedstock“. Tipična veličina čestica metalnog praha je u rangu od 0,1 – 20 μm [1], a volumetrički udio metalnog praha se obično kreće od 60 do 65% [1-3]. Nakon što se u fazi miješanja i granulacije postigne feedstock u obliku peleta sa obezbijeđenim homogenim svojstvima slijedi faza injektiranja. U ovoj fazi granulirani feedstock se zagrijava do temperature topljenja veziva a potom se injektira u zatvoreni alat. Kada se alatna šupljina ispuni do određenog procenta, najčešće 95 – 99% slijedi faza djelovanja naknadnog pritiska. Nakon što komponenta dovoljno očvrstne vrši se otvaranje alata i izbacivanje. Profilirana komponenta koja se dobija u MIM tehnologiji naziva se „zeleni dio“. Nakon izbacivanja zelenog dijela iz alata slijedi faza izdvajanja veziva. Vezivo je potrebno izdvojiti kao fluid, tekućinu ili paru, bez da komponenta izgubi oblik.

¹ Mr.sc.Edis Nasić, asistent (nasicedis@yahoo.com), Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, BiH.

² Mr.sc.Adnan Mustafić, viši asistent, (adnan.mustafic@untz.ba), Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, BiH

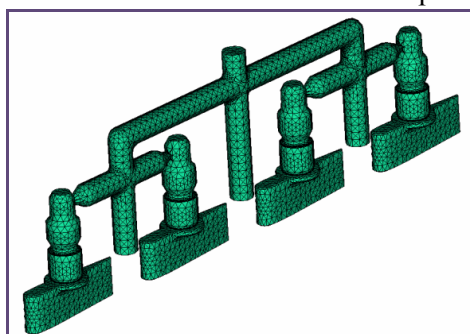
Nakon što se vezivo potpuno izdvoji dobiva se porozna komponenta, koja se u MIM tehnologiji naziva „smeđi dio“. Poslije izdvajanja veziva slijedi sinterovanje kao završni korak. Tokom postupka sinterovanja komponente su izložene visokim temperaturama, što dovodi do zguščavanja. Komponente se tokom faze sinterovanja volumetrički skupljaju za oko 15% [1-3], gdje je moguće postići tolerancije u rangu 0,3% - 0,5% [2]. Gustoća komponente je blizu teoretske obično veća od 95% [1-2], a iskorištenost materijala je gotovo 100% [1-2] jer postoji regranulacija materijala od neuspjelo izrađenih komponenti, uljevka i razdjelnih kanala. Osnovna faza u MIM tehnologiji je faza injektiranja. Najčešće greške javljaju se zbog pogrešno postavljenih parametara u ovoj fazi. Greške koje se pojave ne mogu se otkloniti u narednim fazama procesa koje slijede. U ovom radu razmatrana je faza popunjavanja i djelovanja pritiska držanja na konkretnom proizvodu uz primjenu numeričke simulacije.

2. NUMERIČKA SIMULACIJA FAZE INJEKTIRANJA

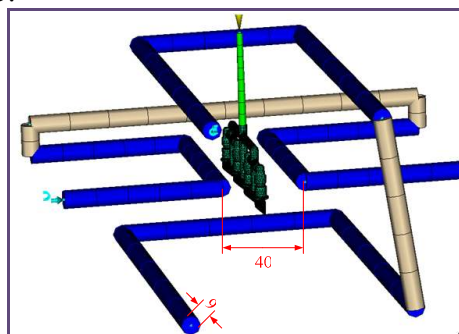
Simulacija faze injektiranja izvodi se pomoću računarske dinamike fluida (CFD), čija načela se temelje na rješavanju jednačina za očuvanje količine kretanja, mase i energije primjenom metoda konačnih elemenata (MKE) i metoda konačnih razlika (FDM) [4]. Simulacija faze injektiranja se izvodi sa komercijalno dostupnim softverima koji su prevashodno namijenjeni za FE simulaciju injekcionog presanja plastike. Nedostatak softvera prilagođenih za plastiku je nemogućnost simuliranja pojava segregacije, nagomilavanja i razdvajanja metalnog praha i veziva [4]. Za numeričku simulaciju faze injektiranja MIM procesa neophodno je postaviti ulazne podatke kao što su:

- Oblik i geometrija komponente,
- Matematski modeli materijala za pojedine faze,
- Parametri mašine,
- Svojtava materijala alata,
- Parametri procesa.

Prvi korak u analizi je definisanje geometrije modela odnosno mreže konačnih elemenata. Mreža konačnih elemenata urađena je prema dimenzijama komponenti i razdjelnih kanala i prikazana je na slici.2., a kompletan FE model sa rashladnim kanalima prikazuje slika.3.



Slika.2. 3D Mreža konačnih elemenata



Slika.3. FE model sa rashladnim kanalima

3. KARAKTERISTIKE MIM MATERIJALA

3.1. Viskoznost materijala

Za analizu punjenja potrebno je opisivanje osnovne karakteristike MIM materijala a to je njegova viskoznost. Potrebno je viskoznost opisati jednim od matematskih modela. Za opisivanje viskoznosti u zavisnosti od temperature i brzine smicanja najčešće se koristi model drugog reda koji se može napisati kao:

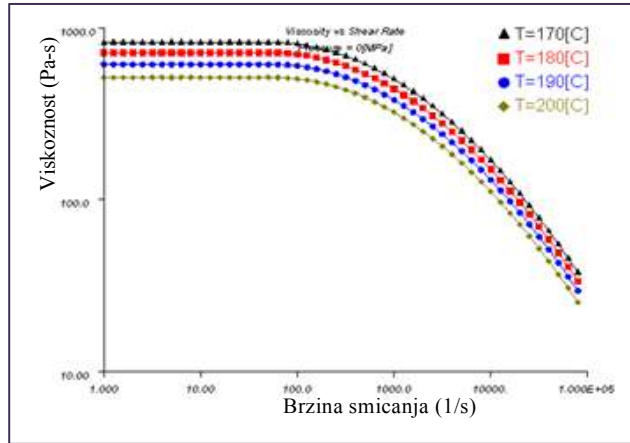
$$\ln(\eta) = A + B \ln(\dot{\gamma}) + CT + D[\ln(\dot{\gamma})]^2 + E \ln(\dot{\gamma})T + FT^2 \dots (1)$$

gdje su: η - Viskoznost (Pa-s), $\dot{\gamma}$ - Brzina smicanja (1/s), T - Temperatura ($^{\circ}C$).

Materijal je BASF CATAMOLD 310N sa vezivom baziranim na polyacetalu sa polyetilenom čiji je tipični sastav nakon sinterovanja (Fe, C 0,20-0,50%, Cr 24-26%, Ni 19-22%, Si 0,75-1,30%, Nb 1,2-1,5%, Mn <1,5%, Ostali < 2,0%). Karakteristike viskoznosti feedstock-a CATAMOLD 310N za raspon temperature od 170 do 190 $^{\circ}C$ prikazana je na slici 4. Na osnovu eksperimentalnih vrijednosti viskoznosti određeni su koeficijeni viskoznosti materijala (tabela.1.) koji figurišu u matematskom modelu (1).

Tabela.1.

A	5.48091
B	0.403646
C	0.0178002
D	-0.0576995
E	0.000327771
F	-9.38505e-005



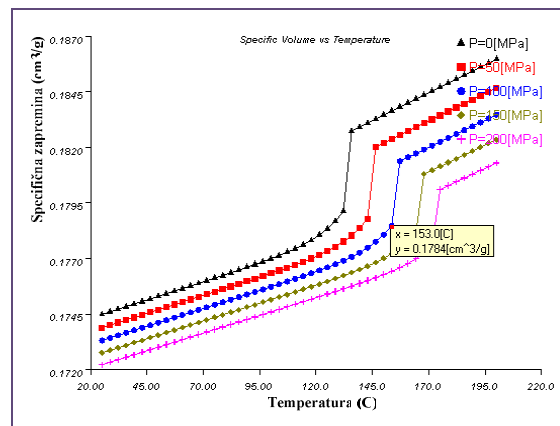
Slika.4. Viskoznost u funkciji temperature i brzine smicanja

3.2. PVT i termalna svojstva feedstock-a

Pri numeričkoj simulaciji za analizu djelovanja pritiska držanja potrebno je opisati panašanja specifične zapremine u zavisnosti pritiska i temperature. PVT svojstvo MIM feedstock-a pored viskoznosti, predstavlja ključni podatak za fazu injektiranja i fazu pakovanja. Zavisnost specifične zapremine, pritiska i temperature može se opisati matematskim modelom. Model treba da definiše zavisnost stišljivosti $V(P,T)$ u tri karakteristična područja: rastopljeno područje, prelazno područje i kristalizirano područje. 2D Tait model koji je korišten u FE simulaciji dat je jednačinom (2):

$$V(T, P) = V_o(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + V_i(T, P) \dots (2)$$

gdje su: $V(T,P)$ – specifična zapremina na temperaturi T i pritisku P , V_o – specifična zapremina na nula pritisku, T – temperatura, P – pritisak, $C = 0.0894$ – konstanta, B – osjetljivost materijala na pritisak.



Slika.5. Zavisnost specifične zapremine u funkciji pritisak i temperature - PVT

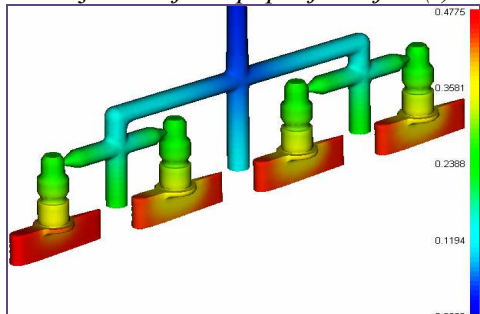
Pored svojstava materijala u fazi punjenja i djelovanju pritiska držanja potrebno je definisati specifični toplotni kapaciteta (C_p) i termalnu konduktivnosti (k) za određeni materijal. Vrijednosti (C_p) i (k) za CATAMOLD 310N iznose $C_p = 2528$ (J/kgC) i $k = 2,33$ (W/mC).

4. ANALIZA REZULTATA FE SIMULACIJE

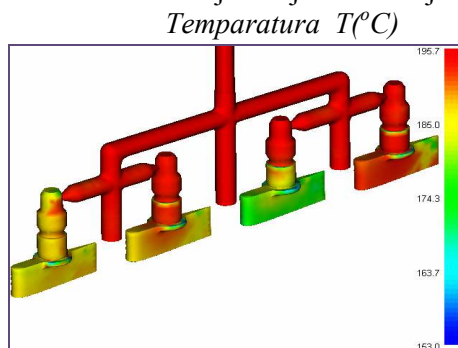
Nakon uspješno postavljenih ulaznih podataka moguće je analizirati izlazne rezultate. Izlazni rezultati koje je FE kod u mogućnosti generisati su: vremena: popunjavanja, očvršćavanja, hlađenja, raspodjela temperatura, pritiska i gustine, raspodjelu viskoznosti i brzina smicanja, pregled područja linija spajanja, zaostajanje zraka u alatnoj šupljini kao i procenat očvrstnutog sloja materijala. Ovdje su analizirani najvažniji rezultati: vrijeme popunjavanja, raspodjela temperatura i pritiska.

4.1. Vrijeme popunjavanja i raspodjela temperatura na kraju faze punjenja

Vrijeme injektiranja je vrijeme koje je potrebno da se alatna šupljina ispuni u potpunosti u što kraćem vremenskom trenutku najčešće do 1 sekunde. Duže vrijeme popunjavanja zahtijeva manje brzine a rezultira bržem očvršćavanju feedstock-a sa povećanjem viskoznosti. Kraće vrijeme injektiranja zahtijeva veće brzine injektiranja koje rezultiraju duže održavanje temperature feedstock-a. Veće brine injektiranja poboljšavaju proizvodnost a takođe i produženje ciklusa proizvodnje. Veće brzine injektiraju rezultiraju i većim brzinama smicanja. *Vrijeme popunjavanja t (s)*



Slika.6. Rezultati vremena popunjavanja

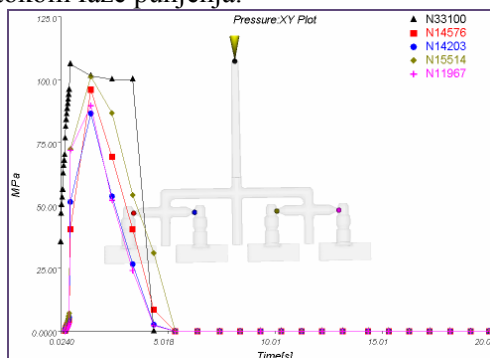


Slika.7. Rezultati raspodjele temperature

Kada je riječ o vremenu popunjavanja rezultat generisan FE simulacijom slika.6., jasno pokazuje da li se komponente istovremeno popunjavaju i gdje su područja otežanog tečenja materijala. Pored vremena popunjavanja drugo važno svojstvo ponašanja materijala je raspodjela temperaturnog polja. Temperatura na prednjem dijelu toka feedstock-a pokazuje rezultate analize popunjavanja i pokazuje temperaturu feedstock-a kada pređe određeno područje tokom analize punjenja. Rezultat FE simulacije prikazan na slici .7. pokazuje raspodjelu temperatura na kraju faze popunjavanja. Izuzetno vruće zone ukazuju na povišeno smicanje, grijanja se javljaju obično na mjestima komponenti u karakterističnim područjima i oko ušća. Hladna mjesta ukazuju na otežano popunjavanje. Veće temperature javljaju se pri višim brzinama injektiranja zbog kraćeg vremena popunjavanja. Veće temperature javljaju se i zbog povećanog trenja između čestica metalnog praha koje se povećava pri većim brzinama injektiranja. Budući da se feedstock brže hladi na područjima bliže stijenama alatne šupljine stoga je temperatura vanjske površine bližih stijenki niža od temperature po unutrašnjosti komponenti. Kada završava faza popunjavanja i nastupa faza djelovanja pritiska držanja u alatnu šupljinu se injektira nova količina materijala veće temperature koja unosi novu količinu toplote u alatnu šupljinu čime se održava viša temperatura u pojedinim područjima. Pri početku djelovanja pritiska držanja i održavanju temperaturnog polja sprečava se prerano očvršćavanje ušća.

4.2. Analiza raspodjele pritiska

Raspodjela pritiska prikazuje rezultat pritiska na kraju faze punjenja i djelovanja pritiska držanja. Maksimalni pritisak se uvijek javlja na mjestu injektiranja materijala i minimalnog pritiska koji se pojavljuje na čelu rastopljenog feedstock-a tokom faze punjenja.



Slika.8. Rezultati FE simulacije raspodjele pritiska na mjestu injektiranja i mjestima ušća

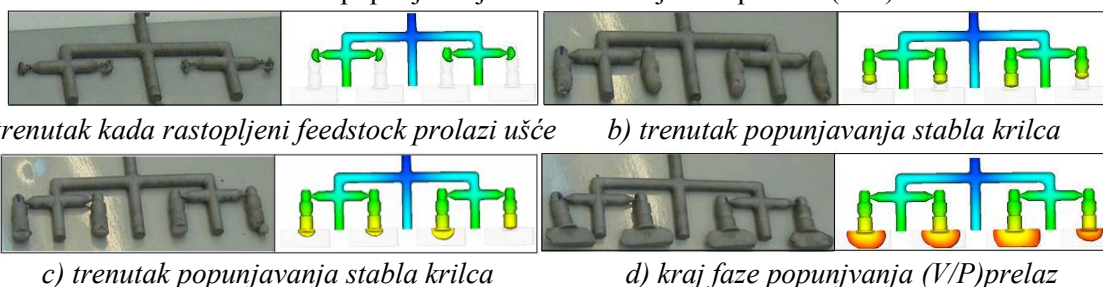
Većina mašina za injekciono presanje nije opremljena senzorima pritiska koji ukazuju na reološka dešavanja unutar alatne šupljine pa se zaključci o kvalitetu zelenog dijela donose na bazi krive hidrauličkog pritiska. Rezultat prikazan na slici.8. predstavlja prednost FE simulacije jer omogućava pregled i trenutak pečačenja ušća, uvid u praćenje vrijednosti izloženosti prekomjernog djelovanja pritiska pojedinih komponenti. Veće vrijednosti i duže vrijeme djelovanja pritiska uzrokuje otežano izbacivanje kao i zaosta napreza u komponenti.

5. EKSPERIMENTALNI DIO I KOMPARACIJA

Eksperiment injekcionog presanja rađen je na mašini **ARBURG 320C** za različite vrijednosti temperature alata, brzine injektiranja i profila pritiska držanja koje su date u tabeli .2.

Parametri	Jedinica	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
Temperatura alata (Ta)	°C	110	120	130
Brzina injektiranja (Vi)	cm ³ /s	5	10	15
Naknadni pritisak (Pn)	bar	900	1000	1100

Pored variranih parametara kako za realni eksperiment tako i za sprovedene simulacija postavljeni su i ostali parametri procesa: Temperatura feedstock-a 195(°C), tačka prelaza (V/P) postavljena je na (95%), vrijeme injektiranja, djelovanja naknadnih pritiska i hlađenja 20 (s), temperatura medija za temperiranje 50 (°C). temperatura okoline 20 (°C). Eksperimenti su provedeni na osnovu planiranog eksperimenta Taguchi metodom prema planu **L₂₇ (3³)**. Na slici.9. prikazana je komparacija popunjenosti alatne šupljine u različitim vremenskim trenucima tokom faze popunjavanja i u kontrolnoj tački prelaza (V/P).

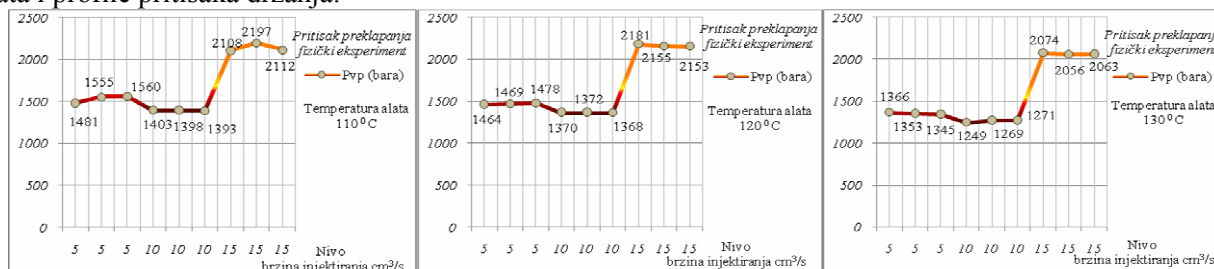


Slika.9. Komparacija FE simulacije i eksperimenta

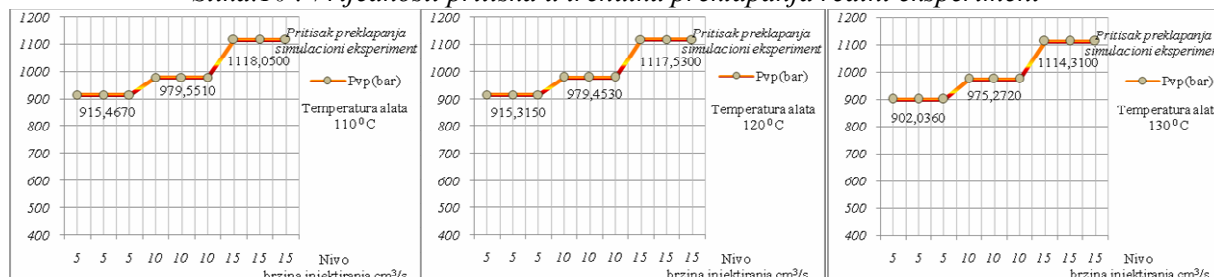
Prikazani rezultati pokazuju dobro slaganje rezultata eksperimenta sa FE predviđanjem. Navedene informacije upućuju na povoljan izbor: mjesta i geometrije ušća, oblik uljevka kao i položaj kanala za hlađenje. Navedeni rezultati daju informacije neophodne za konstruisanje alata još u fazi dizajna, što značajno skraćuje vrijeme i troškove.

5.1. Komparacija eksperimenta i FE simulacije - dostizanje pritiska

Na dijagramima slika.10 i 11., prikazana je zavisnost postignutog hidrauličkog pritiska (bar) u trenutku preklapanja sa kontrole brzine na kontrolu pritiska u funkciji tri brzine injektiranja za različite temperature alata i profile pritiska držanja.



Slika.10. Vrijednosti pritiska u trenutku preklapanja realni eksperiment



Slika.11. Vrijednosti pritiska u trenutku preklapanja FE simulacije

Sa dijagrama je uočljivo da rezultati predviđanja kvalitativno prate rezultate eksperimenta, izuzev u slučaju srednjeg nivoa brzine injektiranja od 10 cm³/s. Kod rezultata eksperimenta pritisci preklapanja su minimalni za brzinu injektiranja od 10 cm³/s, dok kod predviđanja pritiska FE simulacijom pritisci rastu sa porastom brzine injektiranja za sve vrijednosti temperatura alata i pritiska držanja. Objašnjenje leži u činjenici da u realnosti postoji optimalna brzina injektiranja.

Naime, veća brzina injektiranja povećava otpore tečenju a time i potreban pritisak, dok manja brzina daje rastopljenom feedstock-u više vremena za očvršćavanje što smanjuje poprečni presjek razvodnih kanala i povećava viskoznost, što ponovo dovodi do povećanja zahtjeva za veće vrijednosti pritiska. Optimalna brzina je kompromis pri kojem brzina treba biti dovoljno mala da smanji hidrodinamičke otpore tečenju a istovremeno dovoljno velika da spriječi prekomjerno hlađenje i očvršćavanje te porast pritiska vezan za ovu pojavu. FE suimulacija ne ukazuje na optimalnu brzinu injektiranja. Mogući razlozi su: razlika realnog od temperaturnog polja alata i simulacije, razlika u otporima tečenju usljed nemogućnosti simulacije da predvidi separaciju i nagomilavanje metalnog praha, razlika u nivou brzina smicanja kod eksperimenta i FE simulacije.

6. ZAKLJUČAK

Na bazi rezultata ukoliko su svojstva materijala, početni i granični uslovi korektno zadani, moguće je u fazi popunjavanja FE simulacijom predvidjeti: dinamiku popunjavanja alatne šupljine, pojavu efekta mlaznice, mjesta linija spajanja, mjesta prekomjernog zagrijavanja rastopljenog feedstock-a, mjesta postavljanja kanala za odzračivanje, izbor prelaza V/P tačke, raspored temperatura, pritiska, brzina smicanja, viskoznosti u vremenu. Rezultati prikazani na dijagramima pokazuju da se vrijednosti pritiska smanjuju sa povećanjem temperature alata za sve vrijednosti brzina i različite profile pritiska držanja. Dakle kada je alatna šupljina hladnija otežano je tečenje feedstock-a, viskoznost se povećava i potrebni su veći pritisci za savladavanje otpora tečenja pri popunjavanju alatne šupljine. Vrijednosti pritiska dobiveni FE simulacijom su i komparativno znatno manji za 1,3 do 2 puta od onih dobijenih eksperimentalno. Mogući razlozi su: razlika u otporima tečenja i ne mogućnost FE simuliranja efekata fazne segregacije, nagomilavanje čestica metalnog praha te pojave klizanja na stijenci alata.

7. LITERATURA

- [1] Powder Metal Technologies and Applications; ASTM Handbook, Volume7, 1998.
- [2] Powder injection moulding looks to automotive applications for growth and stability - Powder Injection Moulding International – Juni 2007 Vol.1 No.2.
- [3] Compounding and Processing of a Water Soluble Binder for Powder Injection Moulding ; Helio Rui Caldeira da Silva Jorge, Doktorski rad Maj 2008.
- [4] Mould filling simulations during powder injection moulding; Volodymyr Valeriyovych BILOVOL, Doktorski rad Juni 2003.
- [5] Numerical simulation of tungsten alloy in powder injection molding process; ZHENG Zhen-xing, XIA Wei, ZHOU Zhao-yao, ZHU Quan-li School of Mechanical Engineering, Decembar 2007.
- [6] Integrated filling, packing and cooling CAE analysis of powder injection moulding parts; S. Ahn, S. T. Chung, S. V. Atre, S. J. Park and R. M. German Powder Metallurgy 2008 Vol.51 No.4.
- [7] Numerical Simulation of Powder Injection Molding, Filling Process Based on ANSYS; Zhoushun ZHENG, Xuanhui QU, Yunping LI and Jianfeng GUO. J. Metr. Sci. Tehnol., Vol.19 Suppl.1, 2003.

Edis Nasić, Adnan Mustafić

FEA SIMULATION OF INJECTION PHASE OF MIM PROCESS

Summary

It is very difficult to follow and to understand all rheological events in the tool cavity and the influence of parameters during the process that they have on the properties of components during the injection phase. To understand the injection phase it is necessary to use numerical simulations. The advantage of using FE simulation is verification of the fulfillment of construction of components and the tools, and comparison and adjustment of the various combinations of parameters before the start of the process. A lack of application of simulation is that the FE code can't simulate effects such as segregation, accumulation of the metal powder particles and the appearance of separation of metal powder and binder. The work showed simulation and real experiment with a review and variation of parameters: the speed of injection, temperature of tools and profile of pressure with the goal to predict the filling of tool cavity and distribution of pressure.

Key words: Phase injection, FE simulation, temperature, pressure, injection speed, time

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

RAČUNARSKA ANALIZA TOPLOTNOG PONAŠANJA SKLOPA GLAVNOG VRETENA ULEŽIŠTENOG VALJČASTIM DVOREDIM LEŽAJIMA⁴

Rezime: U radu je analizirano toplotno ponašanje konstrukcionog rešenja sklopa glavnog vretena uležištenog valjčastim dvoredim ležajem metodom konačnih elemenata. Analiza toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena izvršena je primenom programskog sistema za automatizovani proračun na dvodimenzionom modelu. Izvršena je uporedna analiza rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata i rezultata dobijenih eksperimentalnim putem. Takođe, u radu je prikazan način izračunavanja koeficijenata provođenja i konvekcije za razmatrani tip uležištenja sklopa glavnog vretena sa valjčastim dvoredim ležajem.

Ključne reči: Sklop glavnog vretena, metod konačnih elemenata, valjčasti dvoredi ležaj

1. UVOD

Sklop glavnog vretena predstavlja jedan od najvažnijih sklopova u mehaničkoj strukturi mašine alatke, čije ponašanje ima limitirajući uticaj na tačnost i proizvodnost. Toplotne i elastične karakteristike sklopa glavnog vretena se menjaju u zavisnosti od uslova kao što su početni zazor sklopa, toplotne deformacije elemenata sklopa, uslova obrade i uslova hlađenja. Pri definisanju toplotnog modela sklopa glavnog vretena treba uzeti u obzir kotrljajne elemente i prstenove ležišta, vreteno i toplotu koja se prenosi kroz njih. Razvijena toplota izaziva promenu kontaktnog pritiska u ležištu, koji se menja i utiče na granične uslove kao što su: razvijena toplota, toplotna kontaktna provodljivost, dinamička krutost, svojstva prigušenja sklopa glavnog vretena itd. Početni preklop stvara početni kontaktni pritisak na dodirnim površinama prstenova. Kako se toplotni gradijent menja u radijalnom pravcu sa vremenom i režimima rada vretena, dolazi do toplotnih deformacija elemenata ležišta koje prouzrokuju povećanje prednaprezanja, a samim tim i promenu krutosti sklopa glavnog vretena.

Sa druge strane činjenica je da su danas prisutne izuzetne mogućnosti za analizu toplotno-elastičnog ponašanja primenom metode konačnih elemenata. Sve to stvara uslove i nameće potrebu da se projektovanju sklopa glavnog vretena danas pristupi u sasvim drugim uslovima nego što su bili prisutni pre nekoliko decenije. Savremena računarska tehnika i programski sistemi pružaju mogućnosti da se process projektovanja značajno ubrza i na taj način skрати vreme razvoja proizvoda, kao i da se u procesu projektovanja dođe do daleko boljih rešenja [3].

Polazeći od dosadašnjih rezultata u analizi toplotno-mehaničkog ponašanja sklopa glavnog vretena uležištenog kugličnim ležajima sa kosim dodirnom (čeličnim i hibridnim), u radu je izvršena analiza toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena uležištenog valjčastim dvoredim ležajem, primenom programskog sistema baziranog na metodi konačnih elemenata.

Temperatura je jedan od glavnih uzroka koji dovodi do otkaza sklopa glavnog vretena mašina alatki i njene vrednosti su određene eksperimentalno i računarski [10]. Primenom savremene opreme za merenje temperature (termovizijske kamere, četvorokanalnog instrumenta za merenje temperature i infracrvenog termometra) određene su vrednosti temperature na karakterističnim tačkama sklopa glavnog vretena u stacionarnom temperaturnom stanju [1]. Razvijena količina toplote u ležajevima izračunata je na osnovu momenata trenja usled opterećenja i momenata trenja usled podmazivanja. Polazeći od usvojenog modela prostiranja toplote u navedenom sklopu određene su vrednosti koeficijenata konvekcije i provođenja toplote, kao polaznih veličina za računarsko modeliranje.

¹ Vladimir Blanuša, dipl. ing.-master, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, blanusa@uns.ac.rs

² Mr Aleksandar Živković, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, acoza@uns.ac.rs

³ Prof.dr. Milan Zeljković, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, milanz@uns.ac.rs

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

2. ODREĐIVANJE KOEFICIJENATA KONVEKCIJE I PROVOĐENJA TOPLOTE

U sklopu glavnog vretena osnovni unutrašnji mehanizmi prostiranja toplote su: konvekcija usled rotacije ležišta, konvekcija usled rotacije vretena, provođenje između kotrljajnih tela i prstenova, provođenje između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno provođenje između unutrašnjeg prstena i glavnog vretena [10], [3]. U konkretnom slučaju nije razmatrano prostiranje toplote sa valjčića i kuglica na prstenove ležajeva (provođenje između kotrljajnih tela i prstenova), iz razloga što su eksperimentalnim putem određene vrednosti temperature na spoljašnjim prstenovima ležajeva. Pre računarske analize izračunate su vrednosti koeficijenata konvekcije i provođenja toplote, kako je to prikazano u nastavku.

Konvekcija usled obrtanja ležaja. Ovaj vid prostiranja toplote se ostvaruje između ležaja i okolnog vazduha. Apsorbovana toplota od sredstva za podmazivanje (masti) se u ovom radu ne razmatra. Pošto se zbog male temperaturne razlike zračenje može zanemariti, koeficijent prelaza toplote se izračunava prema [2] iz uslova protoka vazduha kroz ležište, pri turbulentnom strujanju. U slučaju ovakog prelaza toplote ukupna brzina strujanja vazduha usled rotacije ležišta se izračunava iz aksijalne i tangencijalne komponente. Površina za aksijalni protok vazduha između unutrašnje i spoljašnje staze kotrljanja je:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

gde su:

f -frekvencija ležišta [Hz]

D-prečnik spoljašnjeg prstena [m]

d-prečnik unutrašnjeg prstena [m]

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

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

Koeficijent konvekcije se izračunava prema [2]:

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

Pri čemu su konstante c_0 i c_1 konstante eksperimentalno određene [2], [10].

U tabeli 1 su date vrednosti koeficijenta konvekcije kroz ležišta za različite brojeve obrtaja.

Broj obrtaja [o/min]	Koeficijent konvekcije α [W/m ² K]
2800	160,8
3550	252,2
4500	400,1
5600	614,4
6300	775

Tabela 1. Vrednosti koeficijenta konvekcije pri obrtanju ležišta za različite brojeve obrtaja [10]

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

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

gde je:

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

D_i -prečnik vretena [m]

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

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

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

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

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

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

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

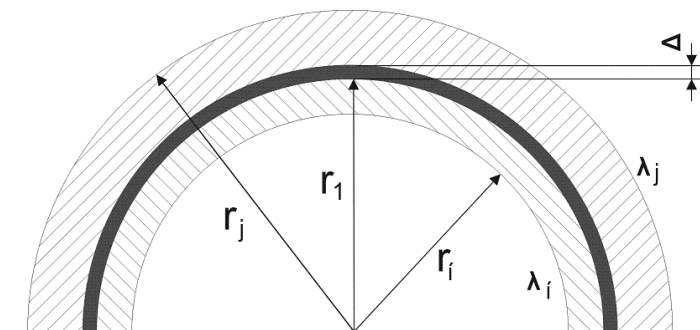
Provođenje toplote između spoljnog prstena i kućišta, odnosno unutrašnjeg prstena i vretena.

Koeficijent provođenja toplote kod sklopa glavnog vretena u velikoj meri zavisi od zazora između spoljašnjeg prstena i kućišta, odnosno unutrašnjeg prstena i vretena. Pojedini autori čak predlažu postavljanje određenih kompozitnih materijala (npr. poliestra) na mestu dodira da bi se smanjile toplotne deformacije glavnog vretena. Toplotna provodljivost između dva elementa se može odrediti na osnovu relacije [4]:

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

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

Ostale oznake su prikazane na slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz kontakta između spoljašnjeg prstena ležaja i kućišta [10]

U prethodnoj relaciji R_w predstavlja toplotnu kontaktnu otpornost na mestu dodira prstena sa kućištem i prema [4] se određuje iz relacije:

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

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

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

Mesto kontakta	Koeficijent provođenja λ [W/m ² K]
Unutrašnji prsten/glavno vreteno	30,41
Spoljašnji prsten/pinola (kućište)	49,95

Tabela 3. Vrednosti koeficijenta provođenja između prstena i kućišta, odnosno prstena i vretena [10]

3. RAČUNARSKO MODELIRANJE TOPLOTNOG PONAŠANJA SKLOPA GLAVNOG VRETENA

U okviru računarskog modeliranja sklopa glavnog vretena izvršena je analiza toplotnog ponašanja primenom programskog sistema baziranog na metodi konačnih elemenata za pet različitih brojeva obrtaja ($n_1=2800$ [o/min], $n_2=3550$, $n_3=4500$, $n_4=5600$ i $n_5=6300$), ali se zbog ograničenog prostora u radu prikazuju rezultati za tri broja obrtaja $n_2=3550$, $n_4=5600$ i $n_5=6300$ [o/min]. Cilj je da se što sveobuhvatnije analizira konstrukciono rešenje sklopa glavnog vretena sa valjčastim dvoredim ležajem, obzirom da se kroz ranija istraživanja došlo do toplotnog ponašanja sličnog konstrukcionog rešenja sklopa glavnog vretena uležišnog kugličnim ležajima sa kosim dodirom.

Eksploimentalnim ispitivanjem toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena određeno je stacionarno temperaturno stanje za prethodno navedene brojeve obrtaja (izmerene su temperature u karakterističnim tačkama) [1]. Vrednosti temperatura u stacionarnom temperaturnom stanju na spoljašnjim prstenovima ležajeva korišćene su u računarskoj analizi sklopa glavnog vretena metodom konačnih elemenata. Izgled eksperimentalnog štanda sa savremenim instrumentima za merenje temperature prikazan je na slici 2. Vrednosti temperature u stacionarnom temperaturnom stanju na spoljašnjim prstenovima ležajeva zajedno sa vrednostima koeficijenata konvekcije i provođenja predstavljaju ulazne podatke za računarsko modeliranje sklopa glavnog vretena. Vrednosti ovih temperatura se daju u nastavku.

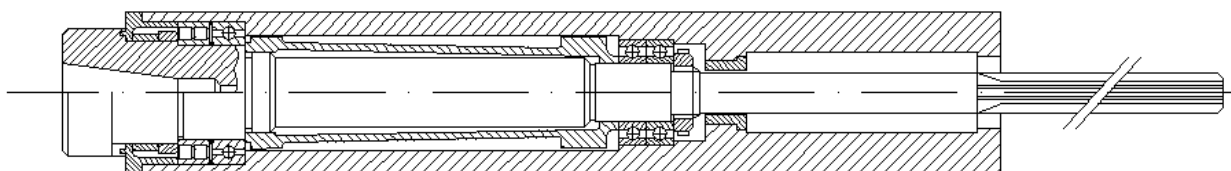


Slika 2. Eksperimentalni štand sa instrumentacijom za merenje

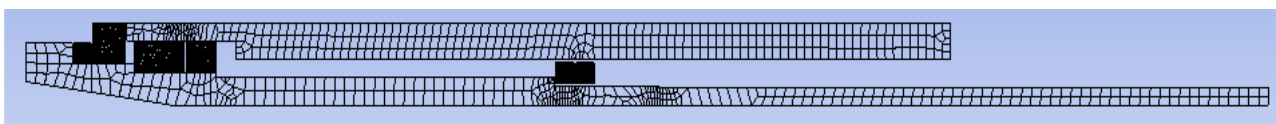
Za broj obrtaja $n_2=3550$ eksperimentalno određene vrednosti temperature u stacionarnom temperaturnom stanju su: na površini valjčastog dvoredog ležaja $t_{valj.}=26,2^{\circ}\text{C}$, na površini kugličnog ležaja $t_{kug.}=25,6^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura okoline $t_{prost.}=20,8^{\circ}\text{C}$. Pri broju obrtaja $n_4=5600$ vrednosti temperature u stacionarnom temperaturnom stanju su: na površini valjčastog dvoredog ležaja $t_{valj.}=33,1^{\circ}\text{C}$; na površini

kugličnog ležaja $t_{kug.}=30,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura okoline je $t_{prost.}=21,7^{\circ}\text{C}$. I na kraju za broj obrtaja $n_5=6300$ vrednosti temperature u stacionarnom temperaturnom stanju su: na površini valjčastog dvorednog ležaja $t_{valj.}=37,1^{\circ}\text{C}$; na površini kugličnog ležaja $t_{kug.}=34\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperatura okoline $t_{prost.}=22,3^{\circ}\text{C}$.

Slika 3 prikazuje konstrukciono rešenje analiziranog sklopa glavnog vretena sa valjčastim dvoredim ležajem. Na osnovu površinskog modela, primenom programskog sistema, definisana je mreža od 6174 elementa i 20337 čvorova. Pri diskretizaciji je korišćen 2D konačni element PLANE 85, dok su za definisanje kontaktnih parova korišćeni konačni elementi TARGET 187 za definisanje površine kontakta i CONTA 174 za uspostavljanje kontakta prstenova i vretena, odnosno prstenova i kućišta. Kao rezultat prethodnog na slici 4 je prikazan diskretizovan model razmatranog sklopa.

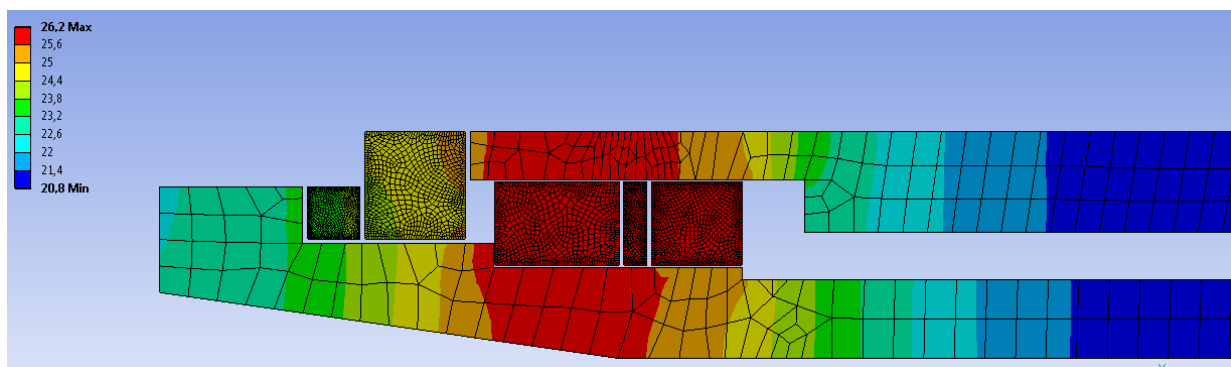


Slika 3. Izgled sklopa glavnog vretena sa valjčastim dvoredim ležajem



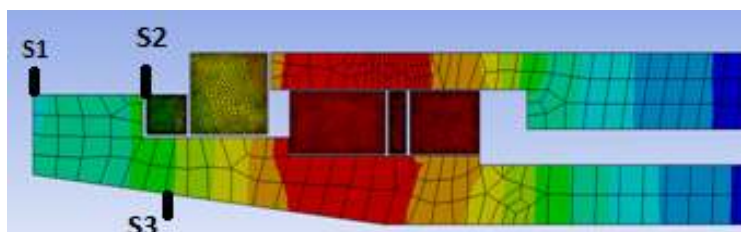
Slika 4. Izgled sklopa glavnog vretena sa mrežom konačnih elemenata

Posle proračuna i nakon postprocesiranja dobijen je grafički prikaz rasporeda temperaturnih polja po elementima za broj obrtaja $n_2=3550$ (slika 5). Ovi rezultati su poređeni sa eksperimentalno dobijenim rezultatima u tri karakteristične tačke na vrhu vretena. Položaj karakterističnih tačaka na sklopu glavnog vretena prikazan je na slici 6.



Slika 5. Grafički prikaz rasporeda temperaturnih polja u stacionarnom stanju za $n=3550$

Odstupanja računarski od eksperimentalno određenih vrednosti temperature u karakterističnim tačkama glavnog vretena prikazana su u tabeli 4.

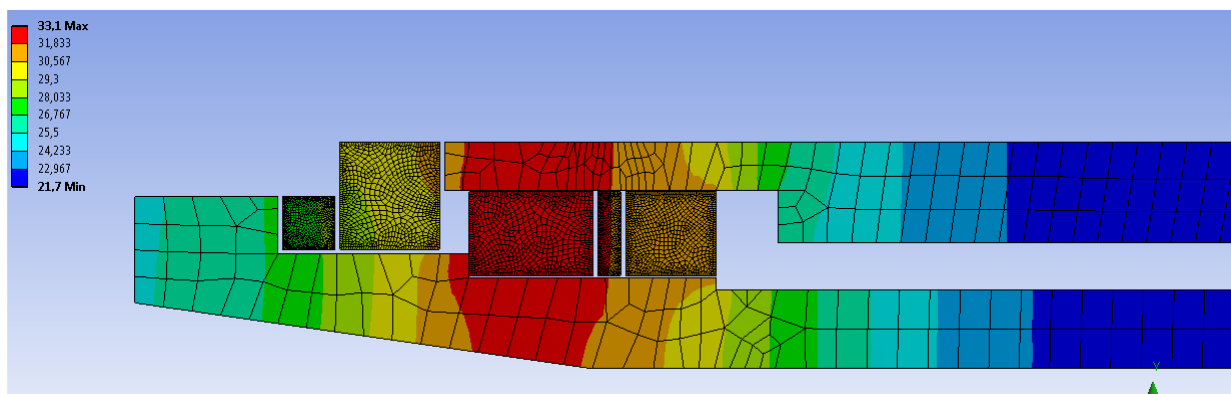


Slika 6. Položaj karakterističnih tačaka na sklopu glavnog vretena

Karakteristične tačke	S1	S2	S3
Ekperimentalno određene vrednosti temperature [°C]	21,9	24,1	24,2
Računarski određene vrednosti temperature [°C]	22,3	23,5	23,5
Odstupanje [%]	-1,8	2,5	2,9

Tabela 4. Odstupanje računarskih od eksperimentalnih vrednosti temperature za broj obrtaja $n=3550$

Rezultati analize toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena za broj obrtaja $n_4=5600$ prikazani su na slici 7, a odstupanja računarskih od eksperimentalnih vrednosti u karakterističnim tačkama u tabeli 5.

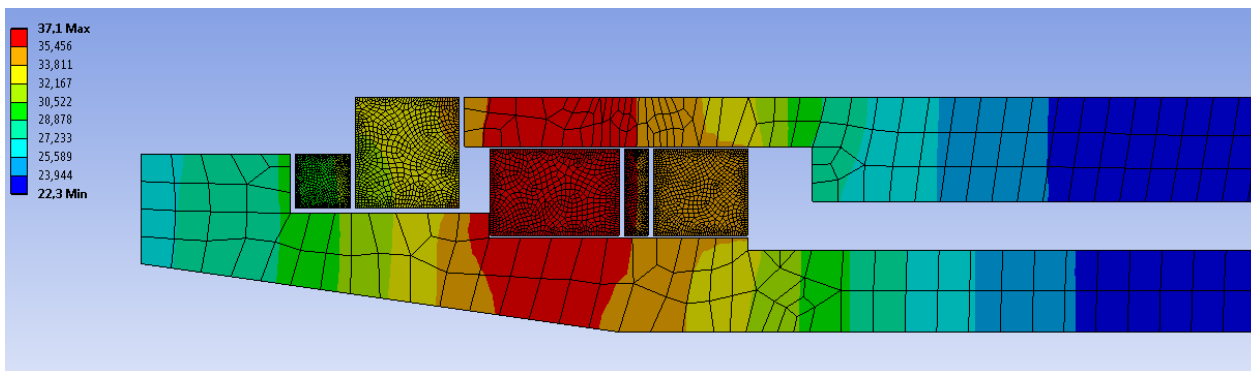


Slika 7. Grafički prikaz rasporeda temperaturnih polja u stacionarnom stanju za $n=5600$

Karakteristične tačke	S1	S2	S3
Ekperimentalno određene vrednosti temperature [°C]	26,4	28,8	27,7
Računarski određene vrednosti temperature [°C]	24,9	27,4	27,4
Odstupanja [%]	5,7	4,9	1,1

Tabela 5. Odstupanja računarskih od eksperimentalnih vrednosti za broj obrtaja $n=5600$

Rezultati računarske analize sklopa glavnog vretena za broj obrtaja $n_5=6300$ prikazani su na slici 8, a odstupanja računarskih od eksperimentalnih vrednosti za karakteristične tačke u tabeli 6.



Slika 8. Grafički prikaz rasporeda temperaturnih polja u stacionarnom stanju za $n=6300$

Karakteristične tačke	S1	S2	S3
Ekperimentalno određene vrednosti temperature [°C]	28,2	28,8	29,8
Računarski određene vrednosti temperature [°C]	26,4	29,7	29,7
Odstupanja [%]	6,4	-3,1	0,3

Tabela 6. Odstupanja računarskih od eksperimentalnih vrednosti za broj obrtaja $n=6300$

4. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u ovom radu predstavljaju deo širih istraživanja vezanih za eksperimentalno ispitivanje i računarsko modeliranje toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena. Sumirajući eksperimentalne i računarski dobijene rezultate toplotnog ponašanja sklopa glavnog vretena, konstatuje se da su odstupanju u opsegu od -3,1% do 6,4 %, za razmatrane brojeve obrtaja, što se može smatrati zadovoljavajućim. Takođe, se može konstatovati da su veća odstupanja kod većih brojeva obrtaja. Iz prethodnog sledi da se, i pored određenih uprošćenja, prikazani računarski model može koristiti za analizu toplotnog ponašanja različitih konstrukcionih rešenja sklopa glavnog vretena, za opseg faktora brzohodnosti ($d_{n_{max}}$) 200.000 – 450.000 [mm/min]. Kroz naredna istraživanja neophodno je uzeti u obzir i uticaj prostiranja toplote kroz elemente ležaja, kao i kroz sredstvo za podmazivanje, odnosno razmatrati trodimenzionalni računarski model.

5. LITERATURA

- [1] Blanuša, V., Zeljković, M., Živković, A., Štrbac, B., Hadžistević, M.: Savremeni postupci merenja temperature, Zbornik radova, CD rom, Infoteh-Jahorina, Sesija PRS-Proizvodni sistemi, Ref. Prs 6, ISSN: 99938-624-2-8, 2012.
- [2] Bossmanns, B., Jay, F.: A thermal model for high speed motorized spindles, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 0890-6955, Vol. 39, Pages 1345-1366, 1999.
- [3] Haitao, Z., Jianguo, Y., Jinhua, S.: Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 0890-6955, Issue 6, Pages 1003-1010, 2006.
- [4] Jedrzejewski, J.: Effect of the thermal contact resistance on thermal behavior of the spindle radial bearings, International Journal of Machine Tools and Manufacture, ISSN: 08909-6955, Vol.28, No.4, Pages 409-416, 1988.
- [5] Zeljković, M., Živković, A., Borojev, Lj.: Thermal-elastic behaviour numerical analysis of the high speed main spindle assembly, International Conference „Heavy Machinery“, ISSN:978-86-82631-45-3, Pages E57-E62, 2008.
- [6] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Toplotno –elastični model sklopa visokobrzinskog glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, Infoteh-Jahorina, Sesija c-Infomacioni sistemi u proizvodnim tehnologijama, ISSN: 99938-624-2-8, Vol.6, Ref. C10, Pages 170-174, 2007.
- [7] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Uticaj toplotnog opterećenja na prednaprezanje kugličnih ležišta sa kosim dodirom, Zbornik radova, CD rom, 33 JUPITER konferencija, 20 Simpozijum CAD/CAM, ISSN: 978-86-7083-628-0, Pages 2.1-2.6, 2007.
- [8] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Eksperimentalno ispitivanje toplotno-elastičnog ponašanja sklopa visokobrzinskog glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, 34 JUPITER konferencija, 30 Simpozijum NU roboti i FTS, ISSN: 978-86-7083-628-0, Pages 3.13-3.18, 2008
- [9] Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.: Uticaj toplotnog prednaprezanja ležišta na krutost sklopa glavnog vretena, Zbornik radova, CD rom, Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem, ISSN: 978-86-7892-131-5, Pages 409-412, 2008.
- [10] Živković, A.: Eksperimentalna i računarska analiza toplotno-elastičnog ponašanja sklopa visokobrzinskog glavnog vretena mašina alatki, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.

COMPUTER ANALYSIS OF THERMAL BEHAVIOR OF THE ASSEMBLY SPINDLE WITH DOUBLE ROW ROLLER BEARINGS

Abstract: *In this paper analyzed the termal behavior of structural solutions spindle with double row roller bearing used finite element method. Analysis of thermal behavior of spindle assembly was performed using the program system for the automated calculation of method finite elements on two dimensional model. The comparative analysis of the results obtained by finite element method and the results obtained experimentally. Also the paper presents a method of calculating the coefficients conduction and convention for main spindle assembly with double row roller bearing.*

Key words: *main spindle assembly, method finite elements, two-row roller bearing*



Tabaković, S.; Bojanić, M.; Milojević, Z.; Živković, A.*

MODELIRANJE ELEMENATA SKELETNOG SISTEMA NA OSNOVU DIJAGNOSTIČKIH SNIMAKA

Apstrakt: Modeliranje spoljašnje i unutrašnje geometrije butne kosti je važan korak u procesu projektovanja endoproteze zgloba kuka, naročito u slučajevima kada je hirurška intervencija i ugradnja implatanta jedini vid lečenja.

Podaci koji čine dijagnostički snimak se zapisuju u datoteku koja omogućava prikaz, prostornu rekonstrukciju snimljenih oblika i sadrži dopunske informacije o pacijentu i metodologiji snimanja. U praksi se snimci najčešće arhiviraju u tzv. DICOM format datoteke.

Proces rekonstrukcije elemenata skeleta, organa, ili tkiva na osnovu dijagnostičkih snimaka obuhvata više faza: segmentaciju i prostornu rekonstrukciju snimaka i prevođenje površinskih elemenata (piksela) u zapreminske elemente (voksele).

U radu se prikazuje način modeliranja elemenata skeletnog sistema na osnovu dijagnostičkih snimaka butne kosti u cilju projektovanja endoproteze zgloba kuka po meri.

Ključne reči: Tomografija, Projektovanje, Endoproteza, DICOM

1.0 UVOD

Pod pojmom Medical Imaging (medicinsko generisanje slike) se smatra vizuelno predstavljanje organa radi medicinske dijagnoze putem kompjuterizovanih metoda snimanja. Na ovaj način ostvaren je davnašnji san lekara da vide organe koji su inače nedostupni ljudskom oku.

Medicinsko generisanje slike obuhvata niz metoda medicinskog snimanja, nastalih sa ciljem dobijanja slike unutrašnje strukture živog ljudskog tela.

Snimci dobijeni na osnovu dijagnostičkih metoda čine niz digitalnih fotografija kojima se u paralelnim ravnima prikazuju preseki snimljenog objekta. Između ostalog, ovi snimci se mogu koristiti za prostornu rekonstrukciju snimljenog objekta.

Cilj rada je segmentacija i prostorna rekonstrukcija butne kosti u cilju projektovanja endoproteze zgloba kuka po meri.

Zglob kuka je najvažniji zglob u lokomotornom sistemu, koji omogućuje uspravan hod i kretanje čoveka. Najčešće komplikacije na zglobo kuka nastaju usled povreda, degenerativnih promena ili malignih obolenja. U takvim situacijama, jedini mogući vid lečenja predstavlja hirurška intervencija koja obuhvata ugradnju implantata, endoproteze zgloba kuka [8].

2.0 METODE DIJAGNOSTIČKOG SNIMANJA

2.1 Uvodne napomene

Radiologija je u užem značenju nauka o zračenju, koja osim zračenja u dijagnostičke svrhe koristi i ultrazvuk i radio-talase. Radiološke metode se dele na digitalne i analogne. U današnje vreme od analognih metoda se koriste rentgenska tehnika snimanja (Rtg) i ultrazvučno snimanje sa mogućnošću digitalizacije. Od digitalnih metoda se najčešće koriste tomografske metode kod kojih se pored dijagnostikovanja

* Doc. dr Slobodan Tabaković, e-mail: tabak@uns.ac.rs; MSc Mirjana Bojanić, e-mail: bojanicm@uns.ac.rs; Doc. dr Zoran Milojević, e-mail: zormil@uns.ac.rs; mr Aleksandar Živković, e-mail: acozy@uns.ac.rs; Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad

oboljenja snimci mogu koristiti za prostornu rekonstrukciju snimljenog objekta.

Izraz tomografija potiče od grčkih reči *tomos-* kriška i *graphein-* pisati. Ova grupa metoda medicinskog snimanja je zasnovana na rekonstrukciji dvodimenzionalne geometrije objekta iz niza projekcija [7]. Definicija je bila proširena i na unutrašnjost objekta, mada nije bila primenljiva sve do pojave računara. Sledeći korak u razvoju bio je rentgen aparat za rotacionu tomografiju pod nazivom „rotografija“, a razvijen je u Japanu 1946. godine. Ovi uređaji su funkcionisali tako da je pacijent ležao na stolu, rentgenska cev je bila postavljena sa jedne strane, a rentgenski film u kaseti sa druge strane pacijenta i paralelno su rotirali oko pacijenta praveći polukrug ili pun krug (od 0° do 230° ili 360°) za vreme ekspozicije.

Najpoznatije tomografske metode su: kompjuterizovana tomografija (CT), kod kojih se snimak dobija rentgenskim zračenjem i magnetna rezonanca (MRI) kod koje se snimci dobijaju pod dejstvom usmerenog magnetnog polja.

2.2 Kompjuterizovana tomografija CT

Princip generisanja snimka poprečnog preseka primenom CT uređaja sastoji se u tome da su u kućištu u prstenastom rasporedu nalaze detektori X-zraka, dok se izvor X-zraka kreće kružno i opisuje 360°. Za svaki ugao rotacije izvora, detektori očitavaju nivo zračenja koje je apsorbavalo telo. Na osnovu svih ovih merenja, uređaj rekonstruiše koliko je količinu zračenja apsorbavala svaka tačka tela snimanog poprečnog preseka.

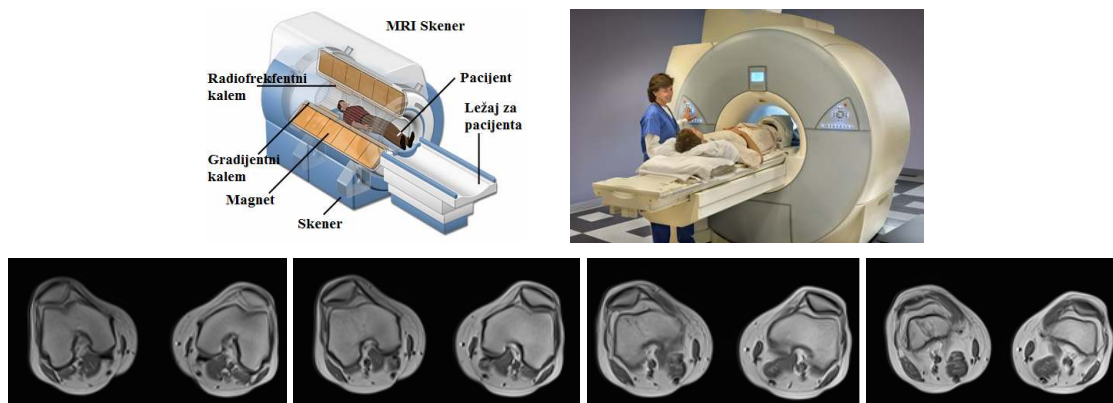


Slika 1. Prvi CT skener, CT skener novije generacije i primer snimka

Prednosti CT skenera su odlična slika, takođe omogućava lako dijagnostikovanje, naročito kostiju kao i njegova cena, pa je dostupan u mnogim medicinskim ustanovama. Moguće je skenirati i pacijente sa ugrađenim medicinskim implantatima bilo koje vrste. Glavni nedostatak je izloženost štetnom X-zračenju, koje pacijent apsorbuje u toku snimanja.

2.3 Magnetna rezonanca MRI

MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) je metoda generisanja snimka poprečnog preseka tkiva pri čemu se meri njegova magnetna karakteristika [6]. Skeneri bazirani na MRI snimaju signale koji potiču iz jezgra vodonika (protona) koje se nalaze u molekulima ljudskog tela koje je postavljeno u snažno, homogeno magnetno polje. Dobijeni signal se snima u matricu, zatim se analizira računarnom i preračunava u snimak koji odgovara maloj zapremini tkiva. Na slici 2 prikazana je šema MRI (levo) i slika skenera novije generacije (desno). Takođe se može videti serija snimaka butne kosti dobijenih na MRI skeneru.



Slika 2. MRI uređaj i serija snimaka dobijena na njemu

Glavna prednost magnetne rezonance je nepostojanje štetnog zračenja, jer se koriste magnetno polje i radio talasi, za razliku od CT skenera. U prednosti još spada i detaljan prikaz mekog tkiva u telu pacijenta. Među nedostacima se izdvajaju cena opreme, dužina snimanja i nemogućnost snimanja pacijenata sa nekim gvozdanim implantatom, jer magnetno polje može izazvati pomeranje implatanta.

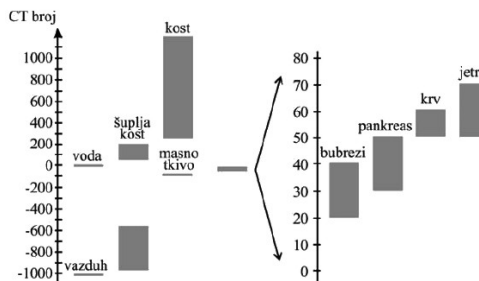
3.0 METODE REKONSTRUKCIJE SNIMKA

3.1 Uvodne napomene

Generisani snimci na CT/MRI uređajima, mogu se snimiti u različitim rezolucijama, a najčešća rezolucija kod savremenih uređaja je 512x512 piksela. Svaki piksel sa ovako dobijenog snimka može imati jednu nijansu sive boje, iz 12-bitne palete (4096 nijansi). Svaki od ovih piksela generisan CT skenerom, može imati vrednost od -1000 do 3000 HU (Haunsfeild Units) [6]. CT broj se izračunava prema datoj formuli:

$$CT[HU] = 100 \frac{\mu - \mu_{vode}}{\mu_{vode}}$$

Na slici 3 su date CT vrednosti za različita tkiva u organizmu. Sa slike se vidi da elementi skeletnog sistema imaju CT broj veći od 250 HU, voda ima CT broj 0, a vazduh ima najmanju vrednost CT broja -1000 HU.

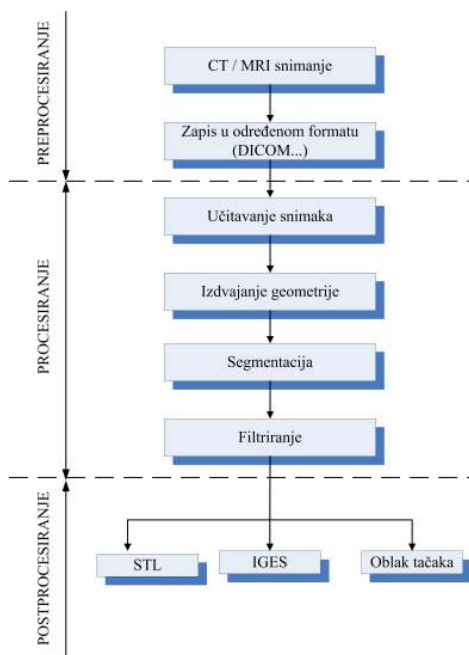


Slika 3. Skala CT vrednosti za različita tkiva [6]

3.2 Postupak rekonstrukcije snimka

Prostorni računarski modeli kostiju, pored primene u medicini, imaju primenu u kliničkoj praksi i u inženjerstvu, za projektovanje implanata.

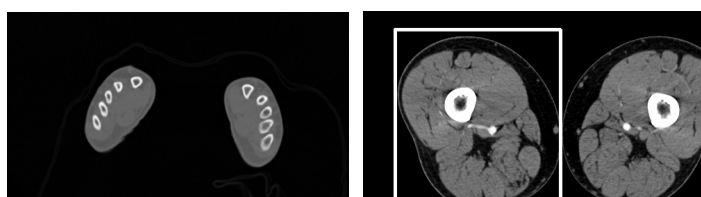
Postupak računarskog modeliranja kostiju se sastoji iz nekoliko faza koje prikazuje algoritam (slika 4).



Slika 4. Algoritam rekonstrukcije računarskog modela

Proces rekonstrukcije zahteva digitalne snimke željenog organa. Postupak snimanja već je ukratko opisan u prethodnom poglavlju. Tomografski snimci zapisuju se u datoteci koja omogućava prikaz, prostornu rekonstrukciju snimljenih organa i sadrži dopunske informacije o pacijentu i metodologiji snimanja. U praksi se snimci najčešće arhiviraju u tzv. DICOM (*Digital Imaging and Communication in Medicine*) format datoteke. Ovaj format je razvijen kao deo standarda koji omogućava da se medicinski snimci i informacije, načinjeni na jednoj opremi mogu koristiti na digitalnim sistemima drugih proizvođača, obuhvatajući sve funkcionalne aspekte digitalnih snimaka u oblasti medicine. Svi podaci o: pacijentu, medicinskoj opremi, komentari lekara se u DICOM formatu tretiraju kao objekte sa odgovarajućim atributima.

Prilikom učitavanja snimaka u DICOM formatu u odgovarajući programski sistem za rekonstrukciju, uvoze se cele datoteke sa više serija snimaka, koji su snimljeni na jednom pacijentu. Nakon toga, vrši se izbor željene serije (slika 5 levo). Pri tome dostupne su informacije o pacijentu i opremi, odnosno sve one informacije koje DICOM sadrži. Kod snimaka koji obuhvataju celo telo, rekonstrukcija počinje izborom onih snimaka koji pripadaju željenom organu. Da bi se izdvojila različita tkiva na snimku, neophodno je izvršiti segmentaciju snimka. Tačnost rekonstruisanog dela najviše zavisi od ove faze. Nakon učitavanja željene serije, vrši se identifikacija oblasti snimka koji pripada željenom organu (*Crop*), u ovom slučaju to je leva noga, odnosno leva butna kost (slika 5 desno).



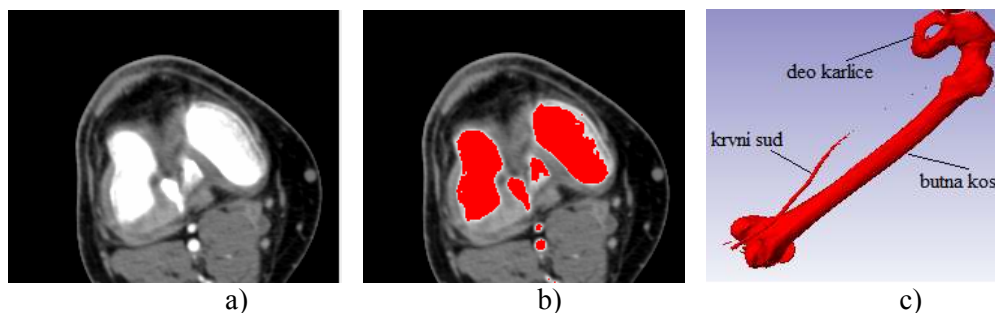
Slika 5. Učitavanje DICOM snimaka i izdvajanje željenog organa

Segmentacije može se podeliti na dve grupe [6]:

- Segmentacija zasnovana na rasterskom prikazu (*Raster-based segmentation*), identifikuju se pikseli na snimcima koji pripadaju odgovarajućim tkivima
- Vektorska segmentacija (*Vektor-based segmentation*), spoljašnja i unutrašnja granice tkiva generišu se u vektorskom obliku (linije, krive, poligoni...)

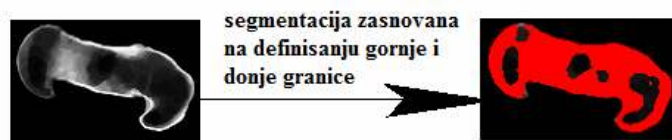
Najčešće korišćene metode segmentacije zasnovane na rasteru su: definisanje granice za segmentaciju (*Thresholding*) i metoda rasta regiona (*Region growing*).

U radu je korišćena rasterska metoda definisanja granice, u kojoj se definišu gornja i donja granica kontrasta piksela na snimku. Vrednosti kontrasta piksela na snimku za odgovarajuća tkiva su poznate, pa se ova metoda može koristiti za automatsku segmentaciju serije snimaka. Glavni nedostatak kod ove metode je nepovezanost između selektovanih piksela, pa se dešava da i drugi organi budu segmentovani, što je i prikazano na slici 6c (osim butne kosti, vidi se krvni sud i deo karlice). U ovakvim slučajevima može se vršiti uklanjanje neželjenih piksela ručno, snimak po snimak, što zahteva dosta vremena.

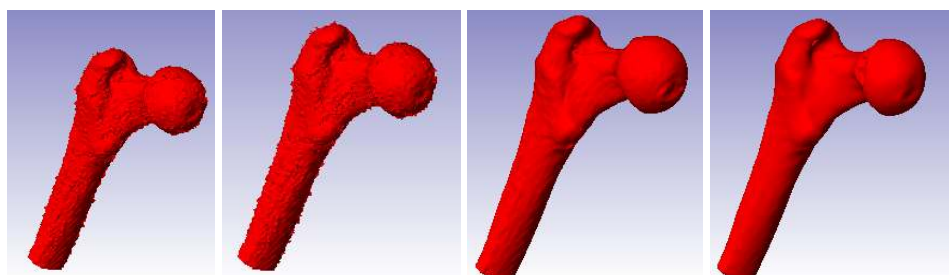


Slika 6. Segmentacija butne kosti

Nakon segmentacije i uklanjanja neželjenih piksela, površina modela sadrži nepravilnosti sa šupljinama i oštrim ivicama, pa je za njihovo ispravljanje neophodno izvršiti filtriranje. Na slici 7 je prikazano generisanje računarskog modela butne kosti, koji obuhvata segmentaciju (slika 7a), prevođenje površinskih elemenata-piksela, u zapreminske elemente - voksele (slika 7b) i filtriranje, koje obuhvata zatvaranje površina (slika 7c), zaobljavanje površina vodeći računa o topologiji i zapremini modela (slika 7d) kao i zaobljavanje pomoću Gausovog filtera (slika 7e).



a)



b)

c)

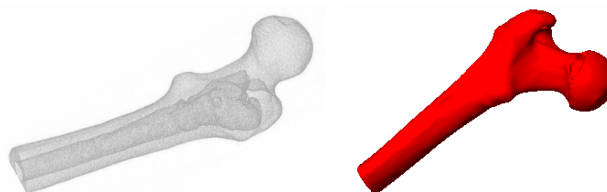
d)

e)

Slika 7. Proces generisanja računarskog modela butne kosti

Posle definisanja računarskog model, vrši se konverzija u različite formate zapisa geometrijskih podataka od kojih su najčešći: IGES, STEP, STL i oblak tačaka (*Point cloud*). Modeli sačuvani u IGES i STEP formatu koriste se kod CAD i CAE programskih paketa za projektovanje i anлізу. STL format se koristi na mašinama za brzu izradu prototipa. Oblak tačaka se takođe koristi na mašinama za brzu izradu prototipa, ali je to tekstualni format koji sadrži koordinate svih tačaka, pa zahteva naknadnu obradu u nekom programskom sistemu.

Na slici 8 je prikazan oblak tačaka (levo) i računarski model (desno). Kod oblaka tačaka se vidi i unutrašnjost butne kosti, odnosno medularni kanal.



Slika 8. Oblak tačaka i računarski model

Prikazani model je rekonstruisan za potrebe projektovanja totalne endoproteze zgloba kuka prema merama pacijenta.

Na slici 9 je prikazan sklop rekonstruisane butne kosti i tumorske endoproteze razvijen za nju.



Slika 9. Model butne kosti sa ugrađenom tumorskom endoprotezom [8]

4.0 ZAVRŠNA RAZMATRANJA

Savremena dijagnostička snimanja pored velike pouzdanosti u dijagnostikovanju oboljenja omogućavaju i rekonstrukciju prostornih računarskih modela. U radu su opisane najčešće primenjivane tomografske metode snimanja (CT i MRI). Na osnovu dobijenih snimaka sa ovih uređaja izvršena je prostorna rekonstrukcija butne kosti, koja služi za projektovanje tela endoproteze zgloba kuka (sa željenom tačnošću), uz mogućnost simulacije i analize njenog funkcionisanja u eksploatacionim uslovima. Pri prostornoj rekonstrukciji elemenata skeletnog sistema, jednu od najvažnijih uloga ima postupak obrade snimaka.

Zavisno od dobijenih računarskih modela, dizajn ortopedskih implanata zahteva sve veću tačnost, zbog proizvodnje što boljih implanata koji se uklapaju u anatomiju pacijenta. To je izraženo kako kod projektovanja i izrade tipskih implanata, tako i implanata rađenih po meri pacijenta. Za tipske implantate između ostalog bitna je i etnička i starosna grupa. Kod proteza po meri veliki broj parametara određen je spoljašnjom i unutrašnjom površinom butne kosti.

Savremena istraživanja za obradu medicinskih snimaka teku u više pravaca i to: usavršavanje postupaka snimanja, obrade digitalnih snimaka i rekonstrukcije površina, u cilju povećanja tačnosti računarskog modela.

5.0 LITERATURA

- [1] Baka, N., Kaptein, B. L., de Bruijne, M., van Walsum, T., Giphart, J. E., Niessen, W. J., Lelieveldt, B. P. F.: 2D–3D shape reconstruction of the distal femur from stereo X-ray imaging using statistical shape models, *Medical Image Analysis*, ISSN 1361-8415, Volume 15, Issue 6, Pages 840-850, 2011.
- [2] Biedert, R., Sigg, A., Gal, I., Gerber, H.: 3D representation of the surface topography of normal and dysplastic trochleausing MRI, *The Knee*, ISSN 0968-0160, Vol. 18, Issue 5, Pages 340-346, 2011.
- [3] Cahir, J., Toms, A., Marshall, T., Wimhurst, J., Nolan, J.: CT and MRI of hip arthroplasty, *Clinical Radiology*, ISSN: 0009-9260, Volume 62, Issue 12, Pages 1163-1171, 2007.
- [4] Fritscher, K.D., Grünerbl, A., Schubert, S.: 3D image segmentation using combined shape-intensity prior models, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Volume 1, Number 6, ISSN 11548-007-0070-z, Pages 341–350, 2007
- [5] Miller, T.: Imaging of hip arthroplasty, *European Journal of Radiology*, prihvaćeno za štampu 2011.
- [6] Milojević, Z., Tabaković, S., Navalušić, S., Zeljković, M., Vičević, M.: Analiza i usavršavanje postupaka obrade dijagnostičkih snimaka dobijenih primenom MRI i CT metode snimanja koštanog tkiva, *Studija u okviru projekta TR 35025, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011, 19 strana*
- [7] Radon, J.: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, *Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Bande 29, s. 262-277, Leipzig, 1917.*
- [8] Tabaković, S., Grujić, J., Bojanić, M., Zeljković, M., Sekulić, J.: Modeliranje medularnog kanala femura na osnovu digitalnog signala sa CT ili MRI u cilju dimenzionisanja stema tumorske endoproteze zgloba kuka, *Zbornik radova, Naučno-stručni simpozijum informacione tehnologije-Infoteh, Jahorina, ISBN 99938-624-2-8, 2012.*

MODELING OF ELEMENTS OF SKELETON SYSTEMS BASED ON MEDICAL IMAGES

Abstract: *Modeling of external and internal geometry of the femur is an important step in the process of designing hip arthroplasty, especially in cases where surgical intervention and implant installation only form of treatment.*

The data consists of a diagnostic image is recorded in a dedicated file that allows you to view, spatial Reconstruction recorded form and contains additional information about the patient and recording methodology. In practice most recordings are stored in so-called DICOM format.

The reconstruction process elements of the skeleton, organs or tissues based on the diagnostic image includes several stages: segmentation and spatial reconstruction of the recording, translating the surface elements (pixels) in the volume elements (voxels).

This paper describes the modeling elements of the skeletal system on the basis diagnostic image of the femur to the hip joint prosthesis design made to measure.

Keywords: *Tomography, Design, Endoprosthesis, DICOM*

NAPOMENA:

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici", TR 35025, podržanom od strane Ministarstva prosvete i nauke, Republike Srbije.



Slobodan Stupar, Ognjen Peković, Srđan Trivković, Nemanja Zorić¹

KONCEPTUALNI DIZAJN LAKE AMFIBIJSKE LETELICE²

Rezime

Uvidevši veliku popularnost rekreativnog letenja i probleme vezane za sertifikaciju aviona kategorije opšte avijacije, vazduhoplovne vlasti uvele su novu kategoriju letelica čija je osnovna namena letenje radi zadovoljstva. U ovom radu opisan je konceptualni dizajn jedne takve letelice koja se razvija na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Zamišljena kao praktična i jednostavna za upotrebu, letelica je amfibijskog tipa sa mogućnošću poletanja i sletanja sa vodenih i čvrstih površina. Sklopivih krila i sa uvlačećim stajnim trapom ova letelica pruža mogućnost jednostavnog čuvanja i transporta. Tokom izrade konceptualnog rešenja korišćeni su savremeni CAD/CAE alati u svim fazama projektovanja. Definisavanje i parametrizacija CAD modela olakšava promenu geometrije i pripremu tehničke dokumentacije za izradu prototipa.

1. UVOD

U cilju popunjavanja praznine između ultralakih letelica i letelica koje se svrstavaju u kategoriju opšte avijacije vazduhoplovne vlasti SAD uvele su novu kategoriju letelica, LSA (light sport aircraft) odnosno laka sportska letelica. Letelice ove kategorije mogu se proizvoditi u fabrikama kada se sertifikuju kao specijalne S-LSA ili se mogu praviti amaterski kada se sertifikuju kao eksperimentalne E-LSA letelice.

Iako je dozvoljeno i korišćenje u komercijalne svrhe, letelice S-LSA kategorije prevashodno služe kao letelice za rekreativnu upotrebu. Shodno tome, pojednostavljena je i procedura za dobijanje sportske pilotske dozvole za upravljanje ovim tipom letelica. Ljudi bez prethodne letačke obuke mogu dobiti dozvolu ukoliko ispune program obuke od 20 sati leta na ovom tipu letelice. Nova pravila značajno su pojeftinila i ubrzala postupak dobijanja dozvole, te je tako hiljadama vazduhoplovnih entuzijasta omogućeno da ispune letačke snove. Zahvaljujući velikom interesovanju letačke zajednice za letelice ovog tipa, za kratko vreme na tržištu se pojavio veliki broj aviona ove kategorije različitih konceptijskih i konstruktivnih karakteristika.

U ovom radu predstavljen je idejni projekat lake višenamenske amfibijske letelice koja se razvija na katedri za vazduhoplovstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

2. ANALIZA ZAHTEVA I PERFORMANSI

Letelica je zamišljena kao moderno, kompaktno, energetski efikasno i ekonomsko isplativo rešenje lakog višenamenskog dvoseda. Kako bi se povećala upotrebna vrednost, letelica je amfibijskog tipa, što omogućava poletanje i sletanje sa vodenih i čvrstih površina u skladu sa LSA standardima.

U cilju sertifikovanja letelice ovog tipa treba ispuniti striktno uslove po pitanju konstrukcije, težine i performansi. Upotrebom savremenih kompozitnih materijala za izradu letelice, minimizirana je težina i dobijena letelica atraktivnog dizajna sa upečatljivim vizuelnim identitetom.

¹ prof. dr Slobodan Stupar dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-242, e-mail: sstupar@mas.bg.ac.rs

Ognjen Peković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: opekovic@mas.bg.ac.rs

Srđan Trivković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: strivkovic@mas.bg.ac.rs

Nemanja Zorić dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: nzoric@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

Između ostalih, letelice kategorije LSA moraju da ispunjavaju sledeće uslove:

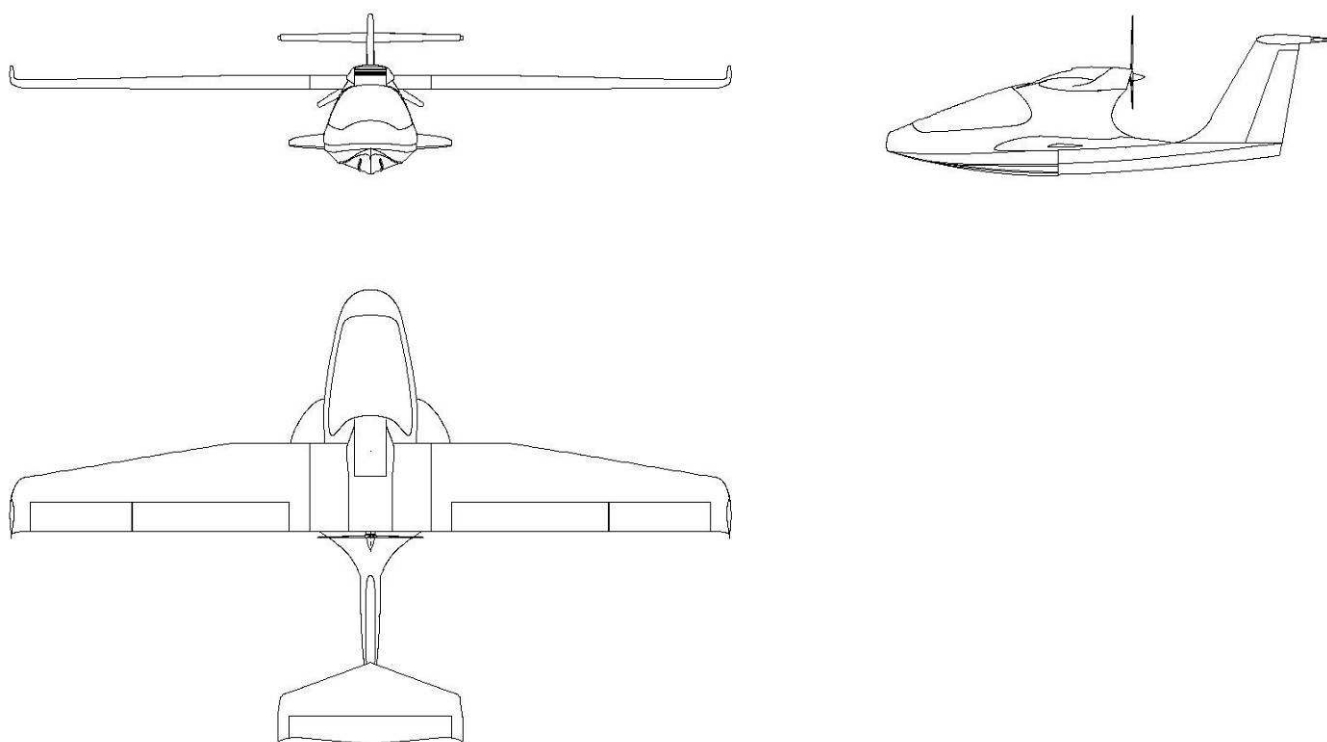
- maksimalna težina na poletanju ne sme biti veća od 650kg;
- minimalna brzina ne sme biti manja od 80km/h;
- maksimalna brzina krstarenja je ograničena na 220km/h;
- može da prevozi maksimalno 2 putnika uključujući i pilota;
- pogon letelice čini jedan klipni motor
- kabina ne sme biti pod pritiskom

Kako bi se olakšao transport i skladištenje letelice omogućeno je sklapanje krila što dodatno pojeftinjuje upotrebu budući da je transport moguće vršiti pomoću prikolice za putnički automobil, dok je za skladištenje potreban mnogo manji prostor tako da je letelicu moguće čuvati i u garažama putničkih automobila.

3. IZBOR KONFIGURACIJE I PRELIMINARNO DIMENZIONISANJE

Uspešno dimenzionisanje i procena performansi letelice rezultat su pravilno izvršenih aerodinamičkih analiza i analiza položaja masa i težišta letelice saglasno sa zahtevima koji proističu iz propisa i projektnog zadatka naručioca.

Na slici 1. prikazana je usvojena konfiguracija letelice. Avion je visokokrilac sa pogonskom grupom smeštenom iza kabinskog prostora tako da je elisa potisnog tipa. Repne površine su "T" tipa, odnosno horizontalni stabilizator smešten je na vrh vertikalnog stabilizatora. Na ovaj način minimiziran je uticaj vodenih kapljica pri poletanju i sletanju sa vodenih površina na upravljačke površine i pogonsku grupu. Dimenzije letelice date su u tabeli 1.



Slika 1.

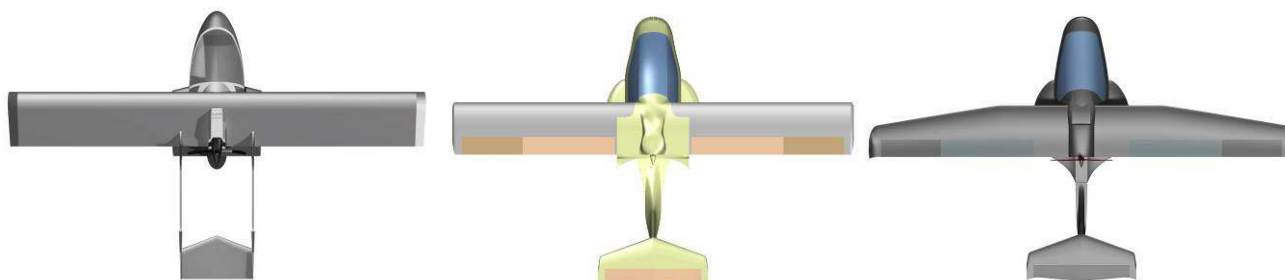
Projektovane aero i hidrodinamičke osobine letelice omogućavaju postizanje visokih performansi, malu dužinu poletno-sletne staze, smanjene aero i hidrodinamičke gubitke uz zadržavanje potrebne stabilnosti. Lak pristup kabini i povišena ergonomičnost same kabine uz velike transparentne površine, značajno podiže komfor letelice i doprinosi uživanju u pilotiranju. U cilju laganog održavanja vazduhoplova i njegovih sistema kapotaži su lako dostupni i jednostavni za uklanjanje.

- Masa prazne letelice	350 kg
- Maksimalna poletna masa.....	650 kg
- Dimenzije letelice:	
- Raspon krila.....	10.4 m
- Dužina	6.75 m
- Visina	2.3 m
- Širina kokpita	1.1 m
- Visina na prikolici.....	2.5 m
- Dužina na prikolici.....	8.5 m
- Širina na prikolici	2.6 m

Tabela 1.

4. IZRADA CAD MODELA LETELICE

Definisanje geometrije aviona je iterativan proces. Postavljeni zahtevi su najčešće proizvod razmatranja postojećih konstrukcija i njihovih performansi. Na osnovu definisanih zahteva pravi se koncept letelice koja zadovoljava te zahteve, međutim, kako geometrija letelice utiče na performanse, postavljeni zahtevi se u toku izrade idejnog rešenja menjaju čime se ulazi u novi iterativni ciklus. Na slici 2. prikazana su tri različita geometrijska rešenja za laki sportski avion.

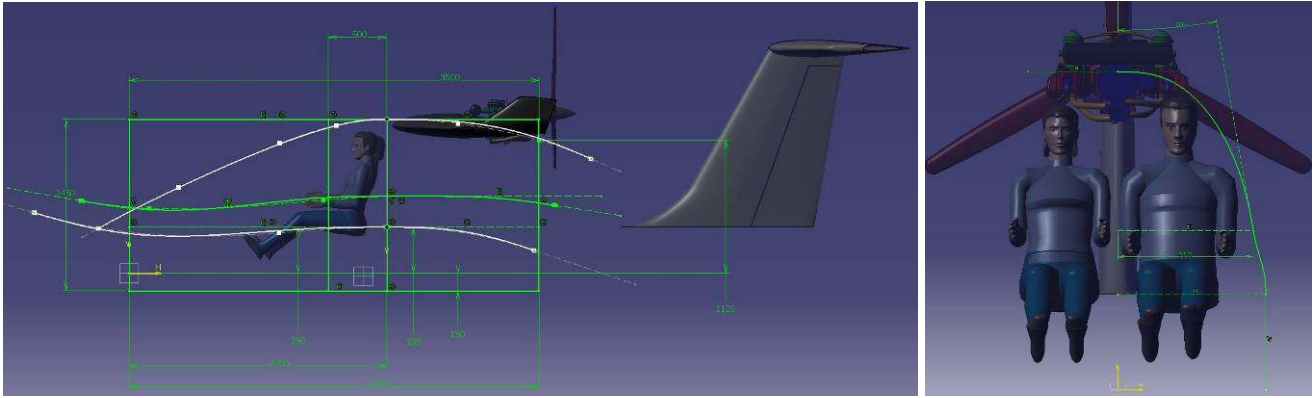


Slika 2.

Za razliku od nekih drugih oblasti tehnike, definisanje geometrije aviona zahteva da konstruktor bude obučan u različitim oblastima, pre svih aerodinamici, otpornosti materijala, sistemima upravljanja, pogonu letelica i tehnologijama proizvodnje budući da svojom geometrijom mora da odgovori na često oprečne zahteve koje nabrojane discipline postavljaju.

Projektovanje geometrije lake amfibijske letelice izvršeno je pomoću modernog CAD/CAM/CAE softverskog paketa CATIA V5. Ovaj softverski paket na jednom mestu nudi integrisane alate za 3D modeliranje, generisanje tehničke dokumentacije za izradu i montažu delova i sklopova, analizu strukture metodom konačnih elemenata kao i alate za generisanje koda za numerički upravljane mašine alatke. Zahvaljujući upotrebi modernog softvera i savremenog pristupa projektovanju koji podrazumeva korišćenje modernih tehnologija proizvodnje, analiza i izrada prototipova delova i sklopova je ubrzana pa su već u ranim fazama procesa projektovanja otklanjani problemi koji bi postali očigledni tek u zrelijim fazama projekta kada bi njihovo rešavanje bilo znatno skuplje.

Geometrija delova letelice izradena je korišćenjem modula "Generative Shape Analysis". Ovaj moduo namenjen je kreiranju složenih prostornih površi kakve su neophodne za pravljenje geometrije aviona. Raznovrsne opcije za izradu žičane "Wireframe" geometrije, napredne alatke za izradu površina kao i standardne opcije za transformacije elemenata (simetrija, razmera, translacija, rotacija...) omogućavaju kreiranje veoma složenih površina velikog kvaliteta. Zahvaljujući mogućnosti zadavanja odgovarajućih uslova na ivicama susednih površina kojima se definiše klasa kontinuiteta lako se dobijaju površine sa kontinuitetom klase C2, odnosno odličnim estetskim osobinama kao što su glatkoća, realna refleksija i sl. Posebnu pogodnost za konstruktora predstavlja fleksibilna 2D i 3D parametrizacija koja omogućava jednostavno menjanje dizajna promenom odgovarajućih parametara (slika 3).



Slika 3.

Zbog velikog značaja vizuelne prezentacije projekta većina modernih softverskih alata za 3D modelovanje sadrži i alate za izradu slika i animacija sa visokim nivoom detalja i tačnosti tekstura ("rendering"). Na ovaj način vešt dizajner može da predstavi svoj proizvod u okruženju u kojem će se i koristiti. U okviru CATIA V5 programskog paketa moduo "Photo Studio" omogućava kreiranje profesionalnih slika modela od ilustrativnog do potpuno realističnog nivoa. Zahvaljujući naprednim opcijama za podešavanje osvetljenja i izradu, modifikaciju i aplikaciju tekstura dizajner može izraditi slike vrhunskog kvaliteta za potrebe prezentacije i promocije proizvoda. Na slici 4. i 5. prikazan je model lake amfibijske letelice u svom "prirodnom" okruženju, vodi i vazduhu.



Slika 4.

5.ZAKLJUČAK

Zahvaljujući velikom razvoju računarskih metoda projektovanja i mogućnostima savremenih softverskih alata cena razvoja lakih letelica značajno je smanjena što se najbolje ogleda u velikom broju novih konstrukcija koje se nude na tržištu. Razvijanje konkurentne letelice iziskuje od dizajnera da koristi savremene metode projektovanja i tehnologije izrade, a od kompanija koje ih proizvode da ulažu dodatna sredstva u prezentaciju svojih letelica kako bi se izborile za udeo na tržištu.

U ovom radu prikazan je konceptualni dizajn lake amfibijske letelice pomoću paketa CATIA V5 i opisana je uloga savremenih inženjerskih softvera pri izradi konceptualnog rešenja letelice. Takođe ukazano je na mogućnosti CATIA V5 pri izradi realističnih slika letelice za potrebe prezentacije koncepta letelice, što je značajno za promociju projekta i može biti od koristi za prikupljanje sredstava za nastavak realizacije projekta.



Slika 5.

LITERATURA

1. CATIA V5 Documentation
2. Ullman D, *The Mechanical Design Process*, McGraw-Hill, 2010.
3. Raymer D, *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, AIAA, 1999.
4. Roskam J, *Airplane Design Part I: Preliminary Sizing Of Airplanes*, Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1989.

Abstract

CONCEPTUAL DESIGN OF LIGHT AMPHIBIOUS AIRCRAFT

Realizing great popularity of recreational flying, and problems related to certification of aircraft from general aviation category, aviation authorities have introduced a new category of aircraft with the main purpose of flying for pleasure. This paper presents the conceptual design of such an aircraft which is being developed at the Mechanical Engineering Faculty in Belgrade. Designed as a practical and easy to use, aircraft is amphibian with the ability to perform landings and takeoffs from water and solid surfaces. With foldable wings and retractable landing gear the aircraft is easy to store and transport. During the development of conceptual design modern CAD/CAE tools were used in all phases of design. Definition and parameterization of CAD model facilitates geometry changes and preparation of technical documentation for development of the prototype



Jelena Svorcan, Slobodan Stupar, Dragan Komarov, Nemanja Zorić¹

AUTOMATIZACIJA PROCESA MODELIRANJA LOPATICA VETROTURBINE U PROGRAMSKOM PAKETU CATIA²

Rezime:

Parametarsko modeliranje predstavlja jedan od mogućih pristupa automatizaciji procesa projektovanja novog ili unapređenja već postojećeg proizvoda. Model prvenstveno zavisi od relacija definisanih između njegovih sastavnih delova, dok je sama geometrija modela njihova posledica. Programski paket CATIA nudi nekoliko različitih nivoa automatizacije, od kojih je jedan stvaranje izvršnih tekstualnih fajlova - skriptova. Ovim radom opisan je skript kojim je moguće brzo i jednostavno generisati trodimenzionalni CAD model lopatica horizontalnih vetroturbina. Dobijeni model moguće je kasnije menjati standardnim alatima programskog paketa CATIA. Međusobna različitost modela lopatica postiže se unošenjem različitih ulaznih podataka kao što su korišćeni aeroprofil, prečnik rotora, tetiva, suženje i vitoperenje lopatice, broj lopatica, debljina oplata, itd.

1. UVOD

Klasični, prvobitni pristup modeliranju podrazumeva eksplicitno definisanje modela. Karakteristike modela, oblici i dimenzije, jasno su zadate, u većini slučajeva samostalno, a ne u zavisnosti od odnosa sa drugim delovima. Međutim, u fazi konceptualnog dizajna, model se najčešće nekoliko puta menja, analizira, i proračunava. Ponavljanjem tih koraka potrebno je u što kraćem vremenskom roku stići do što određenijeg i kompletnijeg modela. Parametarsko modeliranje predstavlja pristup projektovanju danas široko zastupljen koji može obezbediti visoku efikasnost u fazi konceptualnog dizajna.

Model prvenstveno zavisi od relacija definisanih između njegovih sastavnih delova. Generisanje modela vrši se eksplicitnim zadavanjem funkcija, pravila i/ili ograničenja dok je sama geometrija modela njihova direktna posledica. Promena neke od tih relacija najčešće se odražava na ceo model. Ovim pristupom moguće je generisati široki spektar varijantnih rešenja konstrukcije različitih oblika i dimenzija, u zavisnosti od ulaznih parametara. Treba imati u vidu da i ulazni parametri i definisane relacije mogu biti najrazličitijeg karaktera. Parametarsko modeliranje najčešće se primenjuje prilikom modeliranja novih i nekonvencionalnih objekata u oblastima kao što su vazduhoplovstvo [1], arhitektura [2], itd. Iz tog razloga, softverski paketi za projektovanje i modeliranje razvili su različite aplikacije kojima je ovakav pristup omogućen.

Automatizacija procesa modeliranja ima mnogostruke prednosti kao što su smanjenje potrebnog vremena i uloženog novca, povećana efikasnost i kvalitet kroz standardizaciju. Dodatna mogućnost prilagođenja programskog paketa za modeliranje korisniku takođe skraćuje vreme modeliranja i povećava efikasnost jer obezbeđuje bolju manipulaciju standardnim alatima i/ili pruža funkcionalnost koja nije originalno dostupna. CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) [3,4], razvijena od strane francuske

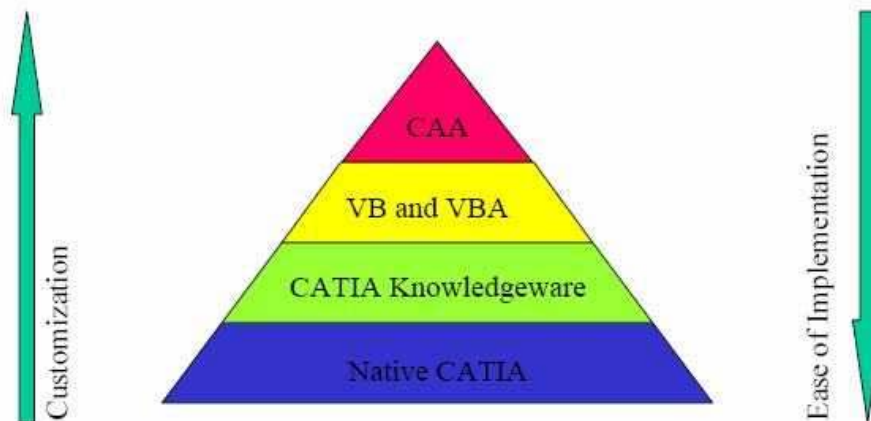
¹ Jelena Svorcan dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: jsvorcan@mas.bg.ac.rs
prof. dr Slobodan Stupar dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-242, email: sstupar@mas.bg.ac.rs
mr Dragan Komarov dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: dkomarov@mas.bg.ac.rs
Nemanja Zorić dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: nzoric@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

kompanije Dassault Systems, danas je jedan od najkompleksnijih i najviše korišćenih programskih paketa za projektovanje. Pored svojih osnovnih alata, nudi i mogućnost parametarskog modeliranja i mogućnost automatizacije procesa modeliranja. Realizacija automatizacije procesa modeliranja lopatica vetroturbine u takvom okruženju predstavlja temu ovog rada.

2. OSNOVNI PRISTUPI AUTOMATIZACIJI U CATIA-I

Struktura programskog paketa CATIA je slojevita [5], slika 1. Svaki sledeći nivo napredniji je od prethodnog i svaki nudi neke mogućnosti automatizacije, koje su takođe veće sa porastom nivoa ali i teže za implementaciju.



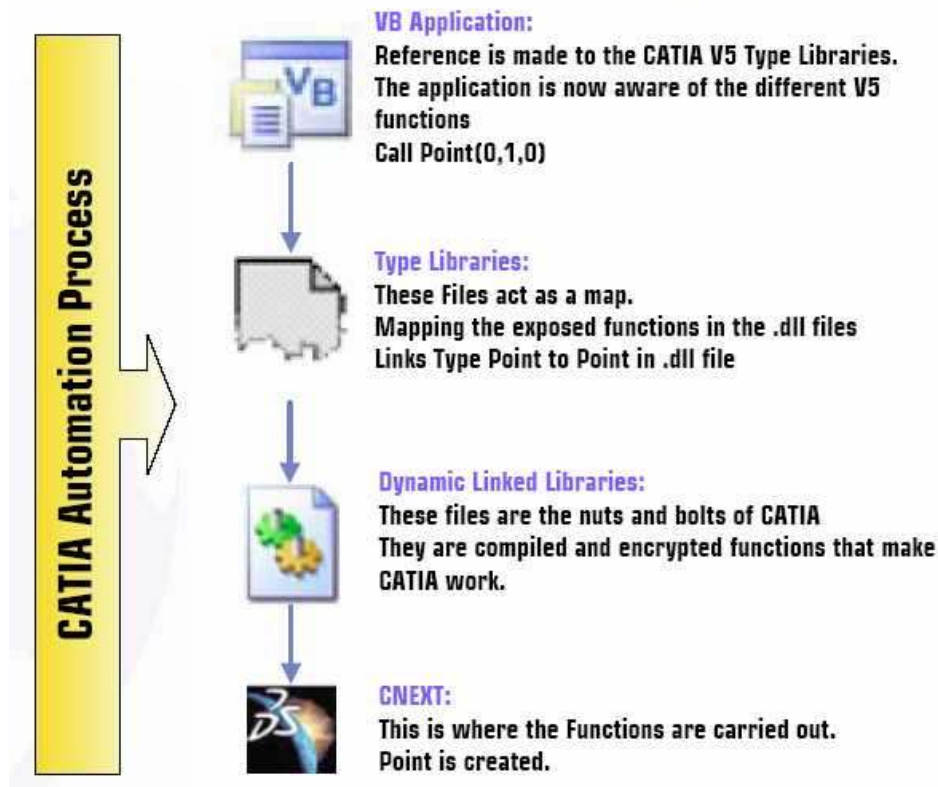
Slika 1: Slojevita struktura programskog paketa CATIA [5]

Prvi, bazični, osnovni nivo daje mogućnost kreiranja parametara (parameters), formula (formula), tabela podataka (design table), šablona (templates) i kopija (power copy). Parametri se stvaraju prilikom definisanja geometrije od strane CATIA-e ili mogu biti namenski stvoreni od strane korisnika. Formulama definišemo ograničenja ili relacije između parametara. Relacije takođe mogu biti zadate tabelarno (Excel, tekstualni fajlovi ili sama CATIA) i korišćene u tom formatu. Šabloni omogućuju naknadno menjanje i specifično korišćenje opšte definisanog dela, dok kopije pružaju mogućnost ponovnog korišćenja grupisanih elemenata (geometrijskih elemenata, formula, ograničenja, itd).

Sledeći nivo, CATIA Knowledgeware, predstavlja nadgradnju osnovnog nivoa. Pruža mogućnost eksplicitnog zadavanja implicitno zadatih parametara i formula sa prethodnog nivoa kao i novih elemenata, pravila (uslovne naredbe) i provera (ne vrše nikakvu radnju, već vraćaju povratnu informaciju). Veoma je koristan pri brzim procenama optimalnog dizajna modela sa puno parametara i ograničenja. Mane su, međutim, što nije naročito upotrebljiv kod veoma kompleksnih modela, nema mogućnost popravke i zahteva dodatne licence.

Treći nivo pruža mogućnost automatizacije pisanjem skriptova, tekstualnih fajlova, makroa - VB (na Windows platformi programski jezici u kojima se piše VBScript ili CATScript koji je razvijen od strane CATIA-e ali polako izlazi iz upotrebe) ili projekata - VBA (programski jezik u kom se piše Visual Basic for Applications) u kojima su navedeni nizovi funkcija koji se potom izvršavaju kao jedna komanda. Osnovne osobine VB-a su: pripadnost standardnom paketu CATIA-e (nisu potrebne nikakve dodatne licence u odnosu na prvobitno instalirani programski paket), mogućnost generisanja snimanjem izvršenih komandi, mogućnost neograničenog broja izvršavanja, ušteda vremena, ali takođe, donekle ograničene mogućnosti i fleksibilnost. Sa druge strane, VBA je takođe besplatan, nešto kompleksiji za pisanje ali pruža mogućnost grafičkog interfejsa, nudi veću fleksibilnost i kompleksnost modela, ali okruženje nije objektno orijentisano. Definisani skript može biti izvršen ili u okviru CATIA-e ili iz neke druge spoljašnje aplikacije, a takođe se može koristiti prilikom integracije CATIA-e sa drugim programskim paketom [6].

Ovakva automatizacije je moguća jer je deo objekata CATIA-e "javan" pa su manipulacije nad njima (stvaranje, menjanje, korišćenje, uništavanje) dozvoljene. Komunikacija između stvorenog skripta ili projekta i CATIA-e odvija se uz pomoć dva tipa fajlova, .dll (Dynamic Linked Libraries) i .tib (Type Library Files), koji se nalaze u direktorijumu UNLOAD za v5, slika 2. Napisani skript ili projekat predstavlja skup različitih manipulacija, funkcija nad dostupnim objektima, koje .tib fajlovi čine vidljivim za Windows i mapiraju u .dll fajlovima koji potom pokreću CATIA-u.



Slika 2: Komunikacija između VB/VBA i CATIA-e [5]

CAA (Computer Application Architecture) predstavlja finalni, sveobuhvatni nivo. Moćniji je od prethodnog nivoa VB/VBA, teži za učenje, pruža mogućnost manipulacije koja trenutno nije dostupna na trećem nivou, programski jezik u kome se piše je prevažno C++ (mada je i Java podržana). Glavne prednosti su isti kod i na Windows i na Unix platformi, dodatne mogućnosti i interaktivne komande, postojanje GUI-a.

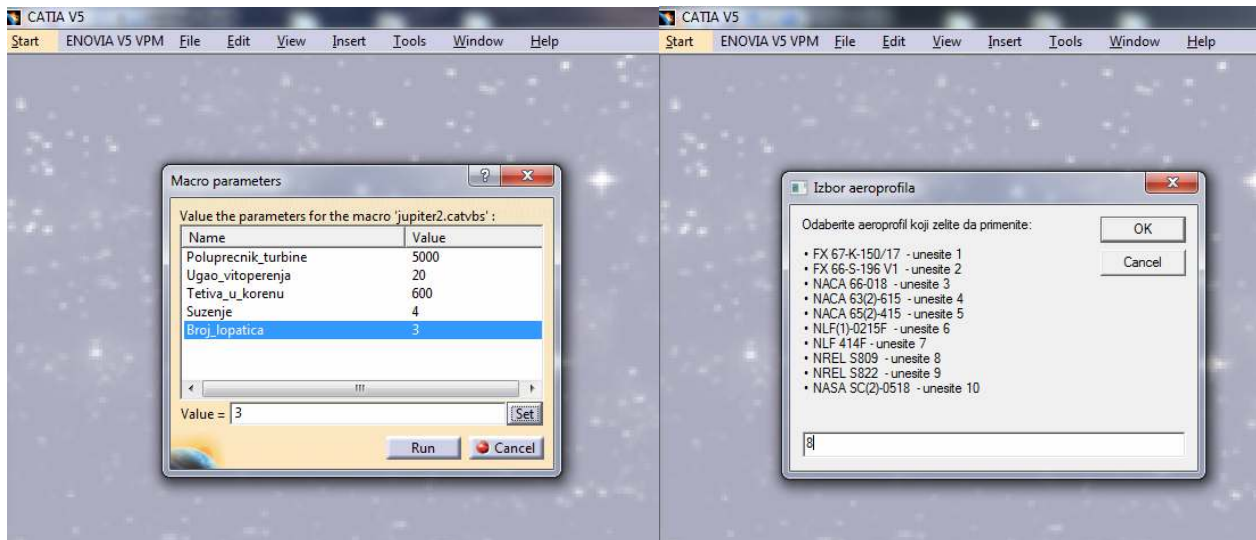
Analizom prednosti, mana i dostupnosti svakog od predstavljenih nivoa automatizacije, zaključeno je da se pisanjem VB skripta može postići dovoljna upravljivost i fleksibilnost prilikom brzog, preliminarnog generisanja trodimenzionalnog modela lopatica vetroturbine pa je jedan takav skript predstavljen u nastavku rada.

3. VB SKRIPT

Makro, izvršni tekstualni fajl, napisan je u programskom jeziku VBScript i poštuje njegovu formu i strukturu. Osnovna konstrukcija unutar programa je procedura, dok su osnovni ulazni i izvedeni parametri definisani kao globalne promenljive. VBScript ne podržava grafički interfejs, ali može da poziva prozore sa porukama i tekstualnim poljima, i tim putem se vrši unos podataka, ulaznih parametara (prečnik rotora, tetiva, suženje i vitoperenje lopatice i broj lopatica), slika 3. Dalje, program čita koordinate odabranog aeroprofila iz odgovarajuće datoteke.

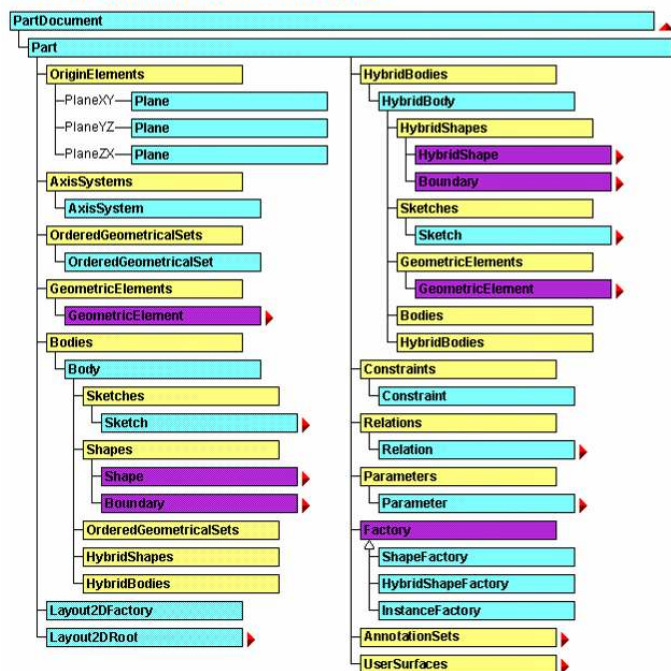
Svi generisani elementi, njihove osobine i međusobne relacije biće zabeležene u nadobjekat klase CATIA.Documents. Modul CATIA-e koji se koristi prilikom izvršavanja ovog skripta je Part Design, ali je takođe moguće koristiti bilo koji od brojnih postojećih modula kao i njihovu kombinaciju. Njegova struktura

(osnovne pripadajuće klase objekata) prikazana je na slici 4. Svaki od tih objekata ima svoje osobine i metode kojima je moguće manipulirati. Tako se na početku generiše složena kriva površ jedne lopatice koja je u korenom preseku, blizu ose obrtanja, kružnog poprečnog preseka, dok su ostali poprečni preseki oblika odabranog aeroprofila, skaliranog, transliranog i rotiranog za odgovarajuću vrednost u zavisnosti od mesta poprečnog preseka. Promena tetive duž podužne koordinate je prema krivim drugog reda. Program podržava elementarne matematičke operacije kao i uslovne i ciklične naredbe. Nakon definisanja površi lopatice, generisan je trodimenzionalan model lopatice koji je potom rotiran i kopiran za prvobitno zadat broj puta.



Slika 3: Unos podataka

Part Document Automation Objects



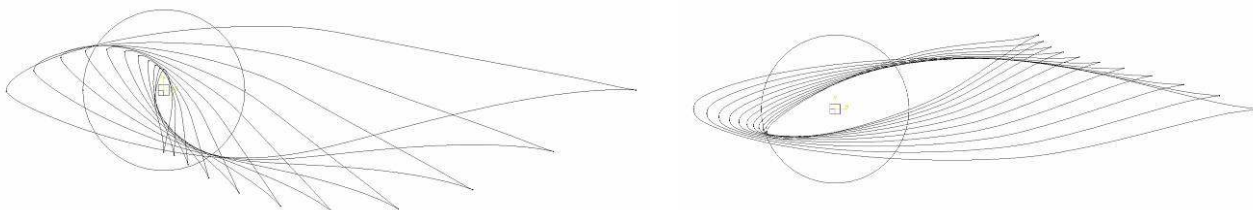
Legend
 Collection
 Abstract object
 Object

- [Circle2D](#)
- [Ellipse2D](#)
- [Hyperbola2D](#)
- [Line2D](#)
- [Parabola2D](#)
- [Spline2D](#)
- [Point2D](#)
 - [ControlPoint2D](#)
- [Group](#)
- [HomePosition](#)
- [HybridBody](#)
- [HybridShape](#)
 - [HybridShape3DCurveOffset](#)
 - [HybridShapeAffinity](#)
 - [HybridShapeAssemble](#)
 - [HybridShapeAxisLine](#)
 - [HybridShapeAxisToAxis](#)
 - [HybridShapeBlend](#)
 - [HybridShapeBoundary](#)
 - [HybridShapeBump](#)
 - [HybridShapeCircle](#)
 - [HybridShapeCircle2PointsRad](#)
 - [HybridShapeCircle3Points](#)
 - [HybridShapeCircleBitangentPoint](#)
 - [HybridShapeCircleBitangentRadius](#)
 - [HybridShapeCircleCenterAxis](#)
 - [HybridShapeCircleCenterTangent](#)
 - [HybridShapeCircleCtrPt](#)
 - [HybridShapeCircleCtrRad](#)
 - [HybridShapeCircleExplicit](#)
 - [HybridShapeCircleTritangent](#)
 - [HybridShapeCombine](#)
 - [HybridShapeConic](#)

Slika 4: Osnovne klase objekata osnovnog objekta Part i primer hijerarhije objekata [4]

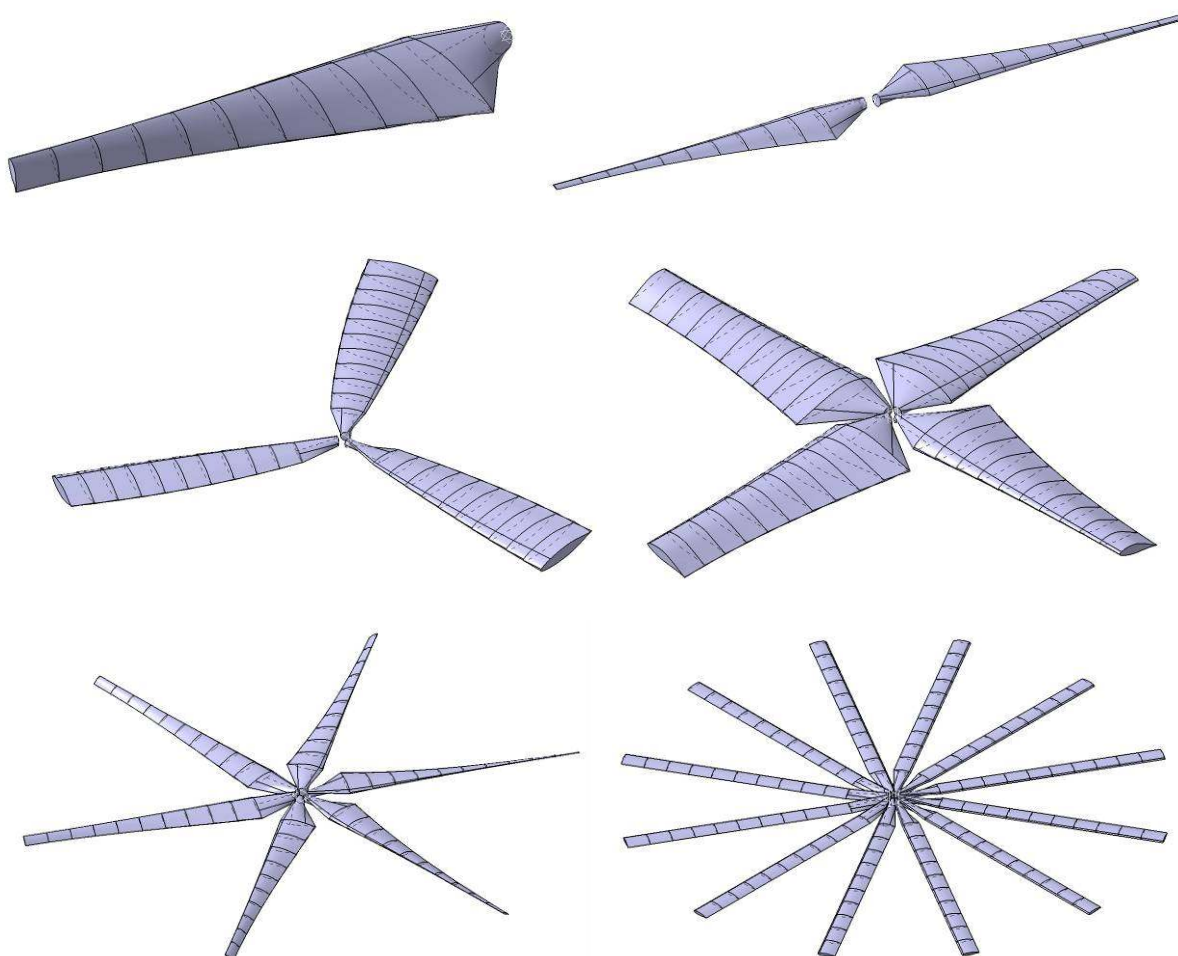
4. GENERISANI MODELI - FAMILIJA MODELA

Izvršavanjem skripta moguće je veoma brzo generisati proizvoljan broj modela, koji su slični u smislu da su svi modelirani prema istim zadatim pravilima. Oblik lopatice je definisan za interval relativnog poluprečnika od 2 do 95%, prvi presek je kružan prečnika 3.2% poluprečnika rotora dok je sledećih 11-oblika aeroprofila ravnomerno raspoređeno između 16-95% poluprečnika rotora, dužinu tetive, suženje i vitoperenost zadaje korisnik. Generisane lopatice se mogu razlikovati po korišćenim aeroprofilima, u trenutnoj verziji moguće je izabrati između 10 ponuđenih, slika 3, ali bi jednostavnom modifikacijom bilo moguće priključiti bilo koji aeroprofil čije su koordinate poznate. Dalje, vrednosti ulaznih parametara su potpuno proizvoljne ako se unose brojne vrednosti tako da je moguće dobiti veoma različite geometrije, primer prikazan na slici 5.



Slika 5: Primeri poprečnih preseka dva različita modela - aeroprofil NREL s809, vitoperenje 90° , suženje 10 i aeroprofil NACA 66-018, vitoperenje -20° , suženje 2

Još veći spektar različitosti moguće je uočiti prilikom poređenja gotovih trodimenzionalnih modela, neki od najzanimljivijih primera prikazani su na slici 6.



Slika 6: Primeri generisanih modela

5. ZAKLJUČAK

Rad prikazuje mogućnosti i korake prilikom jednog tipa automatizacije procesa modeliranja u programskom paketu CATIA i ovom prilikom primenjen je na modeliranje lopatica vetroturbin. Međutim, realne mogućnosti koje CATIA pruža su mnogo veće. Postoji detaljna dokumentacija o svakoj od klasa objekata koje je moguće koristiti, o njihovim svojstvima, metodama i međusobnim vezama, te svaki korisnik može relativno brzo napisati skript prilagođen sopstvenim potrebama. Naravno, u zavisnosti od problematike, mogući su i niži i viši nivoi automatizacije. Prednost izabranog metoda je što ga je relativno jednostavno kreirati, a vrlo je upotrebljiv. Mane su takođe pomenute, nepostojanje grafičkog interfejsa, što je moguće lako prevazići stvaranjem VBA projekta i nemogućnost korišćenja svake opcije ili objekta, npr. nije moguće definisati materijal generisanog modela preko skripta. Taj problem moguće je prevazići CAA nivoom. Prikazani skript moguće je dalje unaprediti, npr. dati veću slobodu korisniku prilikom modeliranja površi lopatice jer je reč o složenoj i nestandardnoj geometriji, ili uvođenjem sklopa koji bi sadržao i druge sastavne elemente kao što su ramenjača ili glavčina rotora i definisanjem njihovih međusobnih položaja.

LITERATURA

1. Ledermann C, Hanske C, Wenzel J, Ermanni P, Kelm R, Associative parametric CAE methods in the aircraft pre-design, *Aerospace Science and Technology* 9 (2005), 641-651
2. Katz N, Parametric Modeling in AutoCAD, *AECbytes Viewpoint* 32
3. www.3ds.com/products/catia
4. CATIA Documentation, Version 5 Release 19, Dessault Systems
5. www.catiatutor.com/CAA-V5/Basic-Concepts-of-CAA-V5
6. Hurlimann F, Kelm R, Dugas M, Oltmann K, Kress G, Mass estimation of transport aircraft wingbox structures with a CAD/CAE-based multidisciplinary process, *Aerospace Science and Technology* 15 (2011), 323-333

AUTOMATION OF HORIZONTAL WIND TURBINE BLADES MODELING PROCESS USING CATIA

Abstract:

Parametric modeling presents one possible approach to design automation when modeling a new or improving an existing product. Model primarily depends on relations defined between its components, and its geometry is their direct consequence. Software package CATIA offers several different levels of automation, and one option is to create executable text files - scripts. This paper describes a script that enables quick and simple generation of tridimensional CAD horizontal wind turbine blades model. Further improvements of the generated model by standard CATIA tools are also possible. Mutual differences between the blades models are achieved with different input parameters such as airfoil, rotor diameter, chord length, taper and twist, number of blades, sheet thickness, etc.



Dragan Komarov, Slobodan Stupar, Aleksandar Simonović, Marija Stanojević¹

PARAMETRIZACIJA ELEMENATA LOPATICE VETROTURBINE PRIMENOM CST METODE²

Rezime

U radu je opisan postupak modeliranja površina lopatice vetroturbine parametrizacijom odgovarajućih preseka CST (Class-Shape Transformation) metodom. Pomenuta metoda daje relativno dobre rezultate za manji broj parametara u poređenju sa drugim načinima parametrizacije, npr. primenom Bezijeovih krivih. Definisani su koeficijenti parametarskog modela koji su potrebni za određivanje parametara i jednoznačno određivanje geometrije. Jednačine su primenjene u okviru programskog okruženja CATIA v5 za definisanje geometrije lopatice rotora vetroturbine.

Cljučne reči: parametrizacija, CST metoda, lopatica vetroturbine

1. UVOD

Metodologija projektovanja lopatica vetroturbin u fazi konceptualnog razvoja podrazumeva definisanje dimenzija i oblika prema postavljenim projektnim zahtevima, kao što su namena, nominalna snaga, godišnja proizvodnja energije, projektovani radni vek, cena proizvedene energije, dostupne tehnologije i materijali za proizvodnju itd. Između ostalog, problem projektovanja i pronalaženja optimalnog oblika lopatice zavisi od procene resursa vetra date lokacije, nominalne snage, izbora elektrogeneratora i načina vezivanja vetroturbin na elektroenergetski sistem. S obzirom da se pri projektovanju vetroturbin mora imati na umu kompletno radno područje, kao i višeznačnost rešenja, može se steći slika o kompleksnosti pronalaženja optimalnog oblika lopatice prema postavljenim zahtevima i ograničenjima u pogledu strukturalnih karakteristika koje su u praksi ostvarive. U iterativnom postupku, za zadati resurs vetra, potrebno je pronaći optimalno konceptualno rešenje koje se u kasnijim fazama projektovanja detaljno razrađuje. Geometrija lopatice definiše se na osnovu izvršenih proračuna aerodinamičkih i drugih opterećenja, pri čemu se najčešće teži postizanju optimalnog rešenja u smislu maksimalnog iskorišćenja raspoloživog resursa vetra uz ostvarivanje minimalne mase lopatice poštujući ograničenja u pogledu čvrstoće, dostupnih materijala, tehnologija izrade, finansijskih i drugih resursa.

Imajući u vidu interdisciplinarnost izloženog problema, kako u fazi konceptualnog razvoja, tako i u kasnijim fazama, metodologija projektovanja lopatica vetroturbin bi trebalo da ima mogućnosti jednoznačnog definisanja geometrije, njenih jednostavnih izmena i ostvarivanja komunikacije između različitih procesa u toku projektovanja, odnosno različitih softverskih alata potrebnih za modeliranje geometrije, numeričke analize, optimizaciju itd. Konceptualni razvoj može biti zasnovan na različitim metodama koje se oslanjaju na postojeće CAD sisteme ili predstavljaju samostalne razvojne alate [1-3]. Za oba pristupa zajednička je parametrizacija geometrije koja bitno utiče na realizaciju svih aktivnosti u toku konceptualnog razvoja.

Parametrizaciju lopatice moguće je izvršiti na različite načine [4,5]. CST (Class-Shape Transformation) metoda pripada grupi metoda parametrizacije koje su bazirane na primeni polinoma, čime je omogućeno definisanje kontinualnih oblika relativno malim brojem parametara, što je od posebnog značaja za realizaciju aerodinamičke i strukturalne optimizacije lopatica vetroturbin u kasnijim fazama projektovanja.

¹ mr Dragan Komarov, Mašinski fakultet Beograd, tel. 3302-345, email: dkomarov@mas.bg.ac.rs
prof. dr Slobodan Stupar, Mašinski fakultet Beograd, tel. 3302-242, email: sstupar@mas.bg.ac.rs
doc. dr Aleksandar Simonović, Mašinski fakultet Beograd, tel. 3302-345, email: asimonovic@mas.bg.ac.rs
mr Marija Stanojević, Mašinski fakultet Beograd, tel. 3302-345, email: mzstanojevic@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

2. CST METODA PARAMETRIZACIJE

Kriva u ravni može se predstaviti proizvodom dva polinoma: $C(x)$ koji predstavlja funkciju klase i $S(x)$ koja predstavlja funkciju oblika [6,7]. Opšti oblik krive u tom slučaju je:

$$y = C(x)S(x) \quad (1)$$

Funkcija klase može biti oblika:

$$C(x) = x^{N_1}(1-x)^{N_2} \quad (2)$$

gde je tip krive definisan koeficijentima N_1 i N_2 .

Funkcija klase je u opštem slučaju proizvoljna, ali se obično uzimaju poznate analitičke funkcije koje odgovaraju nameni (matematički opis krivih i parametrizacija). Vrednostima $N_1=0.5$ i $N_2=1$ određena je funkcija klase koja dobro opisuje NACA aeroprofile sa zaobljenom napadnom ivicom.

U primeni za aeroprofile funkcije oblika su najčešće ponderisani Bernštajnovi polinomi:

$$S(x) = \sum_{i=0}^n [b_i J_{i,n}(x)] = \sum_{i=0}^n \left[b_i \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \right] \quad (3)$$

gde su $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ i x - vrednost svedena na dužinu tetive.

Krive gornjake i donjake aeroprofila definišu se jednačinom oblika:

$$y = C(x)S(x) + x\Delta y_{TE} \quad (4)$$

Δy_{TE} - debljina izlazne ivice aeroprofila

Tada član $S(0)$ definiše relativnu vrednost prečnika zaobljenja:

$$y(0) = \sqrt{\frac{2R_{LE}}{t}} \quad (5)$$

gde su R_{LE} – poluprečnik zaobljenja napadne ivice, a t – dužina tetive aeroprofila.

Slično, vrednost funkcije $y(1)$ definiše ugao između tetive i tangente parametrizovane krive u tački $x=1$ i relativnu debljinu izlazne ivice aeroprofila:

$$y(1) = tg\beta + \frac{\Delta y_{TE}}{t} \quad (6)$$

U opštem slučaju za parametrizaciju aeroprofila potrebno je matematički definisati gornjaku i donjaku, tako da će aeroprofil biti parametrizovan sa $n+m$ parametara pri čemu su m i n redovi Bernštajnovog polinoma za parametrizaciju gornjake i donjake, respektivno:

$$y(x) = x^{N_1}(1-x)^{N_2} \cdot \sum_{i=0}^n [b_{iD} J_{i,n}(x)] + x\Delta y_{TE} \quad (7)$$

$$y(x) = x^{N_1}(1-x)^{N_2} \cdot \sum_{i=0}^m [b_{iG} J_{i,n}(x)] + x\Delta y_{TE} \quad (8)$$

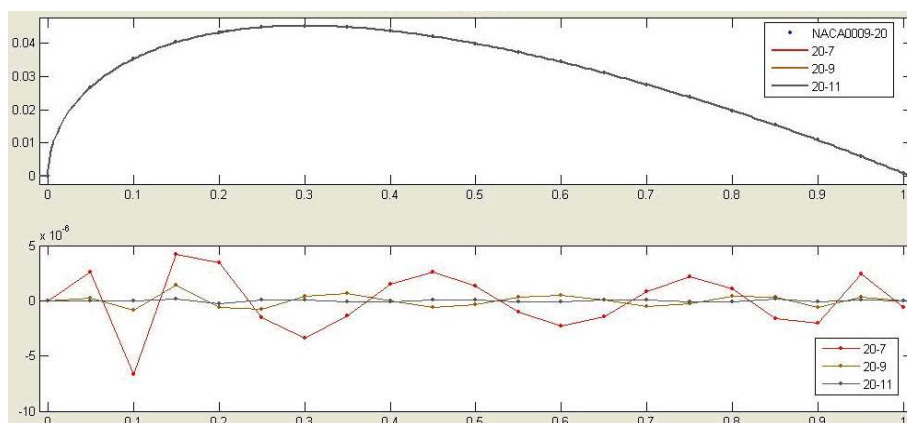
b_{iD}, b_{iG} - parametri donjake i gornjake.

U poređenju sa parametrizacijom Bezijevovim krivama, CST metoda daje bolje rezultate pri čemu je moguće opisati geometriju manjim brojem parametara [8].

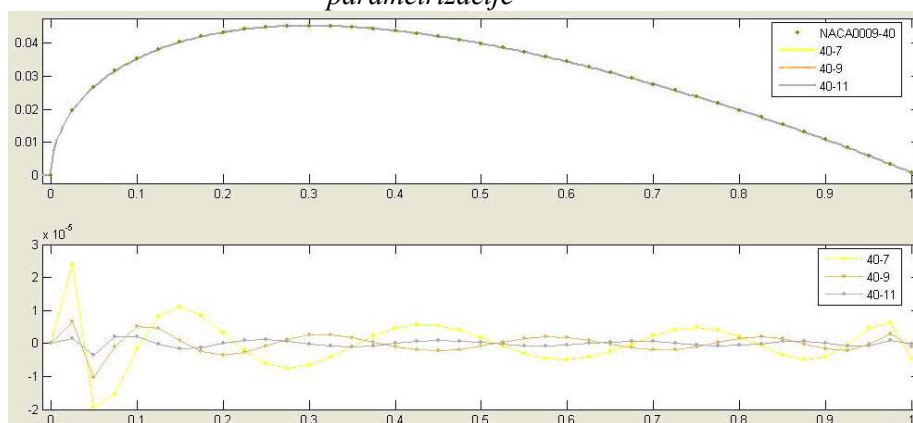
3. PARAMETRIZACIJA AEROPROFILA ZADATIH TAČKAMA

Prikazanom metodom parametrizacije moguće je analitički definisati poznate aeroprofile koji su zadati parovima koordinata koristeći metodu najmanjih kvadrata. U ovom slučaju parametrizacijom se dobija mogućnost generisanja dodatnih tačaka za aeroprofile čiji analitički oblik nije poznat u oblastima velike zakrivljenosti, odnosno napadne i izlazne ivice, postizanja veće tačnosti za pripremu modela potrebnih za numeričke analize i optimizaciju, kao i za kvalitetnu pripremu CAD modela za izradu.

Na slikama 1 – 3 prikazan je parametrizovan simetrični aeroprofil NACA0009 u cilju provere tačnosti metode parametrizacije. Na dijagramima koji su dati uz parametrizovane aeroprofile prikazane su razlike zadatih vrednosti tačkama i parametrizovanog oblika. Izvršena je parametrizacija koristeći tri skupa tačaka kojima je definisan aeroprofil (20 tačaka – slika 1, 40 tačaka – slika 2, 50 tačaka), pri čemu su korišćeni Bernštajnovi polinomi sedmog, devetog i jedanaestog reda. Na slici 3 dat je uporedni prikaz parametrizovanog aeroprofila 5. stepenom Bernštajnovog polinoma za inicijalni oblik definisan različitim brojem tačaka. Greška parametrizacije u oblasti napadne ivice aeroprofila, koja se povećava sa brojem tačaka kojima je aeroprofil inicijalno definisan, bi se mogla smanjiti korišćenjem skupa podataka koji imaju veću gustinu u pomenutoj oblasti.

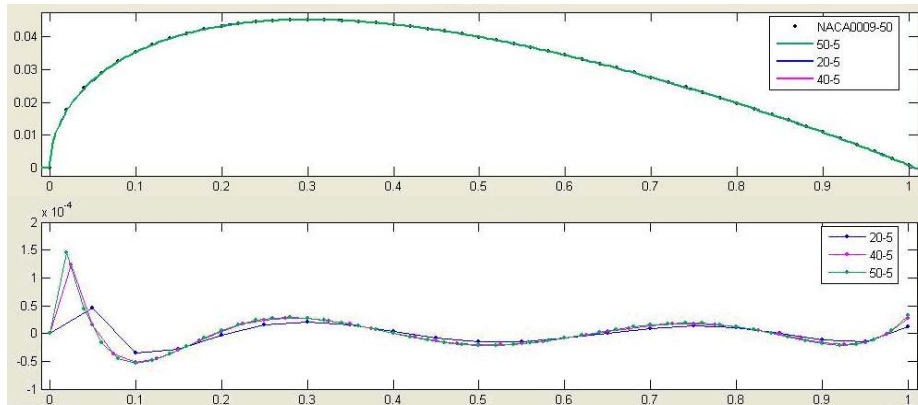


Slika 1. Parametrizovan aeroprofil NACA0009 inicijalno definisan sa 20 tačaka i greška parametrizacije

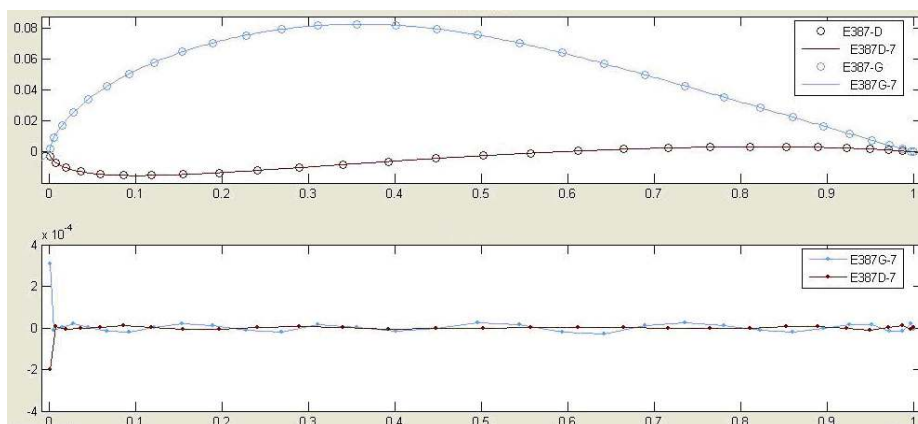


Slika 2. Parametrizovan aeroprofil NACA0009 inicijalno definisan sa 40 tačaka i greška parametrizacije

Na slikama 4 i 5 prikazani su parametrizovani aeroprofile E387 i FX63-137. Gornjaka i donjaka aeroprofila E387 inicijalno su određeni sa po trideset tačaka. Parametrizacija je izvršena primenom Bernštajnovog polinoma sedmog reda.

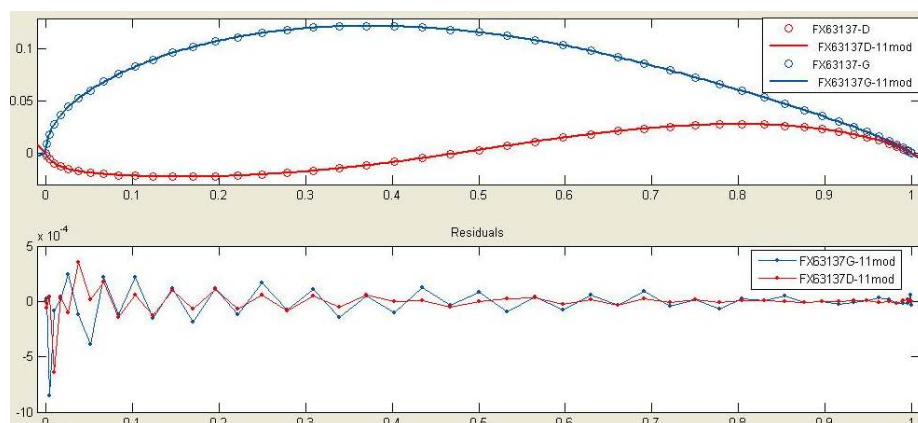


Slika 3. Parametrizovan aeroprofil NACA0009 polinomom 5. stepena za različite brojeve tačaka i greška parametrizacije



Slika 4. Parametrizovani gornjaka i donjaka aeroprofila E387 inicijalno definisani sa po 30 tačaka i greška parametrizacije

Gornjaka i donjaka aeroprofila FX63-137 inicijalno su određeni sa po pedeset tačaka. Parametrizacija donjake izvršena je primenom Bernštajnovog polinoma jedanaestog reda, dok je parametrizacija gornjake izvršena polinomom sedmog reda.

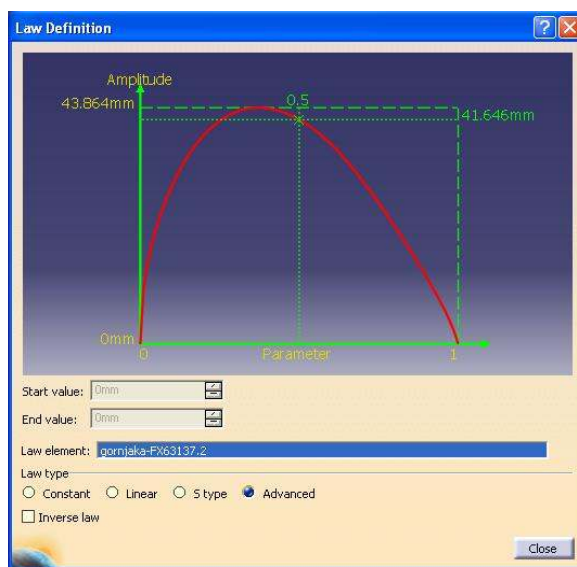


Slika 5. Parametrizovani gornjaka i donjaka aeroprofila FX63-137 inicijalno definisani sa po 50 tačaka i greška parametrizacije

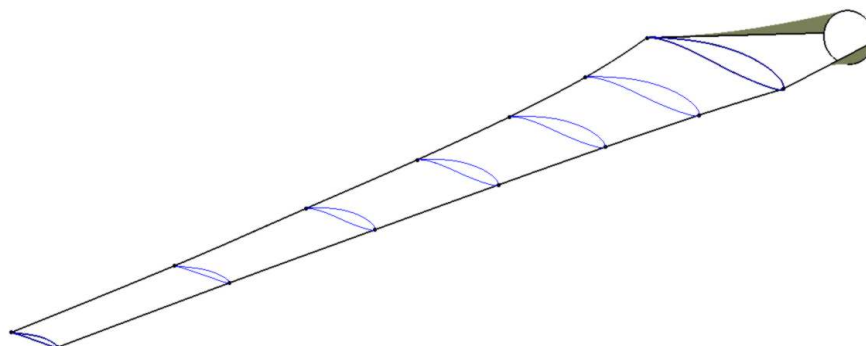
Pri nedovoljnoj rezoluciji tačaka u oblasti napadne ivice, na grešku parametrizacije moguće je uticati modifikacijama koeficijenta funkcije klase N_1 (jednačina 2), pri čemu treba imati na umu kontinualnost krivih u tački $x=0$. Pri parametrizaciji donjake aeroprofila FX63-173 korišćena je vrednost koeficijenta $N_1=0.55$.

4. MODELIRANJE GEOMETRIJE LOPATICE

Prikazanu metodu parametrizacije moguće je primeniti za razvoj modela lopatice u CAD softveru. Preseci, odnosno elementi lopatica zadati su prikazanim jednačinama i parametrima određenim metodom najmanjih kvadrata za aeroprofile FX63-137 i E387 prethodno definisanim tačkama. U programskom paketu CATIA v5 jednačine sa parametrima moguće je implementirati primenom alata za zadavanje zakona promene definisanih veličina i alata Parallel Surface modula Generative Surface Design, slika 6. Model lopatice prikazan je na slici 7.



Slika 6. Definisavanje zakona promene debljine aeroprofila u CAD sistemu CATIA v5



Slika 7. Parametrizovani preseci lopatice

5. ZAKLJUČAK

U radu je primenjena CST metoda parametrizacije zasnovana na Bernštajnovim polinomima za modeliranje elemenata lopatice vetroturbine. Metoda je posebno prilagođena za parametrizaciju aeroprofilisanih oblika. Parametrizacija se uspešno može iskoristiti za aproksimiranje aeroprofila koji su zadati tačkama, njihovu optimizaciju prema različitim kriterijumima, kao i za definisanje novih. Preporučene vrednosti koeficijenata funkcije klase N_1 i N_2 daju dobre rezultate za aeroprofile iz četvorocifrene serije NACA aeroprofila. Pomenuti koeficijenti mogu se modifikovati u cilju postizanja bolje aproksimacije različitih aeroprofila, pri čemu treba imati na umu postizanje kontinualnosti na napadnoj i izlaznoj ivici aeroprofila.

U zavisnosti od aeroprofila i kvaliteta ulaznih podataka tačnost aproksimacije reda veličine 10^{-6} postiže se polinomima 7. do 11. reda što je najčešće dovoljna tačnost i za najzahtevnije primene u oblasti numeričkih simulacija i optimizacije.

Parametrizovani aeroprofil E387 i FX63-137 iskorišćeni su za modeliranje geometrije lopatice dužine 3,75 m. Ostvarena je mogućnost brzog i efikasnog modeliranja geometrije lopatice uz visoku preciznost. Analitički zadate krive obezbeđuju olakšanu komunikaciju različitih softverskih paketa za modeliranje, numeričku analizu i optimizaciju.

LITERATURA

- [1] T. G. Chiciudean et al. A Knowledge Based Engineering Approach to Support Automatic Design of Wind Turbine Blades. CIRP Design Conference. 2008
- [2] D. L. Suwaratana, D. L. Rodriguez. A More Efficient Conceptual Design Process Using the RAGE Geometry Modeler. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Orlando, 2011.
- [3] K.-H. Chang, P.-S. Tang. Integration of design and manufacturing for structural shape optimization. Advances in Engineering Software 32 (2001) 555-567.
- [4] J. Samareh. A survey of shape parameterization techniques. CEAS/AIAA/ICAS NASA Langley International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics. Williamsburg, 1999.
- [5] A. Mousavi, S. Nadarajah, P. Castonguay. Survey of Shape Parameterization Techniques and its Effect on Three-Dimensional Aerodynamic Shape Optimization. AIAA 37th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA-2007-3837. Miami, 2007.
- [6] B. Kulfan. Universal parametric geometry representation method, Journal of aircraft, vol. 45, no. 1, 2008
- [7] K. A. Lane, D. Marshall. A Surface Parameterization Method for Airfoil Optimization and High Lift 2D Geometries Utilizing the CST Methodology. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, 2009.
- [8] D. Komarov, S. Stupar, A. Simonović, N. Zorić. Parametrizacija familije aeroprofila za koreni deo lopatice vetroturbine. 37. JUPITER konferencija, Mašinski fakultet Beograd, 2011.

Abstract

PARAMETERIZATION OF WIND TURBINE BLADE SECTIONS BY CLASS SHAPE TRANSFORMATION METHOD

The methodology of wind turbine blade surfaces modeling by parameterization of corresponding blade sections using Class-Shape Transformation (CST) method was described in the paper. The method provides relatively good results with reduced number of parameters in comparison with other parameterization methods, such as Bezier curves. Necessary coefficients of the parameterization model were defined in order to determine parameters for unique determination of the blade geometry. Equations were applied in CATIA v5 for definition of wind turbine blade geometry.

Keywords: parameterization, CST method, wind turbine blade



Aleksandar Simonović, Vuk Dragović, Ognjen Peković, Velimir Radosavljević¹

PRIMENA INŽENJERSKIH SOFTVERA PRI PROJEKTOVANJU KOMPOZITNIH KOMPONENATA VETROTURBINE²

Rezime

Zbog svojih višestrukih prednosti u odnosu na metale, primena kompozitnih materijala u proizvodnji lopatica vetroturbin je veoma rasprostranjena. Velika kompleksnost projektovanja, analize i izrade odgovornih delova od kompozitnih materijala rezultovala je pojavom brojnih softverskih alata koji se bave različitim fazama projektovanja i izrade kompozitnih delova. Korišćenjem posebnog modula za kompozitne konstrukcije u okviru programskog paketa CATIA V5 moguće je efikasno konstruisati kompozitne delove. U ovom radu prikazan je proces preliminarnog projektovanja kompozitne lopatice vetroturbine primenom paketa CATIA V5 i ukazano je na dalje mogućnosti korišćenja CATIA-e pri izradi glavnog projekta lopatice.

1. UVOD

Kompozitni materijali su kombinacija dva ili više materijala, različitih fizičkih i hemijskih svojstava među kojima nakon spajanja ostaje prepoznatljiva fizička granica na makroskopskom i mikroskopskom nivou. Nakon izrade kompoziti poseduju superiornije strukturalne karakteristike u odnosu na pojedinačne materijale od kojih su napravljeni. Kompozitni materijali (a posebno vlaknima ojačani kompozitni materijali) našli su veliku primenu u avio i auto industriji, brodogradnji, procesnoj tehnici i dr. Vlaknima ojačani kompozitni materijali sastoje se od ojačanja (armature) u obliku vlakana i nosača (matrice) od polimera (smole). Zbog svojih dobrih osobina, pre svega lakog oblikovanja, visoke čvrstoće i modula elastičnosti, male težine i otpornosti na zamor kompozitni materijali se koriste za izradu lopatica i kapotaža ali i drugih komponenata vetroturbin. Lopatice se izrađuju od laminarnih (slojevitih) kompozita koji se dobijaju slaganjem slojeva armature koji se impregniraju smolom i procesom polimerizacije očvršćavaju na taj način formirajući laminat odnosno kompozit.

Na karakteristike kompozita osim materijala matrice i armature utiču i njihov težinski (zapreminski) odnos kao i geometrijski raspored armature u matrici. Za razliku od metala, laminarni kompozitni materijali su neizotropni i nehomogeni što njihovu analizu čini znatno komplikovanijom. Sa druge strane upravo zahvaljujući ovim osobinama kompozita konstruktor može da napravi materijal čije mehaničke osobine odgovaraju funkcionalnim zahtevima. Povoljan odnos težine i čvrstoće, koji je i najveća prednost kompozita postiže se pažljivim odabirom slojeva, njihovim rasporedom i orijentacijom. U cilju dobijanja kompozita sa dobrim karakteristikama konstruktor mora izvršiti komplikovane analize i proračune što neminovno dovodi do upotrebe računara u projektovanju kompozitnih delova.

Računarsko modelovanje i analiza kompozitnih delova prevazilazi mogućnosti standardnih softverskih paketa. Upotreba kompozitnih materijala najčešće je motivisana željom da se minimizira težina a da se u isto vreme zadovolje postavljeni zahtevi u smislu otpornosti konstrukcije. Usled velikog broja parametara

¹ doc. dr Aleksandar Simonović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: asimonovic@mas.bg.ac.rs

Vuk Dragović dipl. inž, WING d.o.o, Beograd, tel. 3030-588, e-mail: office@wing.rs

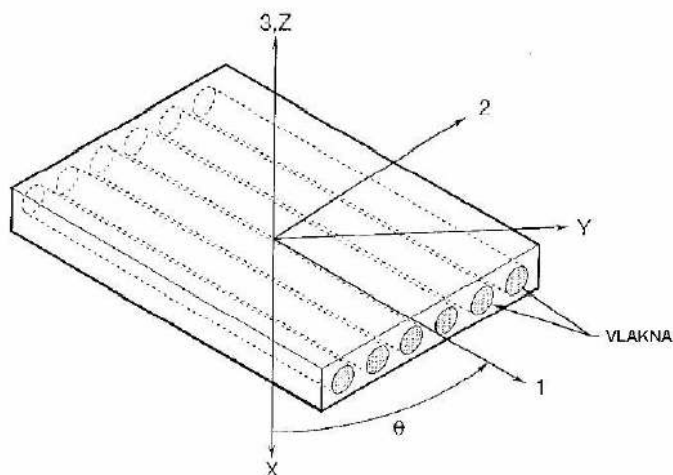
Ognjen Peković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: opekovic@mas.bg.ac.rs

prof. dr Velimir Radosavljević dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-338,

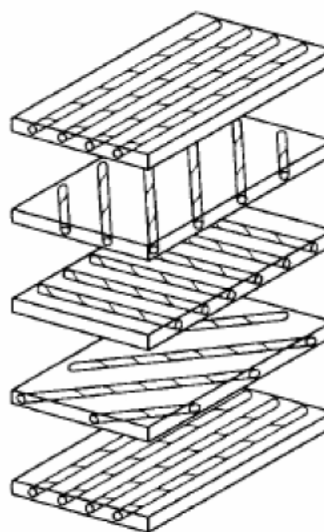
email: vradosavljevic@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

koji utiču na karakteristike kompozita optimizacija strukture je izuzetno složen zadatak. U tu svrhu u poslednjoj deceniji na tržištu se pojavilo više softverskih alata koji proces optimizacije kompozitnih struktura značajno olakšavaju.



Slika 1.



Slika 2.

Alati koji se trenutno nude na tržištu pokrivaju sve faze izrade kompozitnih delova: modelovanje geometrije, definisanje i modelovanje laminata, analizu laminata na makro i mikro nivou u cilju određivanja elastičnih karakteristika materijala, proračuna čvrstoće metodom konačnih elemenata, optimizaciju konstrukcije, izradu kalupa i alata za proizvodnju i simulaciju procesa proizvodnje

2. PROCES PROJEKTOVANJA LAMINARNIH KOMPOZITNIH DELOVA

Projektovanje kompozitnih delova (slika 3.) je veoma složen, multidisciplinarni problem koji zahteva mnogo različitih specifičnih znanja i iskustva. Proces nikada nije jednosmeran i za dobijanje kvalitetnog kompozitnog proizvoda inženjeri se susreću sa velikim izazovima u svakoj fazi projekta.



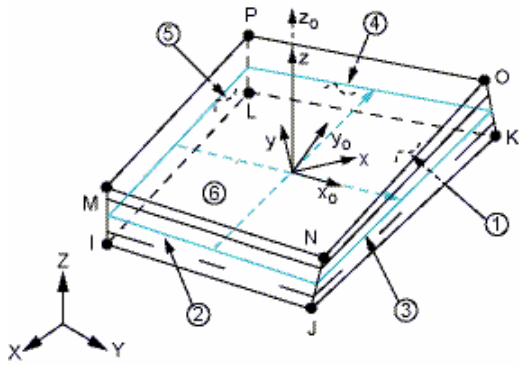
Slika 3.

Saradnja između inženjera koji konstruišu, vrše analize i proizvode kompozitne delove je ključan faktor u proizvodnji kompozita. Kako tržište nameće stroga vremenska ograničenja često se ova tri procesa odvijaju istovremeno pri čemu svaka izmena u jednoj od faza uzrokuje novu iteraciju u celokupnom procesu.

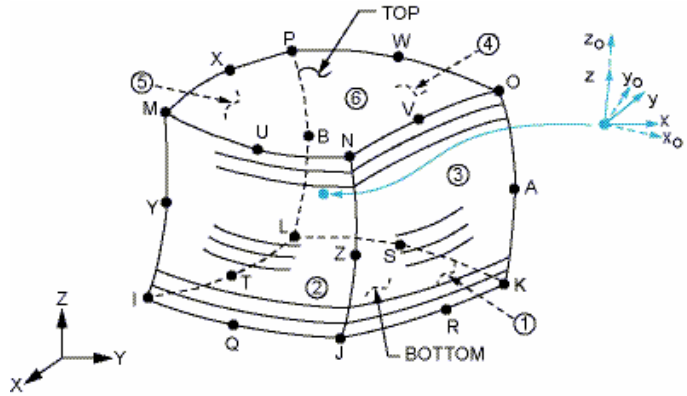
Definisane geometrije kompozitnih delova vrši se u standardnim CAD paketima za modelovanje.

Definisane laminata i analiza njihovih karakteristika je važan korak od koga zavise krajnje performanse dela. Današnji softverski alati nude automatizovano izračunavanje karakteristika laminata sastavljenog od proizvoljnog broja i orijentacije slojeva (lamina), sa različitim materijalima armature i matrice.

Proračun čvrstoće vrši se metodom konačnih elemenata, i svi vodeći softverski paketi za MKE proračune poseduju module za proračun laminarnih kompozita. Mreža konačnih elemenata sastavljena je od 2D elemenata tipa ljuski (slika 4.) ili od laminarnih 3D solid (slika 5.) i 1D grednih elemenata.



Slika 4. Laminarni SOLSH190 2D element



Slika 5. Laminarni SOLID186 3D

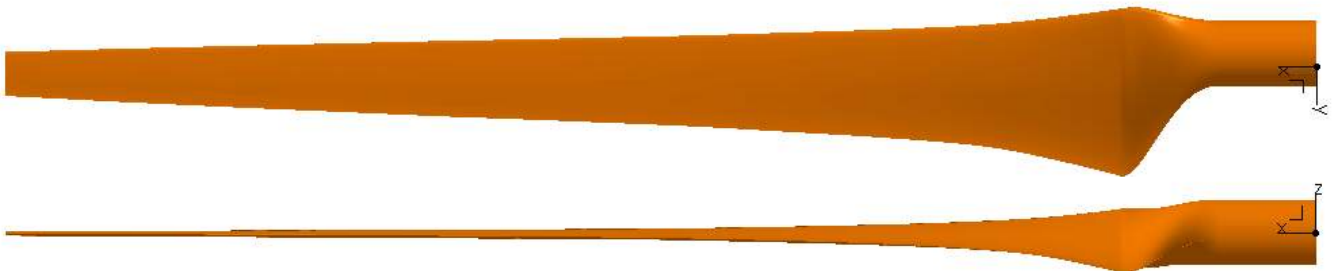
Nakon završenog preliminarnog dizajna, pred inženjere se postavlja pitanje poboljšanja i optimizovanja konstrukcije. U cilju što veće uštede mase inženjer mora da pronađe optimalno rešenje za broj slojeva, način promene broja i vrste slojeva po zonama, elemente ukrućenja itd. Za sva rešenja koja mogu da zadovolje postavljene uslove treba potom odrediti koeficijente sigurnosti, proceniti mogućnost i troškove proizvodnje te izabrati ono koje je optimalno.

Sama izrada kompozitnih delova je veoma vremenski zahtevna i traži angažovanje velikog broja radnika. Da bi se ostvario zahtevani kvalitet, armaturna platna ili rovinzi moraju tačno pratiti konturu kalupa i ostati u kontaktu sa površinom kalupa u svakoj tački. U slučaju velikih ili višestrukih krivina mogu se javiti problemi u vidu stvaranja nabora na platnima ili praznina čime se značajno degradiraju osobine kompozita. U tu svrhu potrebno je uraditi analizu drapiranja, odnosno proveriti da li platna mogu da isprate konturu kalupa ili je potrebno napraviti isečke. Bilo da se radi o ručnoj ili automatizovanoj proizvodnji, tačnost postavljanja pojedinačnih lamina u kalup kao i redosled postavljanja su veoma značajni. Kod odgovornih kompozitnih delova u avio i auto industriji kao i kod proizvodnje lopatica vetroturbina koriste se kompjuterski sistemi kod kojih se preko snimka kalupa u realnom vremenu prikazuju konture slojeva i omogućava precizno postavljanje i orijentacija odgovarajućih slojeva.

3. IZRADA GEOMETRIJSKOG MODELA LOPATICE

Spoljašnji oblik lopatice posledica je aerodinamičkog proračuna, strukturalnih zahteva i mogućnosti proizvodnje. Na osnovu zahtevanih performansi vrši se aerodinamičko oblikovanje lopatice, pri čemu se određuju opterećenja koja služe za dimenzionisanje strukturalnih elemenata. Sagledavanjem mogućnosti proizvodnje i ekonomskih aspekata menja se izgled lopatice i kreće se u novu iteraciju u procesu projektovanja. Proces nije linearan i ponavlja se dok se ne nađe rešenje koje zadovoljava postavljene uslove.

Osnovni aerodinamički oblik lopatice definisan je prečnikom rotora, izabranim aeroprofilima i raspodelom dužine tetive i ugla vitoperenja po razmahu lopatice. Koreni deo lopatice malo doprinosi aerodinamičkoj efikasnosti lopatice, pa se on konstruiše prema tipu veze sa glavčinom rotora. Na slici 6. prikazana je geometrija lopatice. Geometrija lopatice modelovana je u programskom paketu CATIA V5.

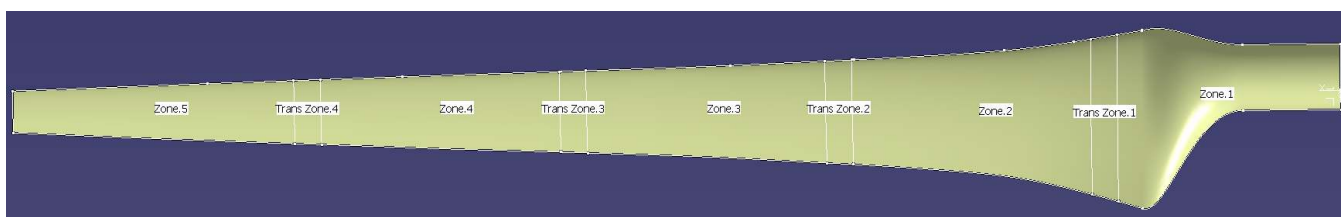


Slika 6.

4. DEFINISANJE SLOJEVA I LAMINATA

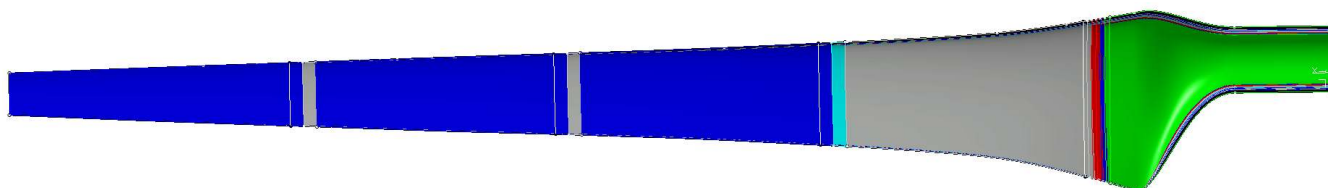
Softverski paket CATIA V5 omogućava korisniku da celokupan proces konstruisanja kompozitnih delova od definisanja geometrije i osobina materijala, preko analize do procesa proizvodnje izvede na samo jednoj platformi. Korisnik može pristupiti konstruisanju na nekoliko načina i to u kontekstu izrade sklopova, kontekstu analize, i u kontekstu proizvodnje.

Preliminarni dizajn kompozitnog dela sastoji se u definisanju geometrije i definisanju osobina materijala. Zavisno od potreba, moguće je definisati vrstu materijala, orijentaciju vlakana i redosled njihovog slaganja na 4 različita načina. U ovom slučaju, budući da se radilo o maloj kompozitnoj lopatici, definisane su zone sa konstantnim osobinama (istim materijalima i orijentacijom vlakana) a na osnovu njih definisani su slojevi odnosno lamine. Na slici 7. prikazana je donjaka lopatice sa zonama i prelaznim zonama. Za svaku zonu definisan je broj slojeva od određenog materijala i određene orijentacije vlakana. Tranzicionim zonama definiše se oblast preko koje se menja broj slojeva u različitim zonama.



Slika 7.

CATIA V5 omogućava automatsko kreiranje lamina na osnovu podataka definisanih po zonama. Lamine se kreiraju na način da se maksimizira njihova površina i dobiju maksimalni mogući slojevi. Ovo je korisno u slučaju da dve susedne zone imaju definisane slojeve istog materijala i orijentacije vlakana. Slike 8. i 9. prikazuju slojeve koji su napravljeni na osnovu definicije zona.



Slika 8.



Slika 9.

Sequence	Ply	Geo-Lvl	Material	Zone.2	Zone.3	Zone.4	Zone.5	Zone.1
Sequence.1	Ply.16	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.2	Ply.14	3	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.3	Ply.15	2	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.4	Ply.13	4	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.5	Ply.12	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.6	Ply.11	2	S1454_G803	90	90	90	90	90
Sequence.7	Ply.10	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.8	Ply.9	2	S1454_G803	90	90	0	0	90
Sequence.9	Ply.8	1	S1454_G803	90	0	0	0	90
Sequence.10	Ply.7	2	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.11	Ply.6	1	S1454_G803	0	0	0	0	0
Sequence.12	Ply.5	2	S1454_G803	0	0	0	0	45
Sequence.13	Ply.4	3	S1454_G803	0	0	0	0	45
Sequence.14	Ply.3	4	S1454_G803	0	0	0	0	90
Sequence.15	Ply.2	5	S1454_G803	0	0	0	0	-45
Sequence.16	Ply.1	6	S1454_G803	0	0	0	0	-45

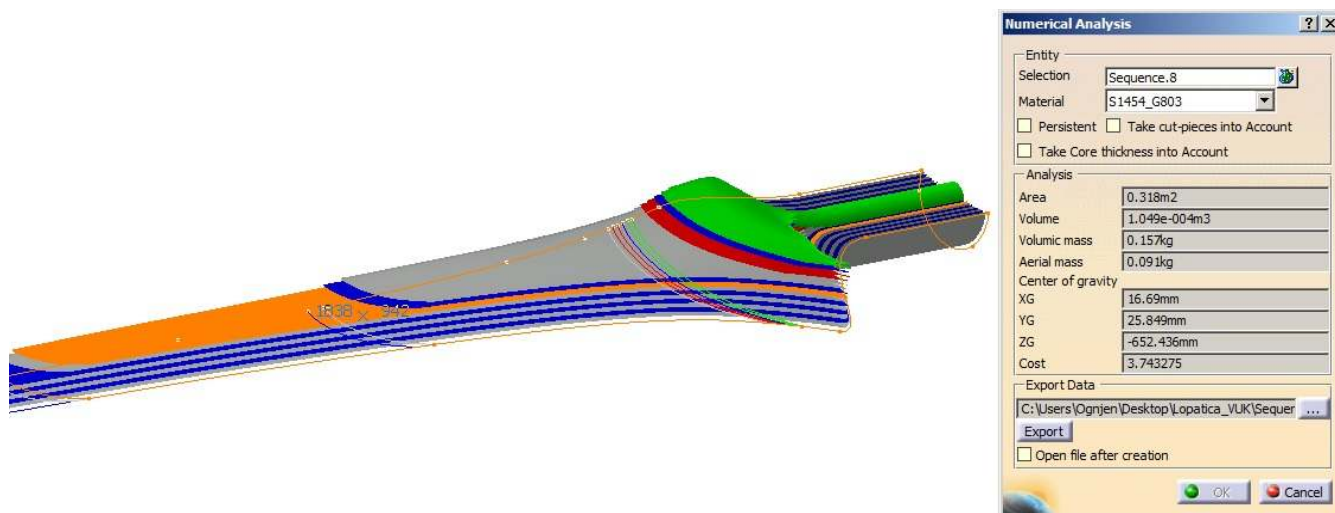
Total Length of Connections (Diagonal Cells represent total length of free edges)						
	Area(m2)	Zone.2(mm)	Zone.3(mm)	Zone.4(mm)	Zone.5(mm)	Zone.1(mm)
Zone.2	0.122243	1009.63	200.536	0	0	323.729
Zone.3	0.0884148	200.536	1001.32	157.576	0	0
Zone.4	0.0708717	0	157.576	1000.88	124.802	0
Zone.5	0.0600635	0	0	124.802	1240.8	0
Zone.1	0.107081	323.729	0	0	0	1144.23

Zones Groups						
Zones Group.1	Zone.2	Zone.3	Zone.4	Zone.5	Zone.1	

Slika 10.

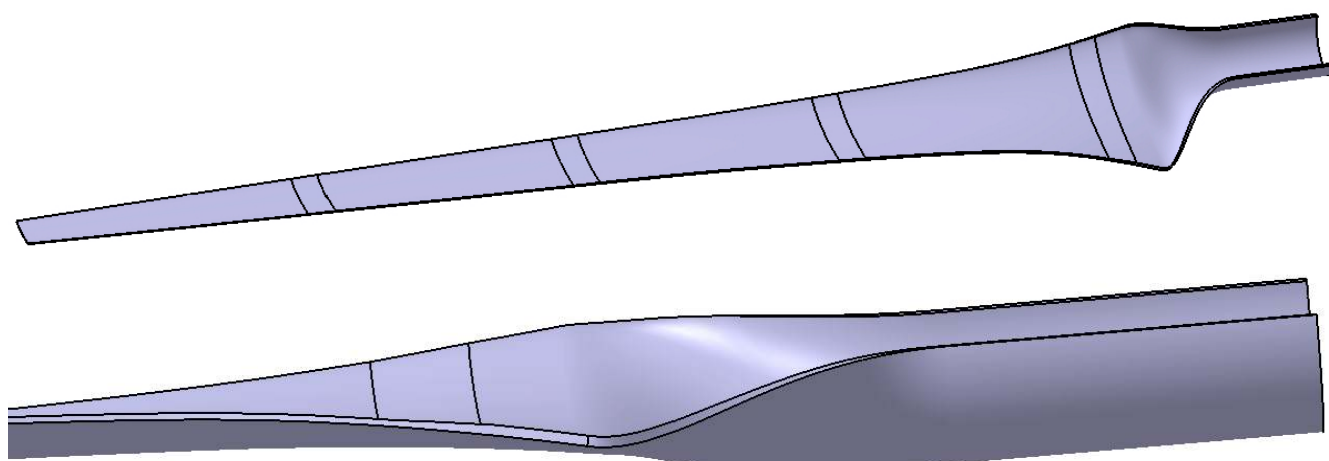
Nakon kreiranja lamina moguće je menjati njihov redosled, materijal i orijentaciju vlakana jednostavno pomoću EXCEL tabele za slaganje slojeva koja se kreira zajedno sa slojevima. Svaka izmena u tabeli lako se registruje na modelu ažuriranjem modela u CATIA okruženju. Na slici 10. prikazana je tabela u ovom slučaju. Konstruktor može dodavati nove slojeve uključujući i vezivne slojeve, trake za lepljenje i materijal jezgra ukoliko se izrađuje "sendvič" konstrukcija. Takođe na ovaj način se dobijaju i podaci o svakoj zoni, njena površina, ukupna dužina granice i dužina granice prema drugim zonama. Omogućeno je i kreiranje tabele u kojoj je moguće kontrolisati način na koji se završavaju pojedinačni slojevi na njihovim različitim ivicama unutar kompozitnog dela. Pomću tabela veoma efikasno se mogu uneti željene izmene u narednim fazama projektovanja ukoliko dođe do izmena na delu.

Pomoću opcija za analizu lamina moguće je dobiti podatke o masi i težištu svake lamine, laminata ili celokupnog kompozitnog dela (slika 11.)



Slika 11.

Na osnovu definisanih zona moguće je napraviti 3D "solid" model kompozitnog dela. Debljina modela odgovara zbiru debljina svih lamina koje su korišćene za konstruisanje kompozitnog dela. Trodimenzionalni model moguće je kasnije koristiti za potrebe definisanja geometrije drugih delova u sklopu, kao i za definisanje konačnoelementnog modela za analizu, gde je potrebno poznavati oblik i položaj stvarne donje i gornje površine laminarnog dela. Na slici 12. prikazan je "solid" model donjake kompozitne lopatice.



Slika 12.

Ovako definisan preliminarni model donjake lopatice potom služi kao osnova za vršenje analiza mogućnosti proizvodnje, strukturalne i frekventne analize.

5.ZAKLJUČAK

Zbog povoljnog odnosa mase i čvrstoće kompozitni materijali nalaze sve veću primenu u granama industrije gde je masa elemenata od najvećeg značaja. Sa druge strane pri projektovanju kompozitnih delova inženjeri moraju osim samog dela istovremeno konstruisati i materijal, pri čemu se susreću sa velikim brojem podataka i promenljivih (različiti slojevi, materijali, smer vlakana, redosled slaganja...) koje treba obraditi kako bi se dobio deo zadovoljavajućih osobina, što iziskuje mnogo više truda nego projektovanje delova od lima. Proces proizvodnje kompozitnih delova zahteva veliko angažovanje manuelne radne snage i vremenskih resursa, pri čemu se javlja velika mogućnost za pojavu grešaka u proizvodnji. Da bi se dobili konkurentni kompozitni delovi, upotreba računara je prisutna u svakoj fazi projektovanja.

U ovom radu prikazana je preliminarna konstrukcija donjake kompozitne lopatice vetroturbine. Zahvaljujući posebnom modulu za kompozitne konstrukcije "Composites design" i ostalim modulima za definisanje geometrije i strukturalnu analizu celokupan proces konstruisanja moguće je izvesti u samo jednom radnom okruženju, što značajno olakšava proces projektovanja i kolaboraciju između inženjera koji rade na projektu.

LITERATURA

1. CATIA V5 Documentation
2. Gay D, *Composite Materials Design and Applications*, CRC Press, 2003
3. Hull D, *An introduction to composite materials*, Cambridge University Press, 1981.
4. Posteljnik Z, Trivković S, Petrašinović N, Stanojević M, *Projektovanje lopatice napredne vetroturbine primenom savremenih CAD softvera*, 37. JUPITER KONFERENCIJA, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd 2011.
5. Hau E, *Wind Turbines*, Springer, 2006.

Abstract

DESIGN OF WIND TURBINE COMPOSITE COMPONENTS USING ENGINEERING SOFTWARE

Due to its multiple advantages over metals, the use of composite materials in the manufacture of wind turbine blades is prevalent. Great complexity of design, analysis and manufacturing of composite parts has resulted in the emergence of numerous software tools that address different stages of design and manufacturing of composite parts. Using a special module for composite structures within the CATIA V5 software package it is possible to effectively construct a composite parts. This paper presents the process of preliminary design of composite wind turbine blades using CATIA V5, and points out to the possibilities of further use of CATIA in detail design phases of the wind turbine blade project.



Mulugeta Biadgo Asress, Aleksandar Simonović, Srđan Trivković, Jelena Svorcan¹

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF HAWT BLADES

Abstract

*Designing horizontal axis wind turbine (HAWT) blades to achieve satisfactory levels of performance starts with the knowledge of aerodynamic forces acting on the blades. In this paper, a design method based on blade element momentum (BEM) theory is explained for horizontal-axis wind turbine (HAWT) blades. The method is used to optimize the chord and twist distributions of the blades. Applying this method a 600W HAWT rotor is designed. A computer program is written to estimate the aerodynamic performance of the existing HAWT blades and used for the performance analysis of the designed 600W HAWT rotor. The program gives blade geometry parameters (chord and twist distributions), performance curves and aerodynamic forces (tangential and normal forces) for the following inputs: power required from the turbine, number of blades, design wind velocity and blade profile type (airfoil). **Keywords:** HAWT Design, Blade Element Momentum Theory, Aerodynamics.*

INTRODUCTION

The objectives of this study are to develop a method using BEM theory for aerodynamic design of the HAWT blades and performance analysis of the existing blades, also to build a computer program using this method and to design a 600W HAWT rotor performing the program, finally to determine the aerodynamic characteristics and to create the performance curves of the designed rotor. The scope of the study is restricted to aerodynamics of HAWTs, blade design procedure for an optimum rotor using BEM theory and performance analysis of the designed rotor.

BLADE DESIGN PROCEDURE

BEM theory refers to the determination of wind turbine blade performance by combining the equations of general momentum theory and blade element theory. At the tip of the turbine blade losses are introduced. These can be accounted for in BEM theory by means of a correction factor, f which varies from 0 to 1 and characterizes the reduction in forces along the blade. An approximate method of estimating the effect of tip losses has been given by L. Prandtl and the expression obtained by Prandtl for tip loss factor is given by the following equation.

$$f = (2/\pi) \cos^{-1} \left[\exp \left[\frac{-(B/2)[1 - (r/R)]}{(r/R) \sin \varphi} \right] \right] \quad (1)$$

¹ Mulugeta Biadgo, dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 063 7223 757, e-mail: mbiadgo@yahoo.com
doc. dr Aleksandar Simonović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345,
email: asimonovic@mas.bg.ac.rs
Srđan Trivković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: strivkovic@mas.bg.ac.rs
Jelena Svorcan dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: jsvorcan@mas.bg.ac.rs

The application of this equation for the losses at the blade tips is to provide an approximate correction to the system of equations for predicting rotor performance and blade design. Carrying the tip-loss factor through the calculations, the changes will be as following:

$$dQ = 4f\pi\rho U_\infty \Omega a' (1-a)r^3 dr \quad (2)$$

$$dT = 4f\pi\rho U_\infty^2 a(1-a)r dr \quad (3)$$

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{(\sigma C_L)}{4f\lambda_r \sin(\varphi)} \quad (4)$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{(\sigma C_L)}{4f \cos(\varphi)} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{4f \sin(\varphi)(\cos(\varphi) - \lambda_r \sin(\varphi))}{\sigma(\sin(\varphi) + \lambda_r \cos(\varphi))} \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{1 + \left[\frac{4f \sin^2 \varphi}{(\sigma C_L) \cos \varphi} \right]} \quad (7)$$

$$a' = \frac{1}{\left[\frac{4f \cos \varphi}{(\sigma C_L)} - 1 \right]} \quad (8)$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} f \lambda_r^2 a'(1-a) [1 - (C_D/C_L) \cot(\varphi)] d\lambda_r \quad (9)$$

The aerodynamic design of optimum rotor blades from a known airfoil type means; determining the geometric parameters such as chord length distribution and twist distribution along the blade length for a certain tip-speed ratio at which the power coefficient of the rotor is maximum. For this reason firstly the change of the power coefficient of the rotor with respect to tip-speed ratio should be figured out in order to determine the design tip speed ratio, corresponding to which the rotor has a maximum power coefficient. The blade design parameters will then be according to this design tip-speed ratio.

Examining the plots between relative wind angle and local tip-speed ratio for a wide range of glide ratios gives us a unique relationship when the maximum elemental power coefficient is considered. And this relationship can be found to be nearly independent of glide ratio and tip-loss factor. Therefore a general relationship can be obtained between optimum relative wind angle and local tip-speed ratio which will be applicable for any airfoil type.

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \right\} = 0 \quad (10)$$

Equation 10 reveals after some algebra [2]

$$\varphi_{opt} = (2/3) \tan^{-1}(1/\lambda_r) \quad (11)$$

Having found the solution of determining the optimum relative wind angle for a certain local tip-speed ratio, the rest is nothing but to apply the equations from equation 6 to 9, which were derived from the blade-element momentum theory and modified including the tip loss factor, to define the blade shape and to find out the maximum power coefficient for a selected airfoil type.

Dividing the blade length in to N elements, the local tip speed ratio for each blade element can be calculated as

$$\lambda_{r,i} = \lambda(r_i / R) \quad (12)$$

Then rewriting the equation 11 for each blade element gives

$$\varphi_{opt,i} = (2/3) \tan^{-1}(1/\lambda_{r,i}) \quad (13)$$

From the tip loss factor for each blade element can be calculated as:

$$f_i = (2/\pi) \cos^{-1} \left[\exp \left[\frac{-(B/2)[1-(r_i/R)]}{(r_i/R) \sin \varphi_{opt,i}} \right] \right] \quad (14)$$

The chord-length distribution can then be calculated for each blade element by using equation below [1]

$$c_i = \frac{8\pi r_i f_i \sin \varphi_{opt,i} (\cos \varphi_{opt,i} - \lambda_{r,i} \sin \varphi_{opt,i})}{BC_{L,design} (\sin \varphi_{opt,i} + \lambda_{r,i} \cos \varphi_{opt,i})} \quad (15)$$

Where, $C_{L,design}$, is chosen such that the glide ratio (the ratio of drag coefficient to lift coefficient) is minimum at each blade element. The twist distribution can be easily determined by using equation 16

$$\theta_i = \varphi_{opt,i} - \alpha_{design} \quad (16)$$

Where, α_{design} , is again the design angle of attack at which $C_{L,design}$ is obtained.

Now the parameters such as chord-length and twist distribution along the blade length are known and in this case lift coefficient and angle of attack have to be determined from the known blade geometry parameters. This requires an iterative solution in which for each blade element the axial and angular induction factors are firstly taken as the values which were found for the corresponding designed blade elements and then determined within an acceptable tolerance of the previous guesses of induction factors during iteration. Applying the design procedure explained a computer program is written to design new blades and to estimate the aerodynamic performance of the existing blades. A detailed flow chart of the program is given in below.

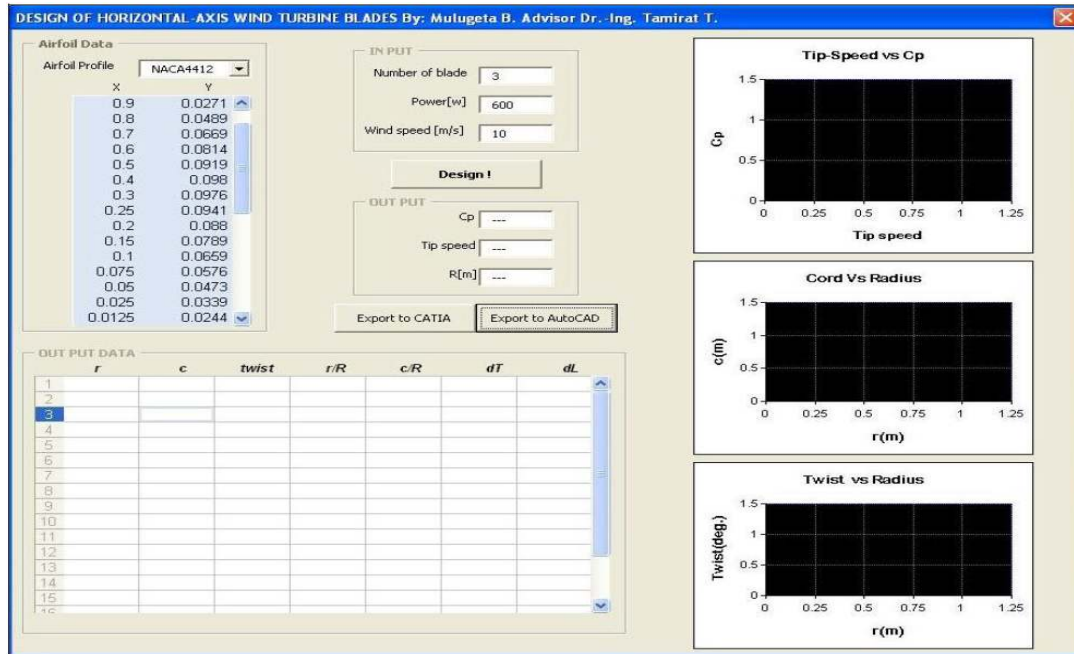


Fig. 1 Views of blade design program.

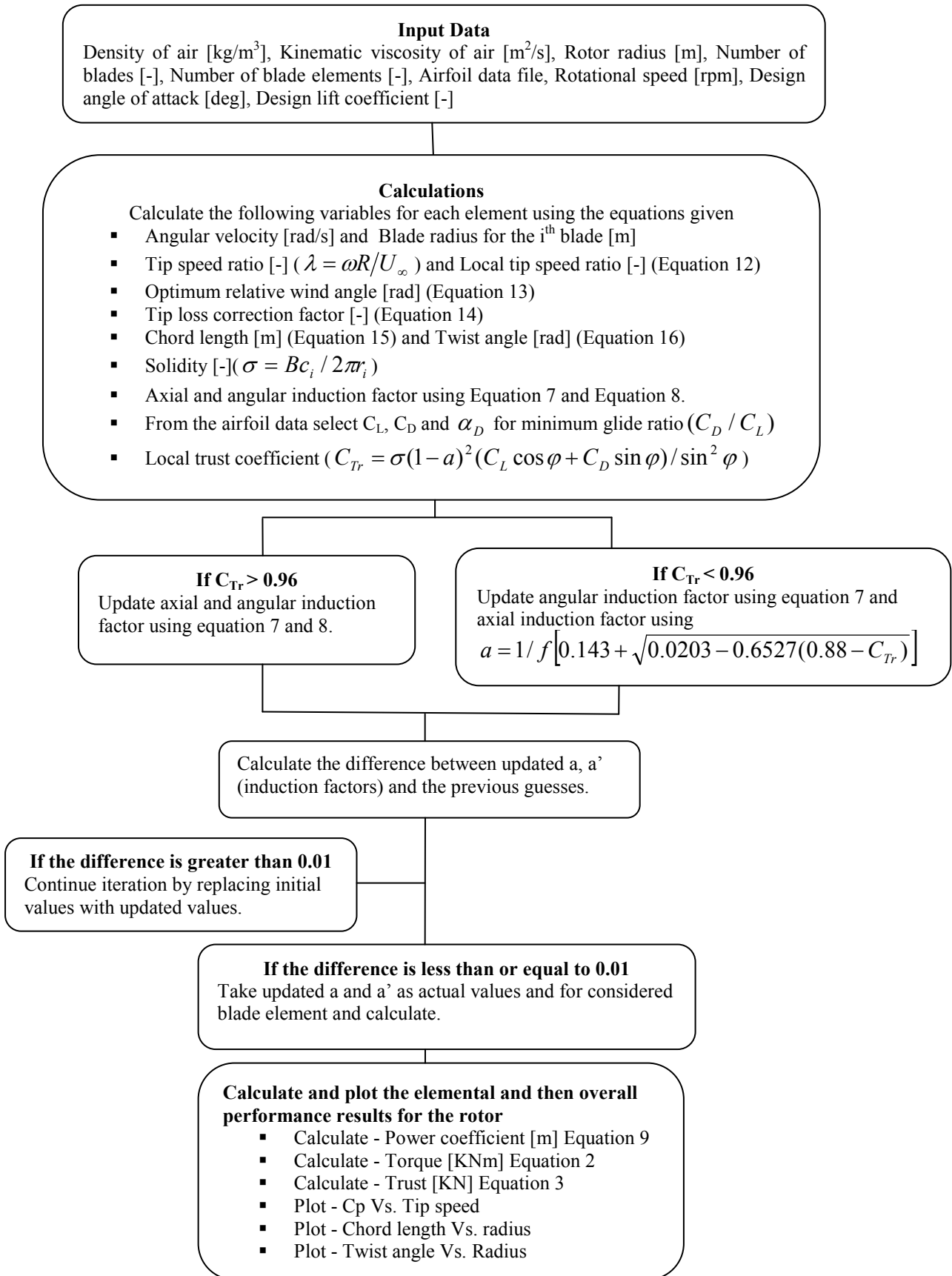


Fig. 2 Flow chart of blade design program.

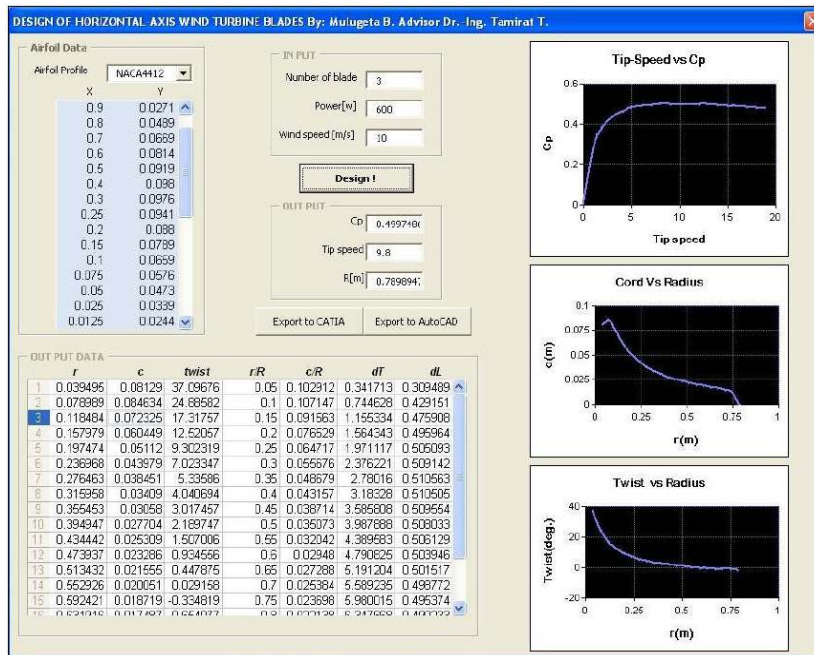


Fig. 2 Out put from the Program performed for sample Blade design

RESULTS

The geometry and configuration of the designed rotor and graphs of chord length with respect to radius; twist angle with respect to radius together and the performance parameter of the designed rotor that is power coefficient with respect to tip speed are also shown figure 2. As can be seen clearly from the figure the rotor employs NACA4412 airfoil profile at all stations of the blades. Other results of the computer program are tangential force and normal forces. Three dimensional views of the blade (blade model) were what the program does lastly after exported to AUTOCAD or CATIA.

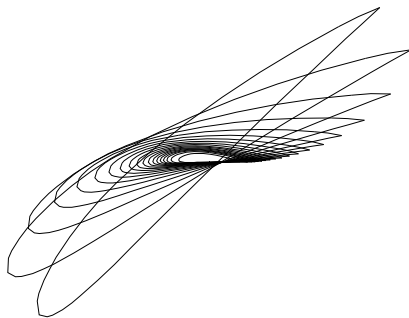


Fig. 3 Views of blade elements from root towards tip

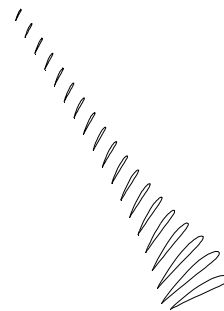


Fig. 4 Isometric views of the blade elements

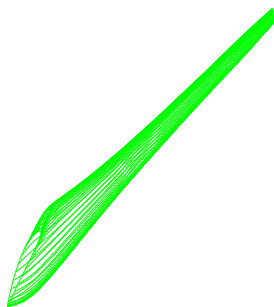


Fig. 5 3-D solid model of the designed blade

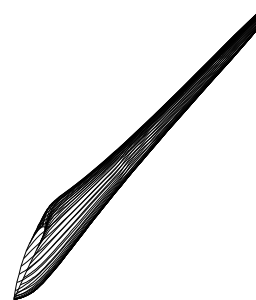


Fig. 6 3-D wire frame model of the designed blade

CONCLUSION

In this study, aerodynamic design of horizontal-axis wind turbine blades was investigated and a user-interface computer program called as BLADE DESIGN PROGRAM was written for the use of its outputs in further studies. All the studies on HAWT blade design were presented on a user interface computer program written on VISUALBASIC. User of the BLADE DESIGN PROGRAM gives the required power output, number of blades, blade profile and design wind velocity as input and the program gives design power coefficient, design tip-speed ratio and rotor diameter as output. In addition to that, blade geometries will be listed. Three dimensional views of the blade (the blade model) were what the program does lastly after exported to AUTOCAD or CATIA.

Structural design of HAWT blades is as important as their aerodynamic design. The dynamic structural loads which a rotor will experience play the major role in determining the lifetime of the rotor. Obviously, aerodynamic loads are a major source of loading and must be well understood before the structural response can be accurately determined and also the blade geometry parameters are required for dynamic load analysis of wind turbine rotors. So such a study on the dynamic load analysis of HAWT blades might also use the outputs of BLADE DESIGN PROGRAM.

REFERENCES

1. Burton T. and Sharpe D. Wind energy handbook. John Wiley & sons Ltd, Chichester, 2006.
2. Hau E., Wind turbines: fundamentals technologies, application, economics Kralling Springer, 2006.
3. Vossinis, A., Voutsinas, S., "Computer-Aided Design of Blades: Current Capabilities and Perspectives", <http://www.fluid.mech.ntua.gr/wind/avis/avigotem.html>
4. Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., "Wind Energy Explained; Theory, Design and Application", John Wiley & Sons Ltd, 2002
5. Spera, D. A., "Wind Turbine Technology", Asme Press, 2009

DIZAJN I ANALIZA PERFORMANSI HORIZONTALNE OSE VETROTURBINA

Rezime

Projektovanje vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja u cilju postizanja performansi zadovoljavajućeg nivoa počinje određivanjem aerodinamičkih sila koje deluju na lopatice. U ovom radu prikazan je metod projektovanja zasnovan na teoriji elemenata lopatice primenjen na vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja. Metod se koristi za optimizaciju raspodele dužine tetive i ugla vitoperenja po razmahu lopatice što je pokazano na primeru vetroturbine snage 600W. Opisan je način rada kompjuterskog programa razvijenog za potrebe procene aerodinamičkih performansi postojećih vetroturbina i iskorišćen je za analizu performansi projektovane vetroturbine od 600W. Program kao izlaz daje raspodelu geometrijskih parametara lopatice (dužina tetive i ugao vitoperenja), krive performansi i aerodinamičkih sila (tangencijalnih i normalnih) za sledeće ulaze: potrebnu snagu turbine, broj lopatica, brzinu vetra i tipove aeroprofila lopatica.



Nikola Petrašinović, Danilo Petrašinović, Zorana Posteljnik, Srđan Trivković¹

KONCEPTUALNI DIZAJN HELIKOIDNE VETROTURBINE SA VERTIKALNOM OSOM OBRTANJA²

Rezime

Dizajn rotora urbane vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja, prikazan u ovom radu, fokusiran je na koncept turbina koje se mogu postavljati na postojeće objekte u urbanom okruženju. Prikazano rešenje predstavlja helikoidni segmentni model rotora urbane vetroturbine. CAD model rotora vetroturbine izrađen je u CATIA V5 programskom paketu. Prednost softverskog projektovanja ogleda se u mogućnosti modifikovanja dizajna usled potrebe za prilagođavanjem različitim uslovima montaže i eksploatacije vetroturbine. Modeliranje rotora je izvršeno za potrebe idejnog rešenja vetroturbine za urbanu sredinu.

1. UVOD

Negativan uticaj na životnu sredinu i ograničenost zaliha fosilnih goriva širom sveta, dovode do povećanja korišćenja obnovljivih izvora energije. Danas, iz obnovljivih izvora se proizvodi oko 18% ukupne potrebne energije. Korišćenje snage vetra datira iz antičkih vremena. Mnogobrojnim tehničkim i tehnološkim usavršavanjima u zadnjih nekoliko decenija, troškovi proizvodnje energije iz vetra znatno su smanjeni [1].

Iako najveći deo proizvedene energije iz vetra potiče iz velikih centralizovanih instalacija, koje danas dostižu instalisanu snagu i do 7MW, postoji velika mogućnost povećanja proizvodnje energije iz manjih instalacija tzv. urbanih vetroturbina. Proizvodnja energije u blizini mesta potrošnje znatno umanjuje troškove instalacije i zemljišta, uključujući male ili nikakve troškove prenosa energije do krajnjeg korisnika. Trenutno, većinu vetro energetskih sistema predstavljaju vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja. Favorizacija ovakvih vetroturbina zasnovana je na njihovom koeficijentu iskorišćenja snage vetra, gotovo dvostruko većim od vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja [2].

Međutim, za kontinualnu proizvodnju energije ovakve vetroturbine zahtevaju konstantan pravac i brzinu vetra.

U urbanim (gradskim) sredinama brzina vetra je promenljivog intenziteta i pravca što značajno smanjuje efikasnost vetroturbina sa horizontalnom osom obrtanja. U ovakvim uslovima vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja mogu efikasnije iskoristiti energiju vetra i povećati kapacitet proizvodnje električne energije.

¹ Nikola Petrašinović dipl. inž., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345,
e-mail: npetrasinovic@mas.bg.ac.rs

mr. Danilo Petrašinović dipl. inž., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345,
e-mail: dpetrasinovic@mas.bg.ac.rs

Zorana Posteljnik dipl. inž., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345,
e-mail: zposteljnik@mas.bg.ac.rs

Srđan Trivković, dipl. inž., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: strivkovic@mas.bg.ac.rs

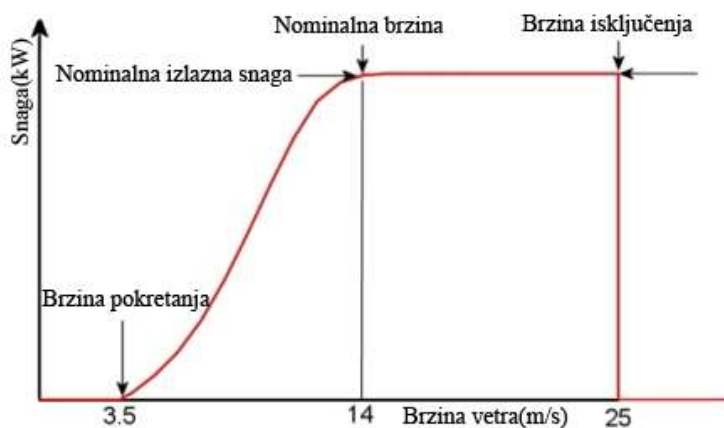
² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

2. PERFORMANSE, PREDNOSTI I MANE URBANIH VETROTURBINA

Primenom osnovnih fizičkih zakona moguće je zaključiti da je:

- Absorbovana snaga proporcionalna trećem stepenu brzine vetra. Dupliranjem brzine vetra, osam puta se povećava snaga. Samim tim brzina vetra igra krucijalnu ulogu u odabiru lokacije za postavljanje vetroturbine.
- Absorbovana snaga proporcionalna površini rotora vetroturbine. Dupliranjem prečnika rotora, četiri puta se povećava površina rotora a samim tim i absorbovana energija iz vetra.

Na slici 1. prikazan je tipičan dijagram snage vetroturbine.



Slika 1.-Dijagram odnosa snage i brzine vetra

U literaturi postoji stalna debata o tome kakav oblik vetroturbina je najpodesniji za urbanu sredinu i montažu na postojeće konstrukcije kao što su zgrade, javna rasveta, mostovi... U tabeli 1. predstavljen je poređenje 3 osnovna oblika urbanih vetroturbina.

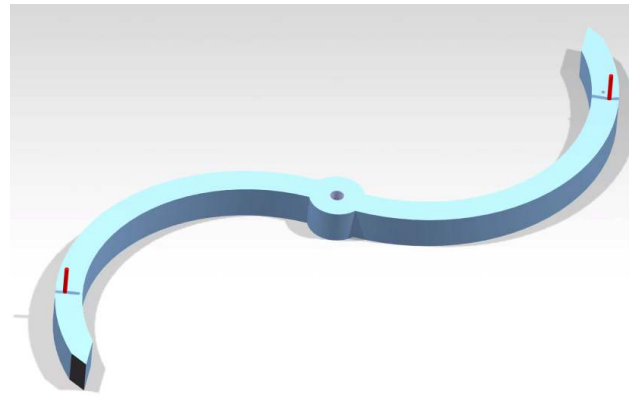
	Vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja	Uzgonske vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja	Otporne vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja
Prednosti	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efikasnost 2. Proveren dizajn 3. Široka upotreba 4. Ekonomična 5. Veliki izbor na tržištu 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dobra efikasnost 2. Nebitan pravac vetra 3. Manja osetljivost na turbulentnost od horizontalne vt. 4. Male vibracije 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proveren dizajn 2. Bez buke 3. Čvrsta i robusna konstrukcija 4. Nebitan pravac vetra 5. Neosetljivost na turbulentnost 6. Male vibracije
Mane	<ol style="list-style-type: none"> 1. Loše karakteristike sa stalnom promenom vetra 2. Nestabilnost pri visokim brzinama obrtanja rotora 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Još neproveren dizajn 2. Veća osetljivost na turbulentnost od otporne vt. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Niska efikasnost 2. Manje ekonomična

Tabela 1.

Postoje različite urbane lokacije gde svaka od predstavljenih vetroturbina ima svoje prednosti. Naime, na vrhu visokih zgrada gde su pravac i brzina vetra mnogo stabilniji, vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja predstavljaju bolje rešenje zbog svoje veće efikasnosti, dok sa druge strane na manjim visinama gde je mnogo turbulentnije polje sa stalnim naletima vetra otporne vertikalne vetroturbine, zbog svoje robusne konstrukcije predstavljaju mnogo bolje rešenje.

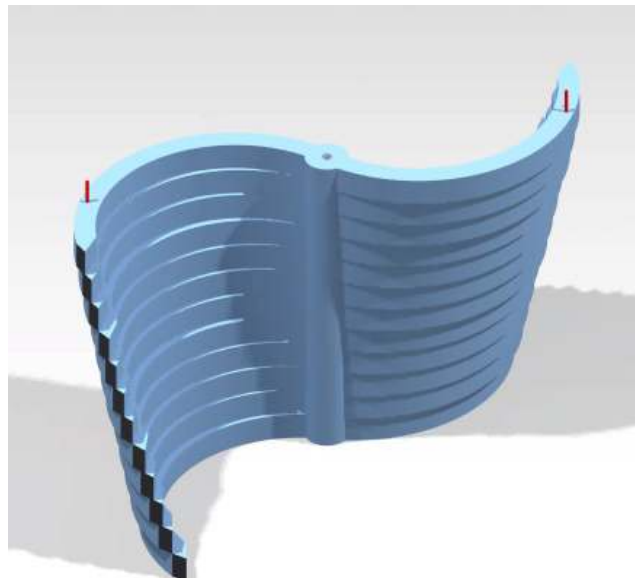
3. KONCEPTUALNI DIZAJN

Za modeliranje rotora vetroturbine korišćen je CAD sistem CATIA V5, pri čemu su razmatrani funkcionalni, tehnološki i estetski zahtevi, imajući u vidu namenu vetroturbine. Naime, rotor je dizajniran tako da bude otpornog tipa sa vertikalnom osom obrtanja. Oblik rotora je helikoidan. Takav oblik se danas sve više razvija u svetu. Osnovna prednost ovakvog dizajna jeste segmentna konstrukcija koja se sastoji iz potrebnog niza osnovnih elemenata od kojih je sastavljen helikoidni rotor. Osnovni element rotora predstavljen je na slici 2. Svaki segment sadrži dve vođice u koji se uklapa sledeći segment. Vođice su postavljene tako da je svaki sledeći element zarotiran u odnosu na osu obrtanja za ugao od 5 stepeni.



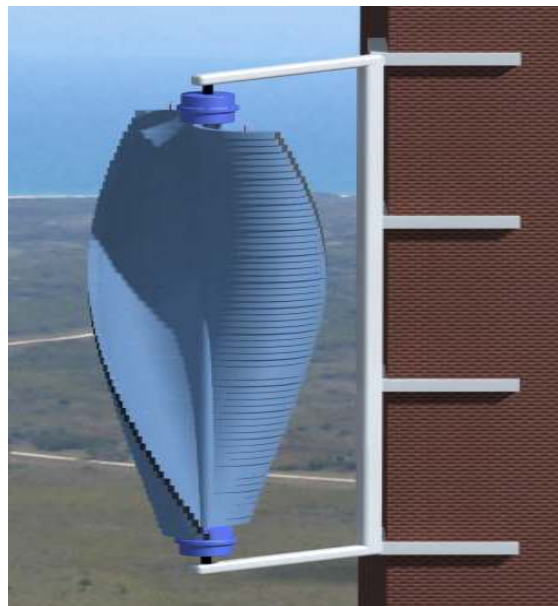
Slika 2. Osnovni segment rotora

Kroz centralnu otvor svakog elementa prolazi osovina koja predstavlja noseći element cele vetroturbine. Dužina te osovine zavisi od broja naslaganih segmenata. Takva segmentna konstrukcija omogućava da se na odabrani generator ugradi potreban broj elemenata kako bi se postigla potrebna površina rotora za nominalnu izlaznu snagu. Na slici 3. prikazan je sklop nekoliko segmenata.



Slika 3. Sklop nekoliko osnovnih segmenata

Prednost ovakvog oblika rotora jeste u njegovoj relativno maloj širini, što nam omogućava laku montažu na različitim urbanim konstrukcijama. Na slici 4. prikazan je sklop urbane vetroturbine montiran na ugao visoke zgrade. Iako, se ovakve vetroturbine nazivaju vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja, ovakav oblik, sa dva oslonca, nam dozvoljava montažu i u horizontalnom položaju. Na slici 5. prikazano je više vetroturbina montiranih na ravan krov zgrade. Kako bi se zahvatio što veći spektar vetra, nosač vetroturbine je zarotiran u odnosu na ivicu zgrade za ugao od 45 stepeni. Ovakav oblik turbine se može sa malim izmenama dizajna montirati i na druge konstrukcije kao što su ulična rasveta, mostovi, sportski centri. Jedna od primena ovakvog rešenja jeste ugradnja ovakvih vetroturbina na postojeće stubove rasvete na mostovima, čime bi se postigla električna autonomija mosta. Takođe bi se postigao vizuelni efekat koji je jako bitan u urbanim sredinama.



Slika 4. Vetroturbina na uglu zgrade



Slika 5. Više vetroturbina na ravnom krovu

5. ZAKLJUČAK

Potreba za smanjenjem emisije ugljendioksida, povećanje cene fosilnih goriva i sve veći troškovi eksploatacije istog doveli su do sve većeg korišćenja obnovljivih izvora energije. Tržište malih vetroturbina za urbane sredine svakog dana raste. Danas postoje dva ključna faktora za odabir urbane vetroturbine, a to su odabir najbolje lokacije i oblik rotora. Kako su naseljena okruženja kompleksnija od ruralnih sredina, faktori koji utiču na postavljanje vetroturbina u gradovima su mnogobrojni: ljudski faktori kao što su kupci, dizajneri, projektanti, zakonodavna tela, kao i tehnički faktori kao što su turbulentnost, instalacija, sigurnosni i ekološki uticaji [3].

Dalji rad na dizajnu će se odnositi na usavršavanje same konstrukcije rotora u pogledu aerodinamike i čvrstoće, a sa ciljem izrade modela za ispitivanje u aerotunelu.

LITERATURA:

1. K. Pope, V. Rodrigues, R. Doyle, A. Tsopelas, R. Gravelins, G.F. Naterer, E. Tsang, *Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine*, Renewable Energy 35 (2010) 1043–1051 (ISSN: 0960-1481)
2. Thomas Ackermann, Lennart Soder, *Wind energy technology and current status: a review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 4 (2000) 315-374 (ISSN: 1364-0321)
3. Tim Sharpe, Gordon Proven, *Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine*, Energy and Buildings 42 (2010) 2365–2375 (ISSN: 0378-7788)

HELICOIDAL VERTICAL AXIS WIND TURBINE CONCEPTUAL DESIGN

Abstract

The design of urban vertical axis wind turbine, described in this paper, is focused on the concept of turbines which can be mounted on the existing objects in urban environment. The presented design is helix segmental model of urban wind turbine rotor. CAD model of wind turbine rotor is made in CATIA V5 software package. The advantage of the software oriented design is reflected in possibility to modify the design due to the need to adapt to different conditions of installation and operation of wind turbines. Modeling of the rotor is performed for the conceptual design of wind turbines for the urban environment.



Zorana Posteljnik, Dragan Komarov, Marija Stanojević, Jelena Svorcan¹

PROJEKTOVANJE I ANALIZA TERMOIZOLACIONE OBLOGE KORENIH UKRUĆENJA ČELIČNIH DIMNJAKA²

Rezime

Industrijski čelični dimnjaci projektuju se u zavisnosti od specifičnih zahteva i uslova eksploatacije. Usled nastanka prslina i narušavanja integriteta konstrukcije izvršena je rekonstrukcija korenog dela dimnjaka. U cilju smanjenja opterećenja konstrukcije koja su posledica rada pri izuzetno visokim temperaturama dimnih gasova i odgovarajućih termičkih dilatacija, korena ukrućenja - rebara dimnjaka obložena su termoizolacionim slojem - oblogom. Metodom konačnih elemenata određena su temperaturska polja sklopa plašta i ukrućenja sa i bez izolacije. Ugradnjom izolacije obezbeđeno je povoljnije temperatursko polje, čime je izbegnuta pojava dodatnih opterećenja usled razlike u dilataciji plašta dimnjaka i rebara u korenom delu dimnjaka. Za izradu CAD modela i tehničke dokumentacije, kao i termičke analize korišćeni su savremeni softverski alati.

1. UVOD

U toku radnog veka industrijski čelični dimnjaci nalaze se pod uticajem spektra mehaničkih opterećenja, kao i hemijskih i termičkih dejstava izazvanih produktima sagorevanja i atmosferskom vlagom. Konstrukcija jednoplašnog dimnjaka sastoji se od jednog plašta koji vrši funkciju glavnog nosećeg elementa strukture, a ujedno služi i kao dimovodni kanal. Koreni deo dimnjaka predstavlja najopterećeniji deo konstrukcije koji je obično ojačan postavljanjem vertikalnih ukrućenja – rebara u korenom delu dimnjaka, po obodu plašta.

Pored problema statičke stabilnosti i funkcionalnosti, prilikom projektovanja dimnjaka treba uzeti u obzir postojanje znatnih termičkih opterećenja svih delova strukture. U radnim režimima razmatranog jednoplašnog dimnjaka temperatura dimnih gasova dostiže vrednost od 500 °C što dovodi do pojave značajne temperaturne dilatacije plašta. Temperature dimnih gasova ne smeju prelaziti dozvoljene vrednosti, koje za dimnjake izrađene od konstrukcionih čelika iznose 400 °C - 480 °C. Prilikom proračuna debljine plašta dimnjaka u slučaju da temperatura plašta iznosi više od 200 °C nalaze se korekcija maksimalnog dozvoljenog napona kako bi se dodatno uzeo u obzir uticaj temperature. U cilju produženja radnog veka dimnjaka potrebno je obezbediti da minimalna temperatura plašta bude iznad temperature tačke rose dimnih gasova kako bi se sprečila pojava kiselih kondenzata na zidu dimnjaka i samim tim smanjila korozija.

U slučaju dimnjaka koji je za tlo dodatno vezan čeličnim zategama pomeranje dimnjaka u aksijalnom pravcu ograničeno je što može izazvati pojavu nedozvoljeno visokih napona u strukturi dimnjaka. Relativno mala kontaktna površina plašta i rebara u odnosu na površinu rebara koja je izložena vazduhu i razlika u

¹ Zorana Posteljnik, dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: zposteljnik@mas.bg.ac.rs

mr Dragan Komarov dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: dkomarov@mas.bg.ac.rs

mr Marija Stanojević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: mzstanojevic@mas.bg.ac.rs

Jelena Svorcan dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: jsvorcan@mas.bg.ac.rs

² Rad je rezultat realizacije aktivnosti predviđenih u okviru projekta TR 35035 koji je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

temperaturi između pomenutih elemenata može rezultovati povećanjem napona na plaštu dimnjaka i pojavom oštećenja u strukturi na mestu spojeva (slika 1). U cilju smanjenja razlike u termičkom širenju ovih komponenti dimnjaka, projektovan je sklop termičke izolacije kojim su rebra obložena, kao deo rekonstrukcije dimnjaka. Predloženim merama obezbeđena je povoljnija raspodela temperaturskog polja u oblasti spojeva plašta i vertikalnih ukrućenja.

Primenom CAD/CAE alata projektovana je termoizolaciona obloga, i izvršena je termička analiza segmenta plašta dimnjaka i rebra metodom konačnih elemenata na osnovu koje je određena debljina termoizolacionog sloja. Korišćene metode omogućavaju postizanje optimalnog konstruktivnog rešenja uz mogućnost skraćenja vremena projektovanja.



Slika 1. Oštećenja dimnjaka na mestima spojeva rebara sa plaštom

2. TERMIČKA ANALIZA

Visoka temperatura dimnih gasova dovodi do deformacije dimnjaka u aksijalnom pravcu. Usled moguće pojave značajne razlike u temperaturama plašta i rebara u korenom delu dimnjaka može doći do pojave nedozvoljenih napona po obimu plašta. Uticaj temperature je od izuzetnog značaja, naročito kod konstrukcija koje rade u promenljivim temperaturnim uslovima. Naponi izazvani dejstvom temperaturskog polja koje prvobitnim projektom nije predviđeno mogu imati znatno veće vrednosti od napona izazvanih dejstvom nominalnih radnih opterećenja.

Izduženje je dato izrazom:

$$\Delta l = \int_0^l \varepsilon(z) dz \quad (1)$$

Za element koji je izložen dejstvu homogenog temperaturskog polja, izduženje je moguće izraziti kao:

$$\Delta l = \int_0^l \alpha_t \Delta T(z) dz \quad (2)$$

gde je α_t koeficijent linearnog izduženja koji zavisi od materijala (u ovom slučaju je to čelik), a ΔT razlika početne i krajnje temperature.

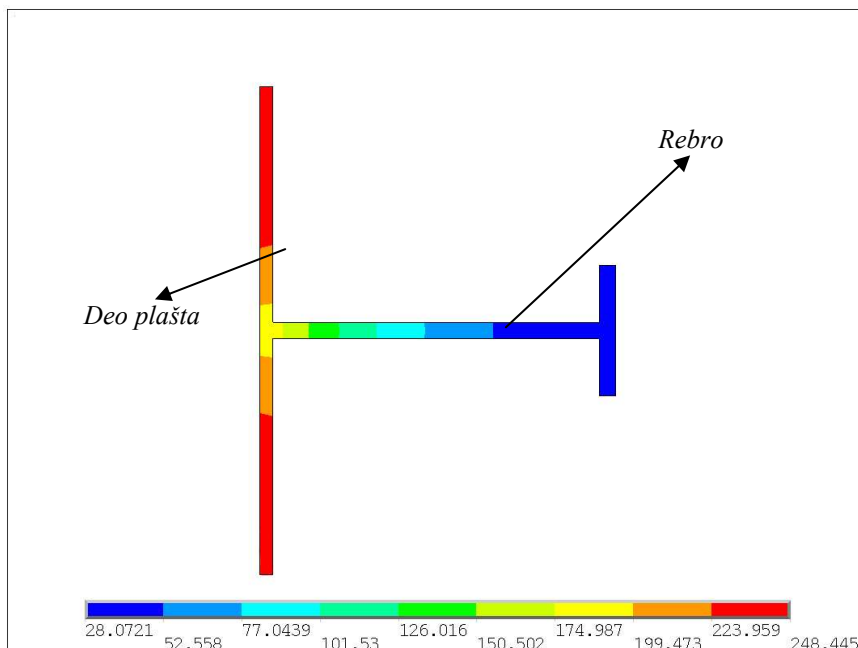
Furijeovim zakonom u dvodimenzionalnom Dekartovom koordinatnom sistemu definišemo prenos toplote kondukcijom:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

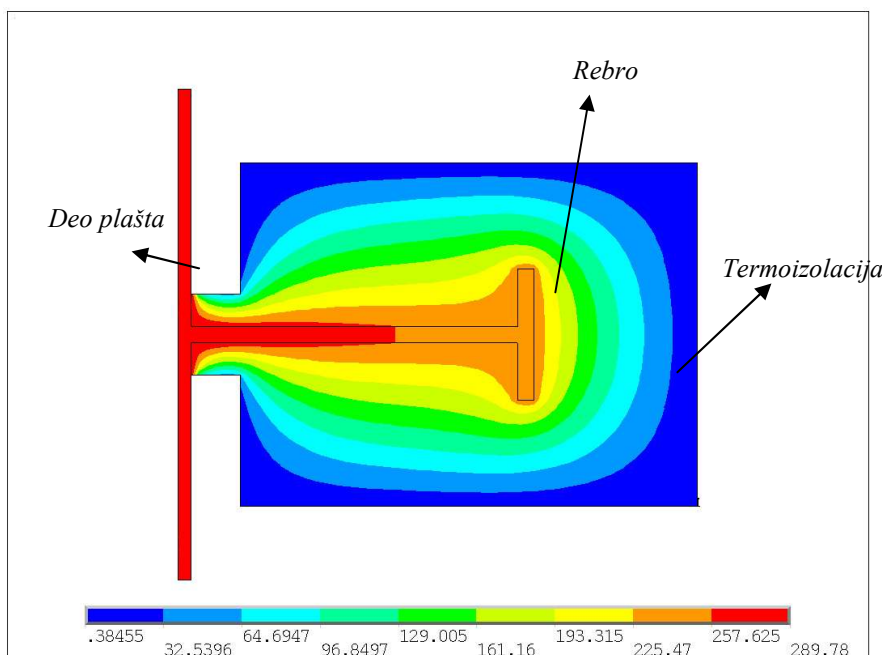
$$q_y = -kA \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

gde je $k(W/mK)$ toplotna provodljivost materijala.

Primenom metode konačnih elemenata određeno je temperaturno polje dela plašta dimnjaka i rebra. Izvršena je dvodimenzionalna stacionarna termička analiza, pri kojoj je mreža konačnih elemenata formirana od elemenata tipa pravougaonika sa četiri čvora u temenima. Kako je analize bilo potrebno uraditi više puta, napisan je skript u kome je moguće lako menjati ulazne veličine i parametre proračuna. U prvom slučaju izvršen je proračun raspodele temperatura za model bez izolacije koji predstavlja deo plašta dimnjaka sa rebrom. Nakon definisanja karakteristika materijala zadata je temperatura sa unutrašnje strane plašta dimnjaka (500 °C) i temperatura okoline sa spoljašnje strane plašta i po površini rebra (0 °C). Na slici 2. prikazani su rezultati proračuna.



Slika 2. Temperaturno polje dela plašta dimnjaka i rebra bez izolacije



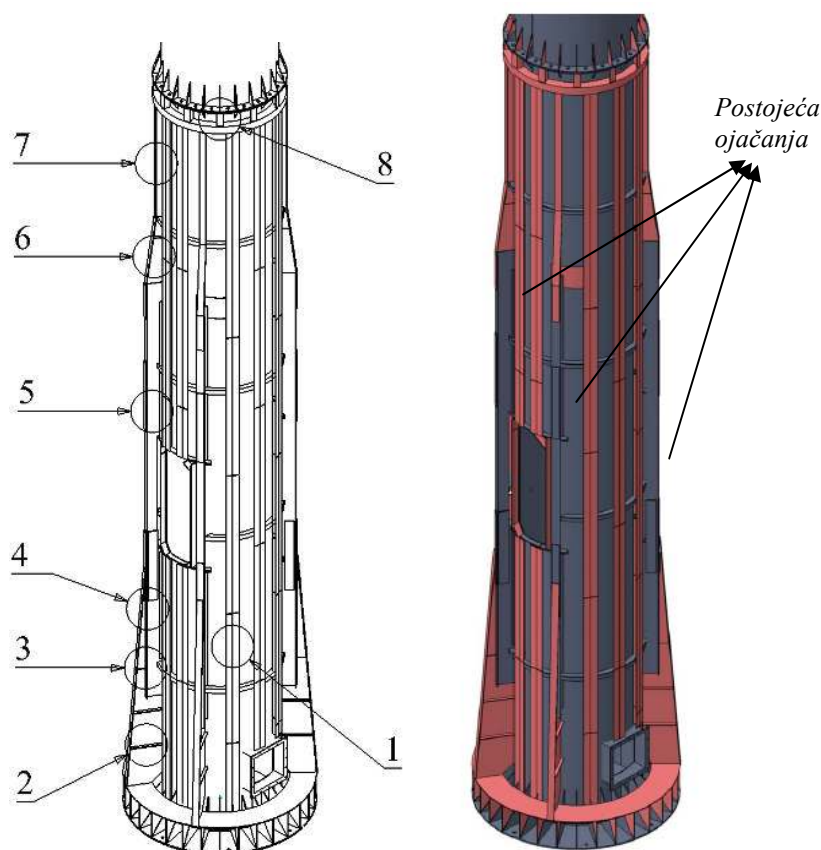
Slika 3. Temperaturno polje dela plašta dimnjaka i rebra nakon postavljanja izolacije

Druga analiza izvršena je za segment plašta sa izolovanim rebrom. Na postojeću konstrukciju dodat je sloj termoizolacije od kamene vune čija je konačna debljina određena variranjem do postizanja zadovoljavajućeg polja temperature. Na slici 3. prikazano je polje temperatura koje je znatno povoljnije u odnosu na slučaj bez izolacije (manji gradijenti temperaturnog polja u rebro), čime su smanjeni termički naponi na spoju plašta i rebra.

3. OPIS KONSTRUKCIJE

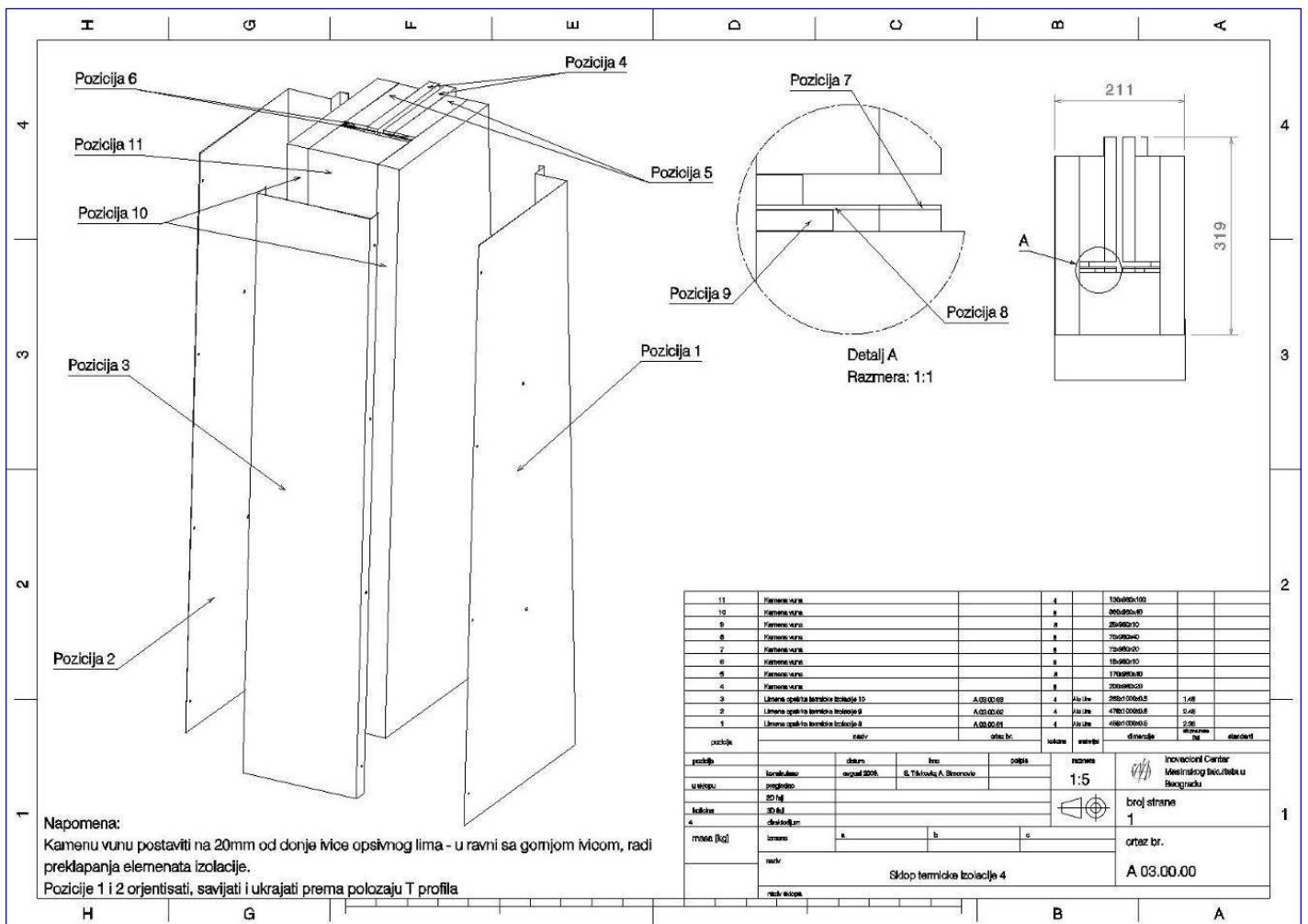
Koreni deo jednoplašnog dimnjaka dodatno je ojačan montažom rebara visine 10100 mm raspoređenih po obimu plašta. Prethodno postavljena četiri vertikalna ojačanja oko otvora dimnovodnih kanala povezana su sa osnovom dimnjaka i produžena do potrebne visine, slika 4 – pozicije 2-4 i 6-7. Nova rebra izrađena su od čeličnih profila L 80 x 80 x 8 postavljenih tako da formiraju poprečni presek oblika slova T. Veza nove konstrukcije i plašta dimnjaka ostvarena je preko horizontalnog ukrućenja (pozicija 8) za koji su zavarena rebra i pomoćni vertikalni elementi za vezu sa prirubnicom dimnjaka. Sva vertikalna rebra u korenom delu dimnjaka izolovana su slojem kamene vune u oblozi od aluminijumskog lima.

Modeliranje svih sklopova i izrada tehničkih crteža izvršeni su u programskom paketu CATIA V5.



Slika 4. Koreni deo dimnjaka sa označenim pozicijama na kojima se postavlja termoizolacija; 1 – Sklop termičke izolacije 1 (dupli L profil), 2 – Sklop termičke izolacije 2 (čelični lim), 3 – Sklop termičke izolacije 3 (čelični lim), 4 – Sklop termičke izolacije 4 (čelični lim), 5 – Sklop termičke izolacije 5 (brodski T profil), 6 – Sklop termičke izolacije 6 (čelični lim), 7 – Sklop termičke izolacije 7 (čelični lim), 8 – Sklop termičke izolacije 8 (L profil)

Na slici 5. prikazan je tehnički crtež jednog od sklopova termoizolacije sa svim potrebnim dimenzijama. Prilog tehničkoj dokumentaciji na osnovu 3D CAD modela čini 28 crteža izrađenih za potrebe proizvodnje i montaže termoizolacionih sklopova u cilju rekonstrukcije korenog dela dimnjaka.



Slika 5. Tehnički crtež sklopa termičke izolacije
Pozicije 1-3 - limena oplata; Pozicije 4-9 - kamena vuna

4. ZAKLJUČAK

Eksploatacioni uslovi dimnjaka često se razlikuju od uslova za koje su projektovani. Kao posledica javljaju se oštećenja koja u ekstremnim slučajevima mogu dovesti do ugrožavanja integriteta konstrukcije. Za prikazani dimnjak, imajući u vidu specifičnu konstrukciju i radne uslove (dimnjak sa zategama, temperature dimnih gasova i do 500 °C), bilo je potrebno izvršiti rekonstrukciju korenog dela u cilju postizanja sigurnog rada. Izvršene analize metodom konačnih elemenata u fazi projektovanja ukazale su na postojanje značajne razlike temperatura plašta dimnjaka i predviđenih novih rebara u korenom delu. Razlike u temperaturskoj dilataciji pomenutih delova dovele bi do značajnog porasta napona na spojevima plašta i rebara. Rebra su termo-izolovana, čime je obezbeđeno ravnomernije polje temperatura u sklopu plašt dimnjaka - rebro. Primenom savremenih softverskih alata za projektovanje i inženjerske analize znatno je skraćeno vreme potrebno za realizaciju rekonstrukcije, uključujući projektovanje, izradu delova od polufabrikata i montažu konstrukcije.

LITERATURA

1. CICIND – Comite international des chemines industrielles, *The CICIND chimney book – Industrial chimneys of concrete or steel*, CICIND Zurich, ISBN 3-00-017609-8, 2005.
2. IS 6533 Design And Construction Of Steel Chimney – Code Of Practice, Bureau Of Indian Standards
3. Agocs Z, Ziolkó J, Vican J, Brodniansky J, *Assessment and Refurbishment of Steel Structures*, Abingdon, ISBN 0-203-56951-2, 2005.
4. Hetnarski R, *Thermal stresses*, Elsevier Science, Amsterdam, ISBN 0 444 815716, 1996.
5. Stupar S, Petrović Z, Simonović A, Komarov D, Peković O, Trivković S, Zorić N, Stanojević M, *Projekat sanacije korenog dela strukture jednoplavnog čeličnog dimnjaka TO Zemun*, Mašinski fakultet, Beograd, 2009.

DESIGN AND ANALYSIS OF THERMAL INSULATION LAYER OF STEEL STACK ROOT STIFFENERS

Abstract

Industrial steel stacks are designed according to specific requirements and exploitation conditions. Reconstruction of chimney root section was done due to crack occurrence and distortion of construction integrity. In order to reduce the load that are consequence of operating at extremely high flue gases temperature and corresponding thermal expansion, root stiffeners – ribs are coated with layer of thermal insulation – lining. Temperature field of shell and stiffeners assembly with and without insulation was determined using finite element method. Installation of insulation provided favorable temperature field and appearance of additional load due to difference in dilatation of chimney shell and ribs in the root section was avoided. CAD models and technical documentation, as well as thermal analysis was done using modern software tools.

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



34. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, maj 2012.

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

Todić, V., Zeljković, M., Lukić, D., Jovičić, G. MOGUĆNOST PRIMENE HIBRIDNIH OBRADNIH SISTEMA U PROIZVODNJI KOTRLJAJNIH LEŽAJA	3.1
Milović, D., Marković, S., Milinković, D., Bjeloglav, D. UPOREDNA ISPITIVANJA SISTEMA ZA PRIPREMU UGLJENOG PRAHA PRE I POSLE REKONSTRUKCIJE.....	3.6
Mujanović, E., Sprečić, D. ANALIZA TROŠENJA ZUBACA KOD KONUSNIH ZUPČANIH PAROVA.....	3.13
Mustafić, A., Nasić, E., Mehmedović, M., Demirović, M. EKSPERIMENTALNO-MATEMATIČKO MODELIRANJE POKAZATELJA OPTEREĆENJA TRAČNOG TESTERISANJA PRI REZANJU VISOKOLEGIRANIH CrNi ČELIKA.....	3.19
Milutinović, M., Tanović, Lj. PRILOG REŠAVANJU PROBLEMA OTPATKA PRI FORMATIRANJU PLOČASTIH MATERIJALA-IVERICE	3.25
Đenadić, D., Manić, M., Tanikić, D., Randelović, S. PRIKAZ VRSTA FIKSATORA I METODA OBRADNE ELEMENATA ZA FIKSATORE U MEDICINI.....	3.32
Janković, D. PREDLOG NOVOG KONCEPTA ISPITIVANJA SISTEMA UBRIZGAVANJA GORIVA.....	3.40
Drndarević, D., Milivojević, M., Petrović, S., Panić, S. MODELLING OF THE SPRING-BACK OF PM PARTS BY NEURAL NETWORKS.....	3.47
Pavlović, G., Savković, M., Gašić, M., Bulatović, R. PRIMENA METODE KRUTIH TELA ZA DISRETIZACIJU NOSEĆIH STRUKTURA PRI DINAMIČKOJ ANALIZI NA PRIMERU KONZOLNE DIZALICE	3.52
Nedić, B., Lakić-Globočki, G. HABANJA ALATA I OBRADIVOST TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA	3.59
Radonjić, S., Kovač, P., Mitrović, A. TEHNOLOGIJA BRUŠENJA I POLIRANJA OKRUGLIH PROHROMSKIH CEVI.....	3.65
Popović, M., Slavković, R., Jugović, Z., Milićević, I. ANALIZA KONVENCIONALNIH PRISTUPA ZA DEFINISANJE SPOLJAŠNJEG OPTEREĆENJA REZNIH ZUBA KOD BAGERA KONTINUALNOG DEJSTVA	3.69
Veličković, D., Marković, S., Đurović, Z., Kajević, M. JEDNA MOGUĆNOST MODELIRANJA TAČNOSTI IZRADE EKSPANZIONE CEVI	3.75
Trivković, S., Peković, O., Petrašinović, N., Stanojević, M. PRIMENA NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA U PROJEKTOVANJU SAVREMENIH OPITNIH POSTROJENJA ZA TRETMAN PIJAĆE VODE	3.81

SESIJA 2 →

← NAZAD

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

Laković, D., Savićević, S., Vukčević, M., Janjić, M., Šibalić, N. ANALIZA STEZAČA KRANSKIH ŠINA	3.85
Janjić, M., Vukčević, M., Savićević, S., Šibalić, N. ANALIZA NAPONA KOD OSNOSIMETRIČNOG DEFORMISANJA U OTVORENIM KALUPIMA	3.89
Jakovljević, Ž. POREĐENJE HILBERT HUANGOVE I DISKRETNE VEJVLET TRANSFORMACIJE U ANALIZI NESTACIONARNIH SIGNALA: PRIMENA U PREKIDNOM STRUGANJU	3.95
Milutinović, D., Slavković, N., Kokotović, B., Dimić, Z., Glavonjić, M. NOVI PRISTUP KINEMATIČKOG MODELIRANJA KAO OSNOVA ZA RAZVOJ DOMAĆEG DELTA ROBOTA	3.104
Glavonjić, M., Živanović, S. NOVI PRISTUP PROGRAMIRANJU NUMERIČKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI PRIMENOM STEP-NC	3.112
Lukić, N., Petrović, P., Danilov, I. OPTIMIZACIJA SENZORA SILE MEKOG ZGLOBA INDUSTRIJSKOG HUMANOIDNOG ROBOTA SA UPRAVLJANOM POPUSTLJIVOŠĆU ZA ZADATKE ROBOTIZOVANOG SPAJANJA DELOVA	3.118
Petrović, P., Lukić, N., Danilov, I. INDUSTRIJSKI HUMANOIDI - NOVI KONCEPT ROBOTA ZA KOLABORATIVNI RAD ČOVEK-MAŠINA U SISTEMIMA ZA ROBOTSKU MONTAŽU	3.126
Danilov, I., Petrović, P., Lukić, N. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA ZA ULTRABRZU OPTIČKU TRIANGULACIJU STRUKTURIRANE SVETLOSTI U ROBOTIZOVANOJ MONTAŽI	3.140
Mitić, M., Miljković, Z., Babić, B. ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ РОБОТСКОГ СИСТЕМА - ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	3.149
Bojović, B., Babić, B., Mileusnić, I., Đukić, M. ФРАКТАЛНА АНАЛИЗА ТОПОГРАФИЈЕ СУПСТРАТА ПРЕВЛАКА КОД АЛАТА ЗА ИЗВЛАЧЕЊЕ	3.159
Zorić, N., Mitrović, Z., Simonović, A., Posteljnik, Z. OPTIMALNA KONTROLA VIBRACIJA KOMPOZITNOG ELASTIČNOG PIEZOELEKTRIČNOG MANIPULATORA PRIMENOM FAZI-LOGIČKOG UPRAVLJANJA.....	3.165
Pavićević, Ž., Sofrenović, M. POSLEDNJI TREND OVI U INDUSTRIJI ALATNIH MAŠINA: SVETSKA KRIZA.....	3.171

SESIJA 1 →

← NAZAD



Todić, V.; Zeljković, M.; Lukić, D.; Jovičić, G.*

MOGUĆNOST PRIMENE HIBRIDNIH OBRADNIH SISTEMA U PROIZVODNJI KOTRLJAJNIH LEŽAJA¹

Rezime:

Hibridni obradni sistemi omogućavaju kombinovane ili međusobno poboljšane prednosti pojedinih procesa obrade koji se na njima realizuju, izbegavajući ili umanjujući pri tome negativne efekte procesa u slučaju kada bi se oni pojedinačno izvodili.

U radu se prikazuju mogućnosti primene hibridnih obradnih sistema i procesa, koji su podržani laserom, u proizvodnji jedne grupe kotrljajnih ležaja.

Ključne reči: hibridni obradni sistemi, procesi obrade, kotrljajni ležajevi, proizvodnja

1.0 UVOD

Savremena industrija prerade metala suočava se sa izazovima teško obradivih materijala, visokim zahtevima u pogledu kvaliteta sve složenijih proizvoda, kratkim rokovima isporuke i smanjenjem troškova proizvodnje.

Maloserijska proizvodnja širokog asortimana proizvoda, koja je karakteristična i široko prisutna u savremenoj industriji prerade metala, uz pomenute zahteve tržišta, nameće potrebu razvoja i primene visokoautomatizovanih i fleksibilnih obradnih sistema, kao što su i hibridni obradni sistemi, bilo kao jednofunkcionalni ili multifunkcionalni. Ovi obradni sistemi, zasnovani su na rešenjima koja omogućuju realizaciju različitih procesa obrade, poznatih kao hibridni procesi obrade. Osnovni cilj razvoja hibridnih obradnih sistema je da se omoguće kombinovane ili međusobno poboljšane prednosti pojedinih procesa obrade koji se na njima realizuju, izbegavajući ili umanjujući, pri tome neke negativne efekte procesa u slučaju kada bi se oni pojedinačno izvodili.

Hibridizacija obradnih sistema, dakle, omogućuje realizaciju višestrukih procesa obrade na jednom obradnom sistemu sa značajnim tehničkim i ekonomskim efektima u poređenju sa pojedinačnom realizacijom tih procesa obrade. Hibridni procesi obrade se mogu svrstati u dve osnovne grupe:

- Procesima kojima se vrši direktno uklanjanje materijala i
- Procesima koji pospešuju uklanjanje materijala drugim procesima obrade, kao što su na primer, procesi obrade rezanjem.

U radu će se detaljnije prikazati osnovne karakteristike i efekti primene laserom podržanih procesa obrade rezanjem metalnih materijala i keramike.

2.0 OSNOVNE KARAKTERISTIKE HIBRIDNIH OBRADNIH SISTEMA I PROCESA

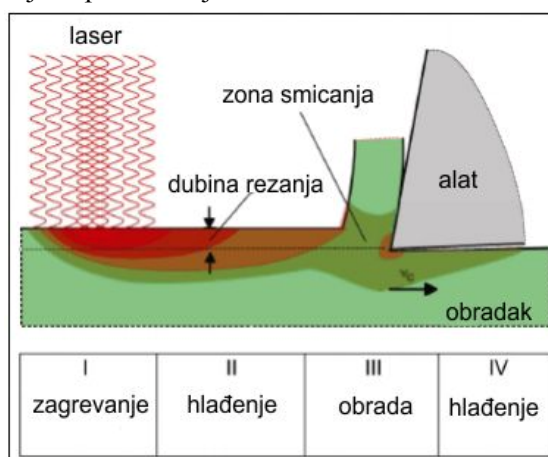
2.1 Hibridni procesi obrade struganjem

Laserom podržani procesi obrade struganjem intenzivno su istraživani u poslednjih desetak godina, naročito kada su u pitanju teško obradivi materijali. Princip obrade struganjem keramike podržane laserom prikazan je na slici 1. Obrada rezanjem podržana laserom zahteva visoko koncentrisani snop energije koji obezbeđuje temperaturu od (800-1000)°C u tački neposrednog rezanja.

* Prof. dr Velimir Todić, e-mail: todvel@uns.ac.rs; Prof. dr Milan Zeljković, e-mail: milanz@uns.ac.rs; mr Dejan Lukić, e-mail: lukicd@uns.ac.rs; MSc Goran Jovičić, e-mail: goran.jovicic@uns.ac.rs; Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad.

¹ U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici" TR 35025, koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Ovaj obradni centar za struganje obezbeđuje odgovarajući proces obrade sa smanjenim ciklusnim vremenom, smanjene ili potpuno eliminisane troškove transporta obradaka između operacija obrade, što je od posebnog značaja za maloserijsku proizvodnju.



Slika 1. Princip obrade keramike pri „laserom podržanim struganjem“ [10]

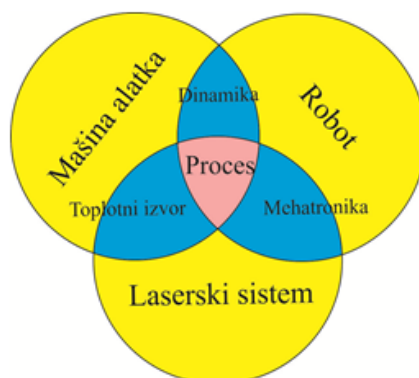
Laserom podržano struganje obezbeđuje proizvodnost izraženu zapreminom skinute strugotine od (80-800) mm³/min, uz postizanje tačnosti mere od (0,01-0,02) mm [10].

Rezultati istraživanja koji su prikazani u radu [5] pokazuju mogućnost i efekte primene procesa obrade laserom podržanog struganja. Ispitana su dva oksidna (Al₂O₃ i ZrO₂) i dva neoksidna (LPS-SiC i Si₃N₄) keramička materijala u procesu obrade laserom podržanog struganja, pri čemu su dobijeni impozantni rezultati u pogledu kvaliteta obrađene površine. Naime, srednja hrapavost obrađene površine je manja od 1 μm bez vidljivih pukotina. Loš kvalitet obrađene površine javlja se pri temperaturama ispod 1100°C, dok je defektni sloj manji nego pri brušenju. Troškovi obrade keramike, laserom podržanog struganja, su 60-80% manji od troškova brušenja. Specifična energija obrade rezanjem smanjuje se sa porastom temperature i iznosi 6 J/mm³, dok je ova energija pri obradi brušenjem (40-100) J/mm³[7]. Pri obradi keramike laserom podržanim struganjem, obradak se stalno zagreva laserskim zrakom neposredno ispred reznog alata.

Rezultati istraživanja mogućnosti obrade laserom podržanog struganja silicijum nitridne keramike (Si₃N₄), koja se koristi za izradu ležajeva, pokazuju da se pri tome efikasno mogu koristiti sledeći režimi obrade: pomak, s = 0,1-0,2 mm/o, a = 0,5-1 mm, v = 60-120 m/min.

2.2 Hibridni procesi obrade glodanjem

Tehnološka platforma, za koju su određeni rezultati istraživanja prikazani u radu [1], u svojoj strukturi sadrži obradni sistem za glodanje, koji je dopunjen određenim brojem laserskih glava namenjenih za obradu zavarivanjem, kaljenjem i bušenjem. Proces obrade laserom i rukovanje obradkom podržani su robotom, koji je direktno integrisan u strukturu mašine za glodanje, slika 2.



Slika 2. Koncept tehnološke platforme [1]

Ova tehnološka platforma integriše, dakle, module mašine, robot (manipulator) i dva laserska izvora, što obezbeđuje veliki broj mogućnosti obrade rezanjem i laserom u jednom stezanju, čime se postiže visoka proizvodnost.

Hibridni obradni centar za glodanje [3], koji je razvijen na modularnom konceptu, svojim rešenjem integriše dva obrtna stola, obezbeđujući na taj način funkciju petoosne glodalice, kao i robot za rukovanje obracima i realizaciju procesa zavarivanja i termičke obrade. Laserske glave, koje su integrisane u hibridni obradni centar za glodanje služe za zavarivanje i kaljenje. Primenom 2D laserskog skenera vrše se promenljiva podešavanja kod procesa kaljenja [2]. Ovako koncipiran hibridni obradni centar za glodanje ima visok stepen fleksibilnosti i značajne efekte u pogledu proizvodnosti i tačnosti obrade [1].

Efekti primene laserom podržanog glodanja [7], odnose se na rezultate istraživanja ove obrade hrom-nikl čelika tvrdoće 58HRC optastim CBN alatom, pri režimima obrade, $v = 500$ m/min, $s = 0,1$ mm/zubu, $a = 18$ mm. CO₂ laserom snage 4kW, postignuto je smanjenje otpora pomoćnog kretanja 45%, glavnog otpora rezanja 62% i otpora prodiranja 44%. Korišćenjem Al₂O₃-TiC keramičkog alata pomenute komponente sila rezanja se smanjuju još za 15% i 30%.

2.3 Hibridni procesi obrade brušenjem

Laserom podržani procesi obrade brušenjem teško obradivih materijala, keramike, stakla, plastike i kompozita realizuju se sa znatno većim efektima u odnosu na konvencionalno brušenje [7]. Utvrđeno je da se primenom egzajmer lasera, talasne dužine 0,2-0,35 μm, pri brušenju postižu znatno veći efekti nego Nd: YAG laserom (*Yttrium Aluminium Garnet*).

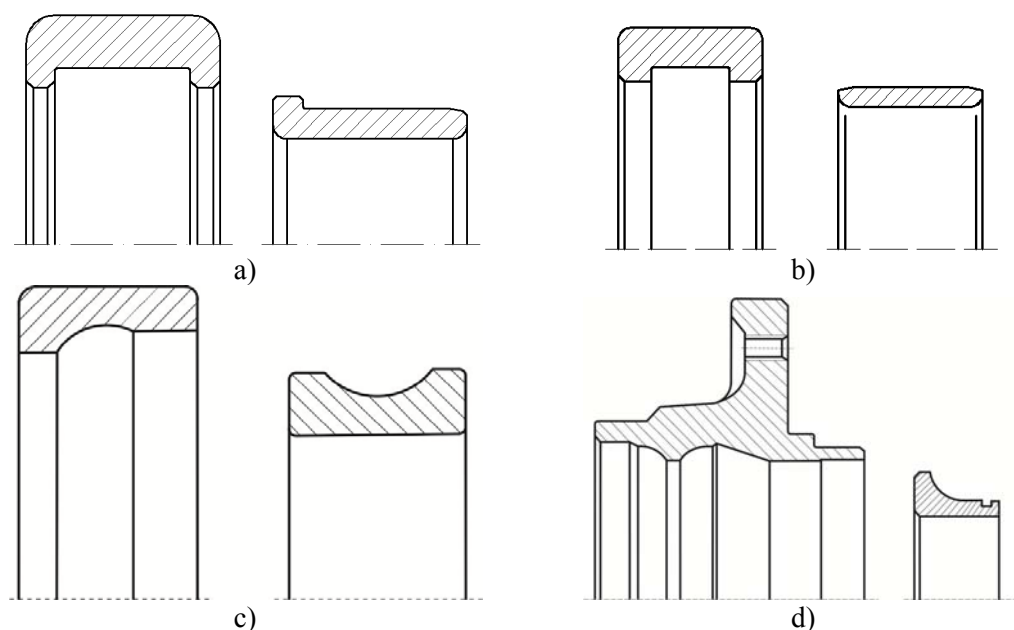
2.4 Termička obrada laserom

Termička obrada laserom je vrlo efikasna za određene vrste čelika. Pri tome, profil laserskog snopa ima značajan uticaj na efekte termičke obrade. Tako HPDL (*High Power Diode Laser*) laser, koji ima Top-Hat oblik, daje mnogo bolje rezultate nego CO₂ ili YAG laser, koji imaju oblik laserskog snopa u vidu Gausove raspodele [8]. Zbog toga je značajan broj istraživača svoja istraživanja usmerio u pravcu izučavanja termičke obrade bazirane na HPDL, kao na primer Choi [8].

U radu [7] su prezentovani rezultati istraživanja mogućnosti kaljenja čelika za ležajeve primenom lasera. Pri tome su moguća dva slučaja kaljenja laserom. Prvi se odnosi na slučaj kada obrada rezanjem sledi direktno lasersko zagrevanje, a drugi kada se obrada rezanjem izvodi posle kaljenja primenom lasera na obradku.

3.0 PRIKAZ GRUPE KOTRLJAJNIH LEŽAJA I LEŽAJNIH SKLOPOVA

Posmatrana grupa ležaja i ležajnih sklopova, čiji su oblici spoljašnjih i unutrašnjih prstenova prikazani na slici 3, proizvode se u određenom opsegu dimenzija, u količinama koje pripadaju maloserijskoj proizvodnji. Prstenovi ovih ležaja i ležajni sklopovi proizvode se od čelika za poboljšanje.



Slika 3. Profili spoljašnjih i unutrašnjih prstenova posmatranih grupa ležaja i ležajnih sklopova: ležaja za vučena i vučna vozila za železnicu (a), (b), kugličnih ležaja sa kosim dodirnom (c) i integrisanih ležaja točka vozila (d)

4.0 TEHNOLOŠKI PROCESI IZRADE PRSTENOVA KOTRLJAJNIH LEŽAJA ZASNOVANI NA PRIMENI SAVREMENIH OBRADNIH SISTEMA

Za razvoj novih rešenja tehnoloških procesa izrade prstenova posmatrane grupe kotrljajnih ležaja razmatraće se mogućnost primene multifunkcionalnih hibridnih i multifunkcionalnih obradnih sistema.

Rezultati istraživanja mogućnosti i efekata primene hibridnih obradnih procesa i sistema, koji su ukratko prikazani u radu, daju polaznu osnovu za razvoj novih rešenja tehnoloških procesa izrade prstenova grupe kotrljajnih ležaja i ležajnih sklopova od čelika ili keramike, slika 3.

Tehnološki procesi izrade kotrljajnih ležaja obuhvataju procese izrade prstenova, kaveza, kotrljajnih tela, uparivanje, montažu, završnu kontrolu i pakovanje. U ovom radu posmatraće se samo tehnološki procesi izrade prstenova, koji su zasnovani na primeni hibridnih multifunkcionalnih i multifunkcionalnih obradnih sistema za određene operacije obrade.

Usvojeno rešenje tehnološkog procesa izrade pomenutih delova posmatrane grupe ležaja, koji se izrađuju od čelika za poboljšanje, zasnovano na primeni hibridnih multifunkcionalnih obradnih sistema za određene operacije obrade, prikazano je u tabeli 1. u vidu sadržaja standardnog tehnološkog procesa.

Pripremi za prstenove ležaja, bilo da su odsecci, odlivci ili otkovci, precizirani su na principima grupne tehnologije, dakle kao grupni za određene opsege dimenzija prstenova [11]. Operacija odsecanja, za slučaj kada su pripremi od cevi, nije prikazana u sadržaju standardnog tehnološkog procesa izrade.

Tabela 1: Sadržaj standardnog tehnološkog procesa izrade prstenova kotrljajnih ležaja

<i>Broj operacije</i>	<i>Opis operacije</i>	<i>Naziv obradnih sistema i opreme</i>
10/1	Grubo struganje jedne strane	Obradni centar za struganje podržan laserom
10/2	Grubo struganje druge strane	
20	Čišćenje obradka	Radni sto
30/1	Brušenje čeonih strana	Obradni centar za brušenje i struganje podržan laserom
30/2	Brušenje druge čeonih strana	
30/3	Fino struganje staze	
40	Brušenje	CNC brusilica
50	Superfinaširanje	Superfinaš
60	Demagnetizacija	Uređaj za demagnetizaciju
70	Kontrola i uparivanje	Kontrolni sto

Tehnološki proces izrade spoljašnjih i unutrašnjih prstenova posmatrane grupe kotrljajnih ležaja, koji je zasnovan na primeni multifunkcionalnih obradnih sistema za određene operacije obrade, za slučaj korišćenja tri pomenute vrste priprema, prikazan je u vidu standardnog tehnološkog procesa, tabela 2.

Tabela 2: Sadržaj standardnog tehnološkog procesa izrade prstenova kotrljajnih ležaja

<i>Broj operacije</i>	<i>Opis operacije</i>	<i>Naziv obradnih sistema i opreme</i>
10/1	Grubo struganje jedne strane	Obradni centar za struganje
10/2	Grubo struganje druge strane	
20/1	Brušenje čela	Obradni centar za struganje i brušenje
20/2	Fino struganje konture	
30	Poboljšanje	Termička obrada
40	Peskarenje	Peskarnica
50	Brušenje	CNC brusilica
60	Brušenje staze	CNC brusilica
70	Superfinaširanje	Superfinaš
80	Demagnetizacija	Uređaj za demagnetizaciju
90	Kontrola i uparivanje	Kontrolni sto

5.0 ZAKLJUČCI

Multifunkcionalni hibridni obradni sistemi mogu se uspješno koristiti za određene operacije obrade spoljašnjih i unutrašnjih prstenova od čelika, dok je njihova primena neophodna za operacije obrade ovih prstenova od keramike. Primena pomenutih obradnih sistema u proizvodnji obe pomenute grupe kotrljajnih ležaja je naročito efikasna u maloserijskoj proizvodnji.

Predloženo rešenje standardnog tehnološkog procesa izrade prstenova posmatrane grupe kotrljajnih ležaja i ležajnih sklopova, koje je zasnovano na primeni hibridnih obradnih sistema, zahteva dodatna ispitivanja i proveru u proizvodnim uslovima, kako u pogledu tačnosti, tako i u pogledu ekonomskih efekata proizvodnje.

Upoređivanjem dve predložene varijante tehnološkog procesa izrade prstenova posmatrane grupe kotrljajnih ležaja može se zaključiti da je broj operacija kod druge varijante veći nego kod prve. Uzimajući u obzir karakteristike obradnih sistema koji se koriste na istim operacijama obrade, obradni i tehnološki ciklus kod prve varijante je kraći, jer se obrada na ovim operacijama izvodi korišćenjem intenzivnijih režima obrade.

6.0 LITERATURA

1. Brecher, C., Hoffmann, F., Karlberger, A., Rosen, J. C.,: Multi-Technology Platform for Hybrid Metal Processing, Laboratory for Machine Tools (WZL), RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2008.
2. Brecher, C., Klocke, F., Breitbach, T., Do-Khac. D., Heinen, D., Karlberger, D., Rosen, J.: A hybrid machining center for enabling new die manufacturing and repair concepts, *German Academic Society for Production Engineering (WGP)*, 2011.
3. Brecher, C., Klocke, F., Breitbach, T., Do-Khac. D., Heinen, D., Karlberger, D., Rosen, J.: Hybrides Bearbeitungszentrum für den Werkzeug- und Formenbau, Aachen 2008.
4. Brecher, C., Klocke, F., Breitbach, T., Do-Khac. D., Heinen, D., Karlberger, D., Rosen, J.: Hybride fertigung für hochlohnländer, Aachen, 2009.
5. Brecher, C., Chris-Joerg Rosen, Emonts, M.,: Laser-assisted milling of advanced materials, Franhofer Institute for Production Technology IPT, Aachen, Germany, 2010.
6. Chih-Wei, C., Chun-Pao, K.: An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planing, *International journal of machine tools and manufacture*, pp. 452-461, Taiwan, 2006.
7. Grzesik, W.,: Advanced machining processes of metallic materials; Theory, Modelling and Applications, ISBN 978-0-08-044534-2, pp. 293-296, Amsterdam, 2008.
8. Kwang-Sun, K., Jae-Hzun, K., Jun-Zoung, C., Choon-Man, L.,: A review on research and development of laser assisted turning, *International journal of precision engineering and manufacturing* Vol. 12, No. 4, pp. 753-759, Korea, 2011.
9. López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A.: Machine tools for high performance machining, ISBN 978-1-84800-379-8, Spain, 2009.
10. Teele, R.,: Laser assisted turning of ceramics, Department of ceramics and refractory materials, RWTH Aachen University, Germany.
11. Todić, V., Tepić, J., Kostelac, M., Lukić, D., Milošević, M.: Design and economic justification of group blanks application, *Metalurgija*, Vol.51, No 2, pp. 269-272, Zagreb, Hrvatska, 2012.

RESEARCH THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF HYBRID MACHINING SYSTEMS IN MANUFACTURING OF ROLLER BEARINGS

Abstract:

Hybrid machining systems allow combined or mutually enhanced advantages individual machining processes that is on them realized, avoiding or reducing the negative effects of process when they performed individually.

This paper present's possibility applying of hybrid machining systems and processes, which are assisted by laser in the manufacturing one group of roller bearings.

Key words: hybrid machining systems, machining processes, roller bearings, manufacturing

Dragoljub Milović¹, Svetislav Lj. Marković², Darko Milinković³, Dejan Bjeloglav⁴

UPOREDNA ISPITIVANJA SISTEMA ZA PRIPREMU UGLJENOG PRAHA PRE I POSLE REKONSTRUKCIJE

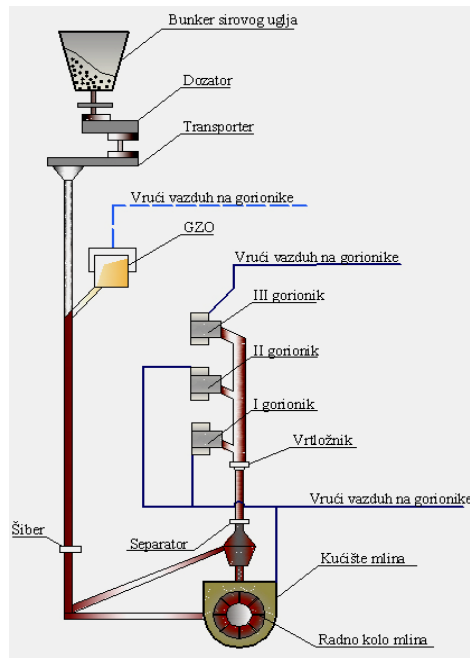
Rezime:

U radu je ukratko opisan princip rada sistema za pripremu ugljenog praha (mlevenje uglja) sa pripadajućom pratećom opremom koji se nalaze u sastavu Termoelektrane Gacko. Mlin ruske proizvodnje dva puta je rekonstruisan. Ispitivanja osnovnih parametara vezanih za pravilan rad navedenog sistema izvođena su 1985, 2005. i 2006. godine od strane različitih institucija. Rezultati ispitivanja su potvrdili ispravnost rekonstrukcije.

Ključne reči: mlin, radno kolo, separator, gorionik, aerosmeša.

1. UVOD

Kotao P-64 (u sastavu TE Gacko) opremljen je sa 8 individualnih zatvorenih sistema ugljenog praha (mlinova) sa direktnim uduvavanjem. Sistem ugljenog praha se sastoji od: bunkera sirovog uglja, kombinovanog dodavača sirovog uglja, usisnog kanala (GZO), ventilacionog mlina (slika 1), inercionog separatora, kanala ugljenog praha, vrtložnika, odvajača praha, gorionika, šibera, klapni i druge isključne i regulacione armature. Osnovni podaci o mlinu dati su u tabeli 1.



Slika 1. Ventilacioni mlin S 40.50

¹ **Dragoljub MILOVIĆ**, maš. ing., Slavljan br. 3, Gacko, RiTE Gacko, Republika Srpska, E-mail: mavedra@teol.net,

² Dr **Svetislav Lj. MARKOVIĆ**, profesor, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, 32000 Čačak, Svetog Save 65, Srbija, E-mail: svetom@open.telekom.rs.

³ **Darko MILINKOVIĆ**, maš. ing., Vidovdanska br. 22, Gacko, RiTE Gacko, Republika Srpska, E-mail: milinkovicdarko@gmail.com,

⁴ **Dejan BJELOGLAV**, maš. ing., Gračanica bb, Gacko, RiTE Gacko, Republika Srpska, E-mail: dejan.bjeloglav@gmail.com,

Tabela 1. Karakteristike ventilacionog mlina S 40.50

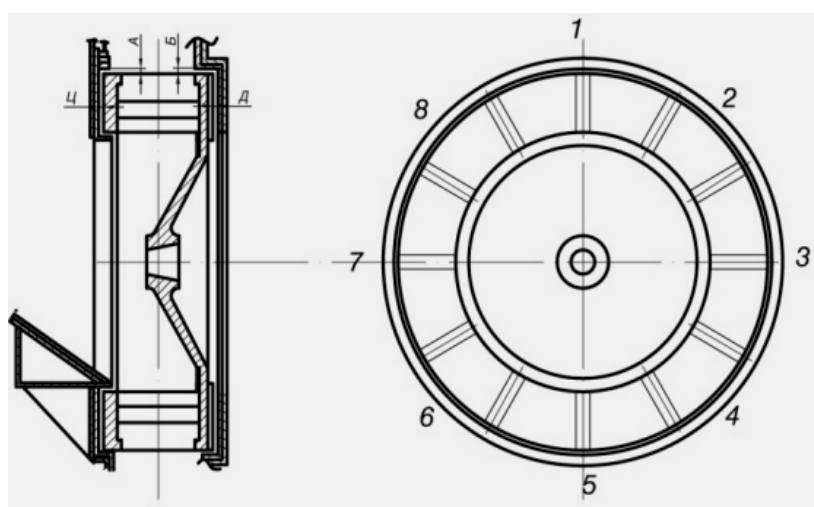
Redni broj	Naziv	Parametar
1.	Ventilacioni kapacitet	120.000 – 160.000 m ³ /h
2.	Obrtaji radnog kola	485 o/min
3.	Težina mlina	100 tona
4.	Kapacitet	50 t/h lignita
5.	Napor ventilatora	1.100 mmH ₂ O
6.	Potrebna količina vode za hlađenje mlina	9,5 m ³ /h
7.	Količina vazduha za zaptivanje	600 m ³ /h

Cilj ispitivanja je provera radnih parametara mlinova, posle dve rekonstrukcije, kojima je kapacitet mlinova za ugalj, povećan sa projektovanih 40 t, na 46 t posle prve i 50 t posle druge rekonstrukcije.

2. PRINCIP RADA MLINA

Ventilacioni mlin služi za mlevenje lignita u praškasto stanje, a takođe i za transport aerosmeše kroz separator, kanale ugljenog praha i gorionike u ložište kotla. Na kotlu su postavljena četiri mlina leve i četiri desne izvedbe. Ventilacioni mlin se sastoji od kućišta, rotora, pulvis-spojnice i elektromotora. Kućište mlina je zavareni oklop. Oklop je rađen u vidu demontažnih metalnih ploča i šipki kvadratnog preseka. Rotor mlina sastoji se od radnog kola, vratila i ležajeva. Radno kolo (slika 2) uređeno je u vidu dva prstena spojena radijalnim vezama na koje se postavljaju udarne ploče. Pri obrtanju rotora ploče stvaraju ventilacioni efekat i usisavaju vazduh, doveden od zagrejača vazduha unutar kućišta mlina. Vratilo rotora se oslanja na dva valjkasta ležaja. Prvi, do radnog kola, je dvoredi i naziva se glavni, drugi, jednoredi, i naziva se noseći. Svaki ležaj ima svoj karter i uljokazna stakla. U gornjem delu kartera glavnog ležaja postavljeno je staklo za kontrolu po kome se može odrediti prisustvo protoka ulja na ležaj. Sistem podmazivanja ležajeva sastoji se od radnog i startno-rezervnog sistema.

Ugalj u potrebnoj količini i sa granulacijom manjom od 40 mm dodaje se u usisni kanal pomoću dozatora i transporterata. Pomoću ventilacionog mlina dimni gasovi, sa temperaturom koja odgovara opterećenju kotla (800-1000°C), usisavaju se u šahtu za uzimanje gasova. Pri padanju nadole ugalj predaje vlagu dimnim gasovima, hladi ih do temperature 300-450°C, i sam se suši. Komadi uglja padaju na radno kolo mlina (slika 2). U mlinu se čestice uglja udarajući u oklop i radne ploče pretvaraju u ugljeni prah. Pri mlevenju uglja vrši se njegovo završno sušenje do potrebne veličine. Smeša ugljenog praha i dimnih gasova potiskuje se radnim kolom mlina u separator gde dolazi do odvajanja krupnih čestica praha od sitnih. Krupne čestice ugljenog praha se recirkulacionim kanalima vraćaju u mlin gde se vrši još jedan ciklus mlevenja. Na taj način oko 40-50% dovedenog uglja u mlin recirkuliše.



Slika 2. Radno kolo mlina

Separisani ugljeni prah zajedno sa gasovima i vazduhom (aerosmeša) iz separatora se usmerava ka vrtložniku gde dolazi do raspodele (krupne čestice ugljenog praha idu na periferiju, a manje ka centru). Na taj način krupne čestice dolaze u donje gorionike, a sitnije u gornje. Za normalno sagorevanje ugljenog praha potrebna je temperatura od 120-180°C. Održavanje temperature aerosmeše iza mlina vrši se dodavanjem

veće količine uglja, a takođe smanjenjem temperature dimnih gasova za sušenje. U tom cilju umesto oduzimanja gasova iz ložišta dodaje se slabo zagrejani vazduh koji ima temperaturu 120°C. Eksploatacioni vek udarnih ploča radnog kola je oko 2000 radnih sati, nakon čega se vrši zamena novim. Radno kolo sa pohabanim udarnim pločama, kojima je neophodna zamena prikazano je na slici 3.



Slika 3. Izgled pohabane udarne ploče

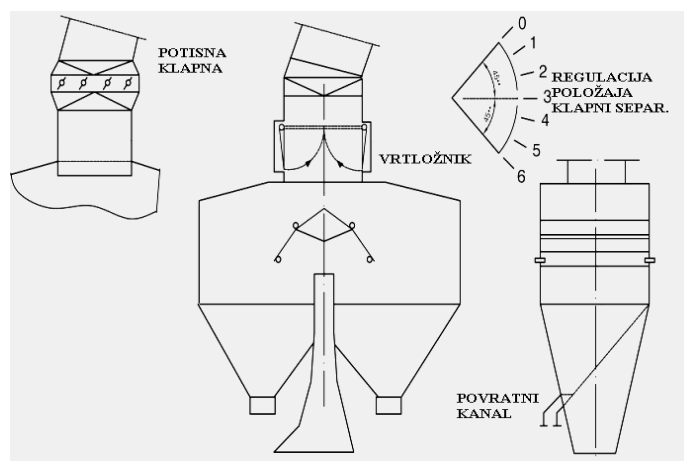
U samlevenom uglju na potisu mlina nema dovoljno kiseonika, kako bi se izbeglo njegovo paljenje u samom mlinu. Kiseonik se dodaje prinudno na izlazu iz gorionika. Bunker sirovog uglja je metalni, zavarene konstrukcije, oblika piramide. Kapacitet bunkera je 260 tona lignita. Kombinovani dodavač sirovog uglja služi za regulisanje količine uglja, koji se dovodi u mlin, i sastoji se od dozatora i dodavača sa pogonima.

Dozator je tipa grebača, postavljen neposredno ispod bunkera sirovog uglja, odakle ugajl kroz „šiberni“ uređaj, pod dejstvom sopstvene težine, dolazi na gornji nagibni pod. Dalje se gorivo pomera grebačima na pod transportera. Grebači dozatora sastoje se od tri samostalna kompleta. Svaki od njih ima dva paralelna lanca međusobno spojena grebačima. Za grebače su primenjeni zupčasti lanci sa korakom 200 mm i radnim opterećenjem 50 kN. Regulator sloja je nožastog oblika. Na račun podizanja ili spuštanja noža vrši se regulacija debljine sloja goriva u granicama 120-260 mm. Pogon dozatora sastoji se od elektromotora naizmenične struje sa regulacijom broja obrtaja od 300-1500 o/min. Broj obrtaja dozatora određuje količinu uglja koja se dovodi u mlin.

Dodavač je tipa grebača. Grebači se sastoje od dva zupčasta lanca sa korakom 200 mm između kojih su postavljeni grebači. Brzina kretanja grebača je 0,1127 m/s. Za čišćenje podova dodavača u slučaju lepljenja uglja na grebače postavljeni su noževi za čišćenje.

Usisni kanal je kružnog preseka prečnika 1800 mm, iznutra obložen vatrootpornim slojem opeke i betona debljine 400 mm. Dimni gasovi iz ložišta uzimaju se kroz otvore za uzimanje gasova. Za čišćenje otvora od šljake služi „topovsko“ obduvanje na koje se dovodi para od izlaznog stepena međupregrevanja kotla.

Separator (slika 4) je namenjen za odvajanje grubih čestica iz aerosmeše i vraćanje istih u mlin na ponovno mlevenje. Za regulaciju finoće mlevenja separatora postavljen je dvokrilni šiber sa uređajem za regulaciju ugla nagiba krila. Položaj „0“ na pokazivaču odgovara punom otvaranju krila separatora, kada je finoća mlevenja najbolja, a položaj „6“ punom zatvaranju krila, kada je finoća mlevenja najgrublja.

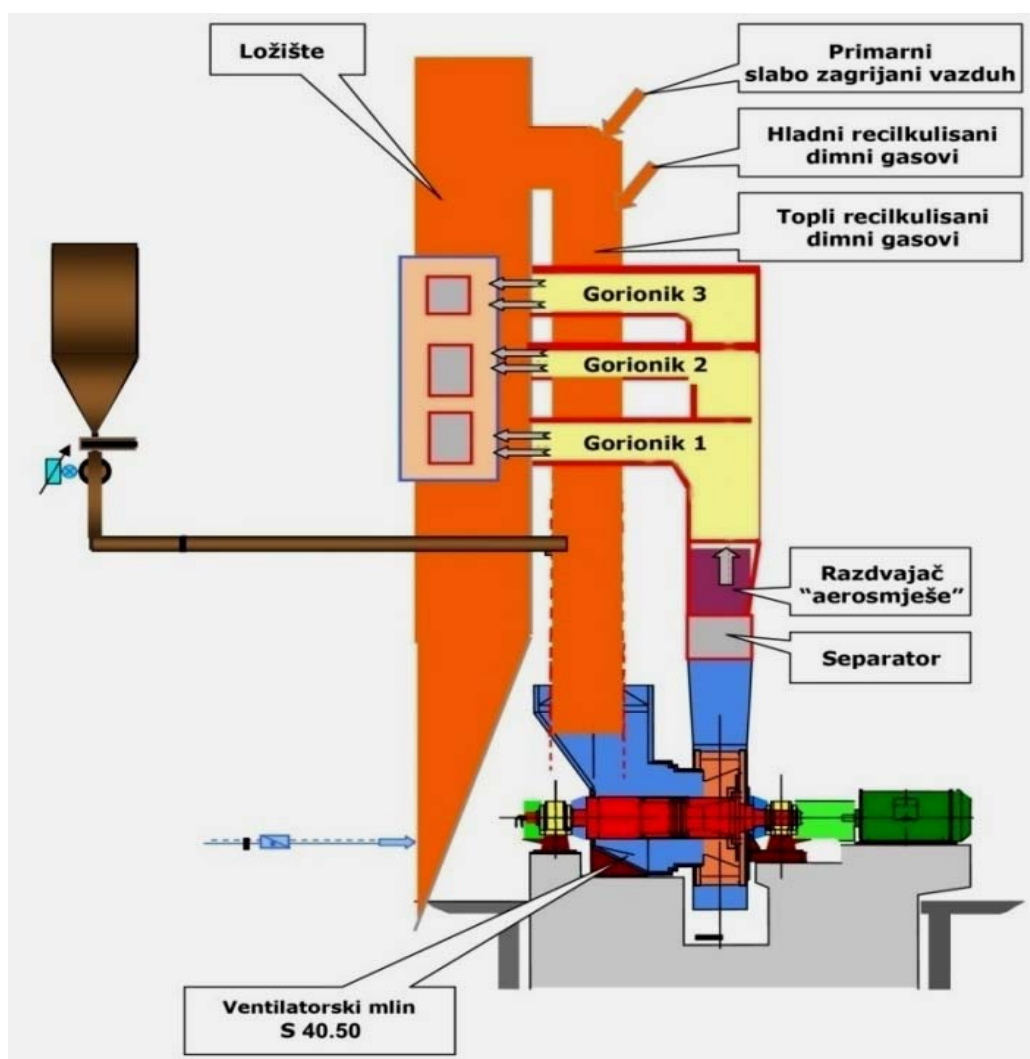


Slika 4. Separator ventilacionog mlina

Posle šibera postavljen je vrtložnik čija namena je da razdvoji ugljenu prašinu prema gorionicima na krupne i sitne čestice. Vrtložnik se sastoji od 6 obrtnih lopatica i rasekača. Ugao okretanja lopatice može se menjati od 0 do 45°. Postavljanje pokazivača na 0° odgovara položaju pri kome vrtloženje ne postoji. Kao rezultat dejstva centrifugalnih sila proizilazi frakciona raspodela toka po preseku kanala ugljenog praha. Na periferiju preseka idu krupnije čestice koje idu u donje gorionike. Malo sitniji ugljeni prah dolazi u srednje gorionike, a najsitniji ugljeni prah i osnovni deo dimnih gasova dolazi u gornje gorionike. Razdvajač praha namenjen je za ravnomerno raspoređivanje aerosmeše na sva tri reda gorionika. Aerosmeša dolazi u gorionike po centru preseka, a sekundarni vazduh po periferiji.

3. GORIONICI

Komora za sagorevanje opremljena je sa 24 gorionika, koji su smešteni jedan nasuprot drugog na bočnim zidovima u tri reda.



Slika 5. Položaj mlina, separatora i gorionika ugljenog praha

Na svakom bočnom zidu se nalaze tri reda gorionika. Svaki red koji se sastoji od četiri gorionika, napaja se svojim ventilacionim mlinom. Gorionik je protočni, ejektorskog tipa. Osa gorionika ima pad prema dole u odnosu na horizontalu od 15°. Gorionik je podeljen na 4 pravougaona kanala primarnog vazduha koji se po obimu obduvavaju sekundarnim vazduhom (slika 5).

4. MERENJA OSNOVNIH PARAMETARA MLINOVA

Projektovane karakteristike lignita prikazane su tabelarno (tabela 2).

Tabela 2. Projektovane karakteristike goriva

Redni broj	Kvalitet uglja	Oznaka	Topotna moć	Elementarna analiza				
			H_d	SI^r	N^r	S^r	A^r	W^r
			kJ/kg	%	%	%	%	%
1.	Poboljšani	Max	11616	34,7	0,6	1,0	8,0	35,0
2.	Garantovani	Gar	10362	30,6	0,5	0,5	12,0	40,0
3.	Pogoršani	Min	9101	25,8	0,5	0,1	16,0	44,0

Oznake u tabeli su: SI^r - šljaka (nesagoriva materija), N^r - azot, S^r - sumpor, A^r - pepeo, W^r - radna vlaga.

4.1. Ispitivanje finoće mlevenja

Ispitivanje finoće mlevenja izvodi se isejavanjem određene količine samlevenog uglja na sitima finoće R_{1000} , R_{200} , R_{90} , a kao rezultat se daju podaci isejane količine na određenom situ, izraženi u procentima. U tabeli 3 su dati podaci po godinama, sa navedenim institutima koji su vršili ispitivanja.

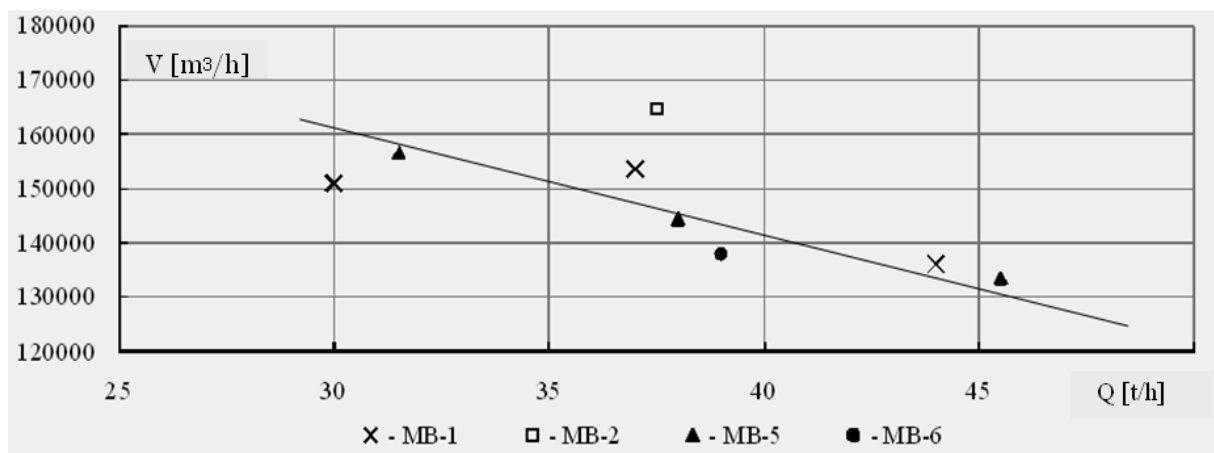
Tabela 3. Rezultati merenja finoće mlevenja

Analiza pomoću sita	Projektovana	Maš. fak. 1985.	Vinča 2005.	Kotes 2006.
R_{1000}	25 -28	25,4	23,5 – 26,5	23,9 -25,1
R_{200}	12-16	15,2	14,4 - 16	11,96 - 14,55
R_{90}	38-56	55	37 - 46,5	33,08 - 44,83
Brzina aerosmeše, m/s	18,4-19,7	18,8-21,3	17,8 - 19,5	13,8 - 23,4
Temperatura aerosmeše, °C	120-190	140-175	183-190	112-167

Dobijeni rezultati uglavnom se nalaze u projektovanim granicama.

4.2. Ispitivanje ventilacione moći mlinova

U toku bilansnih ispitivanja proverena je ventilaciona sposobnost mlinova, označenih sa MB-1, 2, 5 i 6. Rezultati merenja predstavljeni su na slici 6.



Slika 6. Ventilaciona karakteristika mlinova

Očigledno je da najbolju ventilacionu karakteristiku ima mlin MB-2.

4.3. Merenje protoka ugljenog praha po gorionicima

Projektovana raspodela ugljene prašine po gorionicima je sledeća:

- prvi gorionik 30-39%
- drugi gorionik 32-46%
- treći gorionik 20-28%

Merenje ventilacije sprovedeno je po odvojenim horizontalnim kanalima aerosmeše, što dozvoljava da se sa dovoljnim stepenom tačnosti oceni rad svakog reda gorionika. Jasno je iz datih rezultata za protok aerosmeše (slika 6) i raspodelu ugljene prašine po gorionicima (1 red – 32÷41%; 2 red – 32÷37%; 3 red – 23÷31%) da nema većih odstupanja od projektovanih.

Rezultati merenja ventilacione moći (protoka vazduha) mlinova 1 i 2, kao i rezultati merenja protoka ugljenog praha po nivoima gorionika prikazani su u tabeli 4. Izmerene vrednosti koje su dobijene 1985. godine, od strane Mašinskog fakulteta iz Beograda, predstavljaju rezultate pre rekonstrukcije mlinova, dok se dobijeni rezultati iz 2005. od strane Insituta Vinča, kao i oni iz 2006. od strane Ruskog Instituta Kotes, odnose na period posle rekonstrukcije mlinova.

Tabela 4. Rezultati merenja za mlinove 1 i 2

Naziv	Jedinica mere	MLIN 1			MLIN 2		
		Maš. fak. 1985.	Vinča 2005.	Kotes 2006	Maš. fak. 1985.	Vinča 2005.	Kotes 2006.
Ventilaciona moć	m ³ /h	153.582	141.721	150.933	144.468	156.687	133.541
Prvi gorionik	m ³ /h	57.413	54.497	60.251	51.688	57.463	50.006
Drugi gorionik	m ³ /h	52.435	43.490	48.941	55.938	54.308	48.411
Treći gorionik	m ³ /h	43.734	43.734	41.741	36.842	44.916	35.124
Raspored ugljenog praha po gorionicima							
Prvi gorionik	%	35	37	33	34	30	33
Drugi gorionik	%	39	40	42	41	44	45
Treći gorionik	%	26	23	25	26	26	22
Opterećenje mlina	t/h	48	49	48,5	49	52	51
Temp. aerosmeše	°C	148	165	155	160	157	148

5. ZAKLJUČAK

U periodu od 1985. do 2006. godine izvedene su dve rekonstrukcije, kojima je projektovani kapacitet mlina povećan za 25%. Na osnovu prezentovanih rezultata ispitivanja ključnih parametara rada sistema za pripremu ugljenog praha (mlinova), koji su dobijeni od strane tri različita instituta, zaključuje se da su svi ključni parametri u granicama propisanim režimskom kartom.

6. LITERATURA

- [1] В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, Авдеева: *Tehnološka ispitivanja kotlovskih agregata*, Энергоатомиздат, 1991.
- [2] *Toplotni gubici kotla*, Издательство НПО ЦКТИ, – СПб, 1998.
- [3] *Tehničke karakteristike i rezultati ispitivanja kotla P-64 TE „Gacko“ posle rekonstrukcije 2005* – Insiitut Vinča Beograd, 2005.
- [4] *Tehničke karakteristike i rezultati ispitivanja kotla P-64 TE „Gacko“ posle rekonstrukcije II etapa modernizacije*, ОАО ИК „ЗиОМАР“ и ЗАО „СибКОТЭС“. – Подольск-Новосибирск, 2006.

COMPARATIVE TESTING SISTEM FOR PREPARING COAL BEFORE AND AFTER RECONSTRUCTION

Abstract:

The paper briefly describes the working principle of the sistem for the preparation of coal (coal grinding) with associatet auxiliary equipment that are part of the Power plant Gacko. Russian-made mill was rebuilt twice. Tests of basic parameters related to the proper functioning of the sistem is performerd in 1985, 2005, 2006 years by various institutions. The results have confirmed the correctness of the reconstruction.

Key words: mill, impeller, splitter, burner, airmix.

Acknowledgment

This work has been performed within the project TR 35011. This project is supported by the Republic of Serbia, Ministry of Science and Technological Development, which financial help is gratefully acknowledged.



Enes Mujanović¹, Denijal Sprečić²

ANALIZA TROŠENJA ZUBACA KOD KONUSNIH ZUPČANIH PAROVA

Rezime:

Poznavanje mogućih oštećenja zuba zupčanika i uzroka njihovog formiranja su od suštinske važnosti za pravilno projektovanje, izbor materijala i elemenata dimenzionisanja zupčanika. U radu su obrađene teorijske postavke i odabrani modeli rješavanja problema oštećenja bokova zubaca korištenjem različitih vrsta maziva. U eksperimentalnom dijelu su vršena ispitivanja bokova zubaca u odnosu na vrstu korištenog maziva. Rezultati koji su proizašli iz eksperimentalnog dijela i podaci dobiveni eksperimentalnim putem mogu se koristiti za produženje radnog vijeka trajanja konusnih zupčanih parova, a time i smanjenje oštećenja bokova zubaca za različite vrste maziva.

Ključne riječi: Zupčani, konusni zupčani, podmazivanje, zaribavanje, rupičenje, bokovi zubaca.

1. UVOD

Zupčani su mašinski elementi koji služe za prijenos obrtnog kretanja s jednog vratila na drugo ili za pretvaranje obrtnog u translatorno kretanje i obrnuto, translatornog u obrtno.

Za prijenos obrtnog kretanja služe različiti tipovi zupčanika kao što su cilindrični, konusni, hipoidni, pužni, a za pretvaranje obrtnog u translatorno koristi se zupčasti par zupčanik – zupčasta letva. S aspekta oblika zuba zupčani mogu imati ravne, kose, strelaste, zavojne zube, a sa aspekta položaja osa zupčanika u paru zupčasti prijenosnici se dijele na prijenosnike sa paralelnim osama, sa osama koje se sijeku i osama koje se mimoilaze. U toku rada zupčanika, pri kontaktu bokova zuba, dolazi do kotrljanja i klizanja. Razlike u načinu rada kao i karakteristike zahvata bokova zuba imaju dominantan uticaj na formiranje mazivnog sloja te na uslove podmazivanja uopšteno. Kod cilindričnih zupčanika, u momentu zahvata, kontakt se ostvaruje u korijenu pogonskog i vrhu, odnosno tjemenu pogonjenog zupčanika. U tom trenutku prisutno je trenje klizanja i trenje kotrljanja. Kada se kontakt bokova zuba pomjera prema podionim krugovima, tako se smanjuje trenje klizanja, da bi pri kontaktu na podionim krugovima bilo prisutno samo trenje kotrljanja. Daljim radom zupčanika sa pomjeranjem kontakta od podionih krugova na tjemenu pogonskog i korijenu pogonjenog zupčanika ponovo se javlja i trenje klizanja da bi njegovo učešće bilo najveće neposredno prije završetka kontakta. Za sve cilindrične zupčanike bez obzira na oblik zuba kontakt bokova se ostvaruje u jednoj liniji.

Kod konusnih zupčanika se takođe, javlja trenje kotrljanja i trenje klizanja s tim da se kod zupčanika sa pravim zubima kontakt između bokova ostvaruje u liniji, a kod zupčanika sa zavojnim zubima kontakt se ostvaruje u tački. Sa aspekta podmazivanja u principu se svi zupčani mogu podijeliti u dvije grupe, i to:

- Zupčani sa ravnim zubima,
- Zupčani sa zavojnim zubima.

Kod zupčanika sa ravnim zubima opterećenja su u nivou srednjih vrijednosti uz moguća udarna opterećenja, a ovi zupčani su često namijenjeni i za promjenu smjera rotacije. S tim u vezi, za podmazivanje ovih zupčanika koriste se ulja sa EP aditivima. Kod zupčanika sa zavojnim zubima lokalna opterećenja su velika, nema udarnih opterećenja, a zbog povećanog udjela trenja klizanja veće su temperature kontakata. Zbog toga za podmazivanje ovih zupčanika koriste se ulja sa aditivima izrađeni na bazi hlora i fosfora koji se na povišenim temperaturama hemijski vežu sa metalnim površinama. Kod izbora maziva za podmazivanje zupčastih prijenosnika treba voditi računa o sljedećim konstruktivnim karakteristikama i uslovima rada zupčanika:

- Tip ozubljenja i ugaona brzina pogonskog zupčanika,
- Prijenosni odnos,

¹ Mr.sc.Enes Mujanović, asistent (ennessm@hotmail.com), Mašinski fakultet Tuzla, Univerzitet u Tuzli, BiH.

² Dr.sc.Denijal Sprečić, vanredni profesor (esprecic@bih.net.ba), Mašinski fakultet Tuzla, Univerzitet u Tuzli, BiH.

- Snaga,
- Temperatura,
- Hrapavost površina bokova zuba,
- Veličina i karakter opterećenja,
- Način podmazivanja,
- Prisustvo nečistoća,
- Prisustvo vlage ili drugih agresivnih materija.

Prema položaju osa vratila pogonskog i gonjenog zupčanika, zupčanici se mogu podijeliti na:

- Cilindrične zupčanike (kod kojih su paralelne ose),
- Konusne zupčanike (kod kojih se ose sijeku),
- Hiperboloidne zupčanike (kod kojih se ose mimoilaze).



Slika 1: Različiti oblici konusnih zupčastih parova sa pravim zupcima

2. TROŠENJA I OŠTEĆENJA POVRŠINA

Sve mašine, sklopovi i mehanizmi sastoje se po pravilu od svega nekoliko osnovnih pokretnih mašinskih elemenata: ležajeva (kliznih ili kotrljajnih), zupčanika, vođica, lančanih prenosnika i čeličnih užadi. U svim tim elementima osnovna pojava je relativno kretanje različitih površina u direktnom ili indirektnom kontaktu.

Takvo kretanje može biti:

- Klizanje jedne površine po drugoj,
- Kotrljanje jednog elementa (točak, kugla, valjak) po ravnoj površini,
- Kombinovano kretanje.

Na mjestu kontakta javljaju se složene mehaničke, termičke, ali i hemijske pojave. Dva osnovna procesa koji se javljaju pri relativnom kretanju mašinskih elemenata su trenje na dodirnim površinama i trošenje materijala sa površina koje su u međusobnom kontaktu. Trenje, kao neodvojivo svojstvo površine parova materijala u kontaktu je nepoželjno u ogromnoj većini elemenata i mašinskih sklopova i drugih mašinskih uređaja (osim kod kočnica i mehaničkih spojnika gde je koristan proces). Pojava sile trenja pri klizanju i kotrljanju površina u kontaktu ne dovodi samo do nekorisnog utroška energije (pretvaranje izgubljene mehaničke energije u toplotnu), već usljed istrošenja i razaranja površina do mogućnosti teških oštećenja elemenata i sklopova i konačno do otkazivanja rada mašine i postrojenja, Tabela 1.

Složeni mehanizmi i procesi u pojavama trenja i njihove posljedice pri različitim uslovima, a posebno procesi trošenja površina i mogućnosti njihovog smanjivanja predmet su istraživanja nauke pod nazivom tribologija.

Tabela 1. Uzroci neispravnosti mašinskih elemenata

Uzroci neispravnosti	Zupčanici	Klizni ležajevi	Kotrljajni ležajevi
	%		
Neadekvatan proračun i konstrukcija	6,9	9,1	13,8
Greške u materijalu	0,8	36	1,9
Greške proizvodnje i montaže	17,6	10,7	14,4
Neadekvatana eksploatacija, održavanje i kontrola	36,7	39,1	37,4
Habanje materijala tokom dugoga rada	38,0	30,5	26,5
Ostalo		7,0	4,0

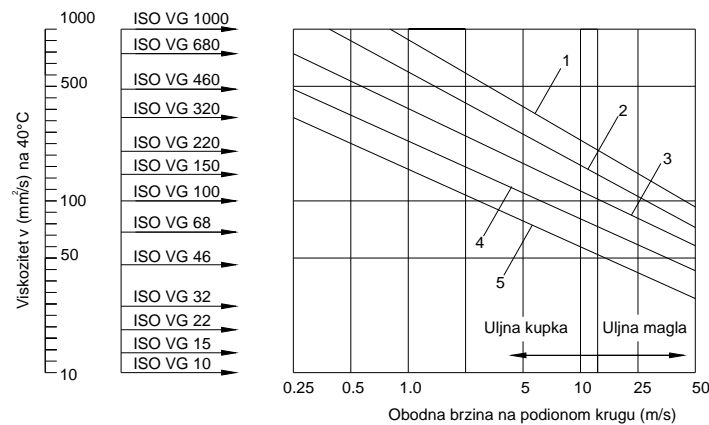
3. VRSTE MAZIVA ZA PODMAZIVANJE ZUPČANIKA

Pregled vrsta maziva za podmazivanje zupčanika kao i generalne preporuke za upotrebu kod pojedinih tipova zupčanika predstavljene su u tabeli 2.

Tabela 2. Preporuke za upotrebu pojedinih vrsta maziva za podmazivanje zupčanika

VRSTA MAZIVA	VRSTE ZUPČANIKA		
	Cilindrični sa ravnim i kosim zubima i konusni sa ravnim i zavojnim zubima	Hipoidni	Pužni
Ulja sa aditivima protiv oksidacije	Normalno opterećeni	Ne preporučuje se	Samo za manja opterećenja i pri malim brzinama
Ulja sa EP aditivima	Teško opterećeni i sa udarnim opterećenjima	Prikladno za većinu ovih prijenosnika	Prihvatljivo za većinu ovih prijenosnika
Ulje zamašćeno sa 5 do 10% masnog ulja	Najčešće se ne primjenjuje	Prikladno samo za manja opterećenja	Prihvatljivo za većinu ovih prijenosnika
Viskozno mazivo za otvorene prijenosnike	Samo za sporohodne zupčanike	Podesno za male brzine, ali uz dodatak EP aditiva	Samo za male brzine poželjni su EP aditiva
Mast	Sporohodni otvoreni zupčanici	Ne preporučuje se	Samo za male brzine poželjni su EP aditiva

Najvažniji korak pri izboru vrste maziva za podmazivanje zupčanika je određivanje viskoziteta. Viskozitet ulja se određuje na osnovu obodne brzine ili faktora snage brzine. Za izbor viskoziteta ulja za zatvorene zupčaste prijenosnike sa ravnim zubima i konusne zupčanike sa ravnim i kosim zubima, a u zavisnosti od obodne brzine, može poslužiti dijagram prikazan na slici 2.



Slika 2: Dijagram za određivanje viskoziteta ulja za cilindrične i konusne zupčanike u zavisnosti od obodne brzine i materijala zupčanika

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Ispitivanje i analiza oštećenja bokova zubaca

Programom ispitivanja, zavisno od tipa otkaza bokova zubaca na konusnim zupčanicima sa pravim zupcima (oštećenje, rupičenje, lom), treba definisati sve aktivnosti. U širem obliku to obuhvata sljedeće:

- Vizuelni pregled,
- Spoljašnje uticaje (različite vrste maziva, atmosferski uslovi, sredina)
- Kontrolni pregled (uređaj za mjerenje hrapavosti),
- Osnovne geometrijske mjere zupčanika i odstupanja zbog habanja i plastične deformacije.

Postupak ispitivanja bokova zubaca konusnih zupčanika obavljen je na Mašinskom fakultetu u Tuzli u laboratoriji za mjerenje i kontrolu na uređaju za mjerenje hrapavosti MITUTOYO SurfTest SJ-301. Za ispitivanje su korištena dva konusna zupčanika sa pravim zubima koji su ispitivani u zavisnosti od dvije vrste ulja za podmazivanje. U toku ispitivanja vršena je analiza trošenja zubaca u zavisnosti od vrste korištenog maziva (ulja).

Korištene su dvije vrste ulja (maziva):

- Mazivo 1,
- Mazivo 2.

Mazivo 1 je višenamjensko reduktorsko ulje sa EP dodacima na osnovi fosfor – sumpor tehnologije. Koristi se kod konusnih zupčanih prijenosnika u uslovima srednjih i visokih opterećenja, kao i podmazivanje ležaja. Mazivo 1 je standardno reduktorsko ulje za većinu radnih uslova i također je bazno mineralno ulje. Temperaturno područje primjene je ispod 70 (°C) za produženu primjenu. Dodaci protiv habanja su EP/AW.

Mazivo 2 je ulje za ekstremno opterećene prijenosnike, udarna opterećenja, kreni–stani uslove rada, male brzine kretanja. Smanjeni koeficijent trenja, dolazi do izražaja kod graničnih uslova, svojstvo koje omogućava posebna mješavina krutih mazivih čestica. Najučinkovitije je kod udarnih opterećenja, kreni – stani uslove rada i male brzine kretanja. Mazivo 2 je bazno mineralno ulje. Temperaturno područje primjene je ispod 80 (°C) za produženu primjenu. Dodaci protiv habanja su MOS2.

Na slici 3. prikazani su konusni zupčanici sa pravim zupcima 1 i 2 na kojima su izvršena ispitivanja oštećenja bokova zubaca.

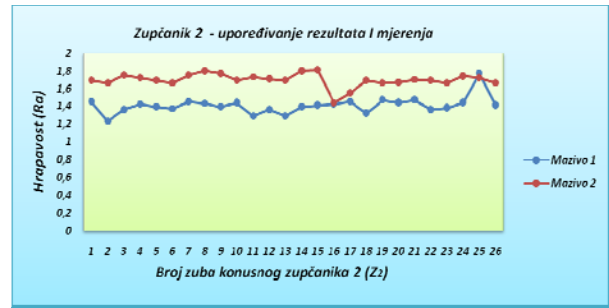
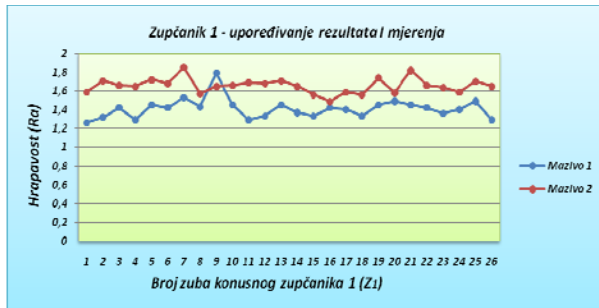


Slika 3: Konusni zupčanici sa pravim zupcima koji su ispitivani Ds 126/2 – 40,58 (mm)

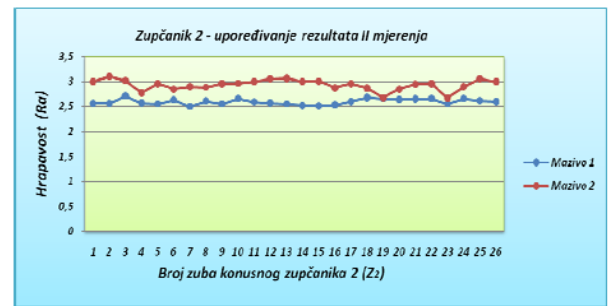
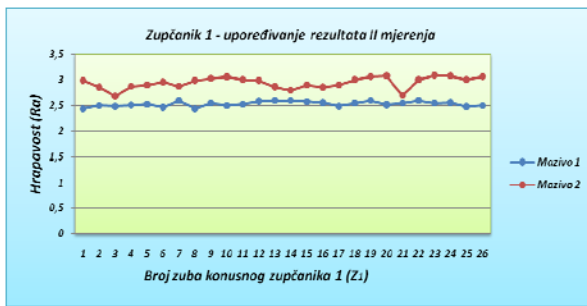


Slika 4: Postupak ispitivanja bokova zubaca (rupičenje) kod konusnih zupčanika sa pravim zupcima

Na slici 4 je prikazan postupak ispitivanja konusnih zupčanika sa pravim zupcima na uređaju za mjerenje hrapavosti površina MITUTOYO SURFTEST SJ-301 na Mašinskom fakultetu Tuzla.



Slika 5: Upoređivanje rezultata mjerenja pri korištenju različitih vrsta maziva, maziva 1 i maziva 2 za konusni zupčanik 1 i 2 – mjerenje I



Slika 6: Upoređivanje rezultata mjerenja pri korištenju različitih vrsta maziva, maziva 1 i maziva 2 za konusni zupčanik 1 i 2 – mjerenje II

5. ZAKLJUČAK

U radu su obrađene teorijske postavke i odabrani modeli rješavanja problema oštećenja bokova zubaca korištenjem različitih vrsta maziva. U eksperimentalnom dijelu su vršena ispitivanja bokova zubaca u odnosu na vrstu korištenog maziva. Istraživanje je obuhvatilo veliki broj naučnih područja i disciplina kako u teorijskom tako i u eksperimentalnom dijelu.

Ispitivanjem bokova zubaca na konusnim zupčanicima, primjenom različitih vrsta ulja došlo se do sljedećih zaključaka:

- Oštećenja bokova zuba kod konusnih zupčastih parova su znatno mala i potreban je veći broj radnih sati da bi se tačno i precizno utvrdio kriterij po kome dolazi do trošenja bokova zubaca,
- Maziva 1 su pokazala bolje rezultate u odnosu na maziva 2 za 5%–10%, pri I mjerenju, a za 10%–15% pri II mjerenju,

- Primjenom različitih vrsta maziva prije svega maziva sa EP dodacima moguće je produžiti radni vijek trajanja konusnih zupčanika sa pravim zupcima.

6. LITERATURA

- [1] Williams J.A; ENGINEERING TRIBOLOGY; Oxford University Press; 2005,
- [2] Savić V; TRIBOLOGIJA I PODMAZIVANJE; IKOS; Novi Sad; 1995,
- [3] Lauer D; SYNTHETIC GEAR OIL SELECTION; Machinery Lubrication magazine; May–June 2001.
- [4] Oberšmit E; ZUPČANICI I OZUBLJENJA; Liber, Zagreb; 1987,
- [5] Prasanta S; ENGINEERING TRIBOLOGY; New Delhi; 2005,
- [6] Bharat B; INTRODUCTION TO TRIBOLOGY; New York; 2002,
- [7] Gwidon W. Stachowiak; Andrew W. Batchelor; ENGINEERING TRIBOLOGY; Elsevier Butterworth-Heinemann; 2005.

E. Mujanovic, D. Sprecic

ANALYSIS OF THE WEAR OF TEETH CONICAL GEAR PAIRS

Summary:

Knowledge of the possible damage to gear teeth and cause damage to those essential for the proper design, material selection and dimensioning elements gearbox. In the paper are given the essential theoretical concepts and models chosen to solve the problem of damage flanks of gear teeth using different types of lubricants. In the experimental part of the execution of tests damaged gear teeth flanks in regard to the type of lubricant. Findings that have been reached and the results of experimental studies, can be used to extend the working life of conical gear pairs and thus reduce damage to gear teeth flanks for different types of lubricants.

Key words: Gears, conical gears, lubrication, jamming, pitting, cog flanks.



Adnan Mustafić, Edis Nasić, Muhamed Mehmedović¹, Mensur Demirović²

EKSPERIMENTALNO-MATEMATIČKO MODELIRANJE POKAZATELJA OPTEREĆENJA TRAČNOG TESTERISANJA PRI REZANJU VISOKOLEGIRANIH CrNi ČELIKA

Rezime:

U radu su prikazani rezultati eksperimentalno-matematičkog modeliranja pokazatelja opterećenja reznog alata kao i uticaj procesnih parametara pri obradi tračnim testerisanjem cilindričnih, debelostijenih polufabrikata od visokolegiranih CrNi čelika. S obzirom da je ispitivani alat (testera) višesječan, sa varijabilnim koracima između pojedinih zuba kao i različitom geometrijom istih, raspored sile rezanja po svakom zubu je prema tome varijabilan. Mjerljivi procesni parametri koji su kontinuirano prikupljeni u procesu obrade bili su moment i snaga na pogonskom elektromotoru testere, dok su ostali pokazatelji opterećenja alata izvedeni indirektnim putem analitičkom metodom.

Ključne riječi: Tračno testerisanje, Procesni parametri, Pokazatelji opterećenja alata, Matematski model.

1. UVOD

Standardni oblici i dimenzije polufabrikata koji se nude na tržištu, pogotovo standardizovane dužine polufabrikata, u najvećem broju slučajeva razlikuju se od dimenzija tehnološki proračunatog polaznog komada. Shodno navedenom, postupci obrade, koji imaju za cilj formiranje konačnog oblika, dimenzija, tolerancija i kvaliteta obrađenih površina kompatibilnih sa zahtjevima sadržanim u tehničkoj dokumentaciji proizvoda, u najvećem broju slučajeva prethode operacije odsijecanja. Obzirom na značajan broj uticajnih faktora, izbor adekvatnog postupka obrade za realizaciju operacije odsijecanja je prilično složen. Dok za određenu grupu proizvoda postoji mogućnost „alternative“ po pitanju izbora postupka za realizaciju operacije odsijecanja, za određenu grupu proizvoda „alternativa“ ne postoji, čime se, za ovakve proizvode, značaj potpunog razumijevanja operacija odsijecanja višestruko uvećava te predstavlja jedini način njihove efikasne realizacije.

Tračno testerisanje je postupak obrade sa diskontinuiranim rezom, a realizira se pravolinijskim kretanjem rotirajuće, beskonačno duge, rezne trake. Za razliku od okvirnog testerisanja, tračno testerisanje nema povratnog hoda. S druge strane, komparirano sa kružnim testerisanjem, tračnim testerama omogućava se postizanje znatno manje širine reza (sječanja). Ovo se dalje, u kontekstu opravdanosti primjene tračnog testerisanja, može dovesti u vezu sa manjim otporima rezanja odnosno silama rezanja, te s tim u vezi i većom postojanošću testere, kraćim vremenom trajanja operacije, većom produktivnosti, manjim defektima uzrokovanih promjenom mikrostrukture kao posljedice procesa, većim stepenom iskorištenja materijala, nižim troškovima proizvodnje, itd.

U odnosu na lakše obradljive materijale iz grupe metala i legura, teško obradljivi metali i legure poput legiranih CrNi čelika posjeduju specifična mehanička svojstva zbog legirajućih elementa, koji pored abrazivnih dejstava na rezni alat uzrokuju i veća opterećenja istog. Naravno, ovdje treba istaknuti i činjenicu da i uslijed nepravilno usklađenih režima obrade dolazi do velikih opterećenja reznih alata, što bitno utiče na njihovu postojanost ili radni vijek u toku eksploatacije.

Istraživanjem u okviru rada prikazani su rezultati eksperimentalno-matematičkog modeliranja pokazatelja opterećenja reznog alata pri postupku tračnog testerisanja polufabrikata prstenastog poprečnog

¹ Mr. sc. Adnan Mustafić, viši asistent (adnan.mustafic@untz.ba), Mr. sc. Edis Nasić, (nasicedis@yahoo.com), asistent, Dr. sc. Muhamed Mehmedović, docent (muhamed.mehmedovic@untz.ba), Mašinski fakultet, Univerzitetska 4, 75000 Tuzla.

² Mr. sc. Mensur Demirović, dipl.inž.maš. (mensur.demirovic@yahoo.com), Tehnopedrol d.o.o. Đorđa Mihajlovića 4, 75000 Tuzla.

presjeka od visokolegiranog CrNi čelika dobivenih tehnologijom centrifugalnog livenja, pri čemu su postavljeni opšti modeli pokazatelja opterećenja kao funkcije brzine rezanja, posmaka i dužine zahvata reznog alata sa predmetom obrade u obliku:

$$P = f(v_c, s, d) \quad M = f(v_c, s, d) \quad F = f(v_c, s, d) \quad (1)$$

gdje je:

P – snaga rezanja, [kW]

M – moment rezanja, [Nm]

F – ukupna sila rezanja, [N]

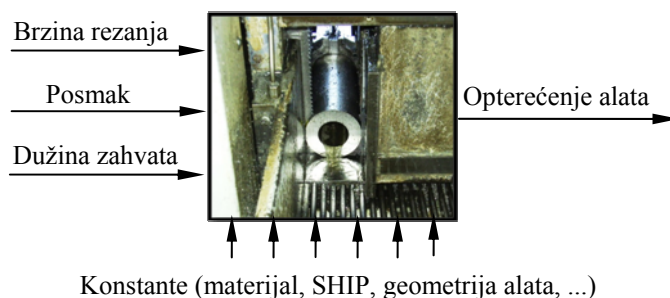
2. PLANIRANJE EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

Ekperimentalna ispitivanja izvršena su u proizvodnom pogonu CIMOS TMD-Ai Gradačac na vertikalnoj, potpuno automatiziranoj tračnoj testerici tipa Kasto ssb A2. Vertikalne tračne testere svoju učinkovitost i ekonomičnost za razliku od drugih tipova testera imaju pri obradi teško obradljivih materijala i predmeta većih poprečnih presjeka. Polufabrikat prstenastog poprečnog presjeka ($\varnothing 85 \times \varnothing 38 \times 505 \text{ mm}$) bio je liveni čelik tipa G-X55CrNiSi19-13-2 koji spada u grupu nehrđajućih i vatrootpornih čelika. Hemijski sastav, izgled i mikrostruktura livenog nehrđajućeg austenitnog čelika dati su u tablici 1.

Tablica 1. Hemijski sastav, izgled polufabrikata i mikrostruktura čelika G-X55CrNiSi19-13-2

G-X55CrNiSi19-13-2			Polufabrikat	Mikrostruktura
Hemijski element	Min. [%]	Max. [%]		
Ugljik	0,4	0,7		
Silicijum	1,8	2,20		
Mangan	---	1,5		
Sumpor	0,20	0,40		
Fosfor	---	0,06		
Hrom	18	21		
Nikl	12	14		
Ostali elementi	---	0,3		
Željezo	Ostatak			

U cilju ispitivanja uticaja procesnih parametara rezanja na opterećenje tračnih testera pri obradi austenitnog CrNi čelika G-X55CrNiSi19-13-2, korištena je testerica sa zubima od tvrdog metala tipa Futura SN proizvođača WIKUS uz primjenu sredstva za hlađenje i podmazivanje u vidu emulzije sa koncentracijom ulja od 10-12%. Dimenzije testere prema podacima proizvođača su $L \times B \times H = 4115 \times 41 \times 1,3 \text{ mm}$ sa varijabilnom raspodjelom zuba od 3-4 zuba po colu. Analizirajući proces obrade testerisanjem, a uvažavajući i specifičnost alatne mašine sa zasebnim pogonima za glavno i pomoćno kretanje, značajan uticaj na opterećenja tračne testere imaju glavna brzina rezanja, brzina posmičnog kretanja izražena kao posmak za vrijeme jednog punog obrtaja testere ali i dužina zahvata reznog alata s obzirom na specifičnu geometriju radnog predmeta. Prema tome, veličine koje će biti obuhvaćene vektorom ulaza procesa testerisanja, a čije su vrijednosti značajne na izlazne karakteristike pokazatelja opterećenja reznog alata proglašene su varijablama, odnosno nezavisno promjenljivim veličinama. Shematski prikaz modela postupka obrade tračnim testerisanjem prikazan je na slici 1.



Slika 1. Shema ulazno/izlaznih parametara pri modeliranju pokazatelja opterećenja

Izabrane nezavisno promjenljive veličine glavne i posmične brzine rezanja varirane su u intervalima $v_c=40-52$ m/min i $s=3,9-5,2$ mm/o, dok je dužina zahvata alata birana u intervalima od $d=20-75$ mm.

Za opšti model (1) pri eksperimentalnom ispitivanju postavljene su zavisnosti snage, momenta i sile rezanja u obliku regresivnog polinoma prvog reda:

$$y_M = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{1 \leq i < m \leq 2} b_{im} x_i x_m \quad (2)$$

gdje su:

b_0, b_i, b_{im} – koeficijenti regresivnog modela,
 x_1, x_2, x_3 – kodirane vrijednosti faktora modela.

U cilju izvođenja aktivnog eksperimenta, čiji su rezultati poslužili kao polazna osnova za određivanje vrijednosti koeficijenata regresijskog modela napravljena je plan matrica prema tablici 2. Eksperimentalno istraživanje sprovedeno je potpunim višefaktornim ortogonalnim planom eksperimenta sa $N=2^k+n_0$ eksperimenata.

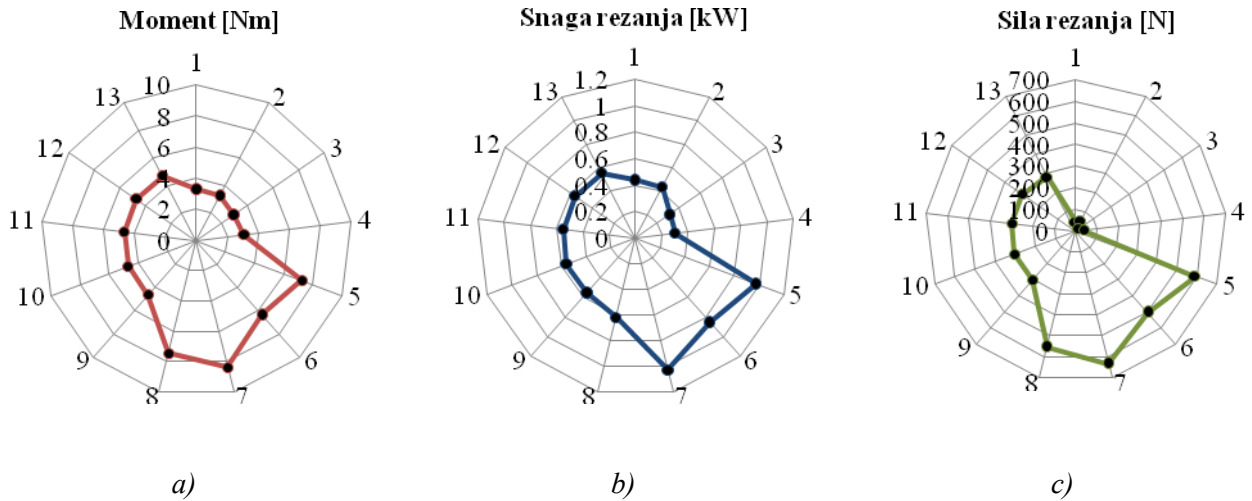
Tablica 2. Plan matrica eksperimenta

Broj eksperimenata	Kodirane vrijednosti sa interakcijama – plan matrica							
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1.	+1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2.	+1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3.	+1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4.	+1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5.	+1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6.	+1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7.	+1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8.	+1	1	1	1	1	1	1	1
9.	+1	0	0	0	0	0	0	0
10.	+1	0	0	0	0	0	0	0
11.	+1	0	0	0	0	0	0	0
12.	+1	0	0	0	0	0	0	0
13.	+1	0	0	0	0	0	0	0

Za ocjenu greške eksperimenta izabran je sistem ponavljanja eksperimenta u centralnoj tački plana $n_0=5$ puta. Shodno tome, ukupan broj eksperimentalnih tačaka u eksperimentalnom prostoru iznosi $N=2^k+n_0 = 2^3+5 = 13$.

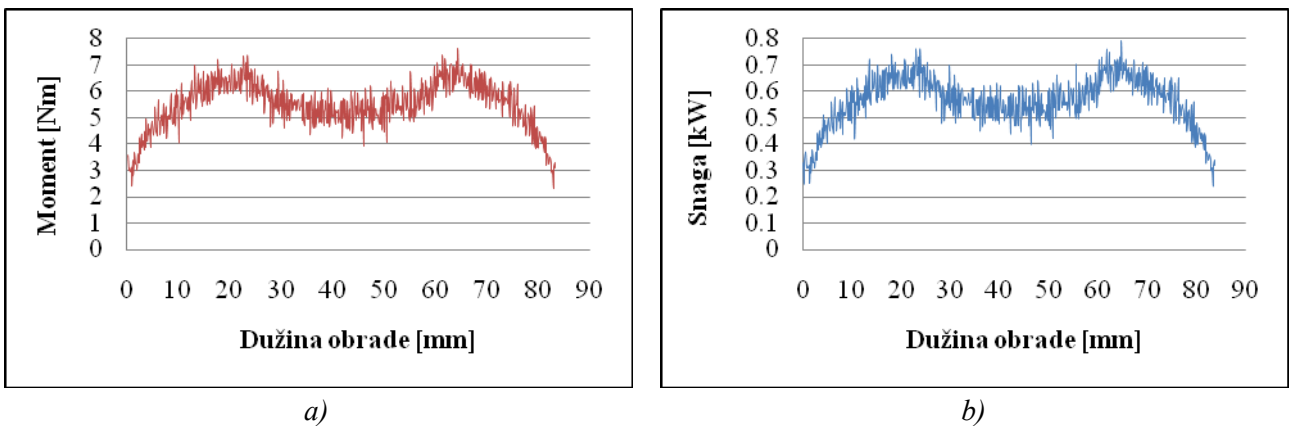
3. IZVOĐENJE EKSPERIMENTA I ANALIZA REZULTATA

Za svaku kombinaciju režima obrade pri odsijecanju debelostijenih cijevi postavljena je nova testera tipa Futura SN proizvođača WIKUS. Prema preporukama proizvođača testere ali i proizvođača alatne mašine pri puštanju u rad novih testera prvi rezovi izveli su se sa nižim vrijednostima režima kako bi se postigla željena postojanost istih. Na početku svake kombinacije eksperimentalnog ispitivanja testerisanjem, vrijednosti posmaka i brzine rezanja reducirani su za 50% od nominalnih. Nakon vremenskog perioda rada od 15minuta ili ukupno odsječene površine od cca. 300cm², prvo se povećala brzina rezanja a nakon toga posmak na nominalne vrijednosti. U toku odvijanja procesa, kontinuirano su mjerene veličine snage i momenta na elektromotoru, dok su ostali pokazatelji korišteni za analizu uslova odvijanja procesa te u tom kontekstu i opterećenja tračne testere, izvedeni indirektno korištenjem analitičke metode. Pri tome je za svaku kombinaciju odsijecano ukupno 200 prstenova, što otprilike odgovara i normi odsječenih poluproizvoda u jednoj smjeni na jednoj mašini. Za svaki deseti odsječeni prsten izvršen je zapis snage i momenta rezanja dok su vrijednosti sile rezanja dobivene indirektnim putem analitičkom metodom. Rezultati mjerenja eksperimentalnog ispitivanja (srednje vrijednosti) po svakom eksperimentu grafički su prikazani prema slici 2.



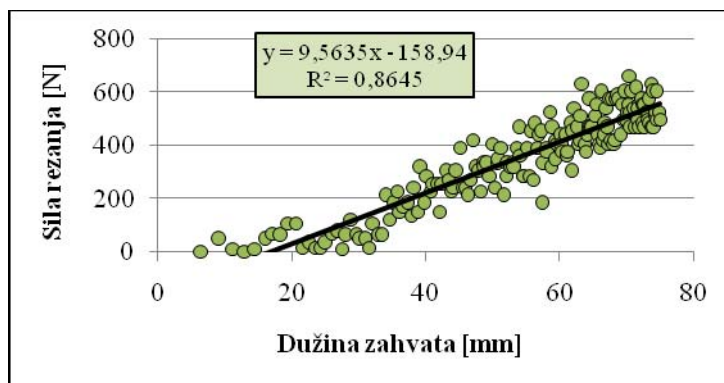
Slika 2. Eksperimentalni rezultati mjerenja za moment (a), snagu (b) i silu rezanja (c)

Dijagram promjene momenta i snage rezanja, koji su dobiveni kao rezultat prikupljanja podataka pri parametrima brzine od 40m/min i posmaka od 3,9mm/o prikazani su na slici 3. Kako je vrijeme trajanja jednog ciklusa rezanja za ove parametre 134 sekunde, a dimenzije vanjskog prečnika $\varnothing 85\text{mm}$, pokazatelji opterećenja u ovom slučaju su prikazani u funkciji dužine obrade.



Slika 3. Dijagrami promjene momenta rezanja (a) i snage rezanja (b) pri brzini od 40m/min i posmaku 3,9mm/o

Jasno je, da dijagram sile rezanja, kao pokazatelj opterećenja koji je dobiven indirektnim putem analitičkom metodom preko snage rezanja ima istu prirodu promjene kao prethodna dva pokazatelja. Kako na veličinu opterećenja veliki uticaj ima i dužina zahvata alata sa predmetom obrade s obzirom na specifičnost geometrije poprečnog presjeka, slika 4. prikazuje dijagram promjene sile rezanja u funkciji od dužine zahvata pri režimima od 40m/min i 3,9mm/o.

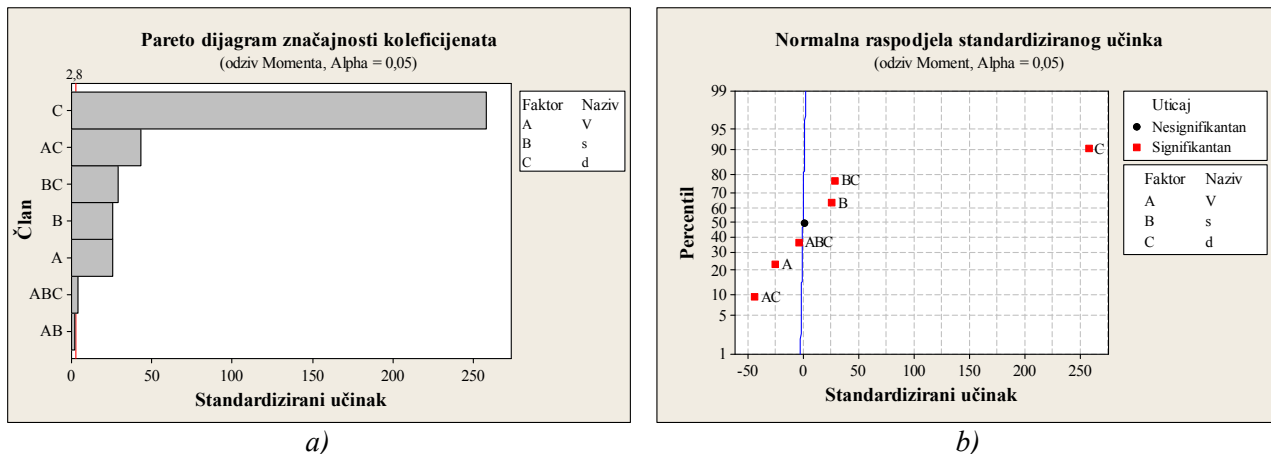


Slika 4. Dijagram promjene sile rezanja od dužine zahvata pri brzini od 40m/min i posmaku 3,9mm/o

Na osnovu regresivne analize podataka prikazanih u tablici 3, dobiven je regresivni model momenta rezanja u kodiranim vrijednostima:

$$\hat{y}_M = 5,02 - 0,208x_1 + 0,211x_2 + 2,11x_3 + 0,015x_1x_2 - 0,355x_1x_3 + 0,239x_2x_3 - 0,033x_1x_2x_3 \quad (3)$$

Disperzivna analiza modela (3) pokazala je da su svi koeficijenti osim interakcije brzine i posmaka signifikantni, jer su računске vrijednosti Student-ovog t-testa ($t_{b_0}=638,67$; $t_{b_1}=25,3982$; $t_{b_2}=25,7826$; $t_{b_3}=257,919$; $t_{b_1b_3}=43,3034$; $t_{b_2b_3}=29,1632$; $t_{b_1b_2b_3}=3,9699$) veće od tablične, odnosno kritične vrijednosti $t_i=2,776$ za prag značajnosti od $\alpha=0,05$ što se može potvrditi i Pareto dijagramom prema slici 5.



Slika 5. Pareto dijagram značajnosti faktora regresijskog modela (a) i normalna raspodjela standardiziranog učinka (b)

Izuzimajući nesignifikantan parametar regresije (3), dobiva se regresivna jednačina momenta rezanja u kodiranom obliku:

$$\hat{y}_M = 5,02 - 0,208x_1 + 0,211x_2 + 2,11x_3 - 0,355x_1x_3 + 0,239x_2x_3 - 0,033x_1x_2x_3 \quad (4)$$

Adekvatnost matematskog modela (4) provjerena je pomoću F -testa, gdje je ta stepene slobode $v_{reg}=6$, $v_{rez}=6$ i prag značajnosti od $\alpha=0,05$, tablična odnosno kritična vrijednost $F_{(6, 6, 0,05)}=4,2837$ što je mnogo manje od računске (dobivene) vrijednosti $F_0=39,47$. Prema tome, model linearne regresije momenta rezanja (4) je adekvatan. Korištenjem jednačina za transformaciju, matematski model momenta rezanja (4) u prirodnim vrijednostima je:

$$M = 1,49 - 0,0347v_c + 0,325s + 0,0769d - 0,355v_c d + 0,239sd - 0,033v_c sd \quad (5)$$

Sličnom procedurom dobivaju se matematski modeli snage i sile rezanja (6) i (7) u dekodiranim (prirodnim) vrijednostima:

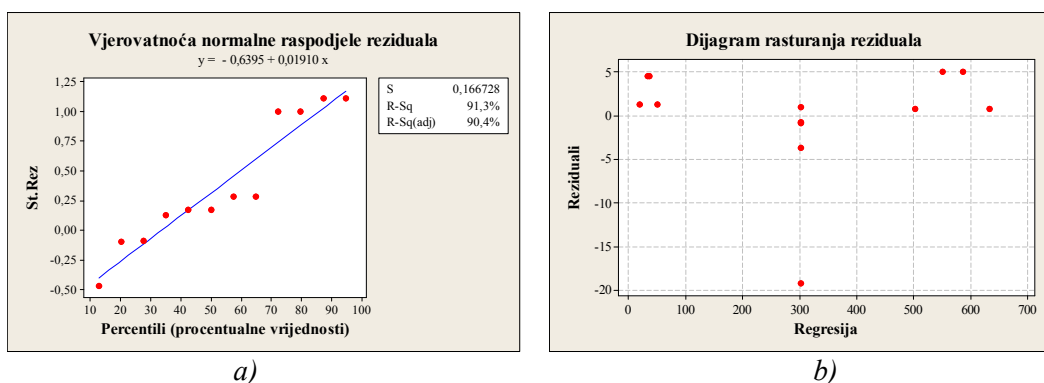
$$P = -0,727 - 0,00903v_c + 0,105s + 0,009d - 0,0362v_c s - 0,01v_c d + 0,0647sd - 0,0347v_c sd \quad (6)$$

$$F = -224 - 1,23v_c + 26,6s + 9,7d - 16,3v_c d + 24,2sd \quad (7)$$

Pretpostavka je da se reziduali pokoravaju normalnoj raspodjeli $\varepsilon:(0, \sigma^2, I)$, gdje je sa ε označen vektor slučajnih komponenti $\varepsilon_i=(i=1, 2, \dots, n)$, a 0 i I su nula, odnosno jedinična matrica reda n [2].

Kako bi se došlo do odgovora da li se reziduali pokoravaju normalnoj raspodjeli, data je grafička interpretacija reziduala u dijagramu vjerovatnoće normalne raspodjele za regresivni model sile rezanja, slika 6a. Vidi se da se standardizirani reziduali pokoravaju normalnoj raspodjeli sa visokim koeficijentom determinacije $R^2=91,3\%$. Sa slike 6b se uočava koncentracija reziduala oko srednje vrijednosti sile rezanja bez sistematskog rasturanja reziduala, što bi u suprotnom po definiciji automatski odbacilo dotičnu regresiju. Do sličnih dijagrama dolazi se i pri analizi za snagu i moment rezanja, pri čemu se može dodatno zaključiti da su matematski modeli adekvatni.

Na osnovu modela momenta rezanja (5), koeficijent determinacije dobivenog matematskog modela momenta rezanja iznosi $R^2=97,5\%$, koeficijent determinacije matematskog modela snage rezanja (6) je $R^2=97,8\%$ a koeficijent determinacije za silu rezanja (7) je $R^2=99\%$. Za sve slučajeve vidi se da je jaka veza između nezavisno promjenljivih parametara i odgovarajuće zavisno promjenljive.



Slika 6. Dijagram vjerovatnoće normalne raspodjele (a), dijagram rasturanja reziduala (b) za matematski model sile rezanja

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenog eksperimentalnog ispitivanja i obrade rezultata mogu se donijeti sljedeći osnovni zaključci:

- Na sistematski način, primjenom teorije planiranog eksperimenta, ispitivana je zavisnost procesnih parametara i dužine zahvata alata na pokazatelje opterećenja reznog alata WIKUS Futura SN 3/4 za alatnu mašinu (testeru) tipa Kasto ssb A2.
- Statističkom obradom eksperimentalnih rezultata mjerenja dobiveni su matematski modeli momenta (5), snage (6) i sile rezanja (7) sa visokim koeficijentima determinacije.
- Rangiranjem nezavisno promjenljivih, prema stepenu uticaja na snagu i silu rezanja može se prikazati na sljedeći način (dužina zahvata, posmak, interakcija dužine zahvata i posmaka, brzina rezanja, itd.)
- Rangiranjem nezavisno promjenljivih, prema stepenu uticaja na moment rezanja može se prikazati na sljedeći način (dužina zahvata, interakcija dužine zahvata i brzine rezanja, interakcija dužine zahvata i posmaka, itd.)
- Za pouzdano predviđanje veličine pokazatelja opterećenja reznog alata, mogu poslužiti dobiveni matematski modeli momenta (5), snage (6) i sile rezanja (7).

6. LITERATURA

- [1] Mustafić, A. UTICAJ PARAMETARA PROCESA NA OPTEREĆENJE TRAČNE TESTERE PRI REZANJU VISOKOLEGIRANOG CrNi ČELIKA (Magistarski rad), Mašinski fakultet u Tuzli, Tuzla, 2011.
- [2] Ekinović, S. METODE STATISTIČKE ANALIZE U Microsoft Excel-u, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 1997.
- [3] Jurković, M. MATEMATSKO MODELIRANJE INŽENJERSKIH PROCESA I SISTEMA, Mašinski fakultet u Bihać, Bihać, 1999.

A. Mustafic, E. Nasic, M. Mehmedovic, M. Demirovic

EXPERIMENTAL-MATHEMATICAL MODELING OF TOOL LOAD INDICATORS IN THE PROCESS OF BAND SAWING OF CrNi STEEL.

Summary:

In the course of its research, this paper presents experimentally examined the influence of the parameters of the band sawing treatment on the cutting tool, engaged in the treatment of the cylindrical, thick-walled preparatory elements made of CrNi steel. The observed tool could be used for multiple cutting and had different length between certain teeth as well as distinctive geometry of the material in question. It was also marked by a periodical entrance of the cutting segments into the materials processed, which, altogether, makes the disposition of the cutting force to each saw tooth variable. The measurable, processing parameters, which were continuously compiled in the process of treatment, were torque and power on the operating motor of the saw. The other indicators of the tool exertion were conducted indirectly, through the analytical method.

Keywords: Band sawing, Process parameters, Tool Load Indicators, Mathematical model.



Milan Milutinović¹⁾, Ljubodrag Tanović²⁾

PRILOG REŠAVANJU PROBLEMA OTPATKA PRI FORMATIRANJU PLOČASTIH MATERIJALA-IVERICE

Rezime:

Pločasti materijali pojavili su se u drugoj polovini dvadestog veka i postali su važna komponenta u preradi drveta. Kako je kvalitet ivica ploča nakon procesa presovanja i brušenja lošiji od zahtevanog neophodno je izvršiti njihovo formatiranje. Uobičajena nadmera ivice ploče iznosi od 5-10 cm tako da ih standardni alati za usitnjavanje otpatka ne mogu usitniti što dovodi do toga da se ostaci moraju ručno skupljati, sitniti pa tek onda skladištiti u silos.

Rešavanje problema usitnjavanja ovakvog otpatka pri proizvodnji iver ploča, i to u fazi njihovog formatiranja-opsecanja, postignuto je projektovanjem i proizvodnjom specijalnog alata-drobljača koji otpadak nestandardnih mera usitnjava. Proizveden prototip alata uspešno rešava problem usitnjavanja otpatka iver ploče i odlično se pokazao u proizvodnom okruženju [1], [5].

1. UVOD

Pločasti materijali pojavili su se u drugoj polovini dvadestog veka i postali su važna komponenta u preradi drveta. Sa aspekta materijala, pri proizvodnji ploča, omogućuju da se iskoriste materijali koji nisu pogodni za druge namene ili otpaci iz drugih procesa obrade. Pločasti materijali su sada sastavni deo tržišta drveta i ispunjavaju zahteve koji su se stajali pred puno drvo. Pločasti materijali se naširoko koriste u proizvodnji nameštaja i stolarije a njihova sposobnost da zadovolje specifične performanse i zahteve bio je značajan faktor njihovog rasta, [6].

U ovom radu posebna pažnja je posvećena konstrukciji specijalnog alata, drobljača, koji omogućava lako usitnjavanje otpadaka, koji se inače ručno skupljao, pri proizvodnji iver ploča i to u fazi njihovog formatiranja-opsecanja tako da se usitnjeni otpadak-strugotina lako transportuje do silosa i može iskoristiti za dobijanje energije. Alat se svojom konstrukcijom i merama razlikuje od svih ostalih proizvođača alata - drobljača (Freud, Leuco, Leitz, BSP, Metalworld, Ake i dr.) i omogućava kontrolisan tok strugotine-usitnjenog otpatkata koji je usmeren od radnog predmeta i rezne ivice alata u sistem pneumatskog transporta. Proizveden alat se dobro pokazao i kada je reč o kvalitetu obrađene površine na ivicama ploče. Kontrolisan tok strugotine prvi put su upotreбили konstruktori svetskog proizvođača alata za obradu drveta Leitz primenom tzv. DFC sistema (Dust Flow Control), [8].

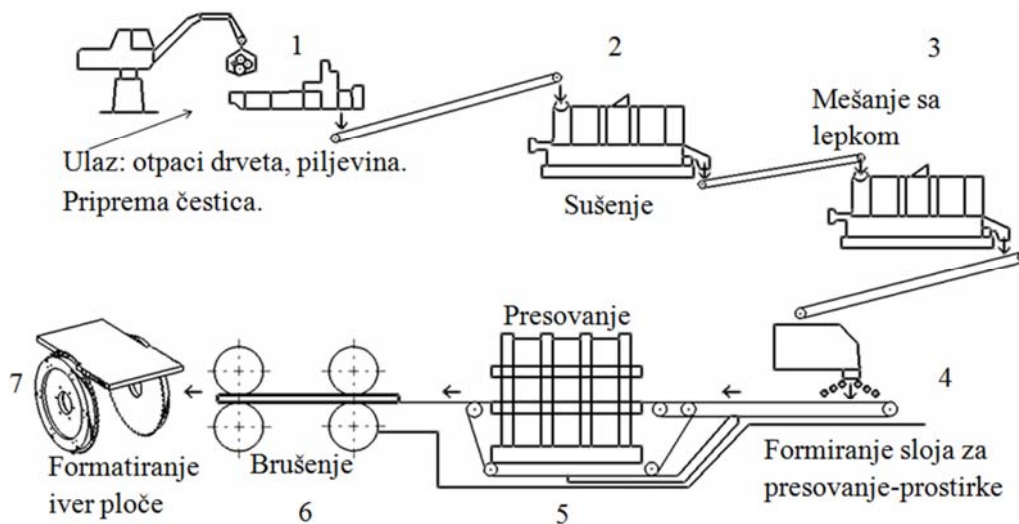
Prikaz linije za proizvodnju iver ploča

U pločaste materijale spadaju: iver ploče, vlaknaste ploče srednje gustine (Medium Density Fiberboard-MDF), vlaknaste ploče visoke gustine (High Density Fiberboard-HDF) i vlaknaste orijentisane ploče (Oriented Strand Board-OSB). Pločasti materijali pojavili su se u drugoj polovini dvadestog veka a nastali su na bazi tehnologije koja se koristila za proizvodnju šper ploče ali su zahtevale nov pristup za pripremu čestica, sušenje, lepkove i prese.

Proizvodnja pločastih materijala generalno, ali ne isključivo, se odvija u sledećim fazama: priprema čestica (strugotine, drvnih otpadaka...), sušenje, mešanje sa lepkom, formiranje sloja za presovanje, brušenje i formatiranje, slika 1. Često se nakon faza presovanja i brušenja vrši nanošenje: furnira, melaminske folije ili dekor papira čime se dobija oplemenjena iverica, [6].

¹⁾ Mr Milan Milutinović, Tehnikum Taurunum-Zemun, mmilutinovic@tehnikum.edu.rs

²⁾ Dr Ljubodrag Tanović, redovni profesor, Mašinski fakultet Beograd, ltanovic@mas.bg.ac.rs

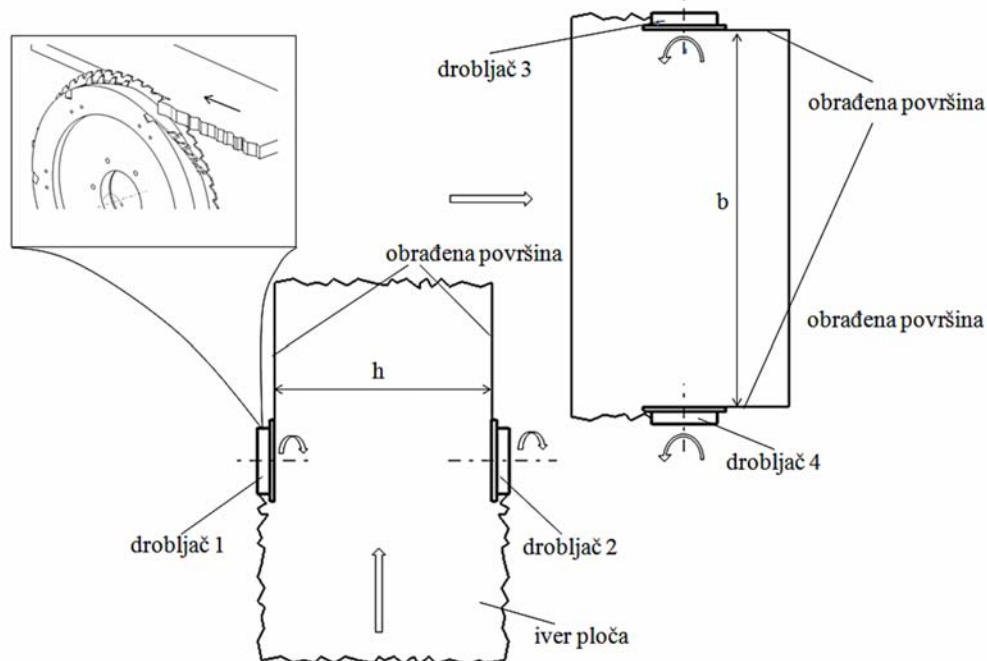


Slika 1. Generalizovana linija za proizvodnju pločastih materijala

Ovaj rad razmatra rešavanje problema neusitnjenog otpatka koji je nastao u procesu formatiranja drobljačem standardne širine koja je manja od širine otpatka koji se drobi. Projektovan specijalni alat za formatiranje i drobljenje otpatka iver ploče primenjuje se nakon procesa brušenja uslučaju neoplemenjene iverice, faza broj sedam, slika 1.

2. POSTAVKA PROBLEMA

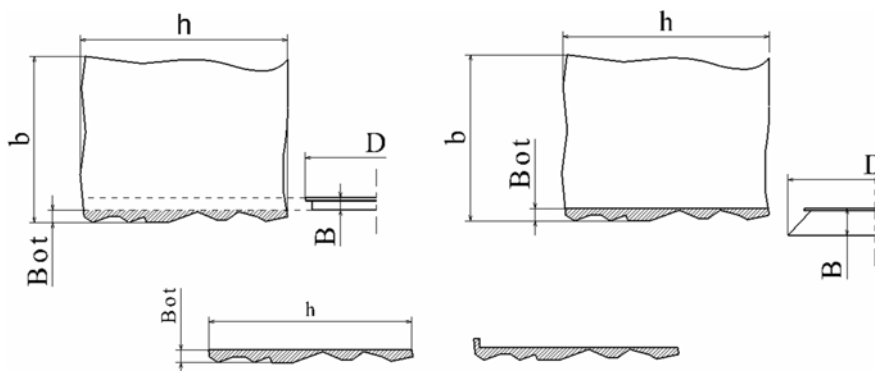
Otpadak koji se javlja pri formatiranju iverice, slika 1, ima promenljiv poprečni presek po dužini i širini neformatirane iver ploče. Na slici 2 prikazana je linija za formatizovanje ploče iverice. Linija se sastoji od četiri alata-drobljača koji rade u paru tako da formatiraju ivericu i usitnjavaju otpadak sa sve četiri strane.



Slika 2. Linija za formatizovanje i usitnjavanje otpatka iver ploče

Rastojanje između drobljača jedan i dva kao i drobljača tri i četiri je promenljivo. Na slici dva prikazani su drobljači sa maksimalnim rastojanjima tako da se može formatirati iverica maksimalnih mera $b \times h$. Često se dešava da se pri formatiranju širine iverice b , na liniju za formatiranje dolazi iverica većih mera od maksimalnih tako da bar sa jedne strane dolazi do pojave otpatka koji se ne može usitniti, slika 3. Glavni razlog je taj što je širina drobljača manja od širine koja se treba obraditi (formatirati i usitniti), što dovodi do pojave otpadaka velikih mera koji, s obzirom na proizvodnost linije, izazivaju zastoje u proizvodnji, ostaju

neposredno u blizini zone rezanja ili usled toga što nije dovoljno usitnjen blokira rad usisnika pneumatskog transporta.



Slika 3. Formatiranje širine iverice: a) alatom-drobljačem standardne širine B i prečnika D , b) specijalnim drobljačem širine B i prečnika D sa konusnim telom (B_{ot} -širina otpatka, h -dužina otpatka).

Neprikupljeni otpadak smanjuje kvalitet proizvoda, iziskuje dodatno čišćenje alata, povećava pripremno vreme ili izaziva kvar mašine kroz prekomerno habanje reznog dela alata.

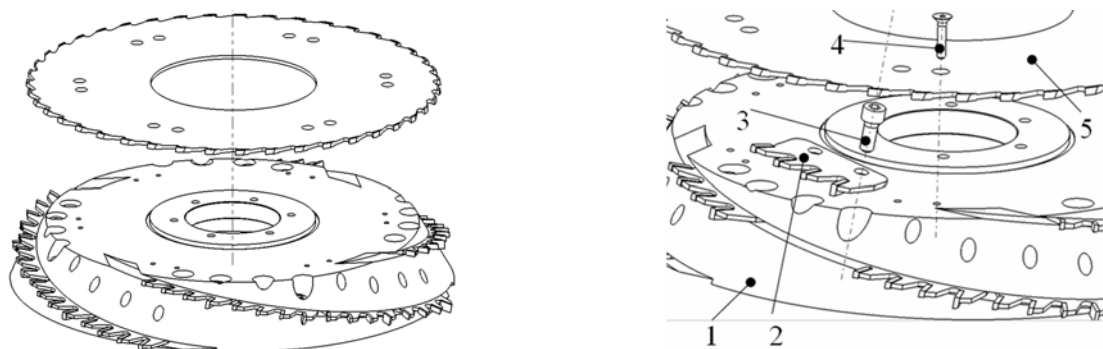
Konstruisanjem i proizvodnjom specijalnog drobljača sa konusnom telom i širinom većom od standardne rešen je problem formatiranja širine iverice i na taj način kompletan otpadak je pretvoren u finu strugoinu koja se veoma lako prikuplja pomoću usisnika pneumatskog transporta i koristi za dobijanje energije.

3. KONTRUKCIJA SPECIJALNOG ALATA-DROBLJAČA

Za potrebe fabrike koja se bavi proizvodnjom pločastih materijala, prvenstveno iverice, a s obzirom na već izložen problem nastajanja neusitnjenog otpatka velikih mera razvijen je prototip specijalnog alata-drobljača sa konusnim telom.

3.1 Tehničke karakteristike prototipa specijalno projektovanog alata-drobljač

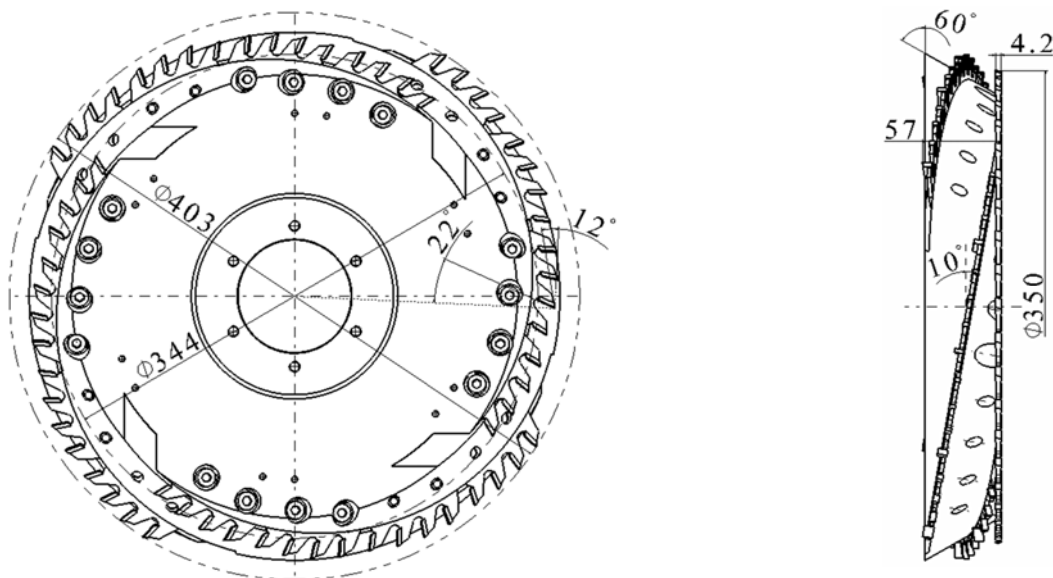
CAD model specijalnog drobljača prikazan je na slici 4. Alat se sastoji od tela drobljača koje je napravljeno od čelika za poboljšanje C1531.



Slika 4. CAD model specijalno konstruisanog alata-drobljača: 1-telo drobljača, 2-segment sa lemljenim pločicama od tvrdog metala, 3-imbus vijak M8, 4-vijak sa konusnom glavom M5x15, 5-kružna testera.

Na telu drobljača nalaze se četiri zavojna žljeba u koje se montiraju po četiri segmenta. Segment drobljača sa lemljenim pločicama od tvrdog metala vezan je za telo drobljača pomoću dva vijka M8. Na svakom segmentu drobljača tvrdo su lemljena po četiri zuba od tvrdog metala. Na telo drobljača pomoću dvanaest vijka M5 montirana je kružna testera. Na kraju ceo sklop drobljača montira se na čauru koja se pomoću vijaka vezuje za telo drobljača i montira na vreteno mašine.

Statička geometrija specijalnog alata-konusnog drobljača kao i karakteristične mere prikazane su na slici 5. Prečnici segmenata, koji se nalaze na telu drobljača, kreću se u rasponu od $\varnothing 403$ mm do $\varnothing 344$ mm. Širina drobljača sa testerom iznosi 57mm.



Slika 5. Karakteristične mere specijalnog alata-konusnog drobljača. Statička geometrija.

Prečnik centralnog otvora na telu drobljača iznosi 80 mm. Pad prečnika uslovljen je uglom konusa tela drobljača koji iznosi 60° . Prečnik testere iznosi $\text{Ø}350$ mm i ostvaruje razliku sa minimalnim prečnikom segmenta drobljača od 6 mm, što je osnovna karakteristika svakog drobljača. Za konstrukciju specijalnog drobljača korišćena je testera sa pločicama od tvrdog metala TM350x4.2x140H7, sa 84 zuba (obilk zuba SE). Grudni ugao zubaca segmenata iznosi 22° a ledni ugao 12° obezbeđujući dovoljno veliki ugao reznog klina. Ovakva geometrija se preporučuje za materijale koji se teško obrađuju kao što su pločasti materijali (iverice, MDF, OSB). Ugao nagiba zavojnog žljeba iznosi 10° što je uslovljeno oblikom i merama pojedinačnog segmenta. Broj zubaca na telu drobljača 64.

4. TEHNOLOGIJA IZRADE SPECIJALNOG ALATA-DROBLJAČA

Tehnologija izrade drobljača može se podeliti u tri faze. Prva faza izrade tela drobljača podrazumeva konvencionalne mašine alatke kao što su univerzalni strug i univerzalna glodalica. Na slici 6 prikazan je deo operacije glodanja pri izradi tela drobljača u ovom slučaju bušenja otvora sa navojima pomoću kojih se vezuju segmenti za telo drobljača.



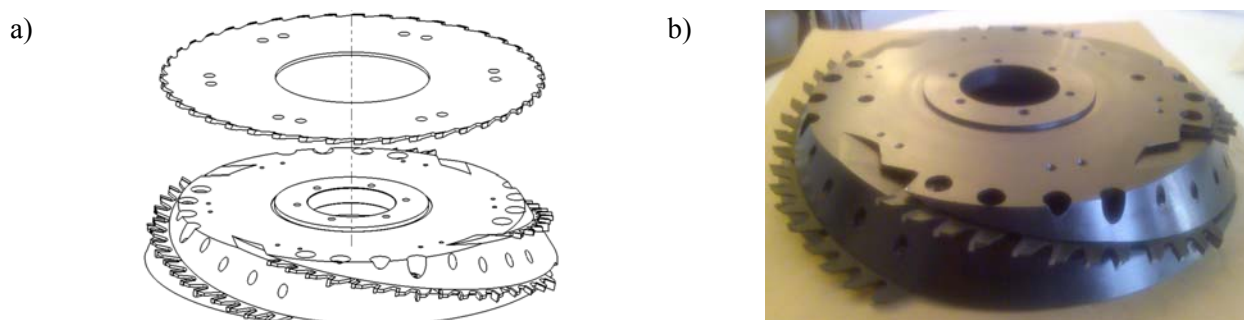
Slika 6. Deo operacije glodanja pri izradi tela drobljača na univerzalnoj glodalici

Druga faza koja se odnosi na proizvodnju tela segmenata drobljača zasniva se na nekonvencionalnim metodama obrade kao što je sečenje vodenim mlazom (Water Jet cutting). Treća faza odnosi se na oštrenje predhodno tvrdo lemljenih pločica od tvrdog metala na tela segmenata. Operacije: sečenja tela segmenata vodenim mlazom (čelična ploča na bazi mangana debljine 3mm), lemljenje pločica od tvrdog metala, oštrenja i prikaz gotovog segmenta prikazani su na slici 7.



Slika 7. a) ostatak manganske ploče nakon operacije sečenja vodenim mlazom, b) lemljenje pločice od tvrdog metala na telo segmenta, c) oštrenje, d) izgled gotovog segmenta

Testera koja se montira na telo drobljača kupljena je kao standardan gotov proizvod. Na slici 8 prikazan je CAD model sklopa specijalnog alata - drobljača i proizveden prototip specijalnog alata.







Slika 8. a) CAD model sklopa specijalnog alata, b) prototip specijalnog alata (bez montirane kružne testere).

5. UPOREDNE KARAKTERISTIKE SPECIJALNOG ALATA SA STANDARDNIM DROBLJAČIMA

U tabeli 1 prikazani su karakteristike standardnih drobljača za formatiranje iverice, [3], [4], [8].

Tab. 1 Standardni tipovi drobljača koji se koriste za formatiranje iver ploče

Slika stand.drobljača				
Tip	A	B	C	D
Proizvođač	Freud	Freud	Freud	BSP
Prečnik D	250	200-300	200-235	255
Širina B	30	30	22	30
Broj zuba na telu	24	16	24	24
Materijal zuba	TM 12x12x1.5	Tvrđi metal	PCD-dijamant	Tvrđi metal
Segmenti	ne	da	da	da
Broj zuba na segmentu	-	1	4	6
Materijal tela	Čelik	Aluminijum	Čelik-aluminijum	Čelik-aluminijum
Oblik tela	cilindrični	cilindrični	cilindrični	cilindrični
Mogućnost rada u setu sa drugim drobljačem	ne	da	ne	ne
Oštrenje segmenata	-pločica-ne	da	da	da
Odnos vrha zuba segmenta i tela drobljača	konstantan	konstantan	konstantan	promenljiv
Zahvat sa obratkom	testera	testera	testera	drobljač

U tabeli 1 prikazani su standardni tipovi drobljača koji se koriste za formatiranje iver ploče. Prednosti proizvedenog prototipa drobljača u odnosu na standardne drobljače: veća širina i prečnik, veći broj zuba na telu što utiče na smanjenje snage rezanja, zbog koničnog tela pojednini zubi segmenta u zahvatu su sa delom

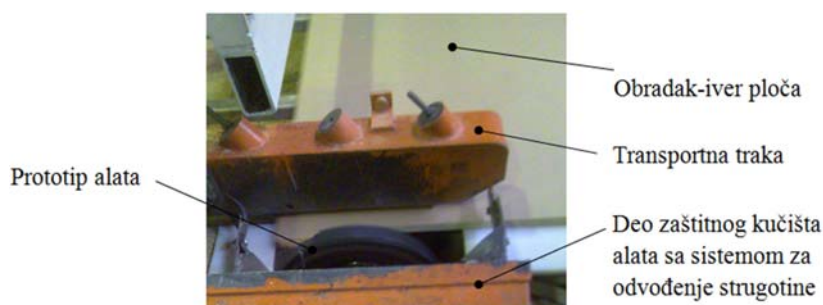
iverice koja se usitnjava pre testere i dovodi do minimalnog savijanja iverice što utiče na bolji rad kružne testere, konstantno rastojanje vrha segmenta od tela drobljača.

Tipski drobljač B ima mogućnost da radi u setu sa još 3 identična drobljača tako da postiže širinu rezanja do 85mm. Ovaj tip drobljača zahteva posebno dizajniranu čauru koja omogućava montažu većeg broja drobljača, za konkretno postavljen problem nema porteban prečnik.

Mane prototipa drobljača: težina drogljača koja iznosi 20 kg, što je 50% više od standardnih drobljača.

6. EKSPLOATACIJA SPECIJALNOG ALATA-DROBLJAČA U PROIZVODNIM USLOVIMA

Prototip projektovanog alata uspešno vrši zahvat formatiranja iverice i usitnjavanja otpatka. U fabrici, za čije potrebe je projektovan i proizveden, alat radi u sve tri smene sa sledećim režimom: broj obrtaja $n = 2700 \text{ ob/min}$, brzina pomoćnog kretanja iver ploče $V_s = 20 \text{ m/min}$, snaga motora glavnog vretena $P = 7.5 \text{ kW}$. Postojanost alata-period između dva oštrenja 1440 min, za ovo vreme alat usitni 28800 m ivica iverice sa kvalitetom obrade koja je zahtevana. Prikaz prototipa alata u zahvatu sa iver pločom prikazan je na slici 9.



Slika 9. Prototip specijalnog alata u zahvatu sa iver pločom

U eksploatacionim uslovima testera drobljača obezbeđuje čist rez i dobar kvalitet obradjene površine na bočnoj strani iverice dok telo drobljača sa segmentima usitnjava ostatak iver ploče i stvara finu strugotinu koja se lako odvodi sistemom pneumatskog transporta.

7. ZAKLJUČAK

Rešavanje problema usitnjavanja otpatka pri proizvodnji iver ploča, i to u fazi njihovog formatiranja-opsecanja, postignuto je projektovanjem i proizvodnjom specijalnog alata-drobljača koji otpadak nestandardnih mera usitnjava. Usitnjeni otpadak se lako odvodi sistemom pneumatskog transporta do silosa i koristi se za dobijanje energije. U radu je objašnjen razlog i potreba za projektovanjem specijalnog alata na zahtev poznatog proizvođača iverice u našoj zemlji. Pored detaljno opisane konstrukcije alata u radu je prikazana i tehnologija njegove izrade. Za proizvodnju alata se, pored konvencionalnih tehnologija, koriste i nekonvencionalni postupci obrade kao što je sečenje vodenim mlazom (Water Jet Cutting). Proizveden prototip alata uspešno rešava problem usitnjavanja otpatka iver ploče i odlično se pokazao u proizvodnom okruženju.

8. LITERATURA

- [1] Chapman K., Wood-based panels: particleboard, fireboards and oriented strand board, chapter 12, MDF Tech, Christchurch, New Zealand
- [2] Đurišić Z., Popović M., Danon G., Krzavost dekorativne površine oplemenjenih ploča iverica pri rezanju, Prerađa drveta br. 9-10
- [3] Freud, Catalogo Generale
- [4] Leuco, catalog
- [5] Miljković J., Kompozitni materijali od usitanjenog drveta IVERICE, Naučna knjiga, Beograd, 1991
- [6] Shi S., Walker J., Wood based composites: plywood and veneer-based products, chapter 11, Department of forest products, Mississippi State University, USA

[7] Tanović Lj., Alati i pribori-Predavanja. Mašinski fakultet Beograd školska 2002/2003

[8] The Leitz-Lexikon, edition 4

Milan Milutinović; Ljubodrag Tanović

CONTRIBUTION TO SOLVING PROBLEMS OF WASTE DURING THE CUTTING OF WOOD BASED PANELS-PARTICLEBOARD

Abstract:

Wood based panels are developed in the late half of the 20th century and become an important component in wood processing. As the quality of the edges of the particleboard, after the process of pressing and grinding, is worse than required it is necessary to cut them-format. The usual overmeasure of the edge is 5-10 cm so the standard tools for forming (trimming) can not chop the waste which leads to collect it manually than chop them and transport to tank.

Solving the problem of large waste chopping during the process of particleboard processing, in forming (trimming) phase, is achieved by design and production of special tool-hogging unit that can chop the large waste. Successfully produced a prototype tool solves the problem of chopping of the large waste and has proven to be excellent in the production environment.

Keywords: Particleboard, Waste, Tool

D. Denadić¹, M. Manić², D. Tanikić³, S. Ranđelović⁴

PRIKAZ VRSTA FIKSATORA I METODA OBRADE ELEMENATA ZA FIKSATORE U MEDICINI

Rezime:

Fiksator je medicinski uređaj proizveden da pruži podršku oštećenim biološkim strukturama. U polju ortopedije koja se bavi skeletnim poremećajima nerđajući čelici, legure titana i aluminijuma (Ti-6Al-4V), legure kobalta i hroma, kompozitni materijali i drugi biokompatibilni materijali nalaze primenu za stabilizaciju povreda potpornih tkiva ili kao zamena za koštano tkivo. Fiksatori se grubo dele na spoljašnje i unutrašnje u zavisnosti od mesta ugradnje. Najčešće korišćeni medicinski fiksatori su igle, šipke, pločice, zavrtnevi, cevi, žice, klinovi i eksterni fiksatori. Za sve elemente fiksatora postoje metode obrade kojima se oni izrađuju, pri čemu se koriste i konvencionalne i nekonvencionalne metode obrade.

Ključne reči: fiksator, implant, biokompatibilni materijali, konvencionalne i nekonvencionalne metode

1. UVOD

Fiksator je medicinski uređaj proizveden da pruži podršku oštećenim biološkim strukturama. Najveću primenu nalazi u polju ortopedije koja se bavi skeletnim poremećajima, poput povreda ili oboljenja kostiju, kičme, zglobova, mišića i tetiva. Na slici 1 je prikazano spoljašnje fiksiranje tibije.[1]



Slika 1. Spoljašnje fiksiranje tibije

Fiksatori se dele na spoljašnje i unutrašnje u zavisnosti od mesta ugradnje (van ili unutar tela). Koriste se za lečenje svih vrsta preloma i to za lečenje traumatskih preloma, spontanih preloma i stresnih preloma. Traumatski prelomi su oni koje prouzrokuje jaka (direktna ili indirektna sila). Spontani prelomi su oni prelomi koji su izazvani minornom traumom usled promene koštane strukture koja je uslovljena patološkim procesom u kosti dok su stresni prelomi oni koji su izazvani zamorom kosti zbog dugotrajnih naprezanja (sportisti, plesači i i drugi).

¹ dipl.ing.maš. DALIBOR ĐENADIĆ, Tehnički fakultet u Boru, 064/267-0672, ddjenadic@tf.bor.ac.rs

² dr MIODRAG MANIĆ, Mašinski fakultet u Nišu, 063/453-566, mmanic@masfak.ni.ac.rs

³ dr DEJAN TANIKIĆ, Tehnički fakultet u Boru, 063/485-443, dtanikic@tf.bor.ac.rs

⁴ dr SAŠA RANĐELOVIĆ, Mašinski fakultet Niš, 064/189-2586, sassa@masfak.ni.ac.rs

Za izradu fiksatora i implanta se koriste biokompatibilni materijali. To su oni materijali koji pokazuju dobre karakteristike u kontaktu sa ćelijama, tkivima ili telesnim tečnostima ljudskog organizma. Uostalom biokompatibilnost je opisni izraz kojim se označava sposobnost materijala da se ponaša na odgovarajući način u organizmu u kome se aplicira. Najbitnije karakteristike koje treba da poseduju ovakvi materijali jesu: netoksičnost, otpornost prema koroziji, izdržljivost, veliku čvrstoću, žilavost uz nisku vrednost modula elastičnosti.

2. MATERIJALI ZA IZRADU FIKSATORA

Materijali koji se najčešće koriste u biomedicini mogu se svrstati u nekoliko grupa i to: metali i legure, keramički materijali, polimeri i kompozitni materijali koji predstavljaju kombinaciju prethodno navedenih materijala.

Metali su poznati kao materijali velike čvrstoće, žilavosti i otpornosti na habanje, ali su nedostaci niska biokompatibilnost, podložnost koroziji, isuviše velika čvrstoća (u odnosu na živa tkiva), velika gustina i oslobađanje metalnih jona koji potencijalno izazivaju alergijske reakcije tkiva [2].

Metalni biomaterijali se najduže primenjuju u medicini i to za fiksaciju i zamenu tvrdog tkiva (veštački kuk, veštačko koleno, pločice za fiksaciju prelomljenih kostiju itd.) i za izradu hirurških instrumenata [3]. Najviše se koriste nerđajući čelici (austenitni i precipitaciono ojačani), superlegure na bazi kobalta (kobalt-hrom legure) i titanijum i njegove legure.

U današnje vreme za fiksatore se najviše koriste titanijum i njegove legure. Koriste se za zamenu i reparaciju tvrdog tkiva, kao što su veštačka ramena, veštački kukovi, zavrtnjevi za fiksatore, pejsmejkere, veštačka srca itd. Čist titanijum se smatra najboljim biokompatibilnim materijalom jer ima sposobnost spontanog formiranja tankog površinskog sloja stabilnog i internog oksida. Od legura najviše korišćena legura je Ti-6Al-4V, međutim vanadijum izaziva toksičnost, pa se radi na razvoju drugih legura koje ne sadrže vanadijum, već sadrže gvožđe i niobijum kao n.pr. Ti-5Al-2,5Fe; Ti-6Al-7Nb; Ti-13Nb-13Zr; Ti-12Mo-6Zr-2Fe; Ti-45Nb i druge legure.

Pored legura titanijuma i legure na bazi kobalta zvane vitalijum nalaze veliku primenu i to uglavnom legure kobalta i hroma. One imaju veću otpornost na habanje od nerđajućih čelika i titanijumovih legura. Zato se često koriste za izradu veštačkih kukova i to za izradu glave proteze. Ove legure uglavnom sadrže veliki procenat nikla dok je nekim postupcima obrade, npr. specijalnom termomehaničkom obradom moguće dobiti leguru kobalta i hroma bez nikla sa izvesnim procentom molibdena (Co-28Cr-6Mo).

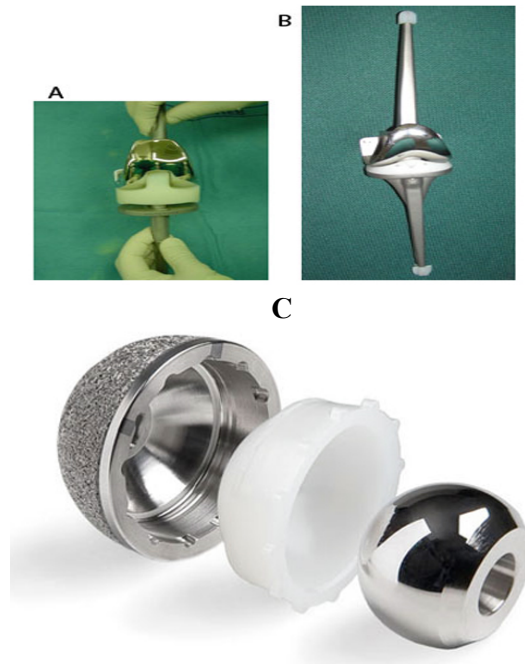
Keramički materijali imaju veoma dobru biokompatibilnost, otporni su na koroziju i habanje i poseduju veoma visoku otpornost na pritisak. U nedostatke keramičkih materijala ubrajaju se krtoš, otežana izrada, loše mehaničke karakteristike, velika gustina itd.

Veliki broj polimera ima široku primenu u biomedicini. Jedan od razloga je i taj što su polimeri prisutni u širokom dijapazonu sastava, osobina i oblika i mogu biti proizvedeni u kompleksne oblike i strukture. Nedostatak je što su dosta savitljivi i preslabi za aplikaciju u ortopedskoj praksi. U praksi kao alternativa su mnogo više u primeni polimer kompozitni materijali kojima se uklanjaju nedostaci koje imaju obični polimeri.

3. VRSTE FIKSATORA U MEDICINI

Opšta podela fiksatora je na spoljašnje i unutrašnje u zavisnosti od mesta ugradnje. Najčešće vrste medicinskih fiksatora su: igle, šipke, pločice, cevi, zavrtnjevi, žice, klinovi i eksterni fiksatori. Navedeni elementi se koriste kao delovi zglobnih proteza, elementi za fiksaciju preloma kao i elementi za fiksiranje kičme.

Za zglobove proteze je karakteristično to da implante u ovom slučaju predstavljaju cevi koje se ubacuju u medularni kanal kosti kako bi stabilisali protezu i delove zgloba. Pokretni delovi zgloba se obično izrađuju od kobalt-hrom legura i polietilena velike gustine kako bi se u velikoj meri smanjilo trenje između kliznih površina zgloba. Od kobalt-hrom legura se takođe izrađuju i totalne proteze kuka kao i glava butne proteze dok se komponenta koja zamenjuje butnu kost izrađuje od legure titanijuma. Problemi koji se javljaju kod totalnih proteza su vezani za životni vek konstrukcija, pa je to nešto na čemu se intenzivno radi. Na slici 2 su prikazane neke varijante proteze kolena i zglobova kuka.



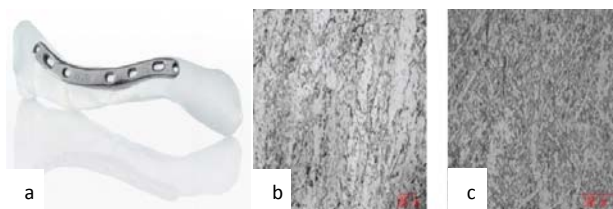
Slika 2. Revizijska proteza kolena (A), Šarnirska endoproteza kolena (B), moguće zamene zglobova kuka kombinacija metal-polietilen (C)

Fiksatori lomova uključuju pločice, zavrtnje, žice, klinove i eksterne fiksatore. Fiksatori lomova se izrađuju od različitih metalnih legura i to najčešće legura titanijuma [1].

Pločice za fiksaciju se uspešno koriste pri tretiranju lomova kostiju, npr. kod loma podlaktice. S obzirom na to da su mesta koja se tretiraju pločicama isuviše kruta, u nekim slučajevima se za imobilizaciju koriste znatno elastičniji eksterni fiksatori. Za njihovu izradu se koriste nerđajući čelici i kobalt-hrom legure, a u slučajevima kada se želi bolja statička i dinamička čvrstoća onda se koriste legure titanijuma i čist titanijum [4]. Na slici 3 su prikazane pločice za fiksaciju od nerđajućeg čelika kao i od čistog titanijuma na slici 4.



Slika 3. Pločice za fiksaciju od nerđajućeg čelika



Slika 4. Fiksacija pločica od čistog titanijuma klase 2 (a), mikrostruktura čistog titanijuma klase 2 uvećanje, 100x (b), mikrostruktura čistog titanijuma klase 2, uvećanje 200x (c)

Zavrtnji su veoma efikasni i dosta primenjeni tipovi implanta koji se koriste u operativnom lečenju preloma. Oni malu silu zavijanja pretvaraju u veliku aksijalnu silu u pravcu ose zavrtnja čime obezbeđuju pouzdano spajanje i fiksiranje polomljenih fragmenata. Koriste se još i za fiksiranje pločica.

Intramedularni klinovi se uglavnom koriste kod lomova dugih kostiju tako što se postavljaju u medularni kanal kosti. Time je omogućena odlična fiksacija mesta preloma. Za razliku od pločica i zavrtnjeva,

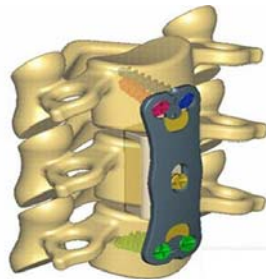
intramedularni klinovi važe za implantne delove kod kojih postoji mogućnost raspodele opterećenja, što je jako važno jer oni predstavljaju potporu polomljene kosti. Na slici 5 su prikazani zahvati fiksiranja tibije i nadlaktice korišćenjem intramedularnih klinova, priteznih vijaka i ortopedskom žicom.



Slika 5. Osteosinteza tibije (podkolenice) intramedularnim klinom, priteznim vijcima i ortopedskom žicom (levo), odnosno osteosinteza humerusa (nadalaktice) intramedularnim klinom i ortopedskom žicom (desno)

Eksterni fiksatori se često koriste u ortopedskoj hirurgiji i to tako što se fragmenti kosti stabilišu zavrtanjima koji prolaze kroz njih i povezani su sa fiksatorom koji se nalazi van tela pacijenta. Postoje tri tipa eksternih fiksatora koji se koriste u ortopediji i to: monolateralni fiksator, prstenasti fiksator i hibridni fiksator. Ranije su izrađivani od nerđajućih čelika, a danas se za njihovu izradu koriste legure titanijuma i legure aluminijuma dok se zavrtnji izrađuju od legure Ti-6Al-4V.

Elementi za fiksiranje kičme se nazivaju kičmeni implantati. Oni se koriste za stabilizaciju delova kičme koji su pretrpeli određenu traumu. Ugrađuju se najčešće trajno u organizam jer je uklanjanje operacijom jako teško i rizično. Iz tog razloga se izrađuju od legura titanijuma zbog biokompatibilnosti i kompatibilnosti sa magnetnom rezonancom. U poslednje vreme se radi na razvoju legura koje ne sadrže vanadijum iz razloga toksičnosti, alergije itd. Na slikama 6 i 7 su dati primeri fiksacije prednje vratne kičme pomoću pločica odnosno fiksacija za kičmu od titanijumovih legura [4-5].



Slika 6. Pločice za prednju vratnu kičmu



Slika 7. Fiksacija za kičmu od titanijumove legure Ti-6Al-4V

4. METODE DOBIJANJA MATERIJALA ZA FIKSATORE U MEDICINI

Proizvodnja novih materijala usko je povezana s postupcima koji bi se uslovno mogli nazvati tehnologijama materijala. Radi se o svim onim postupcima tokom kojih se bitno menjaju sastav i struktura, odnosno formiraju svojstva materijala, a često i svojstva konačnog proizvoda. To su npr. klasični postupci

livenja, postupci oblikovanja praha, lasersko sinterovanje, postupci modifikacije i prevlačenja površina, postupci oblikovanja kompozita itd.

Savremeni materijali se dobijaju optimizacijom sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha (Powder Metallurgy - PM) pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa proizvodnji materijala i delova. Metalurgija praha danas obuhvata ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnih prahova, te oblikovanje delova iz takvih prahova postupkom sinterovanja odnosno srašćivanja. PM postupci omogućavaju postizanje boljih svojstava od tradicionalnih postupaka oblikovanja materijala. Koriste se i za proizvodnju keramike i metalnih kompozita. Ultrabrzno srašćivanje pruža nove mogućnosti proširenja legiranja i prečišćavanja mikrostrukture, dobijanje ranije nedostižnih kompozita, kao i amornih i kristalnih struktura. Postoji veliki broj materijala koji mogu da se dobiju PM postupcima i to: tvrdi metali, vatrostalni metali, kompoziti, specijalne legure itd.

Nerđajući čelici za biomedicinsku upotrebu mogu da se dobiju metalurgijom praha. Ovi čelici se odlikuju velikom otpornošću na koroziju i odličnim mehaničkim karakteristikama. Implantsi od ovog materijala se najčešće izrađuju livenjem. U toj varijanti mehaničke karakteristike u svim pravcima su uglavnom iste.

U biomedicini se veoma često koriste legure na bazi kobalta i hroma. Postoje dve velike grupacije ovih legura i to legure koje se koriste za livenje finalnog proizvoda i legure od kojih se finalni proizvod dobija kovanjem. Pored navedenih legura specijalnom termomehaničkom obradom legure moguće je dobiti i leguru Co-28Cr-6Mo. Proces sinterovanja koji se primenjuje za dobijanje ovih legura podrazumeva tretiranje pod visokom temperaturom koja negativno utiče na mehaničke karakteristike. Zbog toga je razvijen proces sinterovanja na nižim temperaturama koji ne dovodi do remećenja mehaničkih karakteristika. Ove legure treba takođe da zadovolje zahteve u pogledu otpornosti na koroziju i u pogledu mehaničkih karakteristika. Ovaj proces se sastoji od topljenja vakuumskom indukcijom, podvrgavanja visokom pritisku, preciznom kovanju i valjanju.

Titanijum i njegove legure se najčešće dobijaju metalurgijom praha. Taj postupak ima prednost i u odnosu na tehnologiju livenja u kalupima iz razloga što je cena izrade dosta manja. Da bi se izbegla porozna struktura sinterovane legure koristi se postupak izostatičkog presovanja u toplom stanju. Veličina čestica čistog titanijuma koji se dobija postupcima metalurgije praha i termičkim postupcima su 45-100 μm .

5. METODE ZA IZRADU FIKSATORA U MEDICINI

Metode obrade koje se koriste za izradu fiksatora i implanta su različite. Faktori koji utiču na izbor metoda obrade i izrade fiksatora i implanta su sledeći: materijal od kojih se izrađuje gotov deo (obradljivost materijala) zbog mehaničkih i hemijskih karakteristika materijala, karakteristike koje treba da zadovolji deo koji se izrađuje, oblik dela (jednostavan ili složen deo u pogledu geometrije) itd.

Metode koje se koriste su konvencionalne i nekonvencionalne metode skidanja strugotine, livenja, kovanja i druge metode. Koja će se od ovih metoda koristiti najviše zavisi od složenosti oblika gotovog dela, kao i od njegove primene kod živog organizma, da li se deo nalazi van ili unutar tela.

Fiksatori pravilnog geometrijskog oblika poput zavrtnjeva, žica, klinova, nekih vrsta cevi i pločica i drugih vrsta fiksatora mogu da se izrađuju bilo kojim od konvencionalnih postupaka. Tako npr. obrade koje se mogu koristiti za izradu zavrtnjeva su sečenje, struganje, rezanje navoja i slično. Za žice se mogu koristiti metode sečenja, izvlačenja i slično, za cevi sečenje, struganje, glodanje, bušenje i druge metode sve u zavisnosti od oblika cevi koju želimo da dobijemo. Za klinove i pločice se mogu koristiti sečenje, struganje, glodanje, bušenje, dok za svaki od ovih elemenata (fiksatora) kao završna obrada može se primeniti brušenje, poliranje, honovanje i druge završne metode obrade.

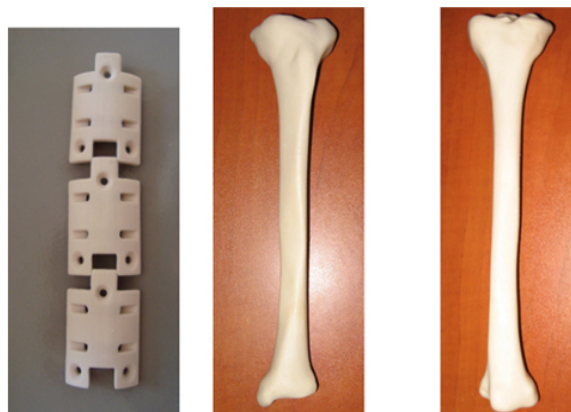
Kad su u pitanju elementi koji su složenog geometrijskog oblika, poput mnogih implanta, koriste se uglavnom nekonvencionalni postupci za preciznu izradu i to su najčešće novije metode izrade na gotovo konačan oblik (net shape i near net shape technologies). Cilj ovih tehnologija je visoka iskoristivost materijala uz što manje primenjenih operacija u procesu oblikovanja, što je kod izrade fiksatora manje važno jer se ne traži toliko visoka preciznost izrade i zbog toga što su elementi fiksatora uglavnom standardnih dimenzija, pa je samim tim i velika iskoristivost materijala.

Postupci izrade na gotovo konačan oblik se mogu svrstati u tri kategorije i to: konsolidacijski postupci za postizanje pune gustine (vruće izostatičko brizganje-HIP, injekcijsko brizganje metala-MIM, oblikovanje metala u testastom stanju (semi-solid), hladno/vruće izostatičko brizganje-CHIP/HIP, kovanje praha); nanošenje raspršivanjem (plasma spraying) i oblikovanje raspršivanjem (spray forming); oblikovanje nadogradnjom-brza izrada prototipova (Rapid Prototyping) i brza proizvodnja delova (Rapid Manufacturing - npr. laserskim sinterovanjem).

U medicini za dobijanje implanta i nekih fiksatora složenijih oblika posebno zanimljiv postupak za izradu delova je postupak izrade delova u jednoj operaciji i to proces laserskog taloženja (sinterovanja) metalnih prahova sloj po sloj. Metalne čestice kod ovog postupka se injektiraju u fokus laserskog snopa čija je putanja računarski vođena u tri ose. Putanja je određena geometrijom trodimenzionalnog modela izratka dobijenog oblikovanjem pomoću CAD paketa. Na slici 8 je prikazan uređaj za izradu modela korišćenjem navedenog postupka, dok su na slici 9 prikazani modeli koji mogu da se dobiju navedenim postupkom [4-6].



Slika 8. Rapid Prototyping 3D Zcorp 310 sistem za vođenje i štampanje



Slika 9. Modeli pločica i prototip tibije

Najpoznatiji postupak oblikovanja u polučvrstom stanju je postupak Thixomoulding [7]. Radi se o postupku istiskivanja praha metala u kalup u testastom, poluukrućenom stanju. Prednosti postupka su: povećana tačnost i iskoristivost materijala u odnosu na livenje pod pritiskom i precizno livenje, izostanak završnih operacija obrade, oblikovanje vrlo složenih geometrija itd.

Za obradu složenih elemenata je interesantna nekonvencionalna metoda sečenja vodenim mlazom ili tzv. sečenje na Water Jet-u. To je jedna od najinovativnijih metoda današnjice. To je proces hladne obrade rezanjem vodom koji omogućava da se radi sa materijalima koji se ranije nisu mogli obrađivati tradicionalnim metodama ili su se obrađivali uz velike teškoće, a takvi su upravo materijali koji se koriste za izradu fiksatora i implanta. Posebno je interesantno to što se rezanjem vodenim mlazom ne zagreva materijal što je dobro jer se kod nekih materijala usled visokih temperatura menjaju karakteristike materijala. Pored toga velika je iskoristivost materijala, upravljačkim sistemom se omogućava rezanje različitih formi i oblika sa velikom preciznošću i visokim kvalitetom reza, manji su troškovi izrade, nema opasnih gasova u okolini pri obradi, velika brzina rezanja koju mnoge mašine nemaju, nema potrebe za završnim radom na proizvodu itd.

Kao što je rečeno koja će se od pomenutih metoda koristiti zavisi i od materijala koji se obrađuje. Tako npr. implantati od nerđajućeg čelika se najčešće izrađuju livenjem. Nerđajući čelik se može obrađivati postupcima obrade materijala skidanjem strugotine, elektroerozijom, dobro se spajaju zavarivanjem, poliraju, a po potrebi moguće je i nanošenje površinskih slojeva materijala.

Finalni proizvodi na bazi kobalta i hroma se izrađuju livenjem ili kovanjem. Legure za kovanje za razliku od legura za livenje koriste se za izradu implanta koji imaju veće zahteve u pogledu čvrstoće. One sadrže veliki procenat nikla koji nije preporučljiv zbog alergije, pa se zbog toga koriste termomehaničke obrade za dobijanje legure sa molibdenom. Razmatrajući ove legure bolje se obrađuju legure sa malim sadržajem ugljenika i velikim sadržajem azota. Obradljivost ovih legura je odlična o kom god postupku mašinske obrade da se radi, pa se zbog toga primenjuju svi postuci mašinske obrade za izradu fiksatora i implanta od ovih legura. Pored toga razvijene su i specijalne metode za dobijanje visokog kvaliteta obrađene površine ovih legura brušenjem [8].

Legure na bazi titanijuma i čist titanijum imaju dobru obradljivost. Najbolju obradljivost titanijum ima pri sledećem režimu obrade: niska brzina rezanja, velika vrednost koraka rezanja, umerene količine sredstava za hlađenje i podmazivanje, oštar alat, velika krutost obradnog sistema itd. Obradljivost legure Ti-6Al-4V se pri istim režimima obrade takođe odlično obrađuje. Delovi koji se izrađuju od titanijuma se dobro spajaju zavarivanjem, ali se mora voditi računa o velikoj hemijskoj agresivnosti. Mana izrade fiksatora i implanta od titanijuma i titanijumovih legura je visoka cena obrade. Troškovi se mogu smanjiti ukoliko se ove legure dobijaju metalurgijom praha. Za slučaj da se želi izbeći porozna struktura sinterovane legure koristi se postupak izostatičkog presovanja u toplom stanju.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ukratko prikazan pregled metoda za izradu fiksatora i implanta. Pored toga prikazani su materijali od kojih se oni najviše izrađuju i koje su to vrste fiksatora i implanta koji se primenjuju u medicini.

Može se zaključiti da su metode koje se najviše primenjuju tradicionalne, ali se intenzivno radi na razvoju metoda koje bi zamenile tradicionalne metode i dovele do povećanja tačnosti izratka, do boljih karakteristika gotovog dela i samim tim do smanjenja pojave infekcija, alergija i slično kod ljudskog organizma. Zbog toga se sve više pojavljuju nekonvencionalne metode kojima se popravljaju navedeni faktori. Neke od tih metoda su prikazane u radu gde se jasno vidi da su to daleko bolje metode od konvencionalnih metoda. Nedostatak tih metoda danas je veća cena izrade gotovih delova i dosta skupe mašine za obradu, pa ih još uvek nema toliko u primeni u Srbiji i okolini, dok je u Evropi i Svetu to dosta zastupljenije.

Pored toga jasno je da je danas za izradu fiksatora i implanta najprimenjeniji titanijum i njegove legure. Nedostatak tih legura je prisustvo vanadijuma koji izaziva infekcije, alergije itd. pa se radi dosta na razvoju novih legura koje nebi sadržale vanadijum. Jedan od najinteresantnijih materijala je niobijum, a sa njim legura Ti-13Nb-13Zr koja pokazuje izuzetne karakteristike za izradu fiksatora i implanta i očekuje se da će ta legura zameniti primenu legure Ti-6Al-4V.

Fiksatori koji se danas izrađuju imaju različite konstrukcije i za sada nema pojave nekih novih fiksatora u smislu konstrukcionog izvođenja. Promene koje se događaju su u pogledu materijala od kog će se izrađivati fiksatori i implantanti. U nekim varijantama se teži lakšim elementima fiksacije, pa se onda rade od lakših materijala, a u nekim slučajevima je bitno da budu teži pa se rade od težih materijala. Najbitnije je da se poveća otpornost na koroziju i netoksičnost.

U vezi sa svim gore navedenim najveću primenu u budućnosti će imati materijali i legure koji budu pokazivali najbolje karakteristike u smislu mehaničkih i hemijskih karakteristika, obradljivosti, reakciji živog organizma u dodiru sa tim materijalima itd.

7. LITERATURA

[1] I.Cvijović-Alagić, M.Rakin, Integritet biomedicinskih implanata od legura titana (drugi deo), Integritet i vek konstrukcija, vol.8, br.2, 2008, str.121-130

[2] J.Geringer, A.Pandit, D.Apatsidis, Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications, Biomaterials, 27, 2006, str. 2651-2670

[3] C.Ribeiro, N.Severino, R.Cury, V.Oliveira, R.Avakian, T.Ayhara, O.Camargo, A new fixation material for open-wedge tibial osteotomy for genu vsrum, The Knee, 16, 2009, str. 366-370

[4] D.Tarnita, D.N.Tarnita, N.Bidzoaca, D.Popa, Modular adaptive bone plate based on intelligent materials, In: 11th Essen Symposium on Bioamaterials and Biomechanics Fundamentals and Clinical Applications, Essen, March 5-7, 2009, p. 102-103

[5] D.Tarnita, D.N.Tarnita, N.Bidzoaca, M.Negru, C.Copilus, Modular orthopedic implants for forearm bones based on shape memory alloys, In: /S/ Proceedings of The 19th International DAAAm Symposium, "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", Trnovo, Slovakia 22-25 October, 2008, 1363-1364

- [6] G.Dowson, Introduction to Powder Metallurgy – The Process and its Products, European Powder Metallurgy Ass., Shrewsbury, England, 1993
- [7] D.M.Walukas, R.F.Decker, R.E.Vining, R.D.Carnahan, Thixomoulding® of Magnesium, Proceedings of 1st Int. Conf. on Mg Science & Technology, Israel, 1997
- [8] H.Ohmori, K. Katahira, Y.Akinou, J.Komotori, M.Mizutani, Investigation on Grinding Characteristics and Surface-Modifying Effects of Biocompatible Co-Cr Alloy, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 55/1, 2006, str. 597-600

THE OVERVIEW OF FIXATORS AND METHODS OF PROCESSING OF MECHANICAL ELEMENTS USED BY FIXATORS IN MEDICINE

Summary:

Fixator is a medical device that provides support to fractured biological structures. Materials such as stainless steel, titanium and aluminium alloys (Ti-6Al-4V), cobalt and chromium alloys, composite materials and other biocompatible materials are used in orthopedy for the stabilization of connective tissue injuries or as a substitute for the bone tissues. Fixators are classified according to the place of installation to external and internal fixators. The widely used medical fixators are pins, rods, plates, screws, pipes, wires, nails and external fixators. Conventional and non-conventional methods of processing are used in the production process of the mechanical elements used in fixators.

Keywords: fixator, implant, biocompatible materials, conventional and non-conventional methods



D. M. Janković¹

PREDLOG NOVOG KONCEPTA ISPITIVANJA SISTEMA UBRIZGAVANJA GORIVA

Apstrakt:

Cilj svakog ispitivanja je da se sa što manje uzoraka i u što kraćem vremenskom periodu dobiju svi podaci dovoljni za analizu. Razvoj sistema ubrizgavanja dizel motora nije u potpunosti pratio razvoj opreme za ispitivanje i ostavljao je prostor za inovacije, u tom pogledu predlog novog koncepta ispitivanja sistema ubrizgavanja dizel motora pronalazi svoje mesto na tržištu svojim praktičnim rešenjem.

Ključne reči: Dizel motor, Linijska pumpa, Cummins, Common Rail, MGT 812/824, Bosch, EPS 708, Novi koncept.

1. UVOD

Razvoj dizel sistema ubrizgavanja se konstantno usavršava, potpomognut strogim zahtevima za smanjenje zagađenja životne sredine i povećanje efikasnosti.

Vraćanjem na sam početak, nekako se samo nameće ime pronalazača i inženjera Rudolfa Dizela koji je 1892. godine patentirao prvi motor koji je kao pogonsko gorivo koristio ugljenu prašinu. Do paljenja smeše gorive ugljene prašine i vazduha dolazilo je pod uticajem visoke temperature nastale usled sabijanja vazduha. Usledio je dalji razvoj i primena motora, prvo kao stacionarnih motora, a odmah potom i u brodogradnji. Tokom druge decenije dvadesetog veka pojavili su se prvi traktori i kamioni sa pogonom na dizel motor, a u istom periodu dizel motori su svoje mesto našli i u železnici. Značajan korak u razvoju dizel sistema ubrizgavanja goriva učinila je kompanija Bosch predstavivši 1927. godine linijsku pumpu visokog pritiska dizel goriva koja je time iz upotrebe isključila ugljenu prašinu. Dostignuti tehnološki nivo, uz robusnost, ekonomičnost, izdržljivost, trajnost i pouzdanost koja se tokom godina potvrdila u eksploataciji, konačno je naveo konstruktore da počnu da razmišljaju o putničkom vozilu sa ovom vrstom pogonskog motora. Prvi rezultat je bio Mercedes-benz 260 D čija je proizvodnja počela 1936. godine. Uprkos činjenici da je još 1952. godine trkački automobil pokretao Cummins-ov dizel motor pa čak i da je osvojio polpoziciju na trci u Indijanapolisu (trku nije završio upravo zbog kvara na motoru) dizel motori su, ipak, u putničkim automobilima ostali prilično retkost. Prvi ozbiljniji znaci energetske krize podstakli su proizvođače i kupce na drugačiji pristup, pa je tokom sedamdesetih godina započela ekspanzija putničkih vozila sa pogonom dizel motora, a krajem sedamdesetih godina gotovo svaka ozbiljnija fabrika imala je u svojoj ponudi bar jedan ovakav model. Dalje širenje na tržište putničkih automobila u 80-tim i 90-tim godinama dizel motori mogu u dobroj meri da zahvale razvoju sistema ubrizgavanja dizel goriva kao i tada novom konceptu turbo-dizel motora. Sa povećanom fleksibilnošću i boljim performansama, dizel motori su konačno počeli da privlače značajniji krug kupaca.

Prva značajna prepreka u pogledu primene dizel motora bila je krajem devedesetih godina u ograničenju zagađenja životne okoline izduvnim gasovima. Nimalo beznačajno ograničenje je promenilo koncept sistema ubrizgavanja dizel goriva i dovelo do početka primene *Common Rail Systema* kao sistema koji vrlo efikasno uspeva da smanji nivo zagađenja životne okoline.

¹ Dejan M. Janković, dipl.ing.maš.

2. COMMON RAIL SISTEM UBRIZGAVANJA

Prototip sistema je razvijen kasnih šezdesetih godina od strane Robert Huberta, iz Švajcarske, a dalje tehnološki razvijen od strane Dr. Marco Ganser-a u Švajcarskom Federalnom institutu za tehnologiju u Cirihi. Javnost dugo nije znala da je osmišljen i proizveden prototip sistema ubrizgavanja koji skoro u potpunosti eliminiše emisiju štetnih gasova. Sistem prolazi kroz faze razvoja tako da je od početka primene krajem devedesetih godina stigao do četvrte generacije. Osnovna odlika ovog sistema je mogućnost variranja pritiska i vremena ubrizgavanja u širokom opsegu. Ovo je postignuto razdvajanjem pumpe visokog pritiska od ubrizgača i uključivanjem upravljačke jedinice za regulaciju trenutka i količine ubrizgavanja. Početkom 21-og veka ekspanzija common rail sistema ubrizgavanja bila je pogurana sve strožijim ekološkim kriterijumima pre svega sadržajem nedozvoljenih materija u izduvnim gasovima motora sa unutrašnjim sagorevanjem. S obzirom na način upravljanja jedan deo nedostataka nastalih habanjem može biti skriven korekcijama tokom ubrizgavanja tako da se razlikuje od starijih sistema dizel ubrizgavanja gde su se trenutno mogli primetiti nedostaci usled habanja. Tako i sam sistem poseduje povratnu spregu koja omogućava povećanje radnog veka komponenti sistema ubrizgavanja! Mašinski deo, element, sklop, mašina, habaju se tokom eksploatacije pa ni ovaj sistem sastavljen od više mašinskih sklopova nije imun na habanje. Ovde se odmah nameću pitanja: Da li se tolerancije pohabanih delova nalaze u granicama dozvoljenih tolerancija, i da li se reparaturom može produžiti radni vek? Tehno-ekonomska analiza [1] je pokazala opravdanost reparature [3]. Testiranje sistema ubrizgavanja goriva i dobijanje esencijalnih podataka koji nam ukazuju na stepen oštećenja i omogućavaju lako definisanje oštećenih segmenata su ključni podaci pri formiranju tehn-ekonomske analize. Treba napomenuti da u pojedinim slučajevima cena novog sistema ubrizgavanja iznosi 25% od vrednosti novog vozila! Daljim razvojem sistema ubrizgavanja prikazanim na slici 1. razvijala se i potreba za razvojem ispitne opreme koja je u daljem tekstu detaljnije pomenuta. Vreme ispitivanja kao važan parametar postaje sve važnije i ovaj rad će se baviti novim pristupom ispitivanja sistema ubrizgavanja sa osvrtom na smanjenje vremena ispitivanja ubrizgača kao osnovom svakog sistema ubrizgavanja.



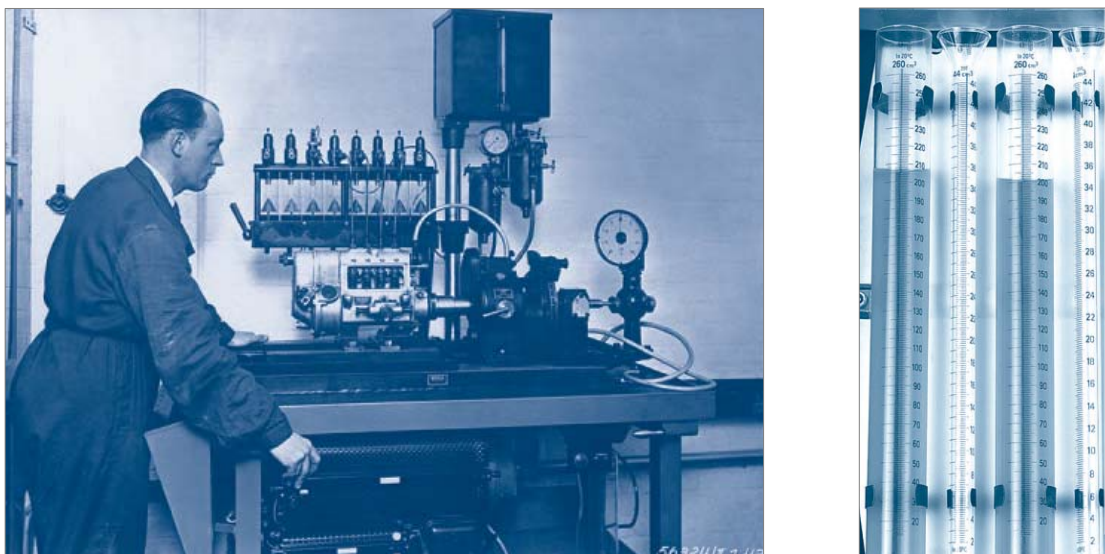
Slika 1. Komponente sistema ubrizgavanja goriva (common rail)

2.1 Razvoj common rail system-a ubrizgavanja goriva

Upotreba sistema omogućila je da potencijali elektronskog upravljanja dođu do punog izražaja, a dizeli su konačno prestali da budu smatrani grubim i nekultivisanim mašinama. Iako prvi prototip ovog sistema potiče iz 60-tih godina, tek su 90-te dovele do intenzivnog istraživačkog i razvojnog rada koji je vrlo brzo doveo do masovne proizvodnje i korišćenja ovog sistema. Led su 1997. godine probili Alfa Romeo 156 1.9 JTD i Mercedes E 320 CDI, a i ostali proizvođači su veoma brzo tržištu ponudili prednosti common rail-a. Njegovo glavni adut je “pametno” upravljanje sofisticiranim solenoidnim ili piezoelektričnim ubrizgačima, što omogućava optimizaciju procesa ubrizgavanja goriva koje se pod visokim pritiskom nalazi u akumulatorskoj magistrali (“rail” – odakle i potiče naziv ovog sistema). Razvoj sistema je stigao do četvrte generacije koja se od prethodnih prvenstveno razlikuje u brzini ubrizgavanja i omogućava više ubrizgavanja u radnom ciklusu motora pa trenutno osim glavnog imamo dva preubrizgavanja i jedno ubrizgavanje nakon glavnog ubrizgavanja. Osnovni cilj više ubrizgavanja je smanjenje emisije izduvnih gasova, veća efikasnost i smanjenje buke motora u radu.

3. RAZVOJ TEHNOLOGIJA ISPITIVANJA SISTEMA UBRIZGAVANJA GORIVA

Početak: ispitni sto MGT 812/824 Bosch



Slika 2. Ispitna oprema sa menzurama za testiranje sistema ubrizgavanja

3.1 MGT - merni sistem sa menzurama za konvencionalne dizel injektione pumpe do 12 cilindara

Sa mehaničkim merenjem količine goriva uz pomoć mernog uređaja MGT 824, a kasnije 2 x 12 menzura (od 44 ml i 260 ml) je moglo biti korišćeno za brzi test. Ispitni sto je zadovoljavao sve potrebe uz pomoć menzura koje su bile povezane držačima, a pražnjenje je bilo ručno. Za više cilindrične pumpe visokog pritiska, bilo je moguće zameniti menzure i povezati do 12 menzura, zapremine 155 ml i 600 ml. Nakon svakog ispitnog postupka, sve vrednosti su bile pojedinačno očitane sa menzura i upisane u odgovarajuću evidenciju.

3.2 Trenutno dostignuće: EPS 708 (Bosch)



Slika 3. Ispitna oprema sa elektronskim meračima protoka EPS 708

Pritisak ubrizgavanja na savremenim common rail dizel motorima se konstantno povećava u proteklih par godina. Pritisak od 2000 bara je trenutno normalan pritisak ubrizgavanja sa tendencijom rasta. Novi ispitni sto za testiranje common rail pumpi visokog pritiska i ubrizgača omogućava testiranja do 2200 bara. Rail, koji je u potpunosti novo razvijen, je projektovan za pritiske do 2500 bara.

Prednosti:

- precizno i komforno testiranje,
- elektronska kontrola merenja tokom testiranja common rail komponenti,

- elektronska kontrola dobavnog pritiska za pumpu i ulja za podmazivanje,
- jednostavna montaža pumpe visokog pritiska,
- integrisani rashladni sistem koji smanjuje potrošnju vode u radionici,
- trenutno zaustavljanje motora ukoliko je hauba otvorena,
- zaštita haube od zaostalih i zagubljenih delova,
- elektronsko posmatranje i prikazivanje servisnih intervala,
- sistem za samo-dijagnostiku registruje neophodne zamene filtera.

I pored svih gore pomenutih prednosti i dostignuća parametar vremena je postao još važniji jer da bi se sistem ispitao potrebni su sledeći uslovi:

- Temperatura ispitne tečnosti ispitnog stola mora biti konstantna,
- Temperatura na početku ispitivanja rezervoara sa ispitnom tečnošću uglavnom 80l zahteva, u zavisnosti od spoljne temperature, zagrevanje i do jedan čas,
- Posebno hlađenje ispitne tečnosti u letnjem periodu,
- Na svim zadatim programima ubrizgač ili pumpa visokog pritiska mora biti u predviđenim parametrima kako bi se ostvarila verifikacija ili se postupak ponavlja,
- Zahtevano vreme ispitivanja nekad prelazi jedan čas za četiri ubrizgača.

Sve nas navodi da pokušaji skraćivanja vremena ispitivanja imaju osnovu i postaju prostor za unapređenje u proizvodnji ispitne opreme za sve proizvođače. Jedan od njih je i "novi koncept ispitivanja sistema ubrizgavanja" koji je od strane Italijanske kompanije Massimo Derrosi u saradnji sa autorom ovog rada u završnoj fazi i treba da dobije šansu za kritiku na ovogodišnjem sajmu tehnike u Frankfurtu.

4. PREDLOG NOVOG KONCEPTA ISPITIVANJA SISTEMA UBRIZGAVANJA GORIVA

Novi koncept je sačinjen iz određivanja parametara u pet faza, koje za cilj imaju dobijanje rezultata u kratkom vremenskom intervalu, a da pri tome ne ugrožavaju kvalitet testa. Za razliku od dosadašnjeg dostignuća ovom sistemu nisu potrebne menzure niti merači protoka kao ni temperaturna stabilnost jer se svi podaci dobijaju iz nekoliko ubrizgavanja, a vreme ispitivanja je smanjeno sa časa na minute.

Parametri koji se ispituju su:

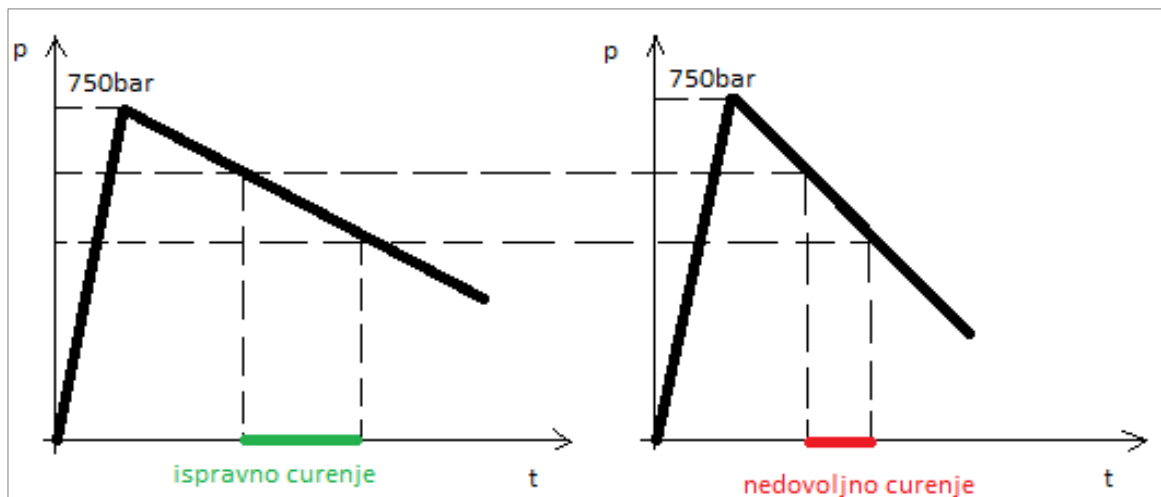
- parametar curenje,
- parametar minimalni pritisak otvaranja,
- parametar kašnjenje na otvaranju,
- parametar vreme ubrizgavanja,
- parametar protok.

4.1 Curenje

Kada je ubrizgač pod pritiskom od 750bar, Slika. 4, bara pumpa se zaustavlja i potom pritisak postepeno opada, što zavisi od pritiska u povratnom vodu. Kada je poznat opseg dozvoljenih vremena curenja, svaka vrednost van opsega pokazuje na povećano curenje.

Ubrizgač levo na Slici br. 4 ima prihvatljivu količinu na povratu; ubrizgač desno na slici br. 4 ima povećano unutrašnje curenje.

p-pritisak, t- vreme



Slika 4. Dijagram pada pritiska u ograničenom vremenskom intervalu

4.2 Minimalni pritisak otvaranja

Konstantno podizanje pritiska do trenutka otvaranja uz impuls od 2Hz definiše minimalni pritisak otvaranja.

4.3 Kašnjenje na otvaranju

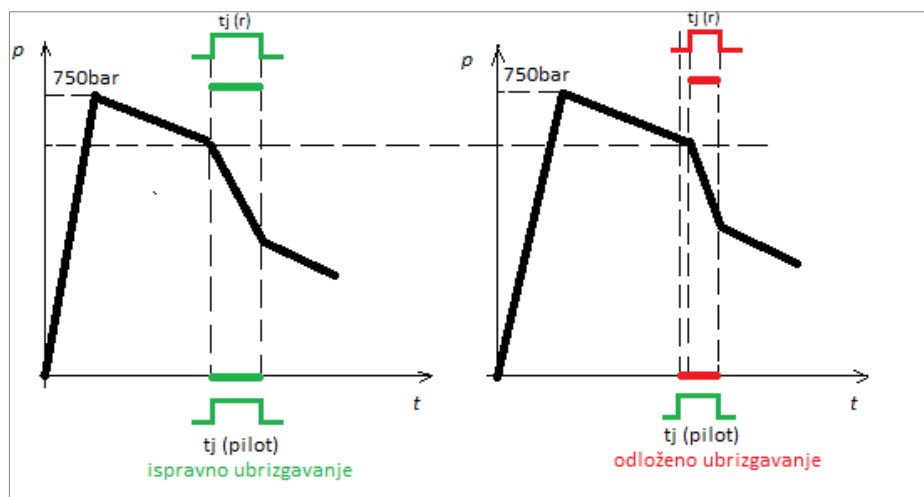
Kašnjenje na otvaranju je vreme koje je potrebno da se **električna komanda prevede u mehaničko kretanje** (Slika 5.).

4.4 Vreme ubrizgavanja

Vreme ubrizgavanja je vreme između otvaranja i zatvaranja uloška ubrizgača. Utvrđivanje vremena ubrizgavanja je neophodno za određivanje protoka.

Na slici 5. levo prikazan je ubrizgač koji raspršuje tačno na vreme, a na slici 5. desno ubrizgač koji odgovara sa kašnjenjem.

p-pritisak, t- vreme, tj- zadati impuls pilot ubrizgavanja.



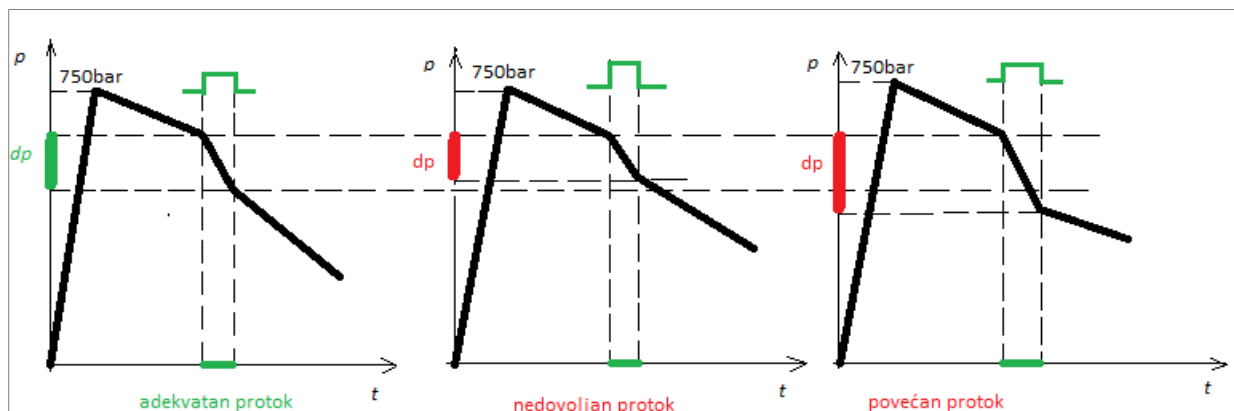
Slika 5. Dijagram vremena ubrizgavanja u odnosu na zadati impuls

4.5 Protok

Za svako ubrizgavanje, na konstantnom pritisku, se računa razlika između pritiska otvaranja i zatvaranja uloška ubrizgača.

Ovaj parametar, zajedno sa vremenom ubrizgavanja, određuje **količinu ubrizganog fluida**. Na slici 6. *levo*, prikazan je ubrizgač koji ubrizgava **tačnu količinu**. Ubrizgač na *centralnoj* slici 6. ima uložak ubrizgača sa **bar** jednim otvorom **smanjenog prečnika** od nečistoća ili oksida, dok su otvori na ulošku ubrizgača **desno** prošireni od habanja.

p-pritisk, t- vreme dp-pad pritiska



Slika 6. Dijagram protoka fluida pri ubrizgavanju u okviru zadatog impulsa

5. ZAKLJUČAK

Analiza je pokazala da se dosadašnjim postupkom ispitivanja sistema ubrizgavanja i pored svih dostignuća sa aspekta vremena, ekologije i efikasnosti nije puno odmaklo. Novi pristup omogućava da se, osim ekoloških i energetske prednosti, posebno izdvaja vremenski faktor koji je presudan za efikasnost. Rezultat novog sistema akvizicije i obrade podataka je u mogućnosti da se iz nekoliko ubrizgavanja dobiju potpuni podaci kao što su kašnjenje ubrizgača, količina ubrizganog goriva kao i vreme otvorenosti ubrizgača. Na ovaj način je postupak ispitivanja ubrzan, a vreme je postalo minoran faktor jer vreme ubrizgavanja iznosi približno jednu milisekundu tako da se vreme ispitivanja četiri ubrizgača sa jednočasovnog ispitivanja svelo na svega nekoliko minuta. Novi koncept omogućuje da se količina ispitne tečnosti smanji za devedeset procenata što navodi na zaključak da je ovaj način ispitivanja tokom eksploatacije isplativiji, a habanje ispitne opreme smanjeno. Treba napomenuti da u pojedinim slučajevima cena novog sistema ubrizgavanja iznosi 25% vrednosti vozila. Pri tome, opravdanost reparature, potvrđena decenijama iza nas, ima esencijalnu ulogu u poboljšanju efikasnosti sistema ubrizgavanja goriva.

6. LITERATURA

- [1] D. Janković, Metodologija povećanja radnog veka kontaktnim površinama ubrizgača goriva, Master rad, Beograd 2011.god.
- [2] Stručni Magazin "Fit for the future", AA / MKI 1 987 717 581 / 201009
- [3] Rene Wasserman, Kako se štede milioni reparaturnim zavarivanjem u mašinskom održavanju, Bor 2003.god., Castolin+Eutectic-Institut za unapređenje tehnike reparaturnog zavarivanja i tehnike zavarivanja u mašinskom održavanju

D. M. Jankovic

PROPOSAL OF A NEW CONCEPT TESTING OF FUEL INJECTION

Abstract:

The goal of each study is to acquire all of necessary data for an analysis, with as few samples as possible and in a shortest period of time. Development of the diesel engines injection systems did not fully trace development of testing equipment which left space for innovation. In this respect, the proposal of a new concept of testing for diesel engines injection systems finds its place in the market with its practical solution.

Keywords: Diesel engine, Line pump, Cummins, Common Rail, MGT 812/824, Bosch, EPS 708, New concept.



D. Drndarevic, M. Milivojevic, S. Petrovic, S. Panic ¹

MODELLING OF THE SPRING-BACK OF PM PARTS BY NEURAL NETWORKS

Abstract

Modelling of the spring-back of the parts within the process of the powder metallurgy production with cold compaction in the closed die is given. The operations of compaction and sizing are considered. The model is developed on the basis of significant process factors applying multilayer neural network architecture with backpropagation learning algorithm. The experimental data for learning and testing of the model are used from the manufacturing process. The results of the simulation in the form of the diagrams and tables are presented. Obtained model gives better results than the one of statistical procedure, i.e. less total mean approximation errors for 8.1%. Practical effects of the modelling are in determination of compaction and sizing tool dimensions in accordance with spring-back of the part after ejection.

1. INTRODUCTION

Rigorous demands for dimensions and shape tolerances of PM parts are presented, which can cause the problem in the tool design and manufacture, as well as application of additional or nonstandard processes. On the other side, each individual work process, beginning from powder preparation, compaction, sintering and additional operations, influences properties, dimensions and shape of finished parts. In compaction and sizing, an important element which has influence on parts accuracy, is a spring-back (elastic deformation) of parts after ejection. Dimensions, shape, material and density of the parts influence on spring-back besides the tool characteristics and the process regimes. An accurate description of a mechanism of spring-back has influence on compaction and sizing tool dimensions and on accuracy of the process as a whole.

Previous investigations of spring-back during compaction and sizing are mainly concerned with defining the mathematical models, with experimental verification of results [1,2]. Some of the author's modelling of spring-back of PM parts are given in [3,4]. In this paper the objective is modelling of spring-back during compaction and sizing. Modelling procedure, based on the application of artificial neural networks, is given.

Artificial neural networks, or simply neural networks (NNs), represent a parallel distributed connection of many simple elements (neurons) performing data processing [5]. The structure of artificial NNs is based on understanding the biological nervous systems. NNs have good characteristics in regard to fault tolerance and noise robustness, as well as to incomplete data. According to these characteristics NNs are very powerful method for modelling and optimization in different kind of processes with large number of influential factors and where effect of these factors on final process characteristics is complex with high nonlinearity.

2. EXPERIMENTAL DATA

The model is formed for the particular kind of sintered parts - self-lubricating bearings whose shapes, dimensions and tolerances are defined by the standard of ISO 2795. The bronze P4013Z is used for the material of bearings. Necessary data for this material (chemical composition, mechanical and physical attributes, etc.) are quoted in ISO 5755/1 Standard.

Dragoljub Drndarevic, Milovan Milivojevic, Slobodan Petrovic, Stjepan Panic, High Business-Technical School, Sv. Save 34, 31000 Uzice, Serbia, Tel: 031 512013, E-mail: skola@vpts.edu.rs

In Table 1. [6], the measured and calculated values needed for the model forming, with used designations, interval change and measurement accuracy, are given. The processing of measured values is performed statistically, calculating the mean value and standard deviation for each series with assumed normal distribution.

Table 1 - Input data

	Pressing	Sintering	Sizing	Interval	Measurement accuracy
Bearing inner diameter	d_p	d_s	d_c	3-60mm	0.001
Core rod diameter	d_{tp}	-	d_{tc}	3-60mm	0.001
Bearing outer diameter	D_p	D_s	D_c	5.5-70mm	0.001
Die diameter	D_{tp}	-	D_{tc}	5.5-70mm	0.001
Bearing height	h_p	h_s	h_c	6-50mm	0.01
Bearing mass	G_p	G_s	-	0.68-344g	0.001(<5g),0.01(>5g)
Density	$\gamma_p=G_p/V_p$	$\gamma_s=G_s/V_s$	$\gamma_c=G_s/V_c$		
Inner diameter allowance			$C_d=d_{tc} - d_s$		
Outer diameter allowance			$C_D=D_{tc} - D_s$		
Height allowance			$C_h=h_c - h_s$		

3. MODEL

The process is observed inversely. Dimensions and density of a part after the given operation are taken as input factors, and output characteristics are dimensions of the tool. The model architecture with selected input factors and requested output characteristics is given in Fig. 1.

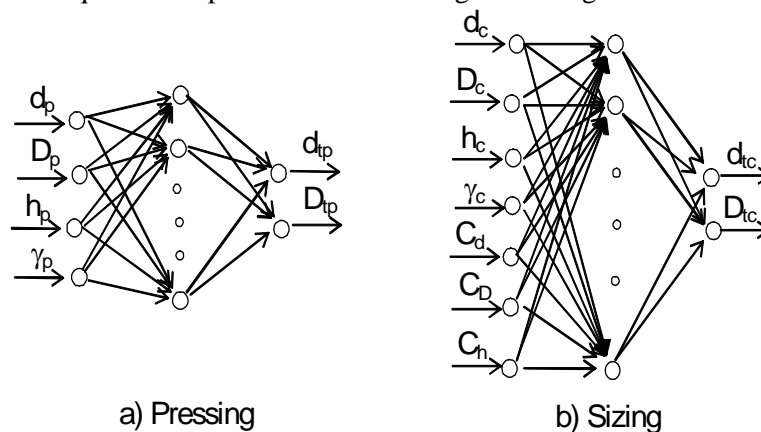


Fig. 1 - The architecture of spring-back model

The standard backpropagation algorithm [7] with correction of weights after every iteration and with the moment term is applied, based on a formed program for simulation. Within the simulation program, the preparation of inputs, i.e. experimental data, is performed. The order of input data is randomized, after which the total set of input data is divided into learning data and testing data, assigning approximately one fourth out of the total input data for testing. Output data are shown in the form of parameters (as the difference of values between tool dimensions and part dimensions, obtained from a given operation) which provided less error value than when directly applying nominal output values. The normalization of input data is performed in the form of linear transformation in the interval (0-1) of the input set and the desired output set. The model accuracy criterion is expressed in the form of learning and testing errors, representing the mean value of absolute deviations of model outputs from the desired ones, i.e. experimental values of outputs for a corresponding set of input data.

During the model forming, the optimization is performed with the aim to determine the model parameter values in order to obtain minimal testing error at minimal learning cycles number at a stable learning process. The optimization is performed by searching the parameter intervals. It is clear that the values of the parameters, obtained for one data set, do not have to give minimal error at testing with another data set. Optimal parameter values are obtained: learning term 0.9, momentum term 0.4, interval of initial values of weights (randomly distributed) ± 0.3 for both pressing and sizing model, number of processing elements in the hidden layer 10 (pressing model) and 4 (sizing model).

4. RESULTS

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

$$X_{dp} = \frac{d_{ip} - d_p}{d_p}; X_{Dp} = \frac{D_{ip} - D_p}{D_p}; X_{dc} = \frac{d_{ic} - d_c}{d_c}; X_{Dc} = \frac{D_{ic} - D_c}{D_c}; \quad (1)$$

In Fig. 2, the spring-back coefficients are shown. For the compaction, the relative spring-back of the inner diameter X_{dp} for the bearings with $d_p = 3-60\text{mm}$ is shown in Fig. 2a. Next to the real curve, its polynomial approximation is given. It is observed that the absolute value of the coefficient X_{dp} decreases with diameter increasing. The coefficient of the outer diameter X_{Dp} slowly increases with increasing D_p (Fig. 2b). For the sizing, the coefficient X_{dc} has the values near zero for small and large diameters, and slightly bigger at the middle of the interval (Fig. 2c), while X_{Dc} behaves similarly X_{Dp} (Fig. 2d).

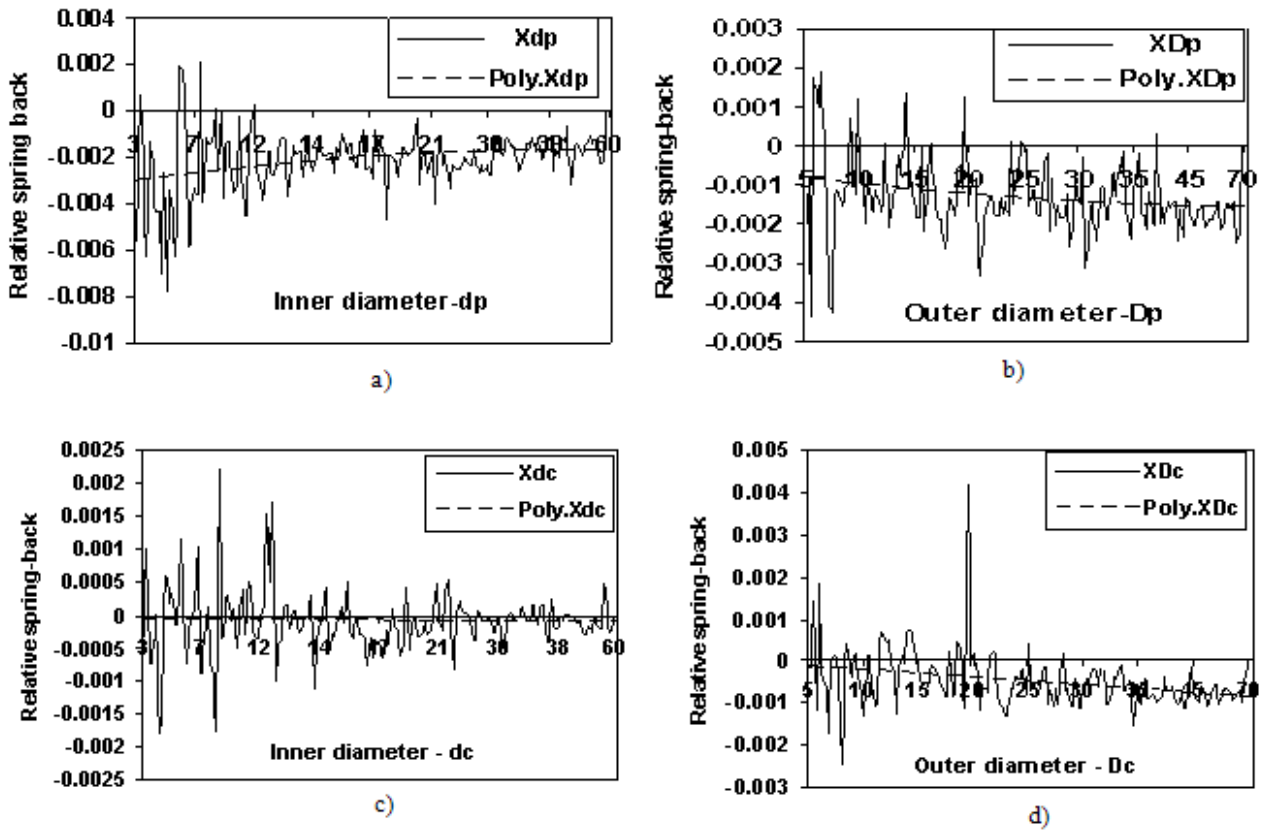


Fig. 2. The spring-back coefficients for compaction (a, b) and sizing (c, d)

The mean values of the spring-back coefficients are given in Table 2, where the sign gives direction of the change in relation to the supposed direction in the equation (1).

Table 2 - Mean values of the spring-back coefficients

X_{dp}	X_{Dp}	X_{dc}	X_{Dc}
$-2.159 \cdot 10^{-3}$	$-1.320 \cdot 10^{-3}$	$-9.744 \cdot 10^{-5}$	$-4.771 \cdot 10^{-4}$

The results of the model simulation in the form of the output errors are given in Fig. 3. The errors represent mean values of the absolute deviations of the model outputs in relation to the desired ones, i. e.

experimental values of the outputs. The diagrams in Fig. 3 display the change of learning and testing errors per dimensions for 3000 cycles of training, since the convergence is very slow during the increase of the number of cycles. The learning and testing errors, after a very fast decrease in the first few cycles (which is a usual phenomenon) and variation in the subsequent phase, enter the area of convergence. It is observed that obtained accuracy of the sizing tool dimensions (d_{tc} , D_{tc}) is higher than the accuracy of compaction tool dimensions (d_{tp} , D_{tp}), which corresponds to the process requirements. The errors of the outer diameters D_{tp} and D_{tc} are bigger than corresponding errors of the inner diameters d_{tp} and d_{tc} , except for the testing error for D_{tp} at the part of the interval. The testing errors for D_{tp} , d_{tc} and D_{tc} , after reaching global minimum, increase slowly with the increase of the cycles number due to "overtraining" effect.

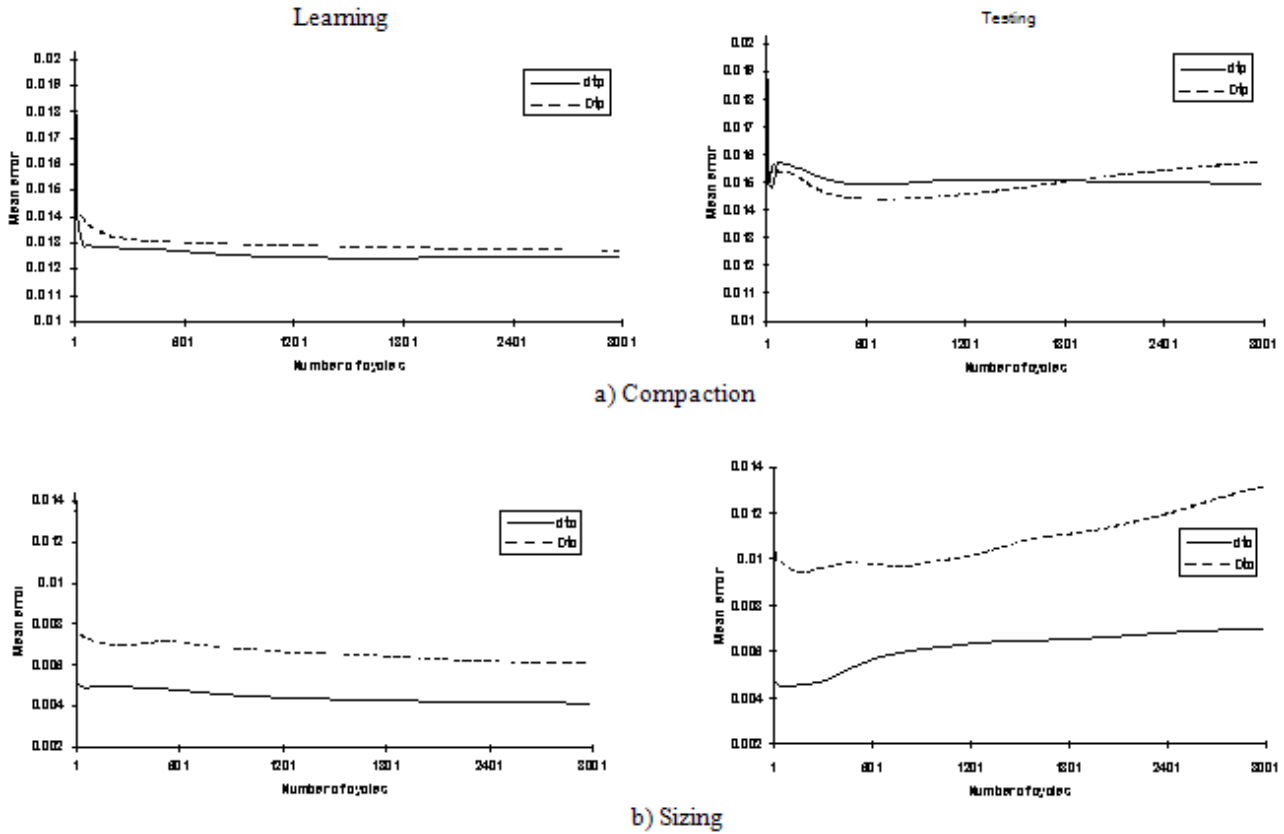


Fig. 3. The learning and testing errors of the spring-back model

The more detailed information of possible approximation with the model based on NN is shown in Table 3. For the purpose of comparison, network output values obtained from testing corresponding data set and the experimental output values from the same set, are given.

Table 3 - Model testing outputs and experimental outputs

k	Model outputs				Desired (exp.) outputs			
	d_{tp}	D_{tp}	d_{tc}	D_{tc}	d_{tp}	D_{tp}	d_{tc}	D_{tc}
1	7.015	9.048	7.021	9.016	7.010	9.048	7.017	9.010
2	30.032	35.112	30.032	35.003	30.019	35.081	30.028	35.034
3	11.608	14.110	11.598	14.086	11.578	14.110	11.594	14.095
.....								
38	19.975	30.049	20.014	30.012	20.000	30.056	20.018	30.004
39	60.060	70.051	60.039	70.026	59.996	69.995	60.033	70.010

5. COMPARISON WITH STATISTICAL PROCEDURE

The results of model simulation, given in this paper, are compared with the standard procedure based on statistical processing of experimental data. This procedure is carried out by backward movement, starting from the finished part dimensions to compaction, taking into consideration dimensional changes in sintering.

The spring-back coefficients, based on learning data set using NN, are determined. Tool dimensions are determined for testing data set using obtained coefficients. The same form of the mean error as the one of the NN is used for comparison.

The comparison results are given in Table 4. The results show that model based on NN gives lower mean error of every output, except for d_{tp} and lower total mean error for 8.1% than the one obtained by statistical procedure. This is achieved by including a greater number of significant factors and their interdependence, as well as by having more common functional forms and iterative approach to solution.

Table 4 - The mean errors of the prediction for statistical procedure and for NN model

Model	d_{tp}	D_{tp}	d_{tc}	D_{tc}	Σ
By statistical procedure	0.01389	0.01636	0.00458	0.01185	0.04668
By NN	0.01491	0.01435	0.00456	0.00936	0.04318

6. CONCLUSIONS

A modelling procedure of spring-back of the part after ejection during compaction and sizing are presented, with modelling results. For modelling multilayer neural network with backpropagation learning algorithm is used. The learning and testing procedures are realized on the basis of the experimental data, taken from the manufacture process.

The simulation results showed that the obtained model provided less approximation error than the one obtained by statistical procedure, mostly used in practice.

The advantages of modelling methods using NNs in comparison with statistical procedure and other applicable methods (regressive analysis, cubic spline) are in including the greater number of factors and their interactivity, simultaneous obtaining of greater number of outputs, more common functional forms and iterative approach to solution.

A practical application of presented procedure is in determination of the dimensions of compaction and sizing tool for the required dimensions of the part for a given material and corresponding regimes of the process.

It is possible to use the same procedure for modelling other characteristics of the powder metallurgy parts.

REFERENCES

- [1] Frachon A., Imbault D., Riera M.D., Prado J.M., Modelling of the spring-back of green compact, *Euro PM2001*, Vol. 3, Nice, Oct. 2001. (22-28)
- [2] Collomb M., Eudier M., Behaviour of sintered parts during sizing operation, *Proc. of Int. PM Conf.*, Düsseldorf, 1986. (1297-1300)
- [3] Drndarevic D., Reljin B., Accuracy modelling of powder metallurgy process using backpropagation neural networks, *Powder Metallurgy*, Vol. 43, no. 1, pp. 25-29, 2000.
- [4] Drndarevic D., Modelling of the spring-back of PM parts during sizing, *III Int. Conf. on Powder Metallurgy RoPM 2005*, Sinaia, July 2005, Vol. 2. (549-554)
- [5] Haykin S., *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*, Macmillan Publishing Co., New Jersey, 1994.
- [6] Company Standards of "Sinter", Uzice
- [7] Rumelhart D. E., Hinton G.E., Williams R.J., Learning representation by back-propagating errors, *Nature*, Vol. 323, 1986 (533-536)

Goran Pavlović¹, Mile Savković², Milomir Gašić², Radovan Bulatović²

PRIMENA METODE KRUTIH TELA ZA DISKETIZACIJU NOSEĆIH STRUKTURA PRI DINAMIČKOJ ANALIZI NA PRIMERU KONZOLNE DIZALICE

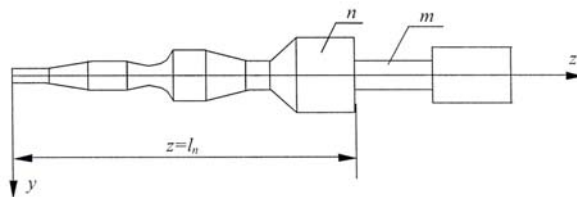
Rezime:

U radu je prikazan postupak dinamičke analize konzolne dizalice korišćenjem metode krutog tela pri čemu je izvršena diskretizacija strukture konzolne dizalice sa tri elementa. Rezultati dobijeni metodom krutih tela poređeni su sa rezultatima dobijenim primenom metode konačnog elementa i klasičnog metoda oscilovanja nosača. Određeni su frekventni spektar i modovi oscilovanja dizalice za sve metode. Pokazano je da se jednostavnim postupkom diskretizacije sa minimalnim brojem elemenata može doći do rezultata koji su značajni za projektante. Sve tri metode su dale približne vrednosti prve tri ugaone učestanosti, koje su od značaja u procesu projektovanja nosećih konstrukcija.

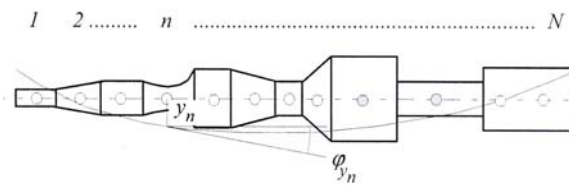
Ključne reči: Diskretizacija, metod krutog tela, frekventni spektar, modovi oscilovanja, konzolna dizalica

1. UVODNA RAZMATRANJA

Prilikom rešavanja problema dinamike mašinskih sistema klasičnim metodama, mogu se javiti mnogobrojni problemi. U inženjerskom projektovanju, svi elementi kao što su: vratila, grede i nosači, imaju različite poprečne preseke u podužnom pravcu (slika 1) i mogu biti podeljeni na odgovarajući broj delova.



Slika 1



Slika 2

Odatle sledi da jednačina kretanja za svaki deo povezuje posmatrani mašinski element preko uslova neprekidnosti. U slučaju grede, jednačina kretanja delova n i m , mogu biti opisane pomoću diferencijalnih jednačina oblika [1], [2]:

$$\frac{\partial^2 y_n(z,t)}{\partial t^2} - \lambda_n^2 \frac{\partial^4 y_n(z,t)}{\partial z^4} = q_n(z,t),$$

$$\frac{\partial^2 y_m(z,t)}{\partial t^2} - \lambda_m^2 \frac{\partial^4 y_m(z,t)}{\partial z^4} = q_m(z,t),$$
(1)

Svaka od ovih jednačina može biti rešena korišćenjem sledećih uslova neprekidnosti:

$$y_n(z,t)|_{z=l_n} = y_m(z,t)|_{z=l_m} \quad \text{i} \quad \frac{\partial y_n(z,t)}{\partial z}|_{z=l_n} = \frac{\partial y_m(z,t)}{\partial z}|_{z=l_m}.$$

U inženjerskim problemima broj ovih uslova je veliki i rešenje dinamičkih jednačina je otežano, a često je vrlo teško doći do njega. Zbog toga se kontinualni sistemi koji se sreću u inženjerskim problemima, često aproksimiraju sistemima sa određenim brojem stepeni slobode. Sam proces određivanja matrice inercije i matrice krutosti zove se diskretizacija.

Današnji softverski paketi dopuštaju računanje matrica krutosti i matrica inercije u prostoru slobodne grede duž koordinata y_n , φ_{y_n} (slika 2) koje su međusobno povezane na osnovu izabranog broja tačaka N . Ove

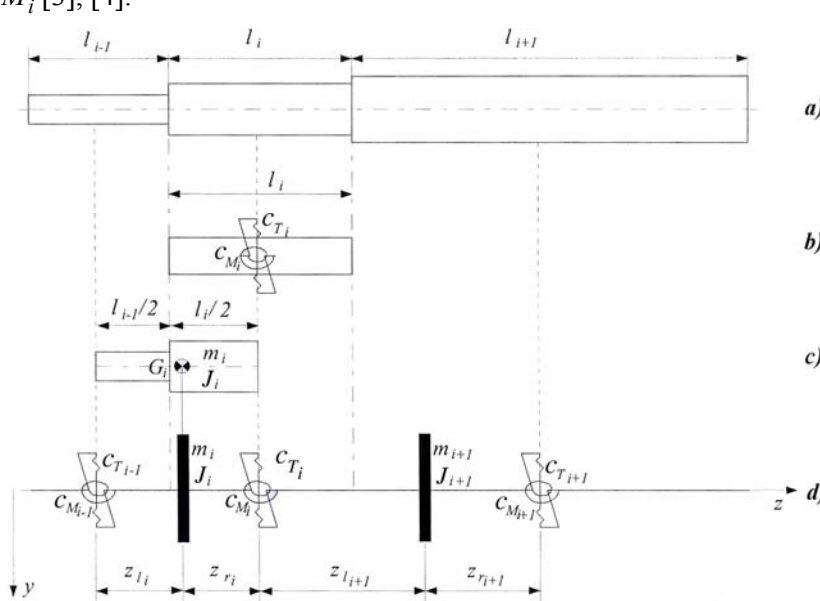
¹ Knećinje Milice 26/27, 37240 Trstenik,

² Mašinski fakultet Kraljevo, Dositejeva 19, 36000 Kraljevo,
Adresa za korespondenciju: savkovic.m@mfv.kg.ac.rs

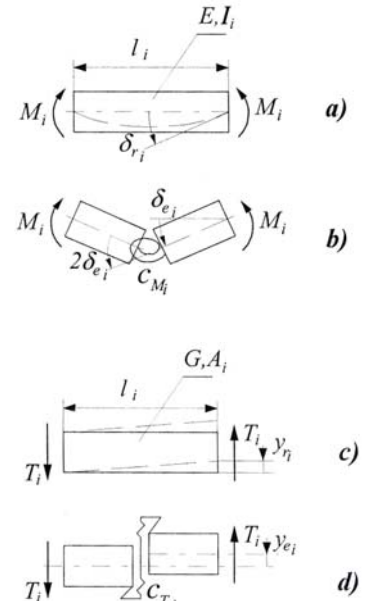
istaknute tačke se zovu čvorovi. Najpoznatiji pristupi za kreiranje matrica krutosti i matrica inercije su metoda krutog elementa i metoda konačnog elementa.

2. PRIMENA METODE KRUTOG TELA

Po ovoj metodi nosač se deli na dovoljan broj segmenata i konstantnog poprečnog preseka, koji daje neophodnu tačnost (slika 3.a). Karakteristike savijanja i smicanja svakog segmenta su prikazane pomoću dve opruge krutosti c_{M_i} i c_{T_i} respektivno (slika 3.b). Ekvivalentno za oba, aktuelni segment (slika 4.a) i njegov model (slika 4.b) zahtevaju jednakost ugla pomeranja ($\delta_{r_i} = \delta_{e_i}$) uzrokovanog istim momentom savijanja M_i [3], [4].



Slika 3



Slika 4

Za $\delta_{r_i} = \frac{M_i l_i}{2EI_i}$ i $\delta_{e_i} = \frac{M_i}{2c_{M_i}}$ sledi da je savojna krutost $c_{M_i} = \frac{EI_i}{l_i}$. Krutost na smicanje iznosi $c_{T_i} = \frac{GA_i}{l_i}$.

Desni deo segmenta l_{i-1} i levi deo sledećeg segmenta l_i čine sekciju (slika 3.c). Svaka sekcija smatra se krutom čije su masene karakteristike m_i i J_i . Na ovaj način dobija se fizički model (slika 3.d) na koji se primenjuju Lagranževe jednačine [5], [6], pri čemu se dobija sledeća jednačina kretanja:

$$M \frac{d^2 Y}{dt^2} + CY = 0, \quad (2)$$

gde su:

$$M = \begin{pmatrix} M_{1,1} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & M_{i-1,i-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & M_{i,i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & M_{i+1,i+1} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & M_{N,N} \end{pmatrix} - \text{matrica inercije}, \quad (3)$$

$$M_{i,i} = \begin{pmatrix} m_i & 0 \\ 0 & J_i \end{pmatrix} - \text{elementi matrice inercije},$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{1,1} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & C_{i-1,i-1} & C_{i-1,i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & C_{i,i-1} & C_{i,i} & C_{i,i+1} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & C_{i+1,i} & C_{i+1,i+1} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & C_{N,N} \end{pmatrix} - \text{matrica krutosti}, \quad (4)$$

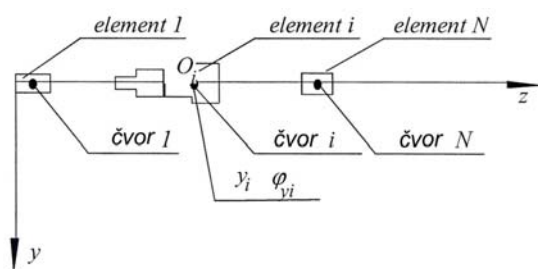
$$C_{i,i-1} = \begin{pmatrix} -c_{T_{i-1}} & c_{T_{i-1}} z_{r_{i-1}} \\ -c_{T_{i-1}} z_{l_i} & -c_{M_{i-1}} + c_{T_{i-1}} z_{r_{i-1}} z_{l_i} \end{pmatrix}, \quad C_{i,i} = \begin{pmatrix} c_{T_{i-1}} + c_{T_i} & c_{T_{i-1}} z_{l_i} - c_{T_i} z_{r_i} \\ c_{T_{i-1}} z_{l_i} - c_{T_i} z_{r_i} & c_{M_{i-1}} + c_{M_i} + c_{T_{i-1}} z_{l_i}^2 + c_{T_i} z_{r_i}^2 \end{pmatrix},$$

$$C_{i,i+1} = \begin{pmatrix} -c_{T_i} & -c_{T_i} z_{l_{i+1}} \\ c_{T_i} z_{r_i} & -c_{M_i} + c_{T_i} z_{l_{i+1}} z_{r_i} \end{pmatrix} - \text{elementi matrice krutosti},$$

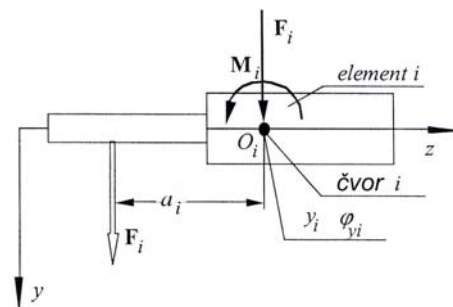
$$Y = (Y_1 \quad \dots \quad Y_i \quad \dots \quad Y_N)^T - \text{vektor koordinata}, \quad Y_i = \begin{pmatrix} y_i \\ \varphi_{y_i} \end{pmatrix} - \text{elementi vektora pomeranja}.$$

Matrica C je kvadratna, simetrična i pojasna matrica, dok je matrica M dijagonalna matrica.

Geometrijska interpretacija vektora koordinata Y_i prikazana je na slici 5. Ovi vektori koordinata su povezani čvorovima koji se nalaze u centru masa krutih elemenata.



Slika 5



Slika 6

Ako više sila deluje na kruti element, svaka od njih može biti ekvivalentno zamenjena silom F_i koja se nalazi u čvoru O_i i momentom $M_i = F_i \cdot a_i$ kao na slici 6. U opštem slučaju ove sile mogu biti nezavisne ili zavisne od vremena. Uvođenjem oznaka F_S za statičke sile i $F(t)$ za pobudne sile, dobija se sledeća jednačina kretanja [3], [4]:

$$M \frac{d^2 Y}{dt^2} + CY = F_S + F(t). \quad (5)$$

Pored ovih metoda može se koristiti i klasična metoda poznata u teoriji oscilacija ili metod konačnih elemenata. Ako se koriste klasične dinamičke jednašine umesto matrice krutosti koristimo tzv. matricu uticajnih koeficijenata Λ .

$$[A] \frac{d^2 \{y(t)\}}{dt^2} + [C] \{y(t)\} = \{0\}, \quad (6)$$

$$[C] = [\Lambda]^{-1}.$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \dots & \alpha_{nn} \end{pmatrix} - \text{matrica uticajnih koeficijenata}. \quad (7)$$

Rešenje diferencijalnih jednačina malih oscilacija pretpostavlja se u obliku:

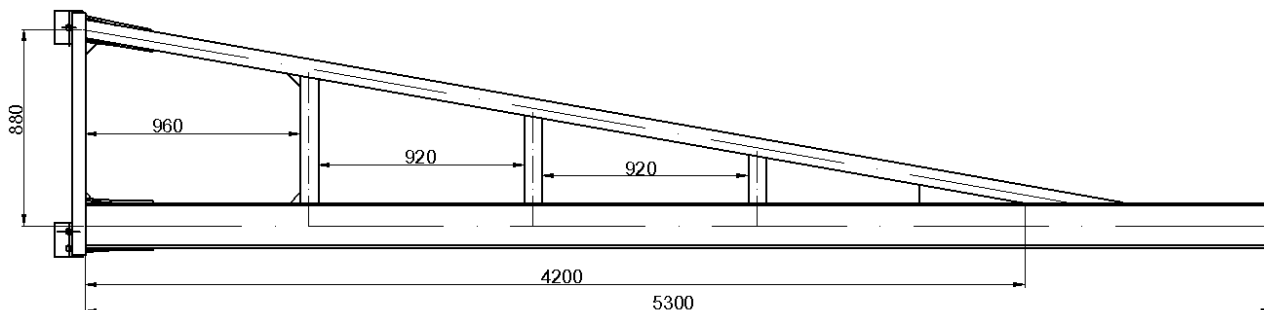
$$y = u \cdot \cos(\omega t - \alpha).$$

Razvijanjem determinante dobija se karakteristična jednačina na osnovu koje se dobijaju sopstvene vrednosti koje su u ovom slučaju kružne frekvencije [7].

3. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA NA PRIMERU NOSEĆE KONSTRUKCIJE KONZOLNE DIZALICE

3.1 Metoda krutih tela

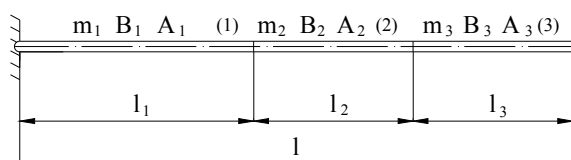
Na slici 7 prikazana je konzola konzolne dizalice nosivosti $Q=500 \text{ kg}$ i dohvata $L=5,2 \text{ m}$, sa odgovarajućim dimenzijama.



Slika 7

Pri rešavanju problema, u obzir nije uzeto prigušenje. Prilikom merenja ugiba vrha strele opterećenog ispitnim teretom njegova izmerena vrednost iznosi $f=18 \text{ mm}$.

Pri određivanju sopstvenih vrednosti i sopstvenih vektora, korišćen je matematički softverski paket *Mathcad*.



Slika 8

$m_1 = 80 \text{ kg}$, $m_2 = m_3 = 55 \text{ kg}$, (ukupna masa $m = 190 \text{ kg}$);

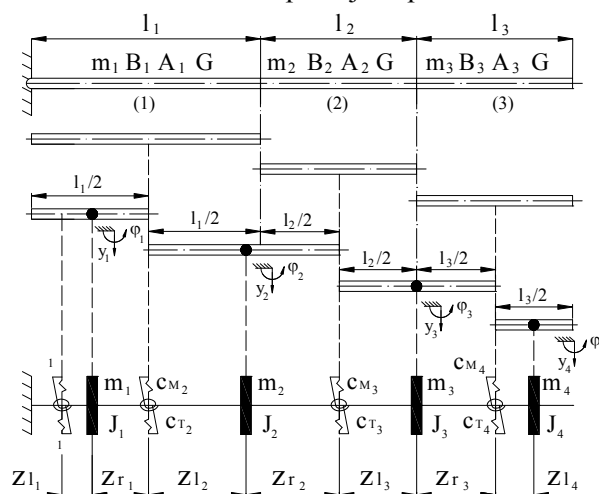
$l_1 = \frac{11}{26}l = 220 \text{ cm}$, $l_2 = l_3 = \frac{15}{52}l = 150 \text{ cm}$, (ukupna dužina $l = 520 \text{ cm}$);

$I_1 = 3I$, $I_2 = 2I$, $I_3 = I$, $I = 2140 \text{ cm}^4$.

$B_1 = 3B$, $B_2 = 2B$, $B_3 = B$, $B = IE$, $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$.

$A_1 = 3A$, $A_2 = 2A$, $A_3 = A$, $A = 33,5 \text{ cm}^2$.

Na slici 9 prikazan je model konzole od tri elementa podeljene prema metodi krutog tela na potrebne delove.



Slika 9

Potrebne veličine neophodne za primenu metode krutih tela glase:

$m_1 = 4/19m = 40 \text{ kg}$, $m_2 = 27/76m = 67,5 \text{ kg}$, $m_3 = 11/38m = 55 \text{ kg}$, $m_4 = 11/76m = 27,5 \text{ kg}$.

$J_1 = 9,34837 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_2 = 28,4017 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_3 = 15,3655 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_4 = 1,10621 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

$$a_1 = \frac{l_1}{4}, a_2 = \frac{3l_1}{4}, a_3 = l_2, a_4 = \frac{3l_3}{4}; c_{M1} = \frac{B_1}{a_1}, c_{M2} = \frac{B_1}{a_2}, c_{M3} = \frac{B_2}{a_3}, c_{M4} = \frac{B_3}{a_4}.$$

$$c_{T1} = \frac{GA_1}{a_1}, c_{T2} = \frac{GA_1}{a_2}, c_{T3} = \frac{GA_2}{a_3}, c_{T4} = \frac{GA_3}{a_4}, G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \nu = 0,3.$$

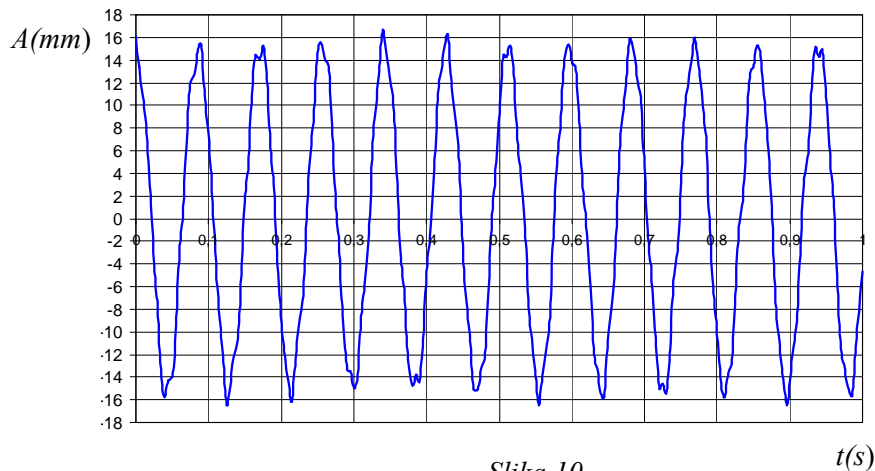
$$z_{h1} = \frac{l_1}{8}, z_{h2} = \frac{l_1}{2} - \Delta l, z_{h3} = \frac{l_2}{2}, z_{h4} = \frac{l_3}{4}. z_{d1} = \frac{l_1}{4}, z_{d2} = \frac{l_2}{2} + \Delta l, z_{d3} = \frac{l_3}{2}.$$

Navedenim postupkom određuju se kružne frekvencije i modove:

$$\omega = \begin{pmatrix} 73,6254 \\ 425,4246 \\ 1218,674 \\ 1529,639 \\ 5728,546 \\ 6731,166 \\ 7422,370 \\ 7660,629 \end{pmatrix} [s^{-1}], S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -3,5758 & -3,4168 & -3,3060 & -3,2952 & -7,6297 & 3,7619 & 0,0473 & -0,3717 \\ 13,9660 & 7,1697 & 1,1778 & -0,1760 & -4,4162 & 0,2172 & -0,3089 & -0,1747 \\ -11,8140 & -4,4495 & 1,9338 & 3,3226 & 3,9379 & 1,2228 & -0,1699 & -0,7542 \\ 36,9331 & 3,9543 & -0,9785 & 1,7290 & 4,4712 & 0,3032 & -0,5019 & -0,0126 \\ -16,0101 & 9,7428 & 0,3344 & -6,3611 & 8,6156 & 0,3245 & 2,0929 & -0,5086 \\ 55,2783 & -9,0572 & 0,8948 & -2,3284 & -1,3530 & -0,1842 & 1,2943 & -0,1796 \\ -16,8089 & 14,7119 & -5,2592 & 21,8810 & -15,2378 & -1,8938 & 12,7660 & -1,7503 \end{pmatrix}.$$

Početni uslovi određuju se istovetno za sve navedene postupke.

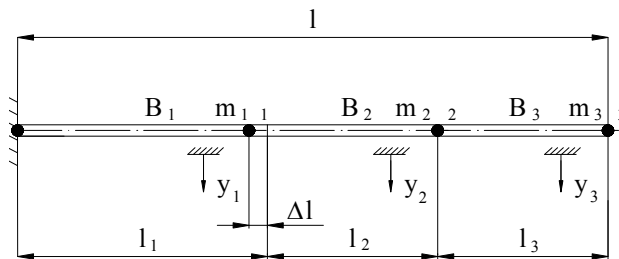
Na slici 10 prikazano je oscilovanje vrha dizalice u trenutku puštanja tereta u intervalu 1 s.



Slika 10

3.2 Klasičan metod dinamike i metod konačnih elemenata

Ovaj rezulta može se uporediti sa rezultatima dobijenim primenom klasičnih jednačina dinamike oscilovanja (slika 11). Za poznate vrednosti: $m_1 = 27/76m = 67,5 \text{ kg}$, $m_2 = 11/38m = 55 \text{ kg}$, $m_3 = 11/76m = 27,5 \text{ kg}$, $\Delta l = 187/5616l$.



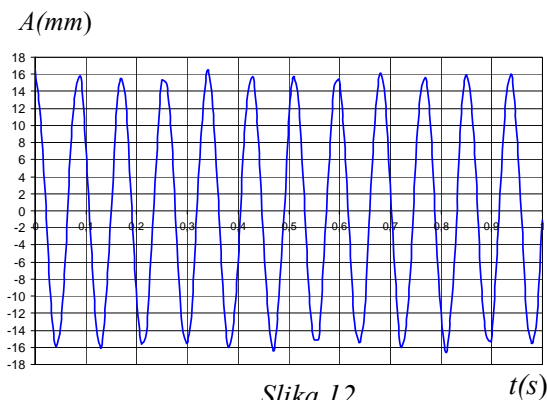
Slika 11

Kružne frekvencije i modovi imaju sledeće vrednosti:

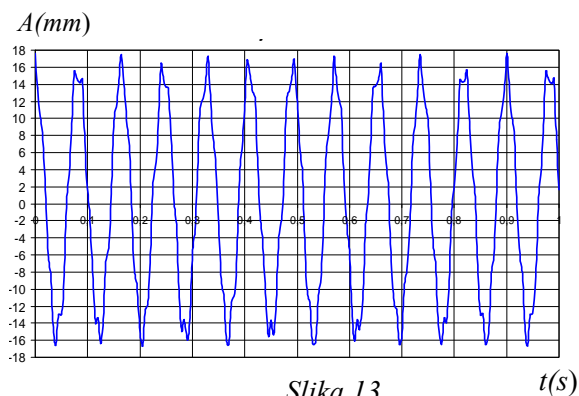
$$\omega = \begin{pmatrix} 5,6856 \\ 27,2241 \\ 65,7519 \end{pmatrix} \cdot \sqrt{\frac{B}{ml^3}} = \begin{pmatrix} 73,7415 \\ 353,0918 \\ 852,7915 \end{pmatrix} [s^{-1}], S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2,9040 & 0,8862 & -0,9128 \\ 5,0857 & -1,4947 & 0,5598 \end{pmatrix}.$$

Na slici 12 prikazano je oscilovanje vrha dizalice u trenutku puštanja tereta u intervalu od 1 s.

Za razliku od predhodnog metoda, kod metoda konačnog elementa i metoda krutog tela, pored linijskog pomeranja tačaka, uzimaju se i ugaona pomeranja tačaka. Na slici 13 prikazano je oscilovanje vrha dizalice u trenutku puštanja tereta u intervalu 1 s dobijeno metodom konačnih elemenata.



Slika 12



Slika 13

4. ZAKLJUČAK

Analiza rezultata dobijenih primenom metode krutih tela pokazala je da se ova metoda može uspešno primeniti za dinamičnu analizu nosećih konstrukcija. Komparativna analiza oscilovanja vrha dizalice u trenutku puštanja tereta, sa metodom konačnih elemenata i klasičnom dinamičkom analizom konstrukcija pokazuje visoku podudarnost dobijenih rezultata a samim time i metode krutih tela.

Amplituda oscilovanja se u dobroj meri poklapa kod sve tri metode, kao i sa stvarnom izmerenom vrednošću. Primećuju su odstupanja u vrednostima frekventnog spektra kod ove tri metode, što se može opravdati time da su kod ovih metoda, iako su uzeta tri elementa, imamo različite brojeve stepeni slobode. Kod metode uticajnih koeficijena imamo najmanju tačnost jer ona samo uzima u obzir uzdužna pomeranja za razliku od druge dve metode koje uzimaju i ugaona pomeranja.

Ono što se može videti da sve tri metode imaju približne vrednosti prve tri ugaone učestanosti (naročito metoda konačnog elementa i metoda krutog tela), čime se opravdava usvojeni fizički model dizalice.

Acknowledgment

A part of this work is a contribution to the Ministry of Science and Technological Development of Serbia funded Project TR35038

5. LITERATURA

- [1] Rašković D.: TEORIJA OSCILACIJA, Naučna knjiga, Beograd 1965.
- [2] Rašković D.: MEHANIKA III DINAMIKA, Naučna knjiga, Beograd 1962.
- [3] David M. Trujillo: A Finite Element for Three Dimensional Rigid Body Dynamics, TRUCOMP Fountain Valley, CA 2009.
- [4] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor. The Finite Element Method Vol. 1 Basic Formulation and Linear Problems, McGraw-Hill Book Company, London, 4th edition, 1989.
- [5] Gašić M., Savković M., Bulatović R., Petrović R., Optimization of a pentagonal cross section of the truck crane boom using Lagrange's multipliers and differential evolution algorithm, *Meccanica*, Vol.46, No 4, pp. 845-853, ISSN 1572-9648.
- [6] Gašić M, Savković M, Bulatović R . Optimization of trapezoidal cross section of the truck crane boom by Lagrange's multipliers and by differential evolution algorithm (de). *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 57(2011)4:304-312.
- [7] Savković, M., Gašić, M., Zdravković, N., Marković, G. Special Design Of Freight Elevator With Diagonal Guiding And Instantaneous Type Eccentric Safety Gear, The Seventh International Conference Heavy Machinery HM2011, ISBN 978-82631-58-3, p.p. 111: 116, Kraljevo-Vrnjačka Banja, 2011.

Summary:

The paper shows the procedure of cantilever crane dynamic analysis by using the rigid body method, whereby the structure discretization with three elements was carried out. The rigid body method results are compared with the finite element method results and results obtained through classical approach in structure oscillation. The frequency range and oscillation modes of the crane were obtained by all methods mentioned. It is shown that the significant results for designers can be achieved by a simple discretization procedure with minimum number of elements. All three methods gave approximately the same values for the first three angular frequencies, which are of most importance for carrying structures design process.

Key words: discretization, rigid body method, frequency range, oscillation modes, cantilever crane

B. Nedić¹, G. Lakić Globočki²**HABANJA ALATA I OBRADIVOST TEŠKO OBRADIVIH MATERIJALA***Rezime:*

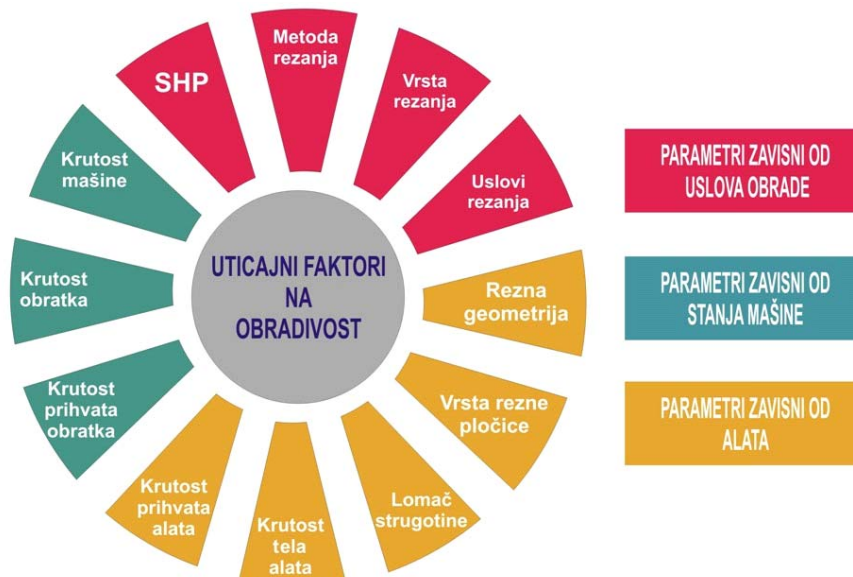
Intenzivni razvoj industrije u zadnjih decenija stavlja poseban akcenat na razvoj novih, superiornijih materijala, kao i poboljšanje postojećih. Poboljšana i nova svojstva najčešće dovode do snižavanja tehnoloških svojstava sa stanovišta oblikovanja i obrade rezanjem. Habanje reznog alata i njegova postojanost su jedni od osnovnih pokazatelja za definisanje indeksa obradivosti materijala.

U okviru ovog rada prikazani su rezultati eksperimentalnim ispitivanjima pri obradi struganjem različitih materijala, formirane su krivih habanja, a na osnovu utvrđenih kriterijuma zatupljenja alata određeni njihovi indeksi obradivosti. Krive habanja alata su predstavljane pomoću polinoma trećeg stepena i određene su prevojne tačke krivih. Pokazano je da se indeks obradivosti može uspešno definisati i sa aspekta postojanosti alata u prevojnoj tački krive habanja..

Ključne reči: habanje, obradivost, rezni alat, indeks obradivosti

1. UVOD

Obradivost materijala je kompleksna kategorija koja zavisi od niza uticajnih faktora kao što su: mehaničke, strukturne i termičke osobine obrađivanog materijala, materijal i geometrija alata, svojstva prevlaka na alatima, svojstva SHP i uslovi hlađenja, dinamičke karakteristike obradnog sistema, uslovi obrade, itd., slika 1. Kriterijumi za ocenu obradivosti materijala predmeta obrade mogu se formirati na osnovu: otpora rezanja, postojanosti i habanja alata, parametara hrapavosti obrađene površine, temperature rezanja i dr. Kao osnovna mera obradivosti materijala, najčešće se koristi indeks obradivosti.



Slika 1. Uticajni faktori na obradivost [1]

¹ Dr Bogdan Nedić, red. prof., Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija

² Dr Gordana Lakić Globočki, Mašinski fakultet, Banja Luka, RS, Bosna i Hercegovina

Ovaj rad je deo projekta TR35034 Istraživanje primene savremenih nekonvencionalnih tehnologija u proizvodnim preduzećima sa ciljem povećanja efikasnosti korišćenja, kvaliteta proizvoda, smanjenja troškova i uštede energije i materijala, koga finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Ispitivanje materijala sa stanovišta obradivosti ima za cilj iznalaženje optimalnih tehnološko-geometrijskih uslova obrade, odnosno efektivnije upravljanjem procesom obrade. Proučavanjem obradivosti materijala teži se ka maksimalnom iskorišćenju informacija dobijenih iz realizovanih ispitivanja u cilju postizanja najekonomičnijeg procesa obrade. Veliki broj uticajnih faktora usložnjava ispitivanje i proučavanje obradivosti, dok veliki broj izlaznih faktora koji su u složenim korelativnim vezama opterećuje izučavanje i analiziranje fenomena obradivosti.

2. OBRADIVOSTI MATERIJALA

Obradivost materijala pri obradi rezanjem, kao tehnološka osobina materijala, predstavlja sposobnost ili pogodnost materijala da se lakše ili teže obrađuje rezanjem u uskom spektru ulaznih parametara kao što su karakteristike reznog alata, parametri obrade rezanjem, vrsta SHP-a, itd. Takođe, obradivost materijala je sposobnost materijala da se pri obradi rezanjem, dobije zahtevani kvalitet obrade i visoka efikasnost, efektivnost i ekonomičnost procesa uz što manje narušavanje entropijskog aspekta procesa obrade i što manje narušavanje upotrebljivosti sredstava rada.

Kako je nemoguće jednoznačno definisati obradivost materijala, pristupa se razvoju odgovarajućih modela, koji se u većoj ili manjoj meri definišu kao specijalni modeli za određenu grupu kriterijuma ili za određenu grupu materijala. Određene institucije razvijaju modele za definiciju obradivosti koje se koriste kao interni modeli vezani za odgovarajuće baze podataka.

Poznavanje obradivosti materijala ima vodeći značaja u oblasti proizvodnje novih materijala novih proizvoda, klasičnog i automatskog projektovanja tehnologija obrade koje je nemoguće uspešno rešiti bez poznavanja funkcija obradivosti, tehnoekonomskoj optimizaciji procesa obrade, konstrukcije novih alata, reznih pločica i prevlaka na reznim alatima i ispitivanje karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje itd.

Jedan od najčešćih načina iskazivanja obradivosti je putem indeksa obradivosti. Indeks obradivosti je relativna mera obradivosti u odnosu na unapred usvojeni odgovarajući referentni materijal. Indeks obradivosti je mera obradivosti materijala iskazana prema nekom od sledećih kriterijuma: otpori rezanja – energetski aspekt, postojanost alata, temperatura rezanja, parametri hrapavosti obrađene površine i tačnost obrade, ekonomična brzina rezanja, troškovi obrade, itd.

Indeks obradivosti nekog materijala I_i se može predstaviti izrazom:

$$I_i = (p_i/p_r)^{\pm 1} \cdot 100\%$$

gde su: p_i – veličina parametra usvojenog za ocenu obradivosti i-tog materijala i

p_r – veličina parametra usvojenog za ocenu obradivosti r-tog materijala (referentnog)

Eksponent odnosa (p_i/p_r) ima vrednost $+1$ ako porast izabranog parametra ima pozitivan efekat na »lakoću« odvijanja procesa obrade. U obrnutom slučaju eksponent ima vrednost -1 . Prilikom ispitivanja obradivosti, uz iskazani indeks ili neku drugu meru obradivosti, potrebno je navesti najvažnije podatke o uslovima i režimima ispitivanja, jer ne postoji mogućnost uopštavanja obradivosti kao kategorije.

Univerzalni indeks obradivosti I_{umi} se može iskazati preko obrasca:

$$I_{umi} = \sum_{i=1}^n I_i^{\alpha_i} = I_1^{\alpha_1} + I_2^{\alpha_2} + \dots + I_n^{\alpha_n}$$

gde su: I_i - indeks obradivosti po i-tom kriterijumu i

α_i - koeficijent uticaja i-tog kriterijuma, pri čemu je $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$

3. OBRADIVOST TEŠKOBRADIVIH MATERIJALA

Intenzivan razvoj automobilske i avio industrije, raketne tehnike, energetike i procesne tehnike, uslovio je razvoj novih materijala koji svojim svojstvima mogu da zadovolje specifične uslove u eksploataciji. To su visokolegirani i nerđajući vatrootporni čelici, legirani alatni čelici, specijalne legure na bazi aluminijuma, nikla i kobalta, višeslojni i keramički materijali. Većina ovih materijala ima povišene mehaničke karakteristike i specifična fizička svojstva koja dovode do snižavanja njihovih tehnoloških svojstava sa stanovišta oblikovanja i obrade rezanjem. Obradivost rezanjem teškoobradivih materijala prvenstveno zavisi od njihovog hemijskog sastava koji uz pomoć odgovarajuće termičke obrade, obezbeđuje njihova eksploatacijska svojstva (vatrootpornost, korozionu otpornost pri visokim temperaturama, visoku čvrstoću i dr.). Znači, ovi materijali nisu samo teškoobradivi pri obradi rezanjem nego u svim vrstama obrade [1].

Materijali sa većom zateznom čvrstoćom imaju nižu obradivost od materijala sa većom čvrstoćom, jer je mnogo teže raskinuti međuatomske i međukristalne veze unutar strukture obratka prilikom prodiranja alata u toku obrade. Zavisnost zatezne čvrstoće i obradivosti može se opisati odgovarajućom monotono rastućom funkcijom. Većina materijala sa malom tvrdoćom i materijala sa velikom tvrdoćom imaju manju obradivost od materijala kojima se tvrdoća kreće u granicama od 35 do 45 HRC.

Žilavost se takođe može dovesti u vezu sa tvrdoćom materijala obratka – niska vrednost tvrdoće znači i veću žilavost materijala i obrnuto. Materijali sa niskom tvrdoćom, odnosno žilaviji materijali, prilikom procesa obrade stvaraju naslage na alatu koje dalje negativno utiču na kvalitet obrađene površine. Negativan efekat naslage posebno je izražen kod obrade aluminijumskih i titanovih legura.

Legiranjem čelika se postižu različite strukture, kao što su sitnozrnasta ili krupnozrnasta. Sitnozrnasta struktura ima bolje mehaničke osobine kao što su zatezna čvrstoća i žilavost. Globalno posmatrajući, materijali sa sitnozrnastom strukturom su u izvesnoj meri nepovoljniji za obradu rezanjem, ali treba imati u vidu da obrada materijala sa sitnozrnastom strukturom daje bolji kvalitet obrađene površine.

Primena aluminijum legura je sve više zastupljena u automobilskoj industriji. Najpoznatije su legure *AlSi12* sa različitim legirajućim elementima. Ovi materijali imaju dobre mehaničke karakteristike i visoku korozionu otpornost. Međutim, u literaturi se ne mogu naći podaci o njihovoj obradivosti.

4. HABANJE ALATA I OBRADIVOST SA ASPEKTA HABANJA ALATA

Postojanost alata je jedan od osnovnih pokazatelja za definisanje indeksa obradivosti materijala. Prilikom ispitivanja grupe teškoobradivih čelika mogu se formirati krive habanja alata pri čemu se prati širina pojasa habanja na leđnoj površini alata pri radu sa strugarskim noževima od brzoreznog čelika HSS.E i noževima sa pločicom od tvrdog metala. Krive habanja alata se aproksimiraju polinomom trećeg stepena [2]:

$$h = C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3, \text{ odnosno } h - h_p = A_1(T - T_p) + A_2(T - T_p)^3$$

gde su h_p i T_p vrednosti pohabanosti i postojanosti alata u prevojnoj tački krive habanja. U ovom izrazu konstante C_1 i C_3 moraju biti uvek pozitivne, a konstanta C_2 uvek mora biti manja od nule.

Mnogobrojna ispitivanja realizovana u Laboratoriji za obradu metala rezanjem na Fakultetu inženjerskih nauka u Kragujevcu, su pokazala da prevojna tačka izračunata na osnovu krive habanja, može predstavljati karakteristiku materijala. U ovoj tački dolazi do promene smera intenziteta porasta otpora rezanja nastalog usled habanjem alata. Do prevojne tačke otpori rezanja neznatno rastu - intenzitet opada, a nakon prevojne tačke intenzitet promene otpora rezanja raste. Takođe, istraživanja promene topografije površina su pokazala da usled habanja u početnom periodu hrapavost opada, a nakon prevojne tačke hrapavost površina počinje da raste. To ukazuje na mogućnost definisanja obradivosti materijala na osnovu položaja prevojne tačke.

Indeks obradivosti sa aspekta postojanosti alata I_i za usvojeni kriterijum pohabanosti definisan je izrazom:

$$I_i = (T_i/T_r) \cdot 100 \%$$

gde su: T_i - postojanost i -tog materijala za usvojeni kriterijum pohabanosti alata,

T_r - postojanost r -tog (referentnog) materijala za isti kriterijum pohabanosti alata.

Indeks obradivosti sa aspekta postojanosti alata u prevojnoj tački I_{pi} definisan je izrazom:

$$I_{pi} = (T_{pi}/T_{pr}) \cdot 100 \%$$

gde su: T_{pi} - postojanost i -tog materijala u prevojnoj tački,

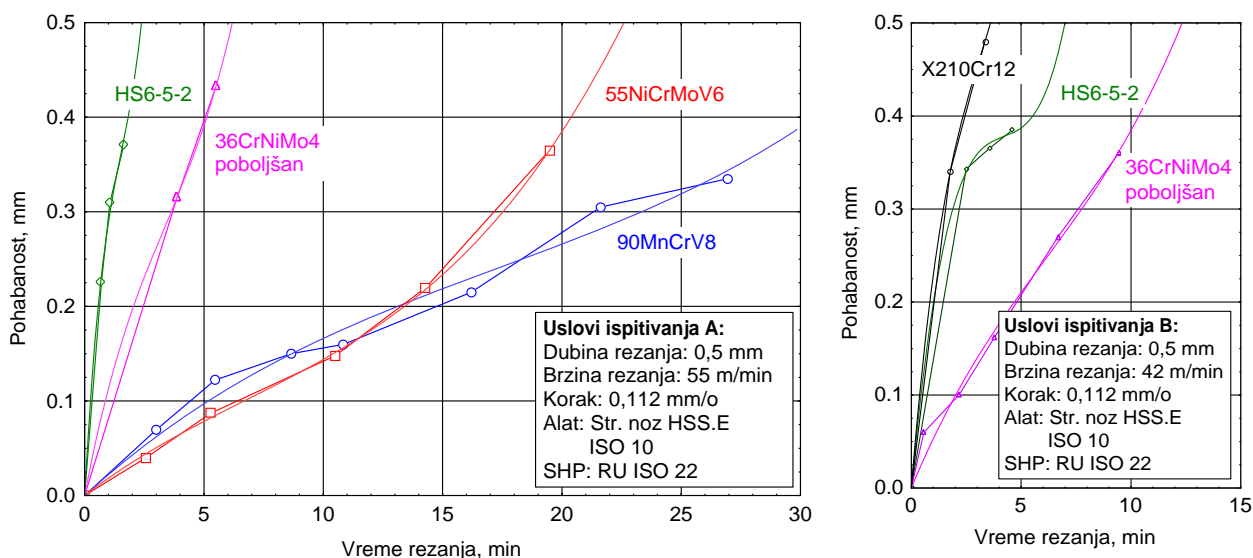
T_{pr} - postojanost r -tog (referentnog) materijala u prevojnoj tački.

U okviru ovog rada predstavljeni su rezultati istraživanja obradivosti grupe teško obradivih legiranih čelika i novih legura aluminijuma [1]. Dobijene su krive habanja i formirani su histogrami indeksa obradivosti na osnovu usvojenog kriterijuma pohabanosti alata i na osnovu postojanosti u prevojnoj tački krive habanja. Uslovi ispitivanja su dati na dijagramima krivih habanja.

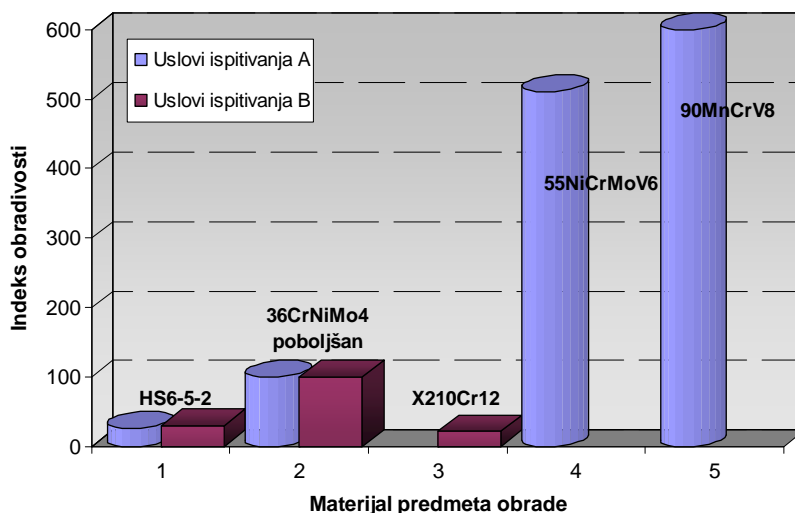
Na slici 2 prikazane su krive habanja dobijene pri obradi struganjem alatima od brzoreznog čelika (strugarski nož ISO 10, 16x25x250 E18Co10, $\gamma=6^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\chi=45^\circ$, $\chi_1=45^\circ$, $r=1$ mm). Na slikama 3 i 4 su prikazani histogrami indeksa obradivosti.

Na slici 5 su prikazane krive habanja dobijene pri obradi struganjem sa alatima sa uizmenljivim pločicama od tvrdog metala (strugarski nož CSDPR 2516 M12, Kenametal, pločica SPGR 120308 PGP-135 (P35), PP Corun). Na slici 6 su prikazani histogrami indeksa obradivosti.

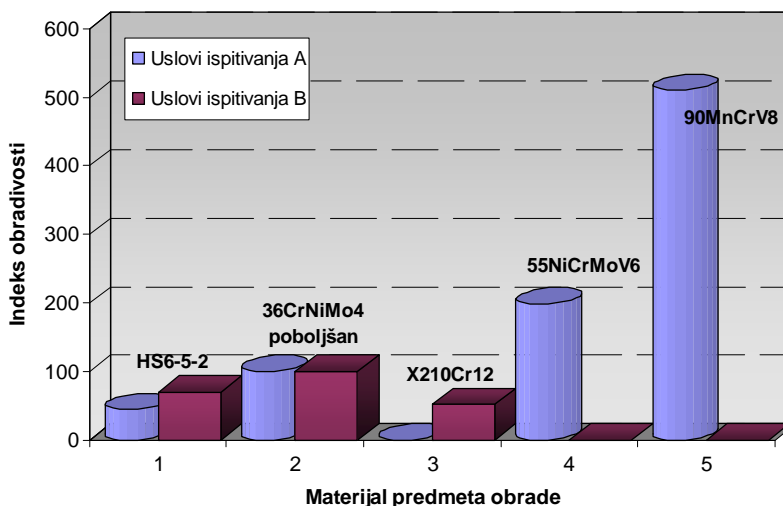
Usvojeni kriterijum pohabanosti alata pri obradi ispitivane grupe čelika sa alatom od tvrdog metala bez prevlake je $h_k=0,2\text{ mm}$.



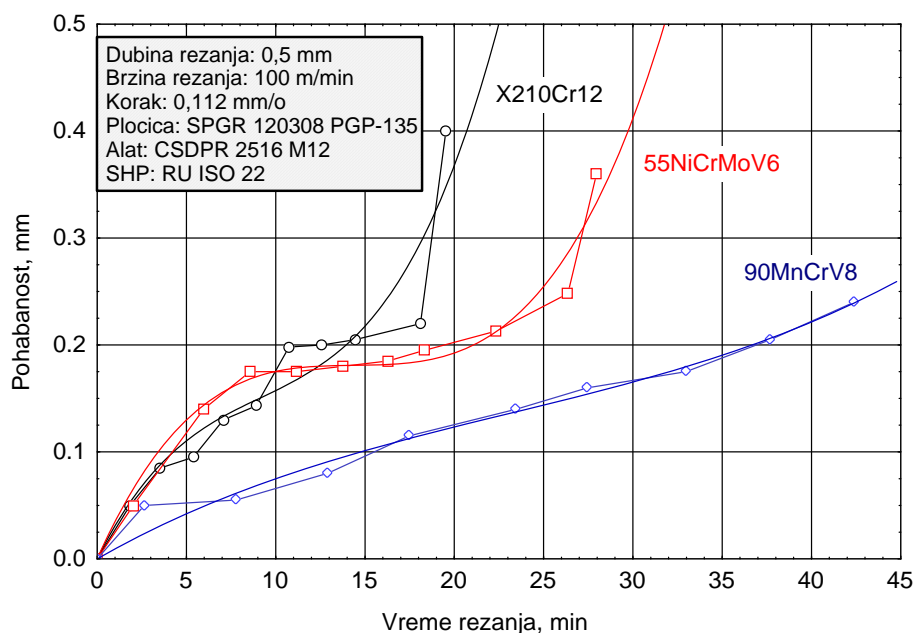
Slika 2. Primer eksperimentalnih krivih habanja alata dobijenih pri obradi grupe čelika sa alatom od HSS.E



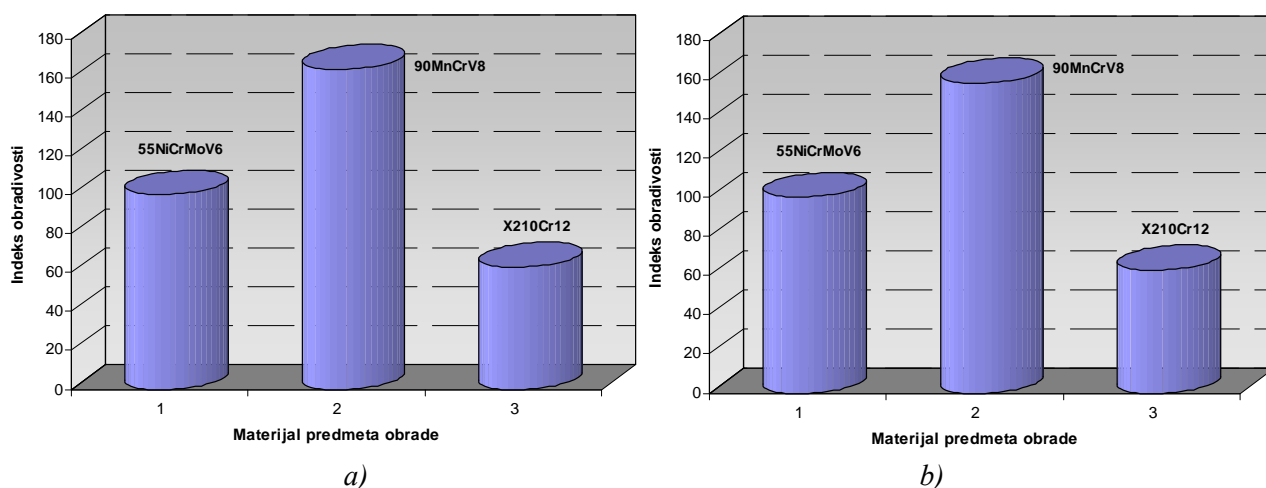
Slika 3. Indeksi obradivosti definisani preko postojanosti alata T za usvojeni kriterijum habanja alata $h_k = 0,25\text{ mm}$ pri obradi struganjem grupe čelika sa alatom od HSS.E



Slika 4. Indeksi obradivosti definisani na osnovu postojanosti alata u prevojnoj tački krive habanja pri obradi struganjem grupe čelika sa alatom od HSS.E



Slika 5. Primeri eksperimentalnih krivih habanja alata dobijenih pri obradi grupe čelika sa alatom od TM bez prevlake



Slika 6. Indeksi obradivosti pri obradi struganjem grupe čelika sa alatom od TM

- a) Indeks obradivosti na osnovu postojanosti alata za usvojeni kriterijum habanja alata $h_k = 0,2$ mm
b) Indeks obradivosti na osnovu postojanosti alata u prevojnoj tački

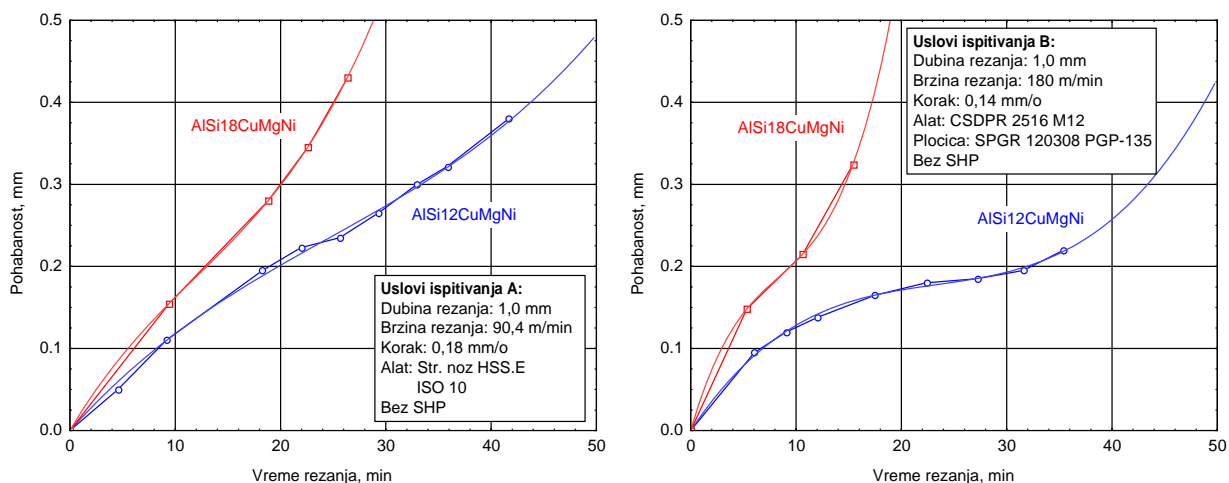
Na slikama 2 i 5 su prikazane krive habanja za grupu teškoobradivih čelika. Može se zaključiti da pri jednakom vremenskom intervalu obrade različiti materijali imaju i različite vrednosti pohabanosti, u ovom slučaju habanja na leđnoj površini alata. Za usvojeni kriterijum pohabanosti alata dobijaju se različite postojanosti alata. Navedena razlika služi za ocenu čelika sa aspekta obradivosti.

Sa dobijenih histograma indeksa obradivosti može se zaključiti da čelik 90MnCrV8 (Č3840) ima najbolju obradivost, a zatim čelik 55NiCrMoV6 (Č5741). Najlošiju obradivost ima čelik X210Cr12 (Č4150) a zatim brzorezni čelik HS6-5-2 (Č7680).

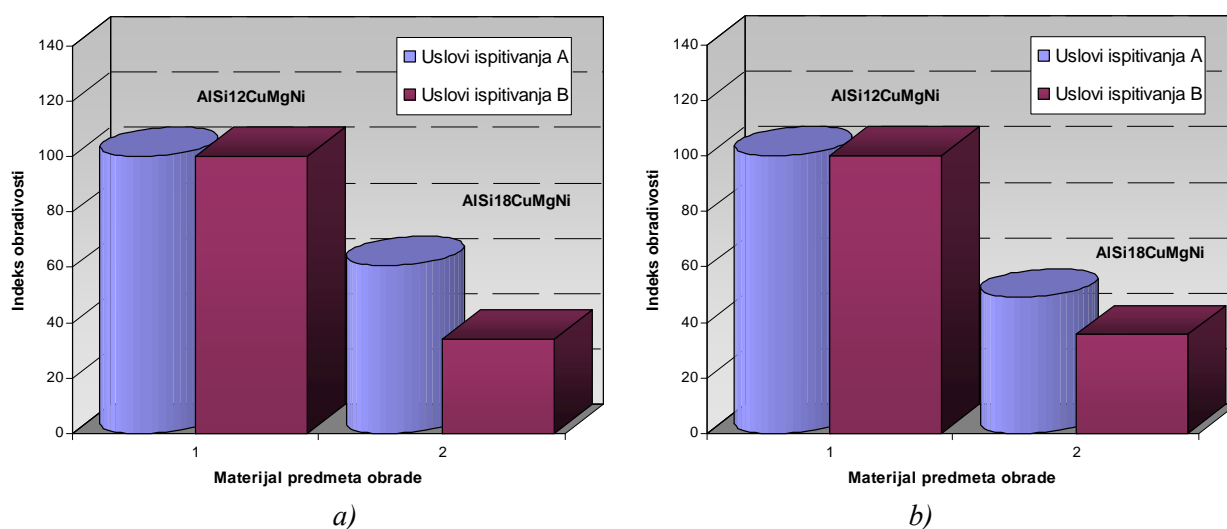
Krive habanja pri obradi legura aluminijum alatima od brzoreznog čelika HSS.E i alatima sa izmenljivim pločicama od tvrdog metala bez prevlaka su prikazane na slici 7. Za usvojeni kriterijum pohabanosti $h_k=0,3$ mm na histogramu na slici 8a) prikazani su indeksi obradivosti.

6. ZAKLJUČAK

Sa matematičkim modelom krive habanja u obliku polinoma trećeg stepena sa uspehom se može aproksimirati bilo koja kriva habanja alata. Na osnovu postojanosti u prevojnoj tački može se sa uspehom definisati obradivost materijala. Na ovaj način se izbegava problem usvajanja kritične postojanosti, odnosno usvajanja pohabanosti alata na osnovu koje se određuje obradivost materijala.



Slika 7. Primeri eksperimentalno dobijenih krivih habanja alata pri obradi Al legura



Slika 6. Indeksi obradivosti pri obradi struganjem legura Al

- a) Indeks obradivosti na osnovu postojanosti alata za usvojeni kriterijum habanja alata $h_k = 0,3$ mm
 b) Indeks obradivosti na osnovu postojanosti alata u prevojnoj tački

LITERATURA

1. Lakić Globočki G., Identifikacija triboloških procesa u zoni rezanja grupe teškoobradivih materijala i aluminijum legura, Doktorska disertacija, Banja Luka, 2004.
2. Nedić, B., Tadić, B., Korelativne zavisnosti u obradi metala rezanjem, 22. Jupiter konferencija, Beograd, 1996.

CUTTING TOOLS WEAR AND MACHINABILITY HEAVY MACHINING MATERIALS

Summary:

Intensive development of industry during last several decades places special attention to development of new, superior materials, as to improvement of already existing. Improved and new characteristics often lead to lower technological characteristics from aspects of shaping and cutting. Wear of cutting tool and its durability are one of the basic parameters for definition of index of material workability.

In this paper are presented results obtained by experimental investigations during scraping of different materials, wear curves are formed, and, based on predefined parameters of tool bluntness, determined material workability indices. Wear curves are presented by polynomial of third degree and inflectional points of the curve are determined. It is shown that workability index can also be successfully defined from aspect of tool durability in the inflection point of the wear curve.

Key words: wear, wear curve, workability, cutting tool, workability index

S. Radonjić¹, P. Kovač², A. Mitrović³

TEHNOLOGIJA BRUŠENJA I POLIRANJA OKRUGLIH PROHROMSKIH CEVI

Rezime:

U radu je prikazana savremena tehnologija obrade na mašini za brušenje i poliranje cevi *Surface Engineering ST 220*. Usled specifičnosti proizvodnog postupka koji je u potpunosti automatizovan i kontrolisan PLC automatskim sistemom omogućeno je lako rukovanje, trenutna dijagnostika kvara, preciznija merenja, maksimalna ponovljivost, kontrola svih parametara procesa i lakše praćenje kvaliteta proizvoda. Mašina za brušenje i poliranje okruglih prohromskih cevi (Č.4580) predstavlja komplet više manjih mašina-modula koje obezbeđuju vrhunski kvalitet gotovih proizvoda uz relativno male troškove obrade gde je ljudski faktor sveden na minimum.

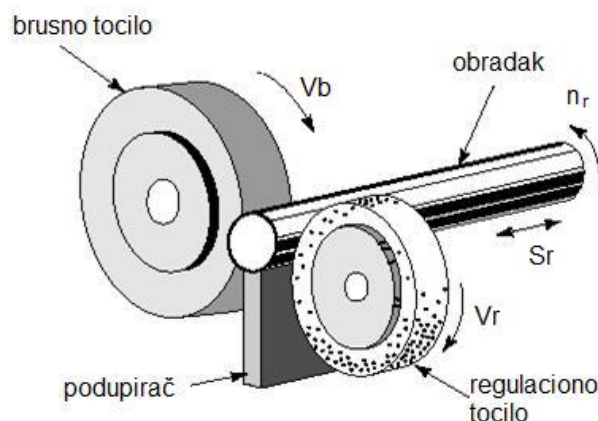
Ključne reči: brušenje, poliranje, *Surface Engineering*, prohromske cevi

1. UVOD

Brušenje bez šiljaka razlikuje se od kružnog brušenja po tome što nema prinudnog kretanja obratka, već se on obrće na osnovu trenja između tocila. Brusilice za brušenje bez šiljaka koriste se u velikoserijskoj proizvodnji za brušenje spoljnih okruglih površina, pri čemu je čest slučaj automatskog dovođenja i odvođenja predmeta. CNC mašina *Surface Engineering ST 220* je automatska mašina za brušenje i poliranje okruglih prohromskih (Č.4580) cevi od $\varnothing 12$ mm do $\varnothing 220$ mm kojom se postiže odgovarajući kvalitet brušenja (u zavisnosti od parametara mašine i granulacije brusne trake) i poliranje do površine - mirror polished (u zavisnosti od parametara mašine i granulacije paste za poliranje).

2. BRUŠENJE BEZ ŠILJAKA

Brušenje bez šiljaka je brušenje kod koga obrađivani materijal nije stegnut već je naslonjen na uzdužni podupirač (slika 1). Obradak je postavljen između dva tocila od kojih je jedno brusno (glavno) a drugo regulaciono (pomoćno) tocilo.



Slika 1: Šematski prikaz brušenja bez šiljaka

¹ Prof. dr Snežana Radonjić, Tehnički fakultet Čačak, Svetog Save 65, Čačak, e-mail: snezar@tfc.kg.ac.rs

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

³ mr Anđelija Mitrović, asistent, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Svetog Save 65, Čačak, e-mail: andjelija.mitrovic@vstss.com

Glavno kretanje obavlja brusno točilo i ono je obrtno, promenljive brzine usled samog tehnološkog procesa. Brusno točilo pritiska obradak na uzdužni podupirač i regulaciono točilo. Pomoćno kretanje obavlja regulaciono točilo i ono je obrtno i njime se obezbeđuje uzdužno pomeranje cevi. Brzina pomoćnog kretanja je takođe promenljiva usled specifičnog tehnološkog postupka. Brusno točilo se okreće dosta većom brzinom obrtaja u odnosu na regulaciono. Tokom procesa brušenja regulaciono točilo se rotira dosta manjom površinskom brzinom od brusnog točila čime kontroliše rotaciju obratka i njegovo aksijalno pomeranje. Da bi ovakav način rada bio izvodljiv, mašina se kontroliše PLC kontrolerom koji ima ulogu da stalno prilagođava brzine rotacije kao i pritisak koji se ostvaruje na obradak.

Ose brusnog i regulacionog točila se mogu pomerati za 1-10 mm. Obradak je postavljen tako da mu je osa iznad točila. Uzdužno pomeranje ostvaruje se naginjanjem regulacionog točila za ugao α koji je u rasponu od $0-8^{\circ}$. Pomeraj obratka (cevi) se može menjati sa promenom nagibnog ugla α i brzine obrtanja regulacionog točila.

$$S_{\text{obratka}} = V_r \cdot \sin \alpha = D_r \cdot \pi \cdot n_r \cdot \sin \alpha \quad [\text{mm/min}]$$

gde je:

S_{obratka} - pomak obratka

V_r – brzina okretanja regulacionog točila

α – nagibni ugao regulacionog točila u odnosu na brusno

D_r – spoljni prečnik regulacionog točila

n_r – broj obrtaja regulacionog točila

Na prečnik obratka utiču dva faktora: razmak između brusnog točila i regulacionog i promena visine uzdužnog podupirača.

3. MAŠINA ZA BRUŠENJE I POLIRANJE OKRUGLIH PROHROMSKIH CEVI

Mašina za brušenje i poliranje okruglih prohromskih cevi *Surface Engineering ST 220* (slika 2) predstavlja komplet više manjih mašina-modula. Ukupna nazivna snaga mašine je 80 kW i za njen rad potrebno je obezbediti stalan dovod vode pod pritiskom od 2 bara. Ukupna dužina mašine je 21m i nju opskrbljuje kran nosivosti 10 t montiran u mašinskoj hali, čija je uloga prenošenje sirovine (neobrađenih cevi) i gotovih proizvoda.



Slika 2: Mašina za brušenje i poliranje okruglih prohromskih cevi

Modularnost mašine je specifična, i ona se sastoji od prijemnog dela, 4 stanice za brušenje, 3 stanice za poliranje (slika 3) i dela za automatsko pakovanje u polietilensku foliju. Kompletna mašina kontrolisana je PLC-om kompanije Siemens. Sama konstrukcija mašine omogućuje da se njeni pojedini delovi isključe iz procesa (po potrebi ili zbog kvara/održavanja) čime se pruža maksimalno radno iskorišćenje mašine. Svaki

modul mašine praćen je PLC-om i redovno održavanje vrši se po potrebi (u zavisnosti od broja radnih sati i opterećenja).

Prijemni deo je na ulazu mašine i on može obezbediti ulaz za cevi dužina od 2000 mm do 6000 mm u zavisnosti od potrebe. Najčešće se koriste cevi dužine 6000 mm. Prijemni deo je u potpunosti automatizovan i maksimalnog opterećenja od 2t, gde broj cevi koje može prihvatiti zavisi od njihovog prečnika i debljine. Unutrašnji prečnik cevi može biti u rasponu od 12 mm do 220 mm.

Stanice za brušenje su prve u lancu obrade i one su modela ST 220 (slika 4). Sve stanice za brušenje su identične, sa time što se svakoj isporučuje različita snaga od 17kW, 13kW, 10kW i 7kW, respektivno. Svaka stanica može menjati broj obrtaja brusnog točka u rasponu od 1500o/min do 3000o/min, što reguliše PLC. Treba napomenuti da je brusno točilo obmotano je izmenjivom brusnom trakom koja se nakon trošenja menja. Za brušenje se koristi Klingspor brusna traka CS 326 Y (granulacija brusne trake u svakoj od stanica je 240, 320, 400, 600, respektivno; vezivno sredstvo-smola; zrno-Al. Oksid agglom.). Dimenzija brusne trake je 200x3500 mm.

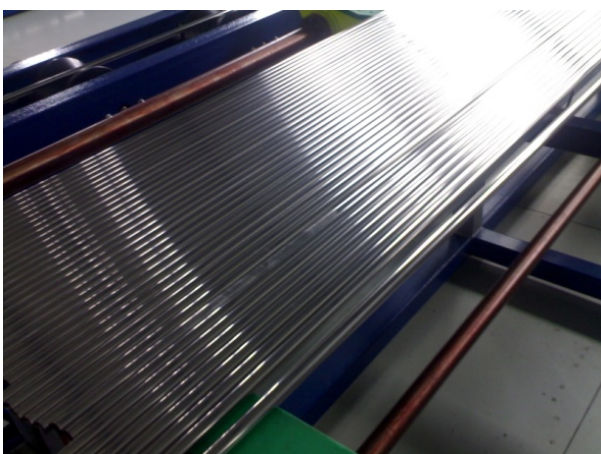


Slika 3: Komplet modula za brušenje i poliranje



Slika 4: Slika unutrašnjosti modula ST 220

Nakon što cev prođe kroz brusne stanice ulazi u stanice za poliranje modela PT 150. Sve stanice za poliranje su identične, sa time što se svakoj isporučuje različita snaga od 7kW, 5kW i 3kW, respektivno. Svaka stanica može menjati broj obrtaja četke za poliranje u rasponu od 100 o/min do 300 o/min, što je regulisano PLC-om. Granulacija polir paste u svakoj od stanica je 1200, 1400 i 1600, respektivno. Četke i paste se kombinuju u zavisnosti da li je potrebna gruba, srednja ili fina obrada cevi.



Slika 5: Stek sa ispoliranim cevima za pakovanje



Slika 6: Mašina za pakovanje u polietilensku foliju

Po izlasku ispolirane cevi se automatski slažu na stek (slika 5), odakle ih povlači mašina za automatsko pakovanje cevi u polietilensku foliju (slika 6) debljine do 70 μ m, nakon čega su spremne za preuzimanje kao gotov proizvod. Mašina može obraditi cevi prečnika \varnothing 20 do gotovog proizvoda (brušenje i poliranje)

brzinom koja približno iznosi 7,5 m²/h a cevi prečnika Ø50 (brušenje i poliranje) brzinom koja približno iznosi 5,9 m²/h.

Celokupan proces obrade je pod kontrolom PLC-a kojim se upravlja pomoću konzole. Na konzoli se u svakom trenutku vidi status mašine, položaj obradaka u mašini i stanje pojedinih elemenata mašine. Pre početka obrade određene količine cevi, preko konzole se unose potrebni podaci, kao što su dužina, prečnik, kvalitet i broj cevi, traženi kvalitet gotovog proizvoda, vrsta brusnih traka, polir četki i pasti kao i vrsta folije za pakovanje. Na osnovu unetih podataka PLC proračunava potrebne parametre za izvođenje procesa i postizanje traženog kvaliteta obrade. U svim modulima mašine postoji skup senzora koji PLC snabdeva potrebnim podacima i praktično je uloga čoveka svedena samo na kontrolora mašine.

Za razliku od klasičnih računara, PLC je dizajniran za obradu podataka sa višestrukih ulaza i izlaza, manje je osetljiv na temperaturu radne okoline i električni šum i otporniji je na vibracije i udare. Programi koji kontrolišu mašinu smešteni su u posebne memorijske module sa rezervnim napajanjem. PLC je primer sistema za rad u realnom vremenu (RTS) jer se upravljački signali moraju generisati u zavisnosti od merenja u jako kratkom vremenskom intervalu.

Kontrolni panel se sastoji od posebnih elemenata: napajanja, kontrolera i releja za ulaz/izlaz. Sam ormar je oklopljen i obezbeđen od uticaja prašine, vlage, toplote i hladnoće i poseduje konekciju ka upravljačkoj konzoli. Upravljanje mašinom obavlja putem senzora i aktuatora. Senzori prate analogne promenljive (temperatura i pritisak), stanje kompleksnih pozicionih sistema i prekidače. Aktuatori su električni motori, pneumatički i hidraulički cilindri i magnetni releji.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana savremena tehnologija obrade na mašini Surface Engineering ST 220 za brušenje i poliranje okruglih prohromskih cevi (Č. 4580) prečnika od Ø 12 mm do Ø 220 mm dužine od 2000 mm do 6000 mm. Mašina se sastoji od prijemnog dela, četiri modula za brušenje, tri modula za poliranje i dela za automatsko pakovanje u polietilensku foliju. Konstrukcija mašine je takva da omogućava da se pojedini njeni delovi mogu isključiti iz procesa čime se pruža maksimalno radno iskorišćenje mašine. Kompletna mašina kontrolisana je PLC automatskim sistemom koji omogućava lako rukovanje, trenutnu dijagnostiku kvara, precizna merenja, kontrolu parametara procesa i lakše praćenje kvaliteta proizvoda.

LITERATURA

- [1] Surface Engineering Operational Manual, Milano, Italy, 2007.
- [2] Quality Centerless Grinding, Middlefield, USA, 2000.
- [3] Intercity Centerless Grinding, Fountain Valley, USA, 2003.
- [4] Radonjić S, Baralić J, Sovilj-Nikić I. P.: "Grinding and polishing of circular stainless steel tubes", TMT 2009, Hammamet, Tunisia, 2009
- [5] Surface Engineering PT 150, Milano, Italy, 2007.

TECHNOLOGY OF GRINDING AND POLISHING OF CIRCULAR STAINLESS STEEL TUBES

Abstract:

This paper presents a modern processing technology on a machine for grinding and polishing tubes Surface Engineering ST 220. Due to the specifics of the manufacturing process that is fully automated and controlled by PLC automatic system enables easy operation, the current fault diagnosis, more precise measurements, the maximum reproducibility, control of process and easier monitoring of product quality. Machine for grinding and polishing of circular stainless steel tubes (Č.4580) is a set of smaller machines-modules that provide the highest quality finished products at relatively low costs of processing where the human factor is reduced to a minimum.



Popović M.¹, Slavković R.², Jugović Z.³, Milićević I.⁴

ANALIZA KONVENCIONALNIH PRISTUPA ZA DEFINISANJE SPOLJAŠNJEG OPTEREĆENJA REZNIH ZUBA KOD BAGERA KONTINUALNOG DEJSTVA

Rezime:

U toku procesa konstruisanja reznih zuba za bagere kontinualnog dejstva, potrebno je izračunati spoljašnje opterećenje. Spoljašnje opterećenje na reznom zubu, posledica je njegove interakcije sa stenskim materijalom tokom procesa kopanja. U okviru ovog rada, dat je pregled konvencionalnih pristupa za statičko modeliranje procesa interakcije. Na bazi toga, izvršena je analiza mogućnosti njihove primenu u procesu konstruisanja, odnosno za izračunavanja opterećenja reznih zuba na relativno jednostavan i dovoljno pouzdan način.

1. UVOD

Proces kopanja kod bagera kontinualnog dejstva neposredno vrše kašike sa reznim elementima (rezni zubi i nož vedrice) koji se nalaze na frontu rezanja. Da bi se iskopavani (stenski) materijal razorio, potrebno je na njega delovati određenom silom. U zavisnosti od vrste stenskog materijala, potrebna je različita sila rezanja za razaranje masiva. Površinski kopovi uopšte, pa i svaki kop pojedinačno, sastoji se od velikog broja međusobno različitih stenskih materijala, koji se kvalifikuju mehaničkim, fizičkim i drugim osobinama kao što su tvrdoća, čvrstoća, lepljivost, abrazivnost, itd.

Primenom reznih zuba raspoloživa sila rezanja se koncentriše na malu širinu rezanja i na taj način se olakšava prodiranje kompletne kašike u materijal. Da bi ispravno izvršili svoju osnovnu funkciju zubi moraju zadovoljiti više zahteva, kao što su povoljna geometrija, visoka otpornost na abrazivno habanje, velika mehanička čvrstoća i žilavost itd. Zbog toga faktori na koje se mora obratiti pažnja pri konstruisanju su [8]: oblik i dimenzije zuba, izbor materijala zuba, montaža zuba na kašiku i tehnologija njegove izrade. Proces konstruisanja reznih zuba za bagere kontinualnog dejstva, karakterističan je zbog sledećih činilaca [9]:

- Kompleksnost procesa konstruisanja vezana za visok nivo korelacije osnovnih svojstava konstrukcije. Na taj način, krajnji izgled, dimenzije i tehnologija izrade je veoma osetljiva na tekuće izmene tokom procesa konstruisanja.
- Veliki uticaj specifičnih zahteva korisnika, i težnja unikatnoj proizvodnji. Zbog toga je neophodno ostvariti veliku fleksibilnost u procesu konstruisanja i procesu izrade.
- Složenost definisanja spoljašnjeg opterećenja i usvajanje odgovarajućih pretpostavki, koje su osnova pri proračunu nosivosti.
- Specifičnost tehnologije izrade reznih zuba koja se ogleda u postojanju velikog broja kompleksnih tehničko-tehnoloških parametara livenja i njihovoj međuzavisnosti.
- Izrada fizičkog prototipa reznog zuba zahteva značajno vreme pripreme i realizacije. Sa druge strane ispitivanje fizičkog prototipa u eksploatacionim uslovima je veoma otežano i takođe zahteva značajne vremenske i finansijske izdatke.

2. PRORAČUN NOSIVOSTI

Proces konstruisanja u opštem slučaju u prvi plan stavlja poznavanje radnog opterećenja (slika 1.), odnosno poznavanje pravca, smera i inteziteta spoljašnjih sila i momenata, ali i njihovog uticaja na poprečne preseke elementa koji se konstruiše. Kada se govori o konstrukciji reznih elemenata kod bagera kontinualnog

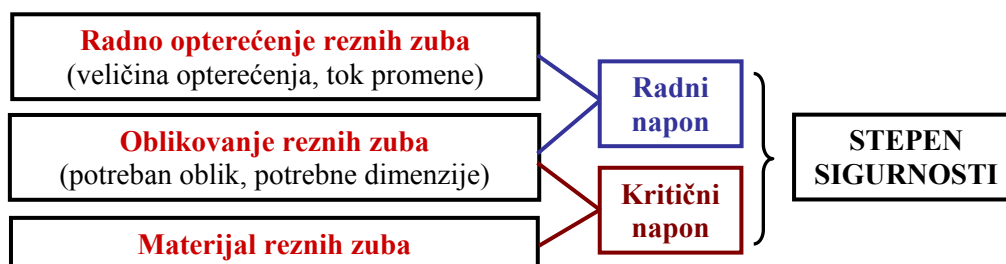
¹ Mr Marko Popović, dipl. maš. ing, Tehnički fakultet Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, e-mail: marko@tfc.kg.ac.rs

² Prof. dr Radomir Slavković, dipl. maš. ing, Tehnički fakultet Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, e-mail: radstanka@gmail.com

³ Prof. dr Zvonimir Jugović, dipl. maš. ing, Tehnički fakultet Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, e-mail: zvonko@tfc.kg.ac.rs

⁴ Mr Ivan Milićević, dipl. maš. ing, Tehnički fakultet Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, e-mail: ivan_milicevic@beotel.rs

dejstva, na prvom mestu neophodno je definisati spoljašnje opterećenje, koje rezni zubi treba da savlada. Prilikom konstruisanja reznih elemenata, težište se stavlja na grubu procenu inteziteta, dok se pravac i smer spoljašnjeg opterećenja definiše sa tri međusobno upravne komponente sile u koordinatnom sistemu, čiji se koordinatni početak vezuje za određeni deo reznog zuba, kašike ili nekog drugog mesta na samom bageru. Međutim, u cilju generisanja boljih konstruktivnih rešenja, neophodno je jasno poznavanje svih faktora i njihovih zavisnosti, koji imaju uticaja na opterećenje reznih zuba. To znači da je potrebno preciznije definisanje spoljašnjeg opterećenja, i to kroz funkcionalne zavisnosti uticajnih faktora, odnosno definisanje spoljašnjeg opterećenja u funkciji od svojstava stenskog materijala koji se iskopava, položaja i orijentacije zuba u zahvatu, tehnoloških parametara (brzine, dubine rezanja) i dr. Analizirajući kako rezni zub deluje na stenski materijal, kakvo ponašanje stenski materijal pokazuje, i kakve otpore pruža u odnosu na posmatrani rezni element, moguće je dobiti značajne informacije za konstruisanje nove i unapređenje postojeće konstrukcije reznih zuba.



Slika 1. Opšta šema proračuna nosivosti reznih zuba

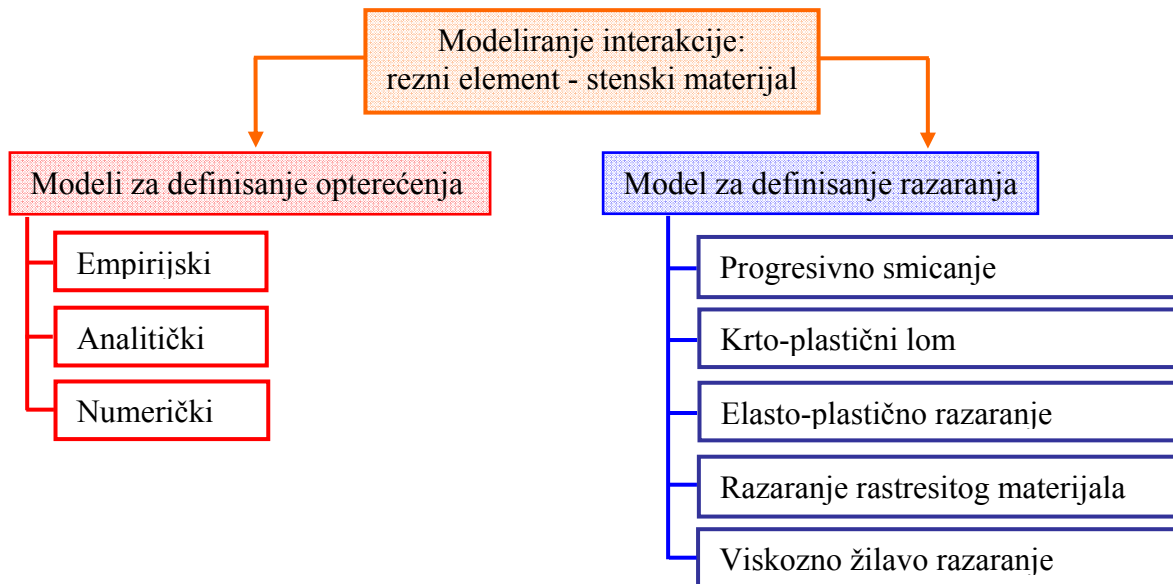
2. RAZLIČITI PRISTUPI STATIČKOG OPISA INTERAKCIJE REZNOG ZUBA I STENSKOG MATERIJALA

Tokom procesa iskopavanja, odvija se intezivna interakcija između stenskog materijala i reznog elementa. Kako je jedna od polaznih stvari u procesu konstruisanja određivanje opterećenja, to je u slučaju konstruisanja reznih elemenata neophodna analiza procesa i sile koji se javljaju tokom interakcije. Na taj način se u direktnu vezu dovode potrebna sila na reznom elementu i odgovarajući otpor razaranja iskopavanog materijala.

Poslednje četiri decenije, većina istraživača bavila se parametarskim izučavanjem problema interakcije, pri čemu su korišćeni različiti pristupi. Parametri su primarno proučavani u okviru kvazistatičkih uslova, uzimajući u obzir stanje ravnoteže u sistemu stenski materijal-rezni element. Na taj način, modeli za izračunavanje sile oslanjaju se na klasičnu teoriju razaranja za kvazistatičke uslove. Modeli zasnovani na osnovama fizičkih pojava, imaju važnu ulogu kao činiooci koji određuju polaznu osnovu za proračun opterećenja reznih elemenata. U poslednje vreme istraživanja se sprovode uzimajući u obzir i dinamičku prirodu interakcije. Ova istraživanja u odnosu na konvencionalne kvazi-statičke pretpostavke, u obzir uzimaju brzine i ubrzanja reznog elementa. Međutim, velike deformacije koje se javljaju kod stenskih materijala još uvek predstavljaju neistraženo područje ove problematike.

Saglasno osnovnim pretpostavkama, aproksimacijama i različitim pristupima, koji se koriste u analizi procesa interakcije, problem se može posmatrati i analizirati kao [1]:

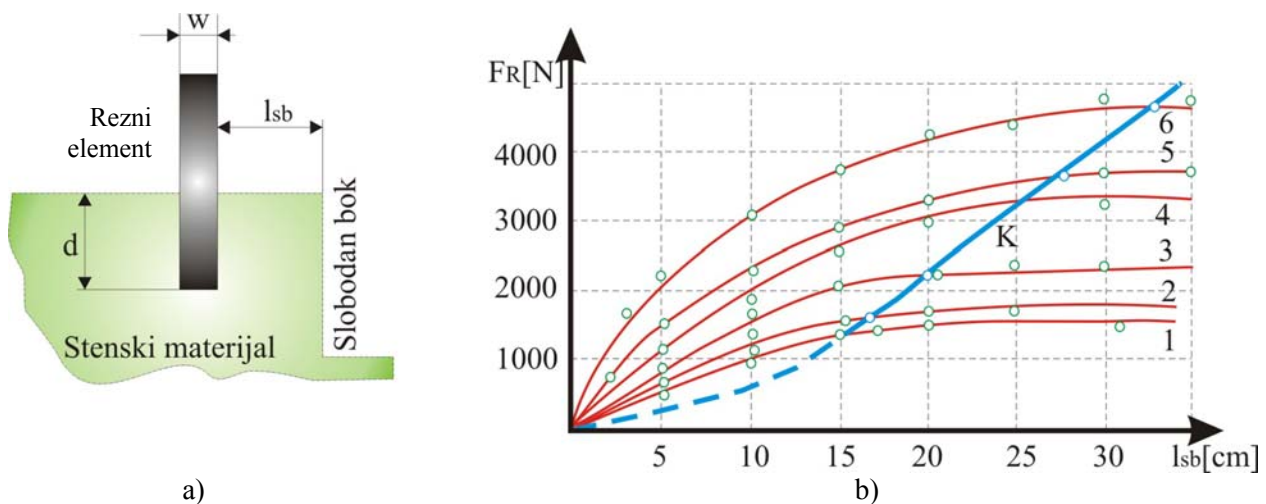
1. Statički proces, definisanjem prostornog stanja napona, sa statičkim graničnim uslovima, za čije rešavanje se može primeniti klasična mehanika stenskog materijala.
2. Kvizistatički proces, koji problem rešava sa stanovišta tečenja stenskog materijala, u kome dominiraju sile koje se javljaju kao posledica brzine i ubrzanja.
3. Vremenski zavisni i slučajni proces, pri čemu se za rešavanje problema koriste slučajne promenljive i statistički alati.



Slika 2. Pristupi u modeliranju interakcije reznih elemenata i stenskog materijala

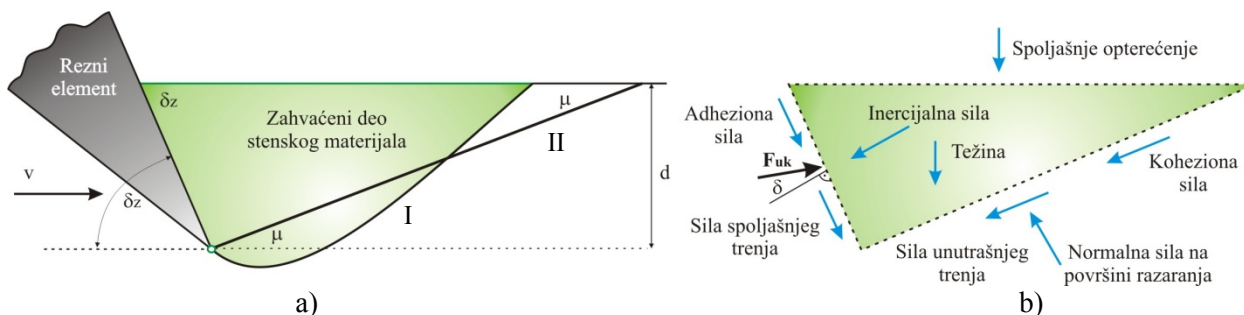
Istraživanje procesa interakcije, ima za cilj razvoj modela za izračunavanje opterećenja, uzimajući u obzir različite stenske materijale, rezne elemente i uslove rada (brzina, dubina, orijentacija alata i dr.). Izdvajaju se tri glavna pristupa (slika 2.), pomoću kojih se definišu odgovarajući modeli, procesa interakcije reznog elementa i iskopavanog materijala, i to su: empirijski, analitički i numerički pristup [2].

Empirijski pristup. Matematička rešenja zasnovana na empirijskim modelima, razvijena su kako bi se opisala interakcija stenskog materijala i reznog elementa, tako što su definisani različiti uticajni parametri. Analitički modeli zasnovani su na fizičkim karakteristikama stenskog materijala, parametrima reznog elementa i polaznim pretpostavkama. Relacije između promenljivih su izražene kroz odgovarajuće krive zavisnosti (slika 3.), koje najpribližnije odgovaraju eksperimentalnim podacima, na osnovu čega se razvija odgovarajući model.



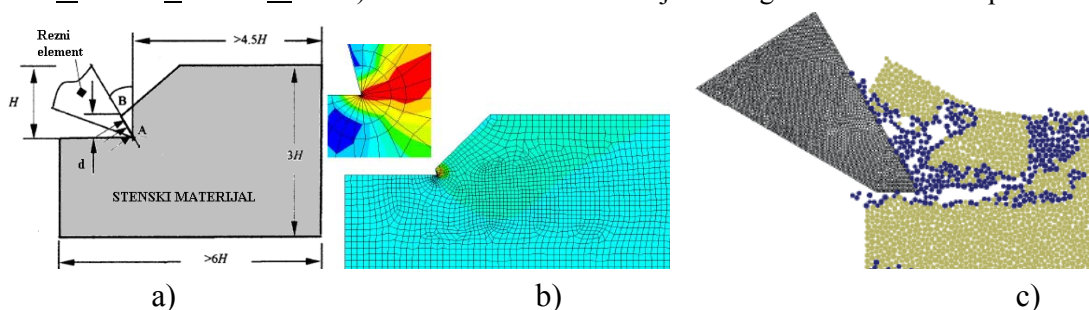
Slika 3. a) Položaj reznog elementa u odnosu na slobodan bok rezanja, b) Uticaj rastojanja reznog elementa od slobodnog boka na silu rezanja [3]

Analitički pristup. Analitički pristup bazira se na analizi reprezentativnih parametra procesa interakcije i sintezi njihovih međusobnih relacija (gustina, pritisna čvrstoća, napadni ugao rezanja, vrsta mašine, brzina rezanja i dr.). Analitički izrazi koji se definišu kao rezultat analize adekvatnog mehaničkog modela (slika 4.), definišu jedan parametar u funkciji od ostalih parametara koji se obuhvaćeni datim problemom. Na taj način, analizom procesa interakcije, dobija se zavisnost sile na reznom elementu u funkciji od karakteristika stenskog materijala, geometrije reznog elementa i tehnologije rada bagera.



Slika 4. Osnovni mehanički model rezanja reznim elementom u obliku klina [4]

Numerički pristup. Računari velikih brzina i komercijalni softveri omogućili su da se kroz različite numeričke metode razvijaju modeli koji će uzeti u obzir kompleksnu geometriju reznog elementa i ostale parametre koji se teško mogu obuhvatiti izrazima dobijenim iz empirijskog ili analitičkog pristupa. Numerički pristup može prevazići nedostatke predhodna dva, adekvatnim modeliranjem problema i dobijanjem podataka o svim bitnim faktorima kojima se opisuje proces interakcije (npr. zona razaranja, polje napona, pomeraj, brzina, ubrzanju itd.). Posmatrano sa stanovišta izračunavanja spoljašnjeg opterećenja reznog zuba, metod konačnih elemenata (*FEM - Finite Element Method*) i metod diskretnih elemenata (*DEM - Discrete Element Method*) su numeričke metode koje se mogu veoma efikasno primeniti (slika 5.).



Slika 5. a) Model interakcije reznog zuba i stenskog materijala, b) Analiza problema primenom metode konačnih elemenata [5], c) Analiza problema primenom metode diskretnih elemenata [6]

Sile koje prate proces kopanja, odnosno njihovi modeli, treba da povežu elemente kojima se opisuje tehnologija rada bagera, geometrija i kinematika reznog elementa i karakteristike iskopavanog materijala. Ponašanje bagera i reznog elementa obično se opisuje konstantnim parametrima i sistemom krutih tela. Sa druge strane, ponašanje i osnovne karakteristike iskopavanog materijala opisuju se na nekoliko različitih načina: primenom mehanike granularne (rastresite) sredine (kod koga se materijal modelira kao skupa partikularnih delova), mehanikom kontinuuma (međupraznine nisu uzete u obzir), dinamikom više tela (sa krutim ili deformabilnim telima), i modelom jasnog razdvajanja elemenata (ekstenzija metode konačnih elemenata koja dopušta diskontinuitete) [7]. Osnovni problem leži u spajanju ova dva modela, odnosno povezivanju bagera, reznog elementa i iskopavanog materijala u jedinstveni dinamički model sa skupom parametara koji se mogu identifikovati i na kraju relativno jednostavno dovesti do rešenja jednačine.

4. KRITIČKA ANALIZA NAVEDENIH PRISTUPA

Empirijski modeli, generalno imaju velike nedostatke da bi se primenili u egzaktnom određivanju opterećenja potrebnih za konstruisanje reznih elemenata. Osnovni nedostatak empirijskih modela je u tome što oni nemaju mogućnost da simuliraju širok dijapazon potreba, obzirom da postoji ograničena prilagodljivost modela. Takođe, nije definisano kakve su prirode sile koje su uključene u model. U izrazima nema (ili je veoma oskudno) osnovnih geotehničkih parametara kao što su unutrašnji ugao trenja i kohezija. Upotreba ove dve veličine je neophodna kako bi model mogao relativno jednostavno da reflektuje karakteristike stenskog materijala koje se mogu dobiti laboratorijskim merenjem uzorkovanog stenskog materijala. Važno je istaći i to, da pošto su modeli zasnovani na eksperimentima, validacija modela zavisi od toga koliko su slični razmatrani uslovi sa uslovima koji su bili pri izvođenju eksperimenta.

Pogodnosti upotrebe empirijskih izraza, leži u činjenici da se relativno lako može izračunati otpor rezanja, kao i da imaju zadovoljavajuću tačnost izračunavanja u ograničenim uslovima, kao što su uslovi eksperimenta. Analitički modeli prevazilaze ograničenja empirijskih izraza, međutim mogućnost njihove upotrebe za rešavanje problema opterećenja u procesu konstruisanja su takođe ograničene iz više razloga, od kojih su dva

važna. Prvo, modeli nisu u mogućnosti da daju adekvatan rezultat otpora rezanja za različite oblike reznog elementa. To je zato što se zasnivaju na reznom elementu koji najčešće ima oblik klina sa neograničenom širinom, što samo delimično ima sličnosti sa stvarnim oblicima reznih elemenata koji se koriste. Drugi važan nedostatak ovih izraza, leži u činjenici da modeli ne uzimaju u obzir razaranje stenskog materijala koje je nastalo usled drugih procesa. Većina analitičkih modela u obzir uzima samo mehanizam rezanja.

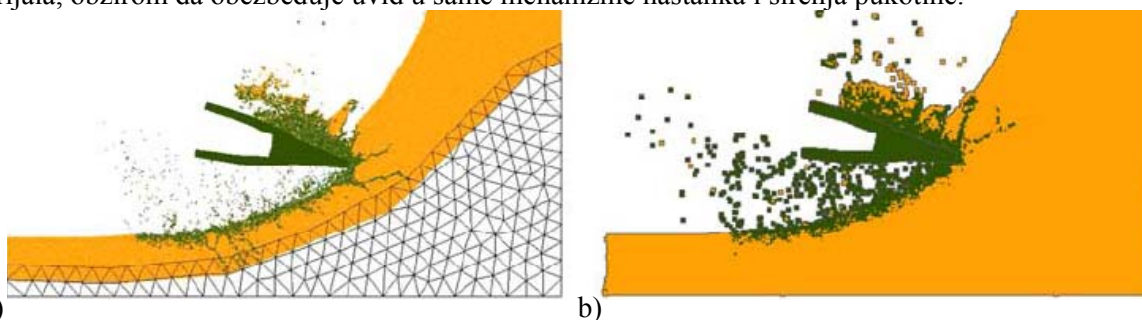
Prednost analitičkih modela je u tome što jasno prikazuju i opisuju sile koje se javljaju u procesu iskopavanja, zatim precizno definišu zonu razaranja, a u razmatranje mogu da uključe i odgovarajući položaj stenskog materijala u zahvatu. Navedeni modeli suštinski ne uzimaju u obzir mehanizme razaranja stenskog materijala, koji uključuju varijaciju napadnog ugla, uticaj vlažnosti, gustinu zemljišta i dr.

Nedostatak u primeni metode konačnih elemenata, odnosi se na rešavanje problema pukotine i razaranja, najviše zbog ograničenja u veličini konačnih elemenata, mogućnosti kontinualne promene diskretizacije usled pukotine, usklađenosti putanje pukotine i ivica konačnog elementa. Međutim, prevazilaženje ovih ograničenja, moguće je primenom funkcije diskontinuiteta oblika, koja se koristi u simuliranju nastanka pukotine i njenog rasta primenom teorije grananja. Metoda konačnih elemenata je računarski posmatrano veoma skupa. Potrebno je istovremeno rešavanje velikog broja jednačina kako bi se dobila odgovarajuća rešenja. Ako je problem nelinearan, vreme izračunavanje rapidno raste, zato što skup simulacionih jednačina treba rešiti više puta.

Uprkos navedenim nedostacima, metod konačnih elemenata se dosta koristi zbog mogućnosti generalizacije i fleksibilnosti u rešavanju heterogenosti, nelinearnosti i graničnih uslova stenskog materijala, sa veoma dobro razvijenim komercijalnim softverskim rešenjima, i njihovim relativno jednostavnim korišćenjem. Metoda konačnih elemenata je metoda koja može obezbediti korisne informacije za rešavanje problema površinske i podzemne eksploatacije. Moguće je izvoditi kako statičke, tako i dinamičke simulacije u 2D i 3D domenu. Jedna od najvećih prednosti korišćenja metode konačnih elemenata je u mogućnosti direktnog uključivanja geoloških informacija u analizu. Geometrijska kompleksnost, pravci različitih stenskih karakteristika i različite litološke celine povezane sa površinskom topologijom, zone lomova, zone uključaka, predhodna iskopavanje sa narušavanjem kontinua i dr., su parametri koje je moguće opisati u jednoj analizi pomoću metode konačnih elemenata.

Zbog svoje konceptualne privlačnosti u eksplicitnom predstavljanju pukotine, metoda diskretnih elemenata ima široku primenu u rešavanju problema kao što su: dinamika stena, rudarski radovi i problemi iskopavanja, lomovi i pukotine stenskog materijala, problemi kosina, laboratorijske test simulacije, konsolidacija stena, simulacije rezervoara, brizganje fluida, povezivanje napona i tečenja, stabilnost otvora i temelja, akustične emisije u stenskom materijalu, izračunavanje karakteristika razorenog stenskog materijala i dr. Obzirom da je metod diskretnih elemenata primenljiv na veliki broj problema, fleksibilan je i moćan alat za analizu diskontinualnog stenskog materijala, ipak ima nedostataka u njegovoj primeni kao standardnog metoda analize.

Osnovni nedostaci se odnose na obezbeđivanje svih potrebnih podataka o lokaciji koja se analizira, kao što su tačna orijentaciji i postojanost diskontinuiteta. Tu je takođe nepostojanje dovoljno informacija o ponašanju materijala u kontaktu kao i na koji način definisati prigušenje sistema. Sa druge strane, ova metoda zahteva značajno vreme za izračunavanje čak i jednostavnih problema. Ipak, metoda diskretnih elemenata predstavlja veoma koristan alat u analizi problema deformacije i razaranja grupisanog stenskog materijala, obzirom da obezbeđuje uvid u same mehanizme nastanka i širenja pukotine.



Slika 6. Simulacija razaranja stenskog materijala reznim zubom a) DEM/FEM model b) DEM model [10]

Zbog svojih pojedinačnih prednosti, ali i nedostataka, u rešavanju praktičnih problema, često se koriste hibridne metode (slika 6.). Hibridne metode kombinuju FEM i DEM metodu, kako bi se iskoristile njihove prednosti, a ujedno eliminisali nedostaci.

5. ZAKLJUČAK

U procesu konstruisanja reznih zuba za begere kontinualnog dejstva, odnosno u fazi njihovog dimenzionisanja, neophodno je poznavanje spoljašnjeg opterećenja. Pošto je spoljašnje opterećenje funkcija

iskopavanog stenskog materijala, tehnologije rada bagera, oblika i položaja reznog elementa u zahvatu i dr., to je potrebno povezati ove parametre u odgovarajuće modele na bazi kojih bi se izračunalo opterećenje. Povezivanje se može izvršiti primenom empirijskog, analitičkog ili numeričkog pristupa.

Empirijski model se kreira pomoću velikog broja izvedenih eksperimenata, uglavnom laboratorijskih. Bez obzira što se u toku kreiranja ovakvog modela ispita veliki broj uzoraka, njegova primena je parcijalna zbog ograničenja koja se javljaju u opisu širokog opsega mogućih varijacija procesa interakcije. Sa druge strane, analitički model može uzeti u obzir i ove varijacije, ali može opisati samo jednostavne slučajeve, kao što je primer oštrice reznog elementa beskonačne širine, klinasti oblik alata itd. Takođe u okviru analitičkih modela, definišu se polazne pretpostavke, koje na samom početku analize dovode do značajnih razlika u odnosu na realne uslove interakcije. Numerički modeli omogućavaju uključivanje velikog broja parametara, kojima se definiše problem interakcije, i ukoliko se obezbedi adekvatan opis problema, mogu dati zadovoljavajuće rezultate izračunavanja opterećenja reznog zuba. Takođe, svaki numerički model se mora na neki način verifikovati, što predstavlja značajno ograničenje.

Uprkos velikom napretku u raznovrsnosti i kompleksnosti opisa problema kopanja, generalno se nije puno odmaklo u rešenjima. I danas, praksa u procesu konstruisanja reznih elemenata za procese kopanja, prvenstveno se zasniva na različitim empirijskim znanjima. Međutim, za primenu sistemskog pristupa u procesu konstruisanja, treba naći optimalno rešenje. Takvo rešenje treba da bude između potrebe da se proces izračunavanja opterećenja pojednostavi i potrebe da se u uzme u obzir što veći broj parametara koji imaju uticaj na vrednost opterećenja. Takav pristup bi se mogao zasnivati na primeni jednog jednostavnog analitičkog modela, koji bi služio za dobijanje nominalnog opterećenja, koje bi se zatim korigovalo odgovarajućim koeficijentima dobijenim empirijskim pristupom. Za proveru i ocenu konstrukcionog rešenja reznog zuba, mogao bi se primeniti numerički pristup, baziran na hibridnoj primeni metode konačnih elemenata i metode diskretnih elemenata.

6. ZAHVALNOST

Rezultati izneti u okviru ovog rada su deo projekta naučno tehnološkog razvoja br. TR35037, pod nazivom „Razvoj nove konstrukcije kašike bagera kontinualnog dejstva u cilju integrisanja modularnih reznih elemenata“, finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

7. LITERATURA

- [1] Kunze, G., Göhring, H., Jacob, K., Baumaschinen . Erdbau- Und Tagebaumaschinen (Fördertechnik Und Baumaschinen), Vieweg Verlag, Germany, 2002.
- [2] Karmakar, S., Kushwaha Lal, R., Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective, Journal of Terramechanics, No.43, pp.411-425, 2006.
- [3] Jovanović, P., Mehanički postupci razaranja stena pri izvođenju rudarskih radova, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1980.
- [4] McKyes, E., Agricultural Engineering soil mechanics, Elsevier Science Publishers, New York, US, ISBN 0-444-88080-1, 1989.
- [5] Yang S., Simulation of Rock Cutting by the Finite Element Method, Shanghai Branch of China Coal Research Ins., China, 2004.
- [6] Rojek, J., Discrete element modelling of rock cutting, Com. meth. in material science, Vol.7, No.2, 2007.
- [7] Gavrilov, D., Discrete mechanics of granular matter, PhThesis, University of Calgary, Canada, 1999.
- [8] Popović, M., Istraživanje i razvoj dvodelne konstrukcije zuba kod rotornih bagera, Magistarski rad, Tehnički fakultet, Čačak, 2007.
- [9] Popović, M., Jugović, Z., Slavković, R., Grujović, N., Milićević, I., Borota, J., Integrated approach of cutting teeth design for excavator of continual action, VII Int. Conf. HM2011, Serbia, pp.89-98, 2011.
- [10] Labra, C., Rojek, J., Onate, E., Zarate, F., Advances in discrete element modelling of underground excavations, Acta Geotechnica, Vo.13., pp.317-322, 2008.

ANALYSIS OF STANDARD APPROACHES FOR CALCULATION OF CUTTING TEETH LOAD FOR EXCAVATORS IN OPEN PIT MINES

Abstract:

This paper gives a review of standard approaches for static modeling of the interaction process of cutting teeth and excavation material. Besides, paper gives an analysis of their potential application in the design of cutting teeth for excavators in open pit mines.

Dragoljub Veličković¹, Svetislav Lj. Marković², Zaviša Đurović³, Maid Kajević⁴

JEDNA MOGUĆNOST MODELIRANJA TAČNOSTI IZRADE EKSPANZIONE CEVI

Rezime:

Ekspanziona cev radi kao zatezna ili pritisna opruga u zavisnosti od znaka razlike pritisa, koji deluju na njene krajeve. Ekspanzione cevi se postavljaju na cevovode radi kompenzacije temperaturnih izduženja. Služe i kao elastični razdvajajući sredina i kao gipki zaptivni uređaji, a takođe mogu biti osetljivi elementi davača koji registruju razliku pritisa gasova ili tečnosti. Model, prikazan u ovom radu bazira se na analizi strukturnih shema, metodama teorije verovatnoće, matematičke statistike i matricne algebre.

Ključne reči: ekspanziona cev, matematički model, tačnost izrade.

1. UVOD

Ekspanziona cev, ili ekspanzioni spoj (Rusi ga nazivaju siljfon, a naziv je dobio po proizvođaču, firmi Sylphon) je tankozida cev od nerđajućeg čelika, mesinga, fosfatne ili berilijeve bronzne sa talasastim poprečnim presekom. Za spoljašnje prečnike od 10 do 100 mm ekspanzioni spoj se izrađuje od celih cevi, a za prečnike do 2 m mogu biti izrađeni zavarivanjem više elemenata. Ekspanziona cev je metalni cilindar sa tankim zidom. Pod dejstvom unutrašnjeg pritiska, koncentrisane sile ili momenta savijanja cev se može izdužiti, skratiti ili saviti.

Zavisno od radnog pritiska, ekspanzione cevi mogu biti:

- ✓ jednoslojne (slika 2.a), za rad pod pritiskom do 1MPa,
- ✓ višeslojne (slika 2.b) - za pritisak do 30 MPa,
- ✓ armirane spoljašnjim metalnim prstenovima (slika 2.v) – za pritisak do 10 MPa pa i više.



Slika 1. Silfon – ekspanziona cev

Primena ekspanzionih cevi je mnogostruka. Mogu se koristiti za:

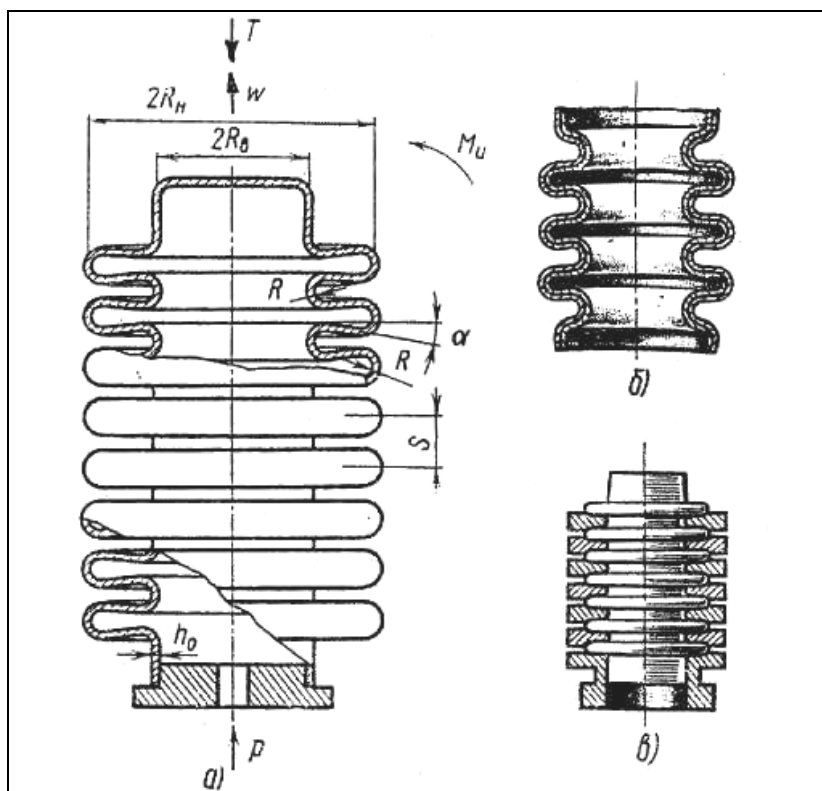
- merenje pritiska ili sile (slika 3.a),
- hermetizaciju pokretnih delova (slika 3.b),
- spajanje dveju cevi (slika 3.v).

¹ Mr **Dragoljub VELIČKOVIĆ**, REIK „Kolubara“, Dimitrija Tucovića 7/2, Lazarevac, Srbija, E-mail: dragoljub.velickovic451@gmail.com

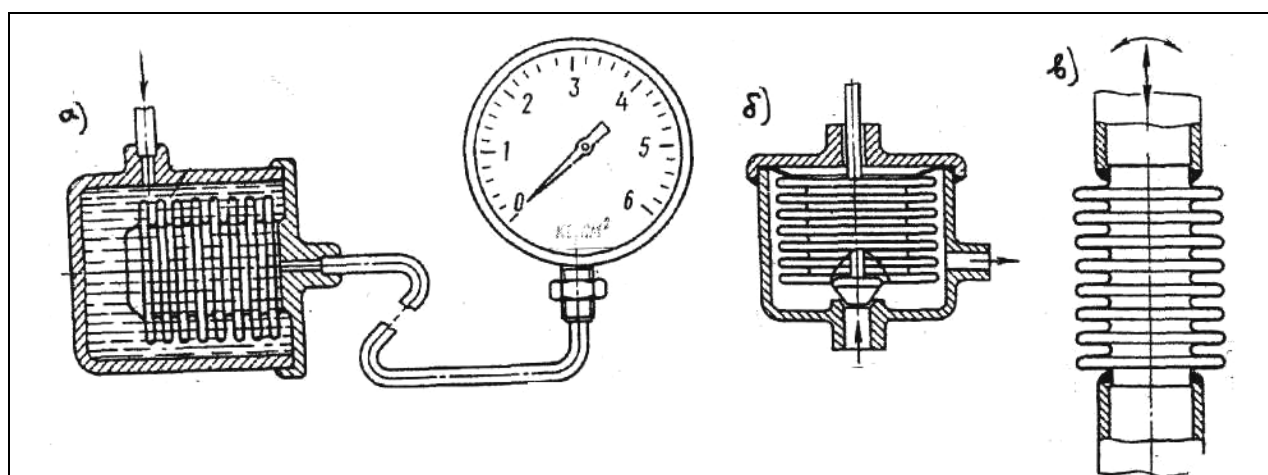
² Dr **Svetislav Lj. MARKOVIĆ**, profesor, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, 32000 Čačak, Svetog Save 65, Srbija, E-mail: svetom@open.telekom.rs.

³ **Zaviša ĐUROVIĆ**, maš. ing., Rudnik uglja AD, RJ „Održavanje“, Pljevlja, Crna Gora, E-mail: infotehnika@t-com.me

⁴ **Maid KAJEVIĆ**, maš. ing., Prijepolje.



Slika 2. Tipovi ekspanzionih cevi



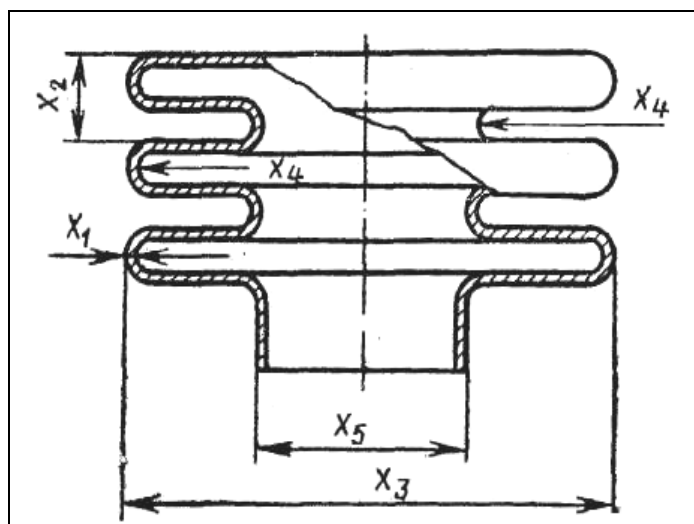
Slika 3. Primeri primene ekspanzionih cevi

Linearna ω i ugaona deformacija φ , debljina zida h_0 , ugaoni nagib rebra α pri dejstvu pritiska p , sile u osi T ili momenta uvijanja M_u , mogu se izračunati prema obrascima datim u literaturi [1].

2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

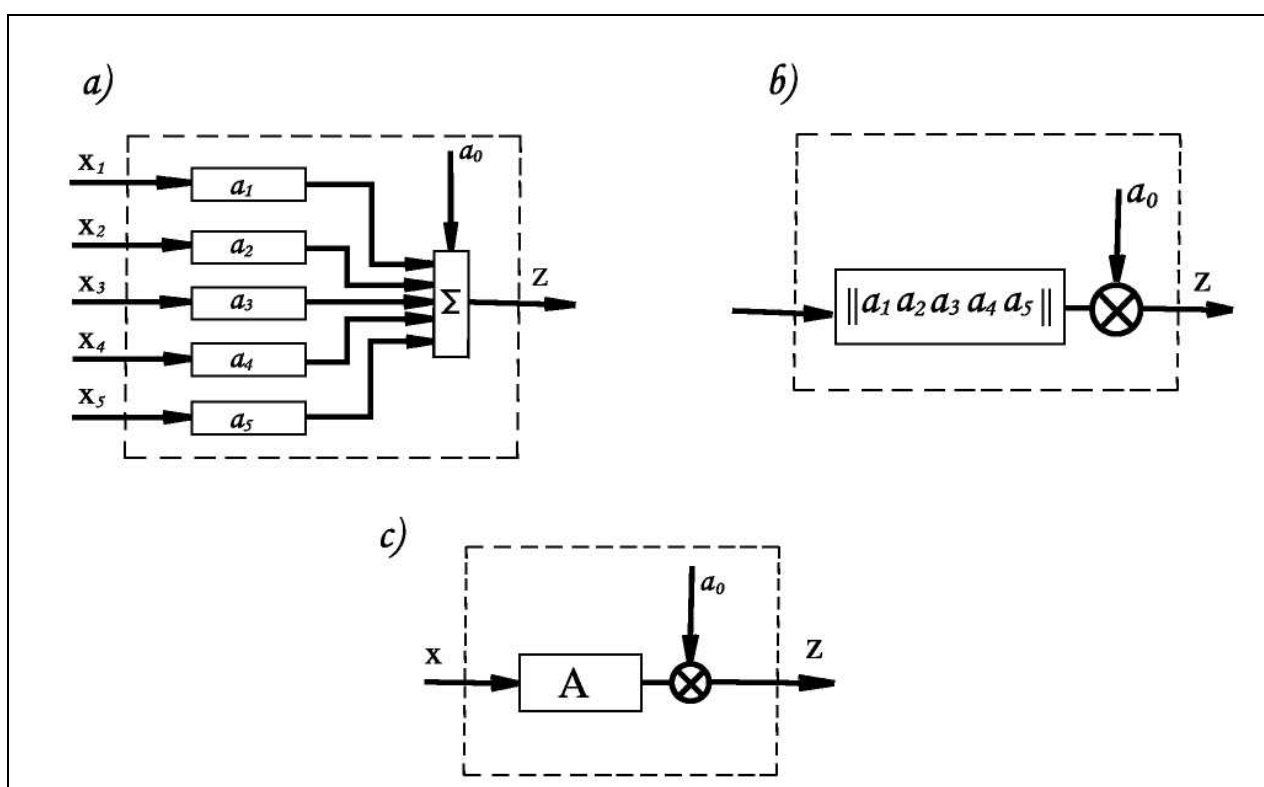
Za rešavanje uvek aktuelnog problema tačnosti izrade proizvoda veliki značaj može imati razrada matematičkog modela zakonomernosti i uzajamne veze tehnoloških procesa. Pravilno postavljen matematički model daje mogućnost ne samo prognoziranja tačnosti svake od operacija tehnološkog procesa, nego i argumentovan pristup razradi optimalnog sistema automatskog upravljanja tim procesima.

Model, prikazan u ovom radu bazira se na analizi strukturnih shema, metodama teorije verovatnoće, matematičke statistike i matrične algebre. Ulazne veličine $X_1 - X_5$ su geometrijski parametri ekspanzione cevi, prikazane na slici 4, a izlazne veličine Z – elastične karakteristike cevi (pre svih - čvrstoća).



Slika 4. Računski geometrijski parametri ekspanzije cevi

Na slici 5 predstavljena je strukturna šema za razmatrani primer.



Slika 5. Shema uzajamne veze geometrijskih parametara ekspanzije cevi i njene čvrstoće: **a** - strukturna shema, **b** i **c** - ekvivalentne matrice sheme u razvijenom i kompaktnom obliku

Matrična jednačina veze Z sa X_i ima sledeći oblik:

$$Z = a_0 + A \cdot X \quad A = \parallel a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \parallel \quad X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Matrična jednačina, koja daje vezu verovatnosnih karakteristika Z i X_i je:

$$M_Z = a_0 + A \cdot M_X \quad (\text{matrično očekivanje})$$

$$D_Z = B \cdot D_X \quad (\text{disperzija})$$

(2)

gde su:

$$B = \begin{pmatrix} a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & a_4^2 & a_5^2 \end{pmatrix},$$

$$M_X = \begin{pmatrix} m_{X_1} \\ m_{X_2} \\ m_{X_3} \\ m_{X_4} \\ m_{X_5} \end{pmatrix}, \quad D_X = \begin{pmatrix} D_{X_1} \\ D_{X_2} \\ D_{X_3} \\ D_{X_4} \\ D_{X_5} \end{pmatrix}$$

3. REZULTATI MATEMATIČKOG MODELIRANJA

Za određivanje koeficijenata $a_1 - a_5$ i parametra a_0 ispitano je 216 ekspanzionih cevi.

Eksperimentalni podaci su obrađeni korelacionim metodama, a rezultati obrade tačnosti i uzajamna veza grešaka geometrijskih parametara i čvrstoće cevi 50x6x0,15 mm, dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Koeficijenti korelacije i korelacioni odnosi za karakteristične geometrijske parametre ekspanzionih cevi

Parametri ekspanzione cevi		Srednja vrednost x_i, Z	Srednje kvadratno odstupanje $\sigma_{x_i}^*, \sigma_Z^*$	Koeficijenti korelacije i korelacioni odnosi	
				r_{zx_i}	η_{zx_i}
Debljina cevi	x_1	0,1196	0,00228	0,423	0,470
Korak rebra	x_2	3,9186	0,03125	0,388	0,399
Najveći spoljni prečnik	x_3	51,826	0,12990	- 0,328	0,361
Radijus zaobljenja	x_4	0,9447	0,07815	- 0,300	0,316
Najmanji spoljni prečnik	x_5	37,748	0,08285	- 0,197	0,270
Čvrstoća	Z	1083,6	68,6	1	/

Koeficijenti regresije računati su po formulama:

$$a_i = \frac{r_{zx_i} \cdot \sigma_Z^*}{\sigma_{x_i}^*} \quad a_0 = Z - \sum_{i=1}^5 a_i \cdot \bar{X}_i$$

Izračunate vrednosti su:

$$a_1=12719$$

$$a_2=851$$

$$a_3=-173$$

$$a_4=-264$$

$$a_5=-163$$

$$a_0=11601.$$

Ukoliko zamenimo nađene vrednosti a_i i a_0 u (2), dobijamo traženi matematički model u obliku matričnih jednačina:

$$M_Z = 11601 \begin{vmatrix} 12719 & 851 & -173 & -264 & -163 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} m_{X_1} \\ m_{X_2} \\ m_{X_3} \\ m_{X_4} \\ m_{X_5} \end{vmatrix},$$

$$D_Z = \begin{vmatrix} 161780592 & 724541 & 29998 & 69484 & 26536 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} D_{X_1} \\ D_{X_2} \\ D_{X_3} \\ D_{X_4} \\ D_{X_5} \end{vmatrix}.$$

Koeficijent višestruke korelacije se računa po obrascu:

$$R_{Z(X_1, \dots, X_5)} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 r_{ZX_i}^2}$$

Ukoliko uzmemo podatke iz tabele 1, dobijamo:

$$R_{Z(X_1, \dots, X_5)} = \sqrt{0,423^2 + 0,388^2 + (-0,328)^2 + (-0,300)^2 + (-0,197)^2} = 0,752$$

Da bi odredili uticaj faktora na tačnost elastičnih karakteristika ekspanziona cevi opštu disperziju σ_Z^{*2} grešaka izlaznih veličina Z , razložimo na dva sabirka:

$$\sigma_Z^{*2} = \sigma_{Z(X_1, \dots, X_5)}^{*2} + \sigma_{\bar{Z}(X_1, \dots, X_5)}^{*2}$$

gde je:

$$\sigma_{Z(X_1, \dots, X_5)}^{*2} = \sigma_Z^{*2} (1 - R_{Z(X_1, \dots, X_5)}^{*2}) \quad (3)$$

- disperzija koja daje ukupan uticaj svih faktora na nestabilnost svojstva materijala ekspanziona cevi;

$$\sigma_{\bar{Z}(X_1, \dots, X_5)}^{*2} = \sum_{i=1}^5 a_i \cdot \sigma_{X_i}^{*2} \quad (4)$$

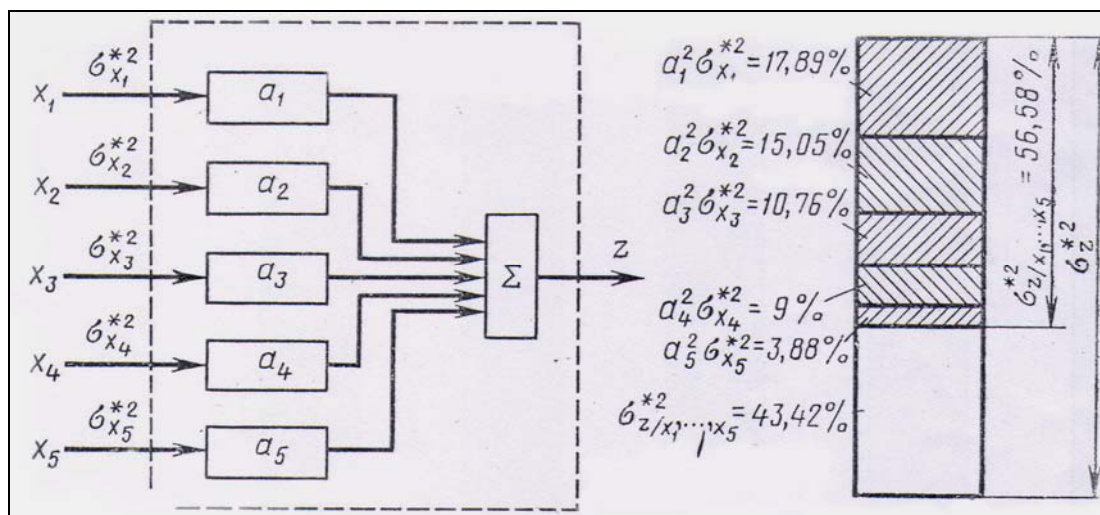
- disperzija usled grešaka geometrijskih parametara.

Ukoliko se u jednačinama (3) i (4) zamene brožane vrednosti σ_Z^{*2} , $\sigma_{X_i}^{*2}$, a_i i $R_{Z(X_1, \dots, X_5)}$ dobija se ukupna disperzija elastičnih karakteristika ekspanziona cevi, uslovljena uticajem grešaka izlaznih faktora:

$$\sigma_{Z(X_1, \dots, X_5)}^{*2} = 68,6^2 \cdot (1 - 0,752)^2 = 2044$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{Z}(X_1, \dots, X_5)}^{*2} &= 12719^2 \cdot 0,00288^2 + 851^2 \cdot 0,03125^2 + (-173)^2 \cdot 0,1299^2 + \\ &+ (-264)^2 \cdot 0,07815^2 + 163^2 \cdot 0,08285^2 = 2662 \end{aligned}$$

Na slici 6 prikazan je pojedinačan udeo grešaka geometrijskih parametara u odnosu na uticaj svih faktora na elastične karakteristike ekspanziona cevi.



Slika 6. Pojedinačni uticaj grešaka geometrijskih parametara na čvrstoću ekspanzione cevi

4. ZAKLJUČAK

U radu je razmatrano matematičko modeliranje i proračun tačnosti tehnološkog procesa, kao stohastičkog procesa uz primenu slučajnih funkcija.

Za definisanje slučajne funkcije potrebno je da se proračunaju matematičko očekivanje, disperzija i korelaciona funkcija, čime je omogućen dinamički aspekt analize.

Modeliranje se sastoji od nekoliko etapa, na primer: u prvoj etapi se vrši izbor značajnih tehnoloških faktora. Izbor, opis i sistematizacija faktora (polazeći od ciljeva) moraju biti jasni, merljivi kao i granice promena u vremenu i prostoru.

Pri stvaranju strukturne šeme i matematičkog modeliranja treba uzeti u obzir hipoteze i ograničenja: tehnološki proces posmatramo kao statističku transformaciju sistema; ulazne i izlazne promenljive (greške obrade) opisane su vektorskim slučajnim veličinama; transformacija sistema je linearna ili linearizirana, pri čemu je primenjen princip superpozicije.

Sledeća etapa modeliranja jeste prelazak na stohastički model koji se odlikuje korišćenjem teorije verovatnoće i statističkom obradom rezultata dobijenih eksperimentalnim putem.

Najveći uticaj na čvrstoću ekspanzione cevi ima greška debljine zida ($\approx 18\%$), a najmanji uticaj ima unutrašnji prečnik ($\approx 4\%$).

5. LITERATURA

- [1] Borisov S. M.: *Rasčet i konstruirovanie mehaničeskikh sistem priborov*, "Mašinstroenie", Moskva, 1981.
- [2] Vencelj E. C.: *Teorija verovatnostej*, Izdateljstvo "Nauka", Moskva, 1969.
- [3] Gavrilov A.N.: *Napravljenija razvitija tehnologii priborostroenija*, "Mašinstroenie", Moskva, 1973.
- [4] Lukomskij Ja. M.: *Teorija korreljacii i ee primenenie k analizu proizvodstva*, Gostehizdat, Moskva, 1971.

MODELING ACCURACY OF PRODUCTION OF THE EXPANSION TUBE – ONE POSSIBILITY

Abstract:

Expansion joint works as tensile or compressive spring, depending on the sign of the pressure difference, which act on its edges. Expansion tubes are placed in pipelines to compensate for temperature elongation. They serve as flexible environment dividers as well as flexible sealing devices, and can also be sensitive elements of sensors, which register the difference of pressure of gases or liquids. The model, presented in this paper, is based on an analysis of the structural schemes, the theory of probability, mathematical statistics and matrix algebra.

Key words: pipe expansion, mathematical model, accuracy of production

Acknowledgment

This work has been performed within the project TR 35011. This project is supported by the Republic of Serbia, Ministry of Science and Technological Development, which financial help is gratefully acknowledged.

Srđan Trivković, Ognjen Peković, Nikola Petrašinović, Marija Stanojević¹

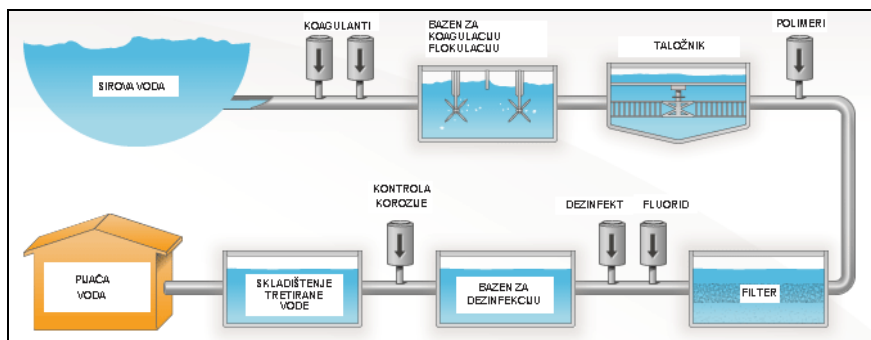
PRIMENA NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA U PROJEKTOVANJU SAVREMENIH OPITNIH POSTROJENJA ZA TRETMAN PIJAĆE VODE²

Rezime:

U radu je opisan postupak softverskog modeliranja opitnih kolona za uporednu simulaciju više procesa u okviru savremenih tretmana pijaće vode. Izrada CAD modela je izvršena za potrebe naponsko deformacione analize i kasnije izrade projektne dokumentacije kolona. Upotreba naprednih softverskih alata je u značajnoj meri olakšala projektovanje segmentnih kolona, netipične geometrije, sa širokim spektrom radnih režima. Projektovanje i izrada modela je izvršena prema definisanim zahtevima korisnika sa ciljem što lakšeg prilagođenja različitim eksploatacionim zahtevima. Promenom primarnih konstruktivnih parametara na postojećem CAD modelu moguća je brza adaptacija kolona za implementaciju u postrojenjima sličnoga tipa i namene.

1. UVOD

Pod preradom vode se podrazumevaju procesi u okviru kojih se kvalitet vode prilagođava zahtevima krajnjeg korisnika. Jedan od najrasprostranjenijih industrijskih procesa prerade je prerada u cilju dobijanja pijaće vode. Industrijska prerada pijaće vode, u zavisnosti od stepena njenog zagađenja i zahteva korisnika, može biti veoma složen i zahtevan proces. Definisane tretmana i izbor tehnologije prerade pijaće vode zavisi od kvaliteta sirove vode. Sve strožiji zahtevi u tretmanima pijaće vode, koji se sprovode kroz definisane zakonske regulative, propise, normative i standarde, nameću konstantno usavršavanje i unapređenje tehnologija tretmana. Usled navedenog, kao i kompleksnosti industrijskog procesa dobijanja pijaće vode, obično je neophodno izvršiti niz studija i ispitivanja na mikro nivou u cilju dobijanja relevantnih procesnih podataka. Ovakve mikro simulacije zahtevaju kompaktna laboratorijska postrojenja, lako prilagodljiva, jednostavna za upotrebu i prilagođena trenutnom stanju tehnike.



Slika 1. Tipičan proces industrijske prerade pijaće vode

U ovom radu je detaljno opisan postupak modeliranja mašinskih segmenata laboratorijskog postrojenja, specifičnih konstruktivnih zahteva, koje se koristi za simulaciju nekih od procesa u toku tretmana pijaće vode industrijskih postrojenja. U cilju efikasnog projektovanja i sprovođenja celokupnog

¹Srđan Trivković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: strivkovic@mas.bg.ac.rs

Ognjen Peković dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: opekovic@mas.bg.ac.rs

Nikola Petrašinović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail:

npetrašinovic@mas.bg.ac.rs

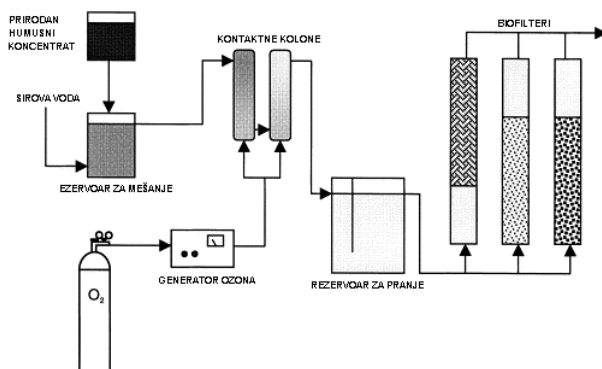
mr Marija Stanojević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: mstanojevic@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

projekta razvoja navedene opitne strukture, uključujući izradu komponenti, neophodno je upotrebiti savremene CAD softverske pakete u svim fazama razvoja opitnih kolona kao primarnog segmenta laboratorijskog postrojenja. Pri tome je potrebno pravilno definisati i odabrati konstruktivne parametre čijim promenama je moguće uticati na krajnju konstrukciju u cilju postizanja funkcionalnosti i tehnološkičnosti. Na ovaj način se omogućava fleksibilnost modela koja je značajna za realizovanje kasnijih eksploatacionih modifikacija u skladu sa čestim izmenama procesa tretmana. Promenom pravilno izabranih parametara vezanih za oblik kolona obezbeđuje se zahtevana funkcionalnost konstrukcije.

2. KONSTRUKTIVNI ZAHTEVI

Osnovna namena opitnih kolona je uporedno simuliranje više procesa u okviru tretmana vode: pred-ozonizaciju i glavnu-ozonizaciju, adsorpciju aktivnim ugljem i dezinfekciju i sterilizaciju. Struktura kolona je projektovana tako da tehnološki odgovara strukturi velikogabaritnih rezervoara-tankova, industrijskih postrojenja, u okviru kojih se vrše navedeni tretmani. Konstruktivne karakteristike bi trebalo da budu prilagođene funkciji rezervoara a da ujedno budu i kompaktne, jednostavne za upotrebu i jednostavne za montažu i demontažu. Takođe, potrebno je omogućiti jednostavno i precizno očitavanje izmerenih vrednosti u širokom spektru radnih režima kao i dug eksploatacioni period uz minorna održavanja. Kolone je sa cevnim i elektro instalacijama potrebno spojiti sa procesnom opremom u zatvoren sistem sa mogućnošću selektivnog i paralelnog ispitivanja definisanog tretmana vode.



Slika 2. Šematski prikaz pilot postrojenja za ozonizaciju i biofiltraciju

Zbog zahteva korisnika za povećanom čvrstoćom i povećanom otpornošću na koroziju u odnosu na postojeća laboratorijska postrojenja ovakve namene izrađene isključivo od polivinil hlorida (PVC) pristupilo se projektovanju novog laboratorijskog postrojenja.



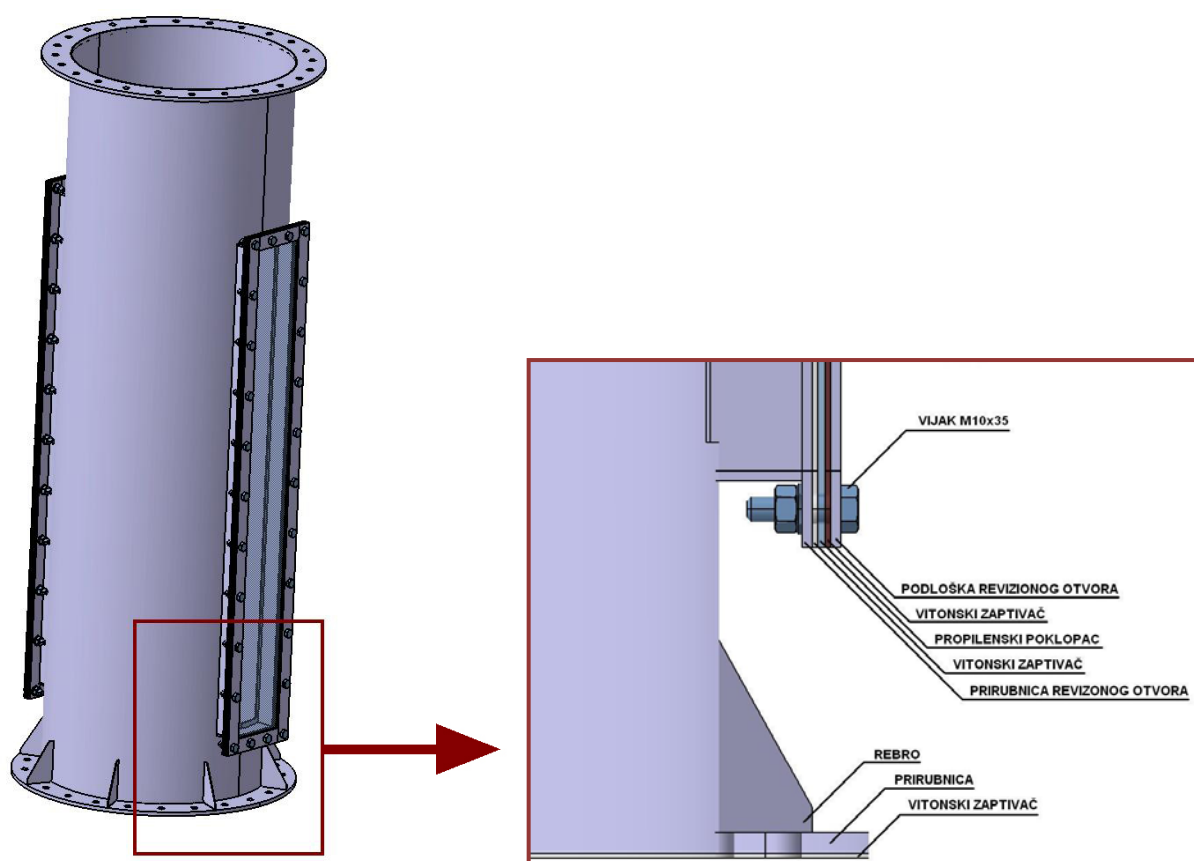
Slika 3. Laboratorijska postrojenja za tretman vode sa kolonama od polivinil hlorida

Materijali kolona su izabrani na osnovu izvršene softverske naponsko-deformacione analize u skladu sa zahtevima procesa. Kolone su projektovane i izrađene od nerđajućeg čelika visokog kvaliteta sa revizionim otvorima od providnog propilena čime je omogućena simulacija definisanog tretmana pri povišenim pritiscima koji se javljaju kao posledica uvođenja novih tehnologija. U cilju lakšeg transporta i brže i jednostavnije montaže i demontaže, konstrukcija je projektovana od sekcija malih visina, minimalnih debljina plašta za date radne uslove, koje su međusobno, kao i sa dovodnim i odvodnim vodovima spojene

jednostavnim priрубničkim vezama. Posebna pažnja pri projektovanju kolona i izradi 3D modela poklonjena je upotrebi standardizovanih polufabrikata i gotovih delova u cilju pojednostavljenja izrade i smanjenja cene.

3. IZRADA 3D MODELA OPITNIH KOLONA

Modeliranje složenog sklopa kakvo je laboratorijsko postrojenje za simulaciju tretmana prerade pijaće vode i njegovih podsklopova zahteva detaljno planiranje pre početka projektovanja i pre same izrade 3D modela. Porebno je odrediti glavne podsklopove kako samog postrojenja tako i opitnih kolona sa svim delovima i njihove pozicije u stablu specifikacije modela tako da kasnije izmene i dorade budu jednostavne uz minimalno intervenisanje sa vezanim delovima.



Slika 4. 3D model prve sekcije opitnih kolona i njeni sastavni delovi

Nakon usvajanja idejnog rešenja, detaljno modeliranje kolona je realizovano primenom modula, Part Design, za modeliranje mašinskih delova i instalacija programskog paketa CATIA V5. Delovi su zatim sastavljeni u Assembly Design modulu čime su omogućene jednostavne izmene i modifikacije. Prvobitno konceptualno rešenje strukture je parametarski projektovano prema postavljenim zahtevima i ograničenjima, koja su nametnuta zahtevima procesa. Parametrizacijom je omogućeno lako modifikovanje konstrukcije u cilju postizanja jednostavnije izrade i smanjenja broja potrebnih delova. Do usvajanja optimalnog rešenja se dolazi nakon odabira optimalnih materijala i njihovih dimenzija u skladu sa tehnološkim zahtevima i naponsko-deformacionom analizom izvršenom u više iteracija. Projektovanje više sličnih konstrukcija, različitih namena, prema zahtevima novih laboratorijskih postrojenja je takođe olakšano lakom modifikacijom sekcija.

Delovi kolona su proizvedeni u potpunosti prema projektnoj dokumentaciji dobijenoj na osnovu izrađenih 3D modela koji su eksportovani u modul Drafting, predviđen za izradu tehničkih crteža, u okviru paketa CATIA V5. Delimična pojednostavljanje i skraćanje vremena proizvodnje navedenih kolona i sličnih konstrukcija je vrlo lako moguća prosleđivanjem modela delova iz CATIA V5 preko standardnog interfejsa do CNC postprocesora i do obradnog centra.



Slika 5. Tipične sekcije opitnih kolona izrađene na osnovu 3D modela

4. ZAKLJUČAK

Projektovanje i proizvodnja mašinskih sklopova i podsklopova laboratorijskih postrojenja za tretmane vode predstavlja dugotrajan proces i usko je povezan sa ostalim elementima postrojenja. U radu je predstavljeno projektovanje tri segmentne opitne kolone, kao ilustrovan primer kako složenosti procesa, tako i primene CAD/CAM tehnologija i integrisanih softvera, koji donose do značajnog povećanja efikasnosti u projektovanju, reprojektovanju, optimizaciji delova i njihovoj proizvodnji. Dobar modularni dizajn i detaljno planiranje pre početka samog projektovanja, odnosno modeliranja sklopova, podsklopova i delova su od velikog značaja za uspeh celokupnog projekta nivoa složenosti laboratorijskih postrojenja za simulaciju tretmana pijaćih voda. Prednosti vezane za ovakav pristup projektovanju su brojne: ušteda ljudskih i tehničkih resursa, znatno olakšane promene konstrukcije, mogućnost vrlo detaljnih analiza delova pojedinačno i u celinama itd.

Integracija naprednih softverskih alata kakvi su CAD alati značajno olakšava i skraćuje potrebno vreme za pripremu projektne dokumentacije za proizvodnju. Ukoliko bi se delovi navedenih opitnih kolona proizvodili na naprednim CNC mašinama sa mogućnošću automatizacije, gde za to postoji mogućnost, vreme potrebno za generisanje projektne dokumentacije kojom se definiše tehnologija proizvodnje bi bilo svedeno na minimum. Ovakvom CAD/CAM integracijom bi takođe bila moguća proizvodnja delova visoke tačnosti i kvaliteta.

5. LITERATURA

1. CATIA V5 User's Documentation, Dassault Systemes, 2003.
2. Cheremisinoff N., Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies, ISBN 0-7506-7498-9, 2002
2. Bogner M., Stanojević M., O vodama, teorija, propisi i primeri iz prakse, ISBN 86-85361-05-2, 2006
3. Wynn C., Kirk B., McNabney R., Pilot plant for tertiary tretment of wastewater with ozone, EPA-R2-73-146, 1973
4. Water treatment handbook, Seventh edition, ISBN 978-2-7430-0970-0

DESIGNING OF MODERN POTABLE WATER TREATMENT PILOT PLANT USING ADVANCED SOFTWARE TOOLS

Abstract:

This paper presents computer modeling of test columns for comparative simulation of multiple processes within modern potable water treatments. CAD model development was done for columns stress-strain analysis and subsequently for design documentation preparation. The use of advance software tools made the design process of segment columns with atypical geometry significantly easier for wide working conditions ranges. Design process and model development were carried according to defined user requirements in order to meet different exploitation conditions. With changes of primary design parameters on existing CAD model, it's possible to make adjustments of columns for implementation in plants of similar type.



Dušan Laković, Sreten Savićević, Milan Vukčević, Mileta Janjić

ANALIZA STEZAČA KRANSKIH ŠINA

Rezime:

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalne analize stezača kranskih šina. Glavna funkcija ovih elemenata obezbeđuje otpor prema okretanju šine oko ose, a koristi se i za pričvršćivanje šina oznake A65 za kranove u elektrolizi Kombinata aluminijuma u Podgorici. Rezultati će biti objašnjeni faktorima čiji su uticaji signifikantni.

1. INTRODUCTION

U jednoj organizovanoj proizvodnji prisutno je neprekidno pomjeranje materijala u toku radnih operacija (u industriji, građevinarstvu itd.). Za ovu svrhu koriste se transportne mašine koje imaju nezamjenljivu ulogu za transport različitih vidova tereta. Kranovi kao transportne mašine za svoje kretanje najčešće koriste šine i kranske staze. Za njihovu vezu koriste se stezaljke koje prenose bočna opterećenja sa šine na kransku stazu. Pri modeliranju ovakvih struktura – stezaljki, brojni izvori njihovog opterećenja moraju biti uzeti u obzir kao i za bilo koju strukturu. Osnovna funkcija ovih stezaljki je obezbeđenje veze protiv prevrtanja šina tj. preuzimanje bočnih sila kojim su izložene. Veličina bočnih sila zavisi od više faktora kao što su: nazivna nosivost kрана, raspon mosne dizalice, glavna brzina dizanja, nazivna brzina dizanja, masa dizalice itd. [1]

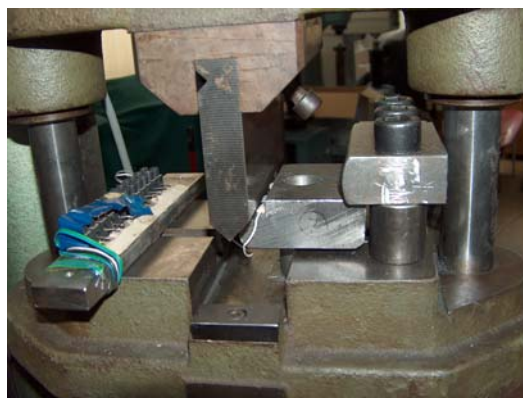
Stezaljka koja je tema eksperimentalne analize primijenjena je u elektrolizi KAP – a za vezu šine A65 i kranske staze. Kran radi u sve tri smjene tj. 24 sata pri čemu mora da dva puta izvrši: postavljanje (zamjenu anoda u ćelijama), punjenje bunkera glinicom iz silosa, doziranje glinice, probijanje kore u ćelijama, vađenje metala iz ćelija pomoću lonca sa usisnom cijevi i čišćenje i čupanje djelova ćelija. Pri probijanju kore ćelije javljaju se oscilacije koje su posebno izražene kod glavnih greda. Pri ovoj tehnološkoj operaciji nivoi opterećenja i napona u konstrukciji nijesu kritični ali zbog svog dinamičkog karaktera izazivaju pojavu zamaranja materijala konstrukcije. Najvećim statičkim opterećenjem kran je, pri normalnoj eksploataciji, izložen u toku zamjene anoda i punjenja lonca tečnim metalom [2]. Kran ECL se prema standardu svrstava u grupu veoma teških eksploatacionih uslova tj. u klasu 4. Iz prethodnog je jasno da su stezaljke izložene i dinamičkim opterećenjima, međutim, u eksperimentalnoj analizi opterećenje je statičke prirode.

2. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Eksperimentalna analiza stezaljke vršena je u Laboratoriji mašinskog fakulteta u Nišu. Ispitivanje je vršeno na presi od 100 KN pri čemu je veličina opterećenja kontrolisana preko davača sile HBM U2A od 100 KN. Eksperimentalna analiza je urađena za dvije stezaljke pri čemu je opterećenje nanošeno u više etapa. Materijal stezaljke je Č 0561(ST 52 – 3) [3] sa granicom tečenja $\sigma_T = 345 \text{ N/mm}^2$ i $E = 206000 \text{ N/mm}^2$. Pri ispitivanju stezaljki došlo je do fizičkog oštećenja mjerne trake broj 2 na stezaljci broj 2 tako da rezultati deformacija za navedenu mjernu traku nijesu prikazani.



Slika 1. Alat sa davačem,

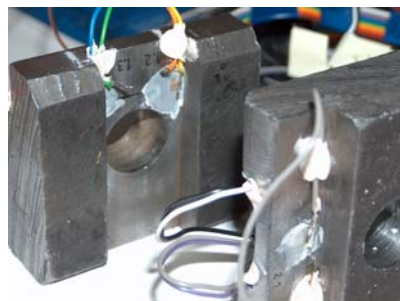


Slika 2. Stezaljka u položaju za ispitivanje presom i stezaljkom

Mjerne trake na stezaljkama su zalijepljene u zonama koncentracije napona. Mjernu traku broj 1 zbog fizičke veličine nije bilo moguće zalijepiti na zaobljenje radijusa 4 mm već se nalazi u podnožju zaobljenja. Mjerne trake broj 2 i broj 3 su zalijepljene u zoni oslonca tj. oko otvora u žlijebu što je i vidljivo na slici 4.



Slika 3. Mjerne trake u zoni zaobljenja

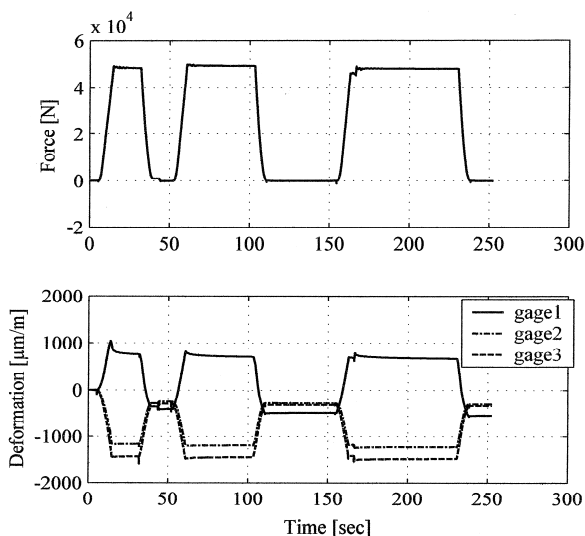


Slika 4. Mjerne trake u zoni otvora

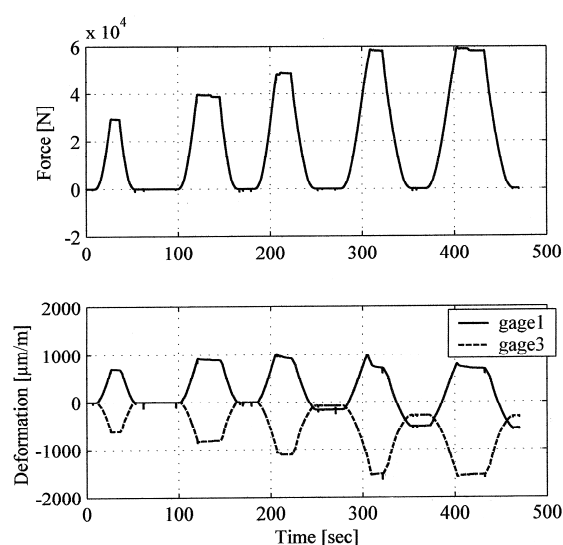
3. EKSPERIMENTALNI ANALIZA

3.1. Eksperimentalni rezultati

Pri eksperimentalnoj analizi opterećenje je nanošeno u više etapa pri čemu se pod etapom podrazumijeva niz opterećenja i rasterećenja stezaljke. Za stezaljku broj 1 eksperimentalna analiza je izvršena u četiri etape ispitivanja a za stezaljku broj 2 u tri etape. U nastavku biće prikazani dijagrami etapa ispitivanja koji su specifični po svom obliku a čije tumačenje je i tema ovog rada.

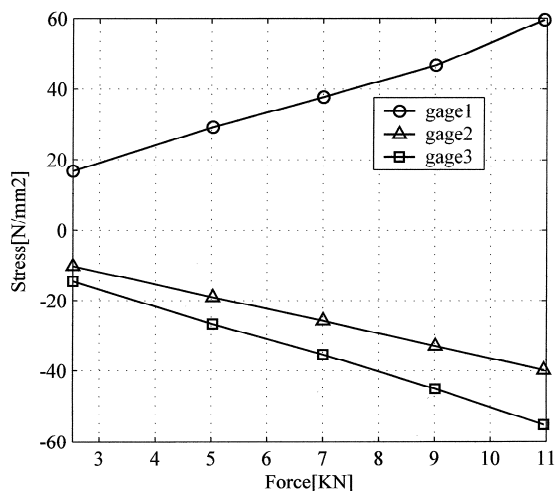


Slika 5. Druga etapa ispitivanja stezaljke1

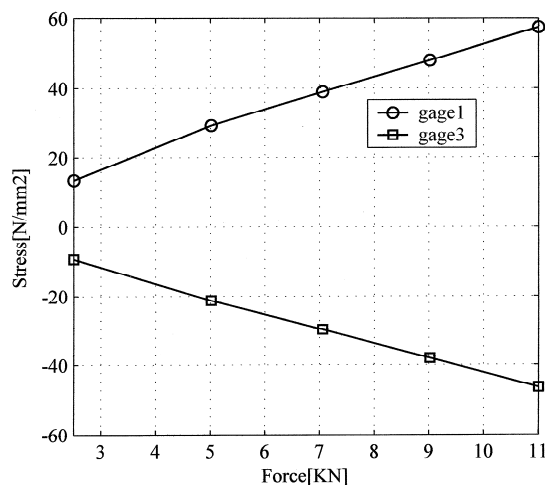


Slika 6. Druga etapa ispitivanja stezaljke2

Stezaljka je pri normalnim eksploatacionim uslovima opterećena statičkom silom od 11 KN. Rezultati naponskog stanja biće prikazani u intervalu od 2 KN do 11 KN sa korakom opterećenja od približno 2 KN. Za opterećenje od 11 KN deformacije za mjerne trake su u zoni elastičnosti. Ovi dijagrami predstavljaju rezultate obrađenih dijagrama deformacija za pojedine mjerne trake.



Slika 7. Dijagrami napona za stezaljku broj 1



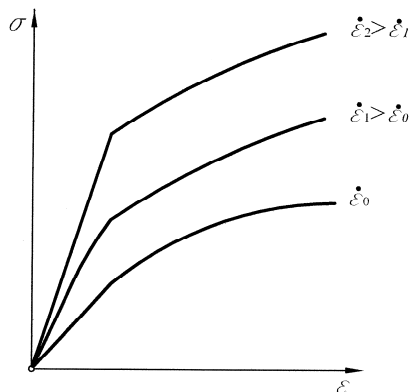
Slika 8. Dijagrami napona za stezaljku broj 2

3.2. Brzina deformacije

Iz geometrije i prirode opterećenja naponsko stanje u stezaljci čini troosnim – prostornim. Za objašnjenje ovako složenog stanja može poslužiti test istezanja koji pruža dosta informacija o faktorima ili bolje rečeno uslovima koji utiču na ponašanje materijala, odnosno veličinu dobijenih deformacija.

Brzina deformacije [4-5] (tj. brzina sa kojom se opterećuje i isteže epruveta) ima sličan uticaj na krivu (σ , ϵ) kao i uticaj temperature. Smanjenje brzine deformacije ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) ima isti uticaj kao povišenje temperature, tj. pri malim brzinama deformacije (sporim deformacijama) raste žilavost materijala, a pri brzim opada.

Prevedeno na slučaj eksperimenta to bi značilo da pri nanošenju opterećenja opada žilavost materijala dok pri konstantnom opterećenju (opterećenje se ne mijenja sa vremenom) raste žilavost materijala. Svakako da različite brzine nanošenja opterećenja utiču na dobijanje različitih rezultata deformacija. Brzina nanošenja opterećenja je karakteristika prese i iznosi 5 KN/sec.

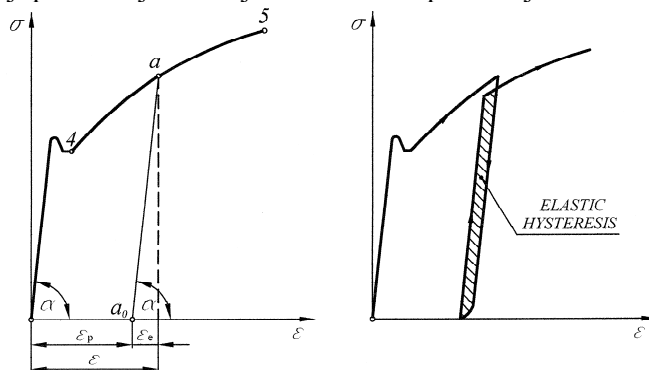


Slika 9. Uticaj brzine deformacije na žilavost materijala

3.3. Plastično ojačavanje (hardening) i elastični histerezis

Koristeći dijagram (σ , ϵ) za aksijalno naprezanje epruvete, možemo objasniti efekat plastičnog ojačanja [4-5]. Na slici 10. možemo primijetiti da u proizvoljnom trenutku deformacije, negdje između tačaka 4 i 5, ukupna deformacija ϵ , sastavljena je od elastične i plastične komponente deformacije. Ako bismo iz tačke a izvršili rasterećenje, tada bi napon i deformacija opali linearno saglasno elastičnom zakonu $\sigma = E \cdot \epsilon$, do

tačke a_0 , gdje imamo da je sila (i napon) jednaka nuli, a zaostala plastična deformacija ε_p . Ako bi sada iz tačke a_0 ponovo opteretili epruvetu vratili bi se do tačke a po pravoj $a_0 - a$, a zatim nastavili po krivnoj $a - 5$. Prenešeno na slučaj eksperimenta, plastična deformacija će se javljati periodično. Ovo znači da će se plastična deformacija u početku, nakon dostizanja deformacije tečenja, pojaviti u sljedećoj etapi za opterećenje koje je veće nego prethodno koje je izazvalo plastičnu deformaciju. Na ovaj način se vrši plastično ojačavanje materijala stezaljke s obzirom na povećavanje opterećenja iz etape u etapu ispitivanja. Takođe se pri cikličnom nanošenju opterećenja, kao u slučaju eksperimentalne analize stezaljke, pojavljuje elastični histerezis [4-5] koji predstavlja rad koji se u ciklusu opterećenja i rasterećenja izgubio na toplotu.



Slika 10. Elastic histresis

4. ZAKLJUČAK

Pored navedenih faktora koji utiču na rezultate eksperimentalne analize svakako utiču i brojni drugi koji nijesu pomenuti. U ove faktore spadaju: zazori u alatu koji utiču na nalijeganje stezaljke, krutost elemenata alata, trenje i klizanje na dodirnim površinama alata i stezaljke, penetracija pritiskivača u stezaljku koja se povećava sa povećavanjem opterećenja itd. Isto tako pri velikim brzinama deformisanja može doći do pojave puzanja i relaksacije napona [4-5], odnosno do pojave viskoznosti materijala. Sve navedene stavke utiču na rezultate eksperimentalne analize. Svakako da je broj ispitanih stezaljki nedovoljan za dobijanje jasne slike o veličini deformacija pa taj broj treba povećati. Na ovaj način bi se dobili kvalitetniji rezultati eksperimenta kao i preciznija slika o faktorima koji utiču na eksperimentalne rezultate. Suštinski su zato informacije i zaključci koji se dobijaju eksperimentisanjem sa različitim materijalima i u različitim uslovima od izuzetne važnosti.

5. REFERENCES

- [1] Ostrić D.: Dizalice, Mašinski fakultet, Beograd, 1992. godine
- [2] Katnić J.: Analiza čvrstoće glavne grede ECL kрана oslabljene prslinom, Diplomski rad
- [3] Metalbiro Zagreb: Jugoslovenski čelik
- [4] Lubarda V.: Otpornost materijala, NIO Univerzitetska riječ, Titograd, 1989. godine
- [5] Timoshenko S. P., Gere J. M.: Theory of elasticity, McGraw-Hill, New York, 1961. year

Dušan Laković, Sreten Savićević, Milan Vukčević, Mileta Janjić

ANALYSIS OF RAIL CLIP

Abstract:

In this article, the results of experimental analysis of rail clip will be shown. The main function of this element is providing relationship against turning rails and it is used for attachment with crane trail and rail A65 in electrolysis of the aluminium processing plant in Podgorica. The results will be explained by the factors whose influences are important.



Mileta Janjić, Milan Vukčević, Sreten Savićević, Nikola Šibalić

ANALIZA NAPONA KOD OSNOSIMETRIČNOG DEFORMISANJA U OTVORENIM KALUPIMA

Rezime:

Rad se odnosi na određivanje naponskog stanja osnosimetričnih elemenata. Izvršena je numerička simulacija za date uslove, korišćenjem softverskog paketa DEFORM-2D: za kontinuitet procesa, po fazama deformisanja i primjenom DEFORM rezultata. Korišćenjem navedenih metoda, na relativno jednostavan način, dobijeni su rezultati koji su u radu grafički interpretirani. Izvršena je analiza kao i poređenje dobijenih rezultata za stepenasti oblik kalupa.

1. UVOD

U okviru obrade deformisanjem, svojom složenosti, posebno se izdvaja zapreminsko deformisanje. Za uspješno projektovanje bilo kojeg tehnološkog postupka obrade deformisanjem, od velikog je značaja poznavanje parametara naponskog stanja. Razvoj računarskih sistema, omogućio je konstrukciju i simulaciju procesa zapreminskog deformisanja i otvorio je korisniku široke mogućnosti analize dobijenih podataka, kao i uvid u stanje svih aktivnosti, gdje se obezbjeđuju trenutni i pouzdani podaci o svim parametrima, koji učestvuju u procesu deformisanja.

U posljednje vrijeme, zahvaljujući rapidnom razvoju računarske tehnike, naročito je došao do izražaja numerički pristup rješavanju problema. Kao najmoćniji numerički metod koristi se metoda konačnih elemenata - FEM (*Finite Element Method*). Na bazi ovog metoda napravljeno je više komercijalnih softverskih paketa za numeričku simulaciju procesa zapreminskog deformisanja. Jedan od najpoznatijih softverskih paketa je DEFORM, čiji je proizvođač *Scientific Forming Technologies Corporation* (SFTC) u kojem je vršena simulacija i dobijeni rezultati koji su prezentirani u ovom radu.

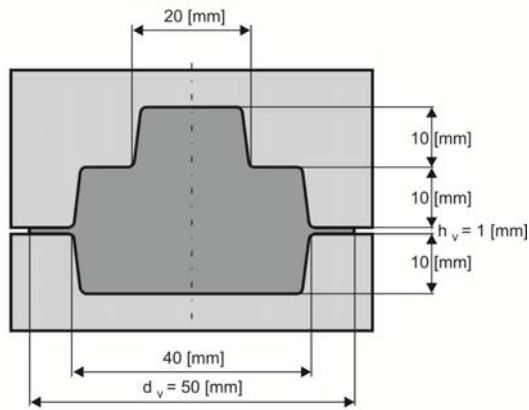
2. ULAZNI PARAMETRI NUMERIČKIH ISTRAŽIVANJA

Proces zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima obuhvata široku klasu problema, kako sa aspekta geometrije, tako i sa aspekta tehnoloških uslova. U radu se razmatraju elementi dati na Slici 2.1. i Slici 2.2.

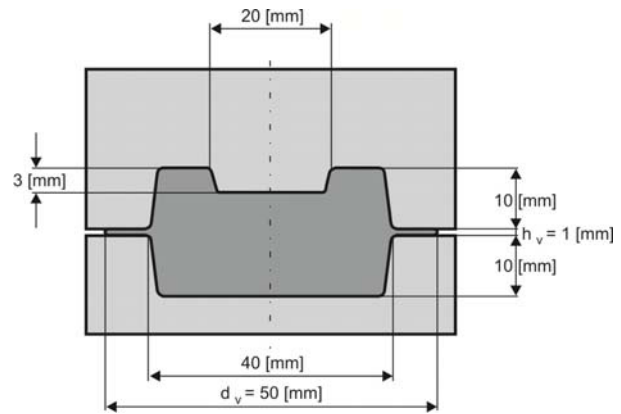
- ◆ Eksperimentalni materijal je legura aluminijuma $AlMgSi0,5$.
- ◆ Ispitivanje se vrši na temperaturi tople obrade $T=440 [^{\circ}C]$.
- ◆ Deformacija se ostvaruje malom konstantnom brzinom deformisanja $v=2 [mm/s]$.
- ◆ Parametri krive ojačavanja su $c=30.34434$ i $n=0.097808$ za leguru aluminijuma $AlMgSi0.5$ i temperaturu $T=440 [^{\circ}C]$.
- ◆ Faktor trenja je $m=0.114$.
- ◆ Prvi oblik alata je stepenasto konveksni (Slika 2.1.). Sastoji se od dva kalupa, gornjeg i donjeg. Gornji dio kalupa sastoji se od dva stepena visine, a donji od jednog stepena.
- ◆ Drugi oblik alata je stepenasto konkavni (Slika 2.2.). Sastoji se od dva kalupa, gornjeg i donjeg. Gornji dio kalupa sastoji se od dva stepena visine gdje je jedan sa upuštenim stepenom, a donji od jednog stepena visine.

Pripremljeni su cilindričnog oblika, prečnika $d_0=33.56 [mm]$. Visina h_0 se određuje iz uslova konstantnosti zapremine obradka prije i posle procesa presovanja za usvojene dimenzije kalupa koje su date na Slici 2.1. i Slici 2.2. i ona iznosi za konveksni oblik alata $h_0=33.56 [mm]$, a za konkavni oblik alata $h_0=29.58 [mm]$.

Koordinate tačaka čije će se pomjeranje pratiti u numeričkom eksperimentu i za koje će se određivati parametri naponsko deformacionog stanja su usvojene [8]. Ukupan broj čvornih tačaka za konveksni kalup je 154, a za konkavni 140.



Slika 2.1. Obradak u kalupu za stepenasto konveksni oblik alata

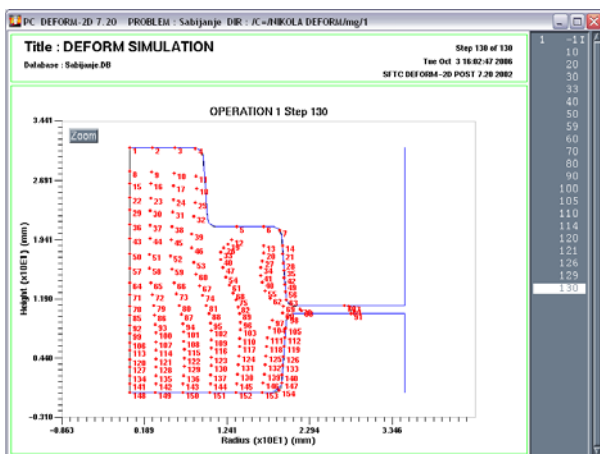


Slika 2.2. Obradak u kalupu za stepenasto konkavni oblik alata

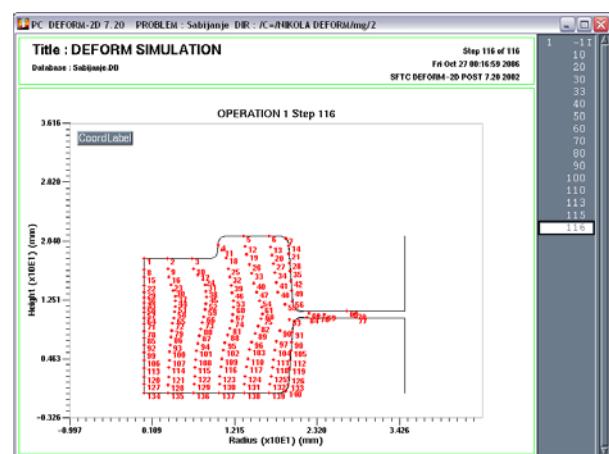
3. NUMERIČKA SIMULACIJA

Na osnovu izvršene numeričke simulacije [8], dobijene su koordinate čvornih tačaka po fazama deformisanja, koje predstavljaju ulazne parametre za određivanje naponsko deformacionog stanja.

Raspored tačaka na kraju procesa deformisanja za konveksni oblik kalupa dat je na Slici 3.1., a za konkavni na Slici 3.2. Naredbom *Data Extract* dobijaju se koordinate čvornih tačaka u svim fazama zapreminskog deformisanja.



Slika 3.1. Raspored tačaka u 13-toj fazi dobijen DEFORM simulacijom za konveksni kalup



Slika 3.2. Raspored tačaka u 12-toj fazi dobijen DEFORM simulacijom za konkavni kalup

3.1. Numerički eksperiment za kontinuitet procesa

Određivanje deformacionih i kinematskih parametara, vrši se na osnovu dobijenih koordinata čvornih tačaka na kraju procesa deformisanja, odnosno pomjeranja tačaka. Na osnovu dobijenih podataka iz numeričke simulacije, dobijene su komponente deformacija i brzina deformacija [9].

Određivanje napona urađeno je korišćenjem metode visioplastičnosti. Obrada podataka vrši se u MATLAB-u. Ulazni podaci su: koordinate čvornih tačaka na početku r_{p0} i z_{p0} i na kraju procesa deformisanja r_{pk} i z_{pk} , $k=13$ za konveksni (Slika 3.1.) i $k=12$ za konkavni oblik kalupa (Slika 3.2.), parametri krive ojačavanja c i n , kao i rezultati dobijeni iz deformacione φ_r , φ_z , φ_θ , γ_{rz} i φ_e i kinematske analize $\dot{\epsilon}_r$, $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_\theta$, $\dot{\gamma}_{rz}$ i $\dot{\epsilon}_e$ [8]. Metoda se bazira na dobijanju aksijalne komponente napona σ_z , rješavanjem osnovne jednačine visioplastičnosti [5], pri čemu je glavni problem određivanje integracione konstante C . Jedine tačke u kojima je moguće odrediti vrijednost aksijalne komponente napona su tačke za maksimalnu vrijednost radijusa na nivou vijenca (Slika 2.1. i Slika 2.2.). Ove vrijednosti se određuju iz uslova da je radijalna komponenta napona u tim tačkama jednaka nuli: $\sigma_r=0$. Ostali deformaciono kinematski parametri su poznati, pri čemu se efektivni napon određuje sa odgovarajućih krivih ojačavanja za vrijednost efektivne deformacije.

Ako se sa $\Delta\sigma_{zv}$ obilježi prvi dio rješenja osnovne jednačine visioplastičnosti onda se može pisati:

$$\sigma_{zv} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{\max}}} = \Delta\sigma_{zv} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{\max}}} + C_1, \quad (3.1)$$

pa je:

$$C_1 = \sigma_{zv} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{\max}}} - \Delta\sigma_{zv} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{\max}}}. \quad (3.2)$$

Kako je osnovna jednačina visioplastičnosti neodređena za vrijednost radijusa $r=0$ [mm]. Kriva se ekstrapolira kvadratnom funkcijom oblika:

$$\sigma_z = ar^2 + b, \quad (3.3)$$

Koeficijenti a i b se određuju iz sistema dvije linearne jednačine sa dvije nepoznate za vrijednosti napona u drugoj i trećoj tački presjeka $z=z_v$.

Vrijednost podintegralne funkcije je poznata, jer su poznati svi deformacioni i kinematski parametri I efektivni napon. Integraljenjem ove funkcije po r dobija se neodređeni integral. Zbog nepoznatog radijalnog napona u ostalim tačkama integracionu konstantu nije moguće odrediti. Iz tog razloga, na osnovu druge jednačine ravnoteže sistema se dobija [5]:

$$\sigma_{z0} = - \int_0^z \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right) dz + C_2. \quad (3.4)$$

Ako se prvi član prethodnog izraza obilježi sa $\Delta\sigma_{z0}$ onda se može pisati da je:

$$\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} = \Delta\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} + C_2, \quad (3.5)$$

pa je:

$$C_2 = \sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} - \Delta\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}}. \quad (3.6)$$

Na ovaj način se dobijaju sve vrijednosti aksijalne komponente napona u osi simetrije obradka, tj. za $r=0$ [mm], što praktično predstavlja mogućnost za određivanje integracione konstante za sve vrijednosti visine z .

Integraciona konstanta se određuje na osnovu:

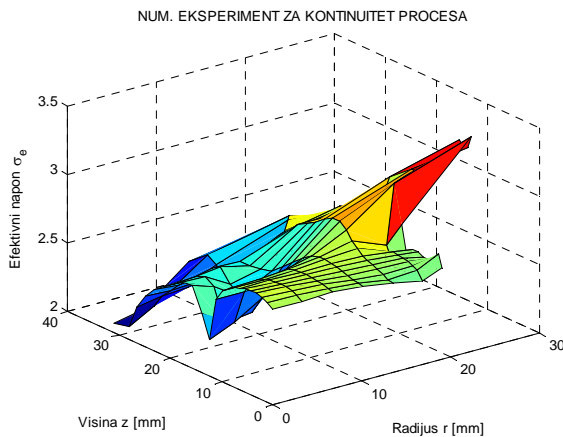
$$\sigma_z \Big|_{\substack{z \\ r=0}} = \Delta\sigma_z \Big|_{\substack{z \\ r=0}} + C, \quad (3.7)$$

pa se dobija:

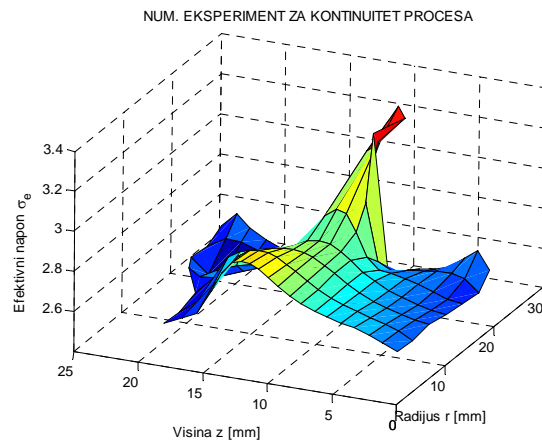
$$C = \sigma_z \Big|_{\substack{z \\ r=0}} - \Delta\sigma_z \Big|_{\substack{z \\ r=0}}. \quad (3.8)$$

Na prethodno opisani način je moguće odrediti vrijednosti normalnog napona u svim tačkama meridijalnog presjeka obradka. Ostale komponente napona određuju se korišćenjem jednačina Levy-Mises-a [6].

Vrijednosti efektivnog napona na kraju procesa deformisanja u posmatranim tačkama meridijalnog presjeka obradka date su u obliku trodimenzionalnog dijagrama na Slici 3.3. i Slici 3.4.



Slika 3.3. Efektivni napon σ_e [daN/mm²] za konveksni oblik kalupa



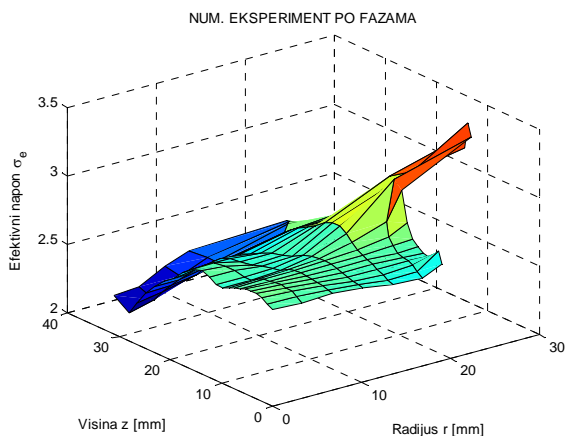
Slika 3.4. Efektivni napon σ_e [daN/mm²] za konkavni oblik kalupa

3.2. Numerički eksperiment po fazama

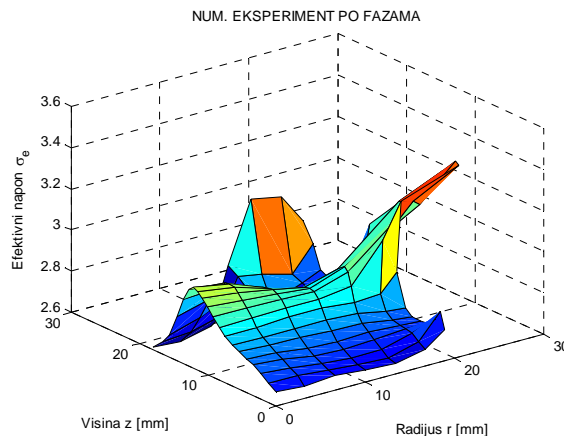
Kod numeričkog eksperimenta po fazama, određuju se deformacije u svakoj fazi, gdje poznatim postupcima i metodama dobijamo krajnju vrijednost deformacija i brzina deformacija [9].

Određivanje napona urađeno je na analogan način korišćenjem metode visioplastičnosti. Ulazni podaci su: koordinate čvornih tačaka na početku r_{p0} i z_{p0} i na kraju procesa deformisanja r_{pk} i z_{pk} , parametri krive ojačavanja c i n , kao i rezultati dobijeni iz deformacione φ_r , φ_z , φ_θ , γ_{rz} i φ_e i kinematske analize $\dot{\epsilon}_r$, $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_\theta$, $\dot{\gamma}_{rz}$ i $\dot{\epsilon}_e$ [9].

Vrijednosti efektivnog napona na kraju procesa deformisanja date su u obliku trodimenzionalnog dijagrama na Slici 3.5. i Slici 3.6.



Slika 3.5. Efektivni napon σ_e [daN/mm^2] za konveksni oblik kalupa

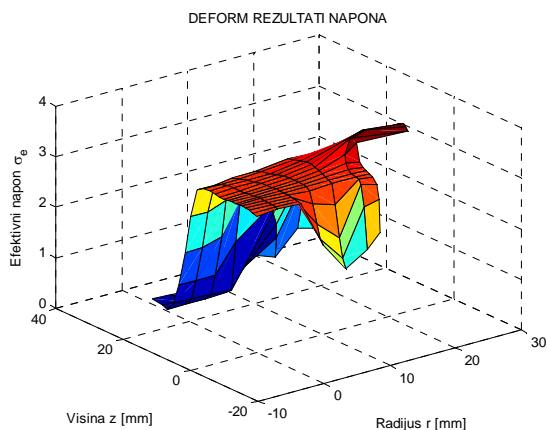


Slika 3.6. Efektivni napon σ_e [daN/mm^2] za konkavni oblik kalupa

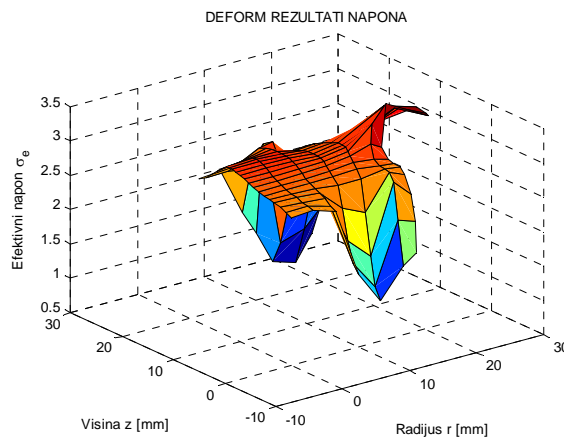
3.3. DEFORM rezultati

Za konveksni i konkavni oblik kalupa, direktno iz DEFORM-2D softverskog paketa dobijaju se vrijednosti promjena napona u svakoj fazi posmatranog procesa, za usvojene čvrne tačke.

Vrijednosti ovako dobijenih efektivnih napona na kraju procesa deformisanja, date su na Slici 3.7. i Slici 3.8.



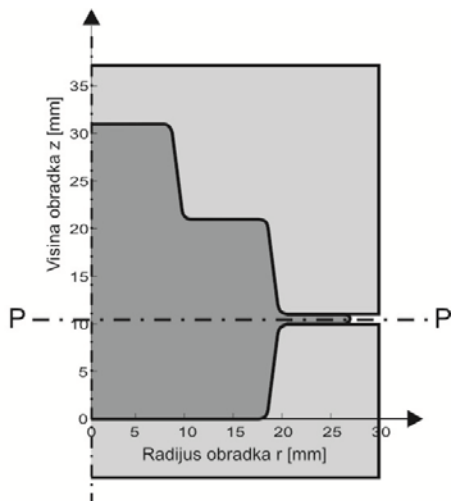
Slika 3.7. Efektivni napon σ_e [daN/mm^2] za konveksni oblik kalupa



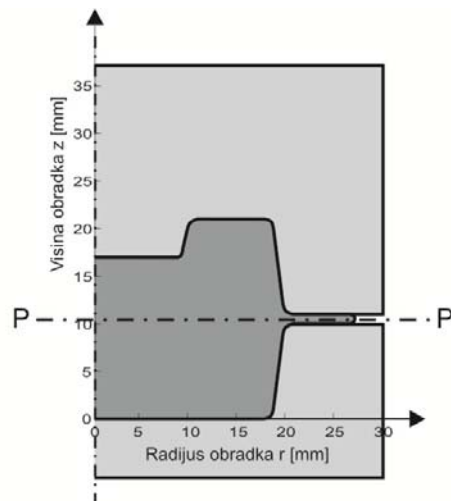
Slika 3.8. Efektivni napon σ_e [daN/mm^2] za konkavni oblik kalupa

4. ANALIZA I POREĐENJE DOBIJENIH REZULTATA

Na osnovu prethodno prikazanih prostornih dijagrama i vrijednosti parametara naponskog stanja, koji su dobijeni izvođenjem numeričkog eksperimenta, urađena je analiza i izvršena su poređenja ovako dobijenih podataka. Za kompletnu naponsku analizu i poređenja, napravljen je program u MATLAB-u koji daje presječne dijagrame u meridijalnoj ravni obradka za traženi presjek P-P, koji prolazi kroz zonu vijenca. Dakle presjek P-P (Slika 4.1. i Slika 4.2.), odgovara podionoj ravni obradka i vrijednosti visine $z = 10.5$ [mm].

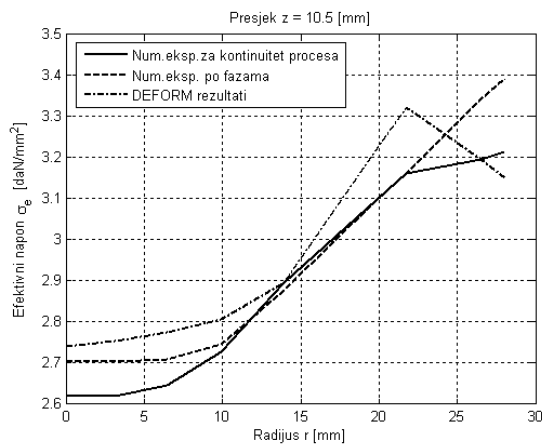


Slika 4.1. Karakteristični presjek u meridijalnoj ravni za polovinu osnosimetričnog obradka konveksnog oblika kalupa

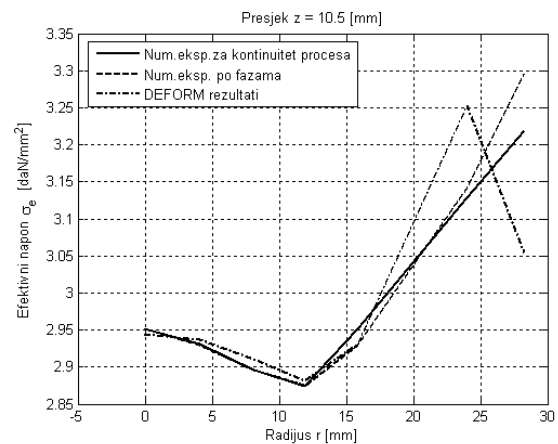


Slika 4.2. Karakteristični presjek u meridijalnoj ravni za polovinu osnosimetričnog obradka konkavnog oblika kalupa

U meridijalnoj ravni obradka za karakterističan presjek P-P dati su dvodimenzionalni dijagrami efektivnog napona za sva tri postupka ispitivanja na Slici 4.3. i Slici 4.4.



a)



b)

Slika 4.3. Efektivni napon σ_e [daN/mm²] za: a) konveksni oblik kalupa i b) konkavni oblik kalupa

Kod sva tri postupka ispitivanja, za sve naponske parametre, jasno se izdvajaju dvije zone vrijednosti: zona vijenca i zona koja odgovara unutrašnjem dijelu kalupa (zona kalupa), dok se kod konkavnog oblika kalupa, jasno izdvaja i zona drugog stepena gornjeg kalupa.

Poređenjem efektivnog napona, kod sva tri postupka ispitivanja konveksnog kalupa, vidi se da dijagrami imaju sličan karakter promjene. Maksimalne vrijednosti efektivnog napona se nalaze u zoni vijenca, za maksimalnu vrijednost radijusa kod numeričkog eksperimenta za kontinuitet procesa i po fazama, dok se kod DEFORM rezultata maksimalna vrijednost ne nalazi na kraju vijenca, već na prvoj četvrtini. Minimalne vrijednosti se dobijaju u zoni kalupa kod sva tri postupka ispitivanja.

Kod konkavnog kalupa jasno se izdvaja zona drugog stepena kalupa gdje vrijednosti efektivnog napona kod postupka ispitivanja po fazama imaju maksimalne vrijednosti koje su bliske maksimalnim vrijednostima u zoni vijenca, dok se za kontinuitet procesa dobijaju manje vrijednosti. Kod DEFORM rezultata maksimalna vrijednost se dobija takođe u zoni vijenca, a minimalna u zoni drugog stepena kalupa.

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Razlike naponskog stanja koje se dobijaju korišćenjem određenog postupka ispitivanja, prvenstveno se odnose na način određivanja parametara deformacionog stanja. Kod numeričkog eksperimenta za kontinuitet procesa, deformacije su određivane po modelu malih deformacija za čitav proces deformisanja. Kod numeričkog eksperimenta po fazama, deformacije se određuju na osnovu pomjeranja po fazama, gdje se

ukupna deformacija dobija kao suma deformacija dobijenih za određene faze. Kod DEFORM rezultata deformacije su određivane na onovu matematičkog aparata koji koristi DEFORM-2D.

Na osnovu rezultata dobijenih napona prezentiranih u ovom radu i sprovedene analize, zaključuje se da je u numeričkim simulacijama procesa deformisanja za navedene uslove, pogodnije koristiti numerički eksperiment po fazama deformisanja, te se diskretizacija po fazama pokazuje kao neminovnost u istraživačkom procesu. Snažna ekspanzija računarske tehnike i softvera u današnje vrijeme, omogućava da u inženjerskim istraživanjima, diskretizacija tijela i diskretizacija procesa budu put ka povećanju tačnosti.

6. LITERATURA

- [1] DEFORM Manual - SFTC.
- [2] Janjić M., Vukčević M., Domazetović V.: Primjena metode diskretizacije u deformacionoj analizi odpreska. XXIV JUPITER Konferencija, Zlatibor, 1998.
- [3] Janjić M., Domazetović V., Savićević S., Vukčević M.: Određivanje krivih ojačavanja i njihov izbor u numeričkim simulacijama. XXXI JUPITER Konferencija, Zlatibor, 2005.
- [4] Janjić M.: Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja - Doktorska disertacija. Mašinski fakultet, Podgorica, 2005.
- [5] Musafija B.: Primijenjena teorija plastičnosti, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 1973.
- [6] Musafija B.: Obrada metala plastičnom deformacijom. Svjetlost, Sarajevo, 1972.
- [7] Vukčević M., Janjić M., Domazetović V.: Uticaj gometrijskih parametara pri deformisanju osnosimetričnih uzoraka u otvorenim kalupima. XXVI JUPITER Konferencija, Beograd, 2000.
- [8] Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: Modeliranje deformaciono kinematskih parametara kod procesa osnosimetričnog deformisanja u otvorenim kalupima. Jupiter 2007.

Mileta Janjić, Milan Vukčević, Sreten Savićević, Nikola Šibalić

THE STRESS ANALISZS AT AXI-SYMMETRICAL DEFORMATION PROCESS IN OPEN DIES

Abstract:

The paper deals with determination of axi-symmetrical element stress state. A numerical simulation for the given conditions was carried out by using DEFORM-2D software package: for process continuity according to deformation phases and applying DEFORM results. By using the mentioned methods, in a relatively simple way, results graphically interpreted in the paper were achieved. An analysis and comparison of the obtained results for degreed dies were done.

Ž. Jakovljević¹

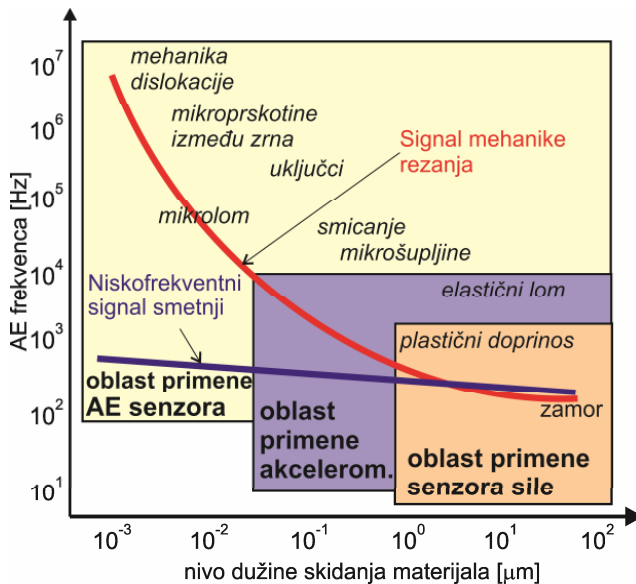
POREĐENJE HILBERT HUANGOVE I DISKRETNE VEJVLET TRANSFORMACIJE U ANALIZI NESTACIONARNIH SIGNALA: PRIMENA U PREKIDNOM STRUGANJU²

Apstrakt

Obrada nestacionarnih signala predstavlja jedan od izazova u proučavanju i upravljanju dinamičkih procesa kakav je i proces rezanja. Najčešće primenjivana kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT) i skalogram koji nastaje kao rezultat STFT imaju značajna ograničenja u obradi signala prikupljenih iz dinamičkih sistema. Dve relativno nove tehnike koje pokazuju značajno bolja svojstva u obradi nestacionarnih signala su Hilbert Huangova transformacija (HHT) i diskretna vejvlet transformacija (DWT). U ovom radu se vrši komparativna analiza HHT i DWT kako bi se razmatranjem njihovih prednosti i mana došlo do smernica za odlučivanje koja od ovih tehnika predstavlja tehniku izbora za analizu signala dobijenih iz procesa rezanja u zavisnosti od željenih rezultata analize. Pored kratkih matematičkih osnova ovih transformacija, u radu se daju i dva primera, jedan numerički, a drugi eksperimentalni koji se odnosi na prepoznavanje prekida procesa rezanja u prekidnom struganju.

1. UVOD

Proces rezanja je izrazito dinamički proces na koji pored fenomena vezanih za sam proces stvaranja strugotine utiču i dinamički odzivi i stanje svih elemenata obradnog sistema (mašina, alat, obradak). In situ praćenjem procesa rezanja može se doći do dragocenih informacija o stanju kako samog procesa, tako i o



Slika 1. Izvori akustičke emisije u procesu skidanja strugotine [1]

kvalitetu obrađene površine, stanju alata, pa čak i elemenata mašine, koje se dalje mogu iskoristiti za nadgledanje procesa obrade i njegovo upravljanje. Sistemi za praćenje procesa rezanja najčešće su zasnovani na merenju sile rezanja, ubrzanja, akustičke emisije, čujnog zvuka u blizini zone rezanja. Na slici 1. su prikazani frekventni sadržaji signala dobijenih korišćenjem različitih vrsta senzora.

Različite faze u procesu stvaranja strugotine: smicanje, oranje, plastična deformacija su povezane sa različitim frekventnim sadržajem signala – slika 1. [1]. Prisustvo šupljina, uključaka, granica zrna i sl. u mikrostrukturi materijala se odražava na interakciju vrha alata i obratka i ima svoje potpise u obliku različitih frekventnih komponenata u signalu [2, 3]. Stanje alata se takođe može identifikovati na osnovu signala prikupljenih iz procesa rezanja. Korišćenjem tehnika za obradu signala moguće je iz njih izvršiti ekstrakciju raznih informacija.

¹ Doc. dr Živana Jakovljević, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: zjakovljevic@mas.bg.ac.rs

² U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR35007 Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Pri analizi signala ključan problem je da se informacija dobije pravovremeno. Kako bi se detektovalo stanje alata ili kako bi se povezao kvalitet obrade ili mikrostruktura materijala sa mehanizmom procesa stvaranja strugotine na primer, nije dovoljno identifikovati prisustvo odgovarajuće frekvence u signalu. Neophodno je ovu frekvencu lokalizovati u vremenu/prostoru.

Za simultanu analizu signala u frekventnom i vremenskom domenu pri praćenju procesa obrade upotrebljavaju se različite tehnike [4]. Kratkotrajna Furijeova transformacija (STFT-Short Time Fourier Transform) se tradicionalno najčešće koristi. Međutim, osnovni nedostatak ove tehnike je konstantna rezolucija po frekvenci i vremenu koja je diktirana širinom prozorske funkcije [5].

Diskretna vejtlet transformacija je privukla veoma značajnu pažnju naročito u oblasti praćenja stanja alata (detaljan pregled se može naći u [4, 6]) i u proučavanju fenomena vezanih za proces stvaranja strugotine [3].

Relativno nova tehnika za simultanu analizu signala u vremenskom i frekventnom domenu koja daje odličnu rezoluciju i po vremenu i po frekvenci je Hilbert Huangova transformacija (HHT) [7]. HHT je primenjivana u praćenju stanja kugličnih ležajeva [8, 9]. Određena istraživanja su sprovedena i u oblasti praćenja stanja alata korišćenjem HHT. U [10] je dat pristup u detekciji loma zuba glodala korišćenjem HHT signala struje motora, a istraživana je i korelacija pohabanosti alata i marginalnog spektra HHT [11].

I pored odlične vremenske lokalizacije frekvenci, HHT još uvek nije zadobila ni približno toliko pažnje u praćenju procesa rezanja kao DWT. Jedan od razloga je svakako to što je HHT za deceniju mlađa tehnika od DWT. Postavlja se pitanje da li je to i jedini razlog.

U ovom radu se vrši poređenje HHT i DWT sa aspekta njihove primene u detekciji nestacionarnosti u procesu rezanja sa ciljem da se komparativnom analizom ukaže na prednosti i mane ovih tehnika. Pored numeričkog primera, koristi se i primer određivanja trenutka prestanka procesa rezanja tokom prekidnog struganja.

2. HILBERT HUANGOVA TRANSFORMACIJA – KRATAK PRIKAZ

U signalima prikupljenim iz nestacionarnih sistema frekvencija se menja u svakom trenutku vremena. Za analizu rada sistema neophodno je izvršiti lokalizaciju pojave frekvence u vremenu, tj. ukoliko je moguće odrediti trenutnu frekvencu signala.

Za definisanje trenutne frekvence signala može poslužiti Hilbertova transformacija (HT). Za monokomponentnu vremensku seriju $f(t)$ HT je definisana relacijom:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

gde su $f(t)$ i $y(t)$ kompleksno konjugovan par koji definiše analitički signal $z(t)$ kao:

$$z(t) = f(t) + jy(t) \quad (2)$$

odnosno u polarno-cilindričnom koordinatnom sistemu:

$$z(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

gde je:

$$\begin{aligned} a(t) &= \sqrt{f(t)^2 + y(t)^2} \\ \theta(t) &= \arctg(y(t)/f(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

$a(t)$ i $\theta(t)$ predstavljaju trenutnu amplitudu i fazu analitičkog signala koje na najbolji mogući način uklapaju trigonometrijsku funkciju promenljive amplitude i frekvence sa monokomponentnim signalom $f(t)$. Na osnovu trenutne faze može se izračunati trenutna frekvencija kao:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\dot{y}(t)f(t) - y(t)\dot{f}(t)}{f^2(t) + y^2(t)} \quad (5)$$

Trenutna frekvencija $\omega(t)$ ima fizičko značenje samo ako je $\theta(t)$ monokomponentna funkcija. Pošto je $\theta(t)$ izvedeno iz $f(t)$, onda je potrebno da $f(t)$ bude monokomponentna funkcija. Najveći broj signala iz realnog sveta, a posebno signali iz dinamičkih sistema nisu monokomponentni. Kako bi na multikomponentni signal primenio Hilbertovu transformaciju, Huang je u [7] predložio tehniku empirijske dekompozicije na modove oscilovanja (EMD – Empirical Mode Decomposition). EMD tehnikom signal se prikazuje kao zbir unutrašnjih funkcija oscilovanja (IMF – Intrinsic Mode Functions) koje predstavljaju pandam prostim harmonijskim funkcijama u okviru Furijeove transformacije. IMF moraju zadovoljavati sledeće uslove: 1) broj ekstremuma i broj prelazaka preko nule moraju biti jednaki ili se razlikovati za jedan; 2) srednja vrednost envelope definisanih lokalnim minimumima i lokalnim maksimumima u svakoj tački mora biti jednaka nuli.

IMF se izdvajaju iz signala korišćenjem procesa razdvajanja (eng. sifting), tako što se prvo pronalaze lokalni minimumi i lokalni maksimumi, a zatim se oni spajaju korišćenjem kubnih splajnova. Na ovaj način se formiraju gornja i donja envelope. Srednja vrednost envelope - m_1 se oduzima od signala $f(t)$ i dobija se prva komponenta h_1 . U idealnom slučaju h_1 je IMF, ali to se u realnosti retko dešava. Kako bi se kreirala IMF proces razdvajanja se ponavlja više puta. U prvom koraku se h_1 posmatra kao polazna funkcija i procedura se ponavlja k puta:

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (6)$$

dok se ne dobije IMF. Proces razdvajanja se završava kada standardna devijacija između dva uzastopna rezultata razdvajanja bude manja od 0,2-0,3. Prva IMF komponenta je definisana sa:

$$c_1 = h_{1k} \quad (7)$$

c_1 se zatim oduzima od signala i dobija se ostatak

$$f(t) - c_1 = r_1 \quad (8)$$

koji sadrži informacije o komponentama nižih frekvenci ($f(t)$ je multikomponentni signal). r_1 se dalje tretira kao polazni signal i procedura razdvajanja se ponavlja - izračunava se c_2 i tako redom n puta sve dok se ne ispuni jedan od sledećih uslova: 1) c_n ili r_n imaju malu vrednost ili 2) r_n je monotona funkcija. Procesom razdvajanja signal se prikazuje u obliku:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (9)$$

Primenom HT na svaku od IMF korišćenjem relacije (5) se izračunavaju trenutne frekvence. Pošto je signal $f(t)$ multikomponentan, on ima više od jedne trenutne frekvence. Korišćenjem HHT signal se prikazuje u sledećem obliku:

$$x(t) = \text{Re} \left(\sum_{i=1}^n a_i(t) \exp \left(j \int \omega_i(t) dt \right) \right) \quad (10)$$

gde su amplituda $a_i(t)$ i frekvencija $\omega(t)$ funkcije vremena za razliku od Furijeove transformacije u kojoj su amplituda i frekvencija konstantne u vremenu. Korišćenjem Furijeove transformacije signal se razlaže na unapred definisane proste harmonijske funkcije, dok se u HHT on razlaže na unutrašnje funkcije oscilovanja koje se dobijaju iz podataka. Na osnovu relacija (9), (10) i (5) se može zaključiti da HHT daje kompletnu, adaptivnu i skoro ortogonalnu reprezentaciju signala. Rezolucija HHT po vremenu i po frekvenci je onoliko velika koliko to frekvencija odabiranja dozvoljava.

Jedan od nedostataka EMD ogleda se u tome što ona generiše nepostojeće komponente na niskim frekvencama [9,12]. Kako bi se ovaj problem rešio, proverava se kros korelacija c_i sa originalnim signalom - μ_i . Samo IMF čije kros korelacije sa originalnim signalom μ_i prelaze zadati prag λ se tretiraju kao prave IMF. Sve ostale IMF se tretiraju kao pseudo-komponente i dodaju se ostatku r_n . HHT sa ovako modifikovanom EMD pokazuje značajno bolje performanse na niskim frekvencama.

3. DISKRETNA VEJVLET TRANSFORMACIJA – KRATAK PRIKAZ

Korišćenjem diskretne vejevlet transformacije (DWT – Discrete Wavelet Transform), poput Furijeove transformacije, signal se razlaže na unapred zadate elementarne gradivne blokove koji se nazivaju vejevletima. Vejevleti su funkcije koje se dobijaju dilatacijom i translacijom jedne, unapred izabrane funkcije koja se naziva „majka vejevlet“. DWT se matematički opisuje sledećom relacijom [13]:

$$T_{m,n} = \int f(t) a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m/2} t - nb_0) dt \quad (11)$$

gde je $f(t)$ signal koji se analizira, ψ je majka vejevlet, a_0^m , $m \in \mathbf{Z}$ je diskretizacija parametra dilatacije (a_0 je korak dilatacije takav da je $a_0 \neq 1$), a b_0 je korak translacije. Navedena diskretizacija obezbeđuje da se uski vejevleti koji imaju visokofrekventni sadržaj transliraju malim, a široki vejevleti koji imaju niskofrekventni sadržaj velikim koracima u vremenu. Stoga, DWT ima bolju rezoluciju po vremenu za visoke, a bolju rezoluciju po frekvenci za niske frekvence.

Kako bi DWT bila jedinstvena neophodno je da familija vejevleta $\psi_{m,n}$ čini ortonormalni bazis. Postoji određen broj razvijenih familija vejevleta koje čine ortonormalne bazise. Najpoznatije su Dubechies vejevleti, coiflets, biortogonalni vejevleti, itd. Izbor vejevleta koji će se koristiti zavisi od njegovih karakteristika i željenih rezultata analize signala.

Za izračunavanje DWT na raspolaganju je brz jednoprolazni algoritam tzv. šema filtriranja [14, 15] koji je zasnovan na konvoluciji signala sa odgovarajućim FIR filtrima i smanjenju i povećanju broja odbiraka u signalu. Dakle, DWT daje potpunu, apriornu i ortogonalnu reprezentaciju signala.

4. POREĐENJE HHT I DWT

Kako bi se izvršila uporedna analiza HHT i DWT u daljem tekstu se daju dva primera. Prvi primer se odnosi na jednostavan sintetisan signal koji na očigledan način ukazuje na razliku između ove dve transformacije. U drugom primeru se razmatra signal akustičke emisije generisane tokom procesa prekidnog rezanja; ovde se radi o realnom signalu koji je izuzetno kontaminiran šumom.

4.1. Numerički primer

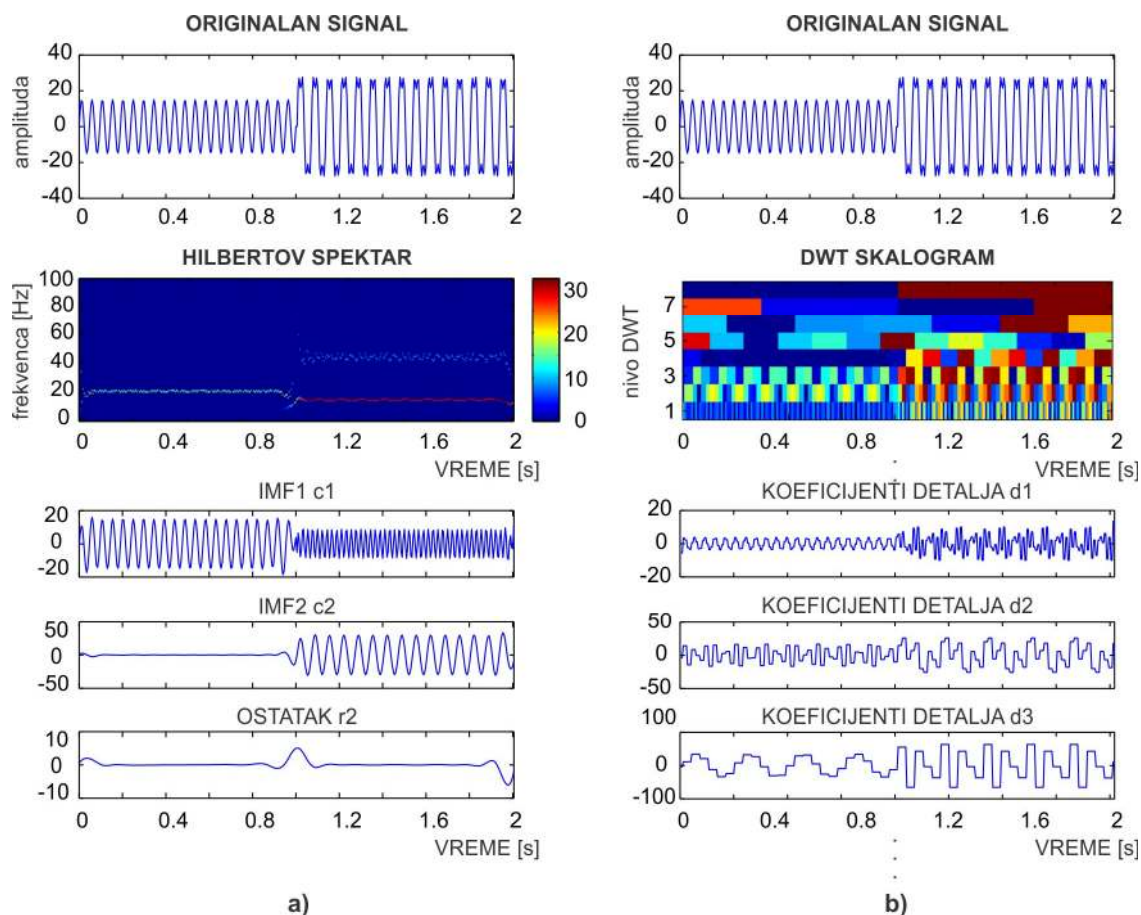
Prvi, numerički primer se odnosi na uporednu analizu signala opisanog relacijom:

$$\begin{aligned} 15 \sin(2\pi 21t) & \quad t \in [0,1] \\ 30 \sin(2\pi 15t) + 9 \sin(2\pi 45t) & \quad t \in (1,2] \end{aligned} \quad (12)$$

pomoću HHT i DWT. Frekvencija odabiranja signala je $F_s=200\text{Hz}$.

Analiza signala pomoću HHT je prikazana na slici 2a. Primenom modifikovane EMD sa pragom $\lambda=0,05$, identifikovane su dve IMF. IMF1 sadrži deo signala koji odgovara najvišim frekvencama u pojedinim vremenskim trenucima (21 i 45 Hz), dok IMF2 sadrži deo signala koji odgovara frekvenci od 15Hz i sadrži energiju samo u drugoj sekundi (slika 2a i relacija (12)). Ostatak r_2 ne predstavlja monokomponentnu funkciju, jer je u ovom slučaju primenjena modifikovana HHT. HHT bez modifikacije je sadržala 8 IMF od kojih je za poslednjih 6 kros korelacija između IMF i polaznog signala bila manja od λ , a ostatak je predstavljao monokomponentnu funkciju. Međutim HHT bez modifikacije je generisala nepostojeće niskofrekventne komponente [12].

U Hilbertovom spektru signala (slika 2a) se uočava dobra vremenska lokalizacija pojedinih frekvenci: oko 21Hz u prvoj sekundi i oko 45Hz i 15Hz u drugoj sekundi. Takođe su identifikovane i odgovarajuće amplitude (colorbar): 15, odnosno 30 i 9. Rezolucije i po vremenu i po frekvenci su diktirane frekvencom odabiranja, pa je frekventni opseg 0-100Hz diskretizovan sa rezolucijom od 1Hz, a vremenska rezolucija je 0,005s.



Slika 2. a) HHT dekompozicija sintetisanog signala (12); b) DWT dekompozicija sintetisanog signala (12) na 8 nivoa korišćenjem vejtleta 'db2'

DWT signala (12) je prikazana na slici 2b. Za analizu signala je korišćen drugi vejtlet iz Daubechies familije – 'db2'. Filter koji se primenjuje u šemi filtriranja [14, 15] za sprovođenje DWT pomoću 'db2' sadrži 4 odbirka. Šema filtriranja predviđa da se na svakom nivou transformacije vrši 'downsample' za dva tj. da se na svakom nivou transformacije odbacuje svaki drugi odbirak. Pošto polazni signal sadrži 400 odbiraka (2s sa $F_s=200\text{Hz}$) maksimalan broj nivoa transformacije je 8. Polazni signal je stoga analiziran pomoću DWT korišćenjem 'db2' upravo na 8 nivoa.

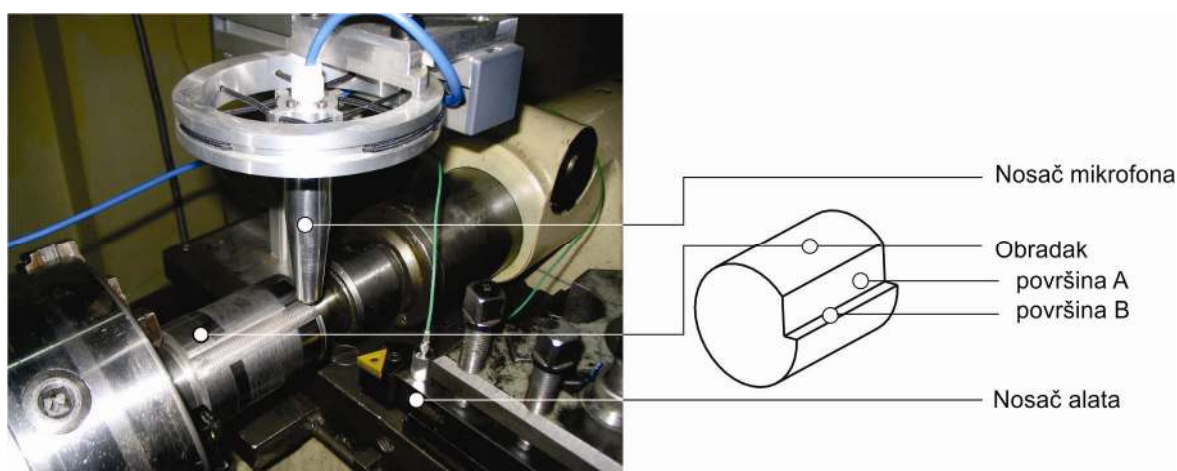
Na skalogramu (slika 2b) se uočava odlična vremenska lokalizacija pojave različitih frekvenci. Međutim, iako oštrije identifikuje pojavu različitih frekvenci u odnosu na HHT, DWT nije u stanju da odredi kolika je trenutna frekvencija signala.

4.2. Eksperimentalni signal akustičke emisije pri prekidnom struganju

Drugi, eksperimentalni primer se odnosi na detekciju trenutka izlaska alata iz procesa rezanja tokom prekidnog struganja. Eksperimentalna instalacija je prikazana na slici 3. Na cilindričnom obratku je formiran uzdužan žleb koji ima dve međusobno upravne površine. Površina A obezbeđuje izuzetno oštar prekid procesa rezanja, dok na površini B alat relativno postepeno ulazi u proces rezanja. Na ovaj način je obezbeđena izrazita nestacionarnost procesa koja se preslikava u nagle promene u snimljenom signalu. Ovakva vrsta prekidnog struganja se može iskoristiti za simulaciju loma alata [6,16]. Tokom eksperimenata je vršena akvizicija signala akustičke emisije u čujnom opsegu korišćenjem kapacitivnog mikrofona smeštenog u noseću konstrukciju. Mikrofon je doveden u blizinu procesa obrade (slika 3). Eksperimenti su vršeni u Zavodu za mašine alatke Mašinskog fakulteta u Beogradu na produkcionom strugu Hasse & Werde. Tokom eksperimenata su varirani broj obrta (118-950 o/min) i korak (0,05-0,2 mm/o). Korišćene su dve vrste pločica od tvrdog metala (TNMM 2230408 i TNMM 220424). Signal je odabiran sa frekvencom od 44KHz.

Iako izgleda da je izlazak alata iz procesa rezanja lako prepoznati, to nije jednostavan zadatak, naročito na osnovu signala akustičke emisije iz čujnog opsega. Prilikom izlaska alata iz procesa rezanja, ali i tokom prelaznih pojava nakon izlaska dolazi do naglog porasta akustičke emisije. Međutim, pored fenomena vezanih za sam proces rezanja (lom strugotine, otkidanje naslaga i sl.) u signalu su prisutni i potpisi svih ostalih pojava iz okruženja vezanih za alat, obradak, naročito mašinu, kao i sve druge elemente u okruženju uključujući i operatera. Ovde treba napomenuti da su zvukovi koje korišćena mašina (produkcioni strug Hasse & Werde) generiše u radu van zahvata izuzetno visokog nivoa i da je razlika u nivou signala koji se dobije kada je alat u zahvatu i van njega svega 5%. Za signal akustičke emisije iz čujnog opsega je generalno karakteristično da je podložan prikupljanju velike količine šuma i potpisa drugih pojava koji se u datoj aplikaciji mogu smatrati šumom, a u slučaju produkcionog struga Hasse & Werde njegova količina je izrazito visoka.

Jedan deo snimljenog signala u jednom od eksperimenata sprovedenih korišćenjem eksperimentalne instalacije prikazane na slici 3 je dat na slici 4. Tokom ovog eksperimenta korišćeni su sledeći parametri: $n=475\text{rpm}$, $s=0.05\text{mm/r}$, $a=2\text{mm}$, pločica od tvrdog metala TNMM 220408-4025. Frekvencija odabiranja signala je bila 44KHz.



Slika 3. Eksperimentalna instalacija

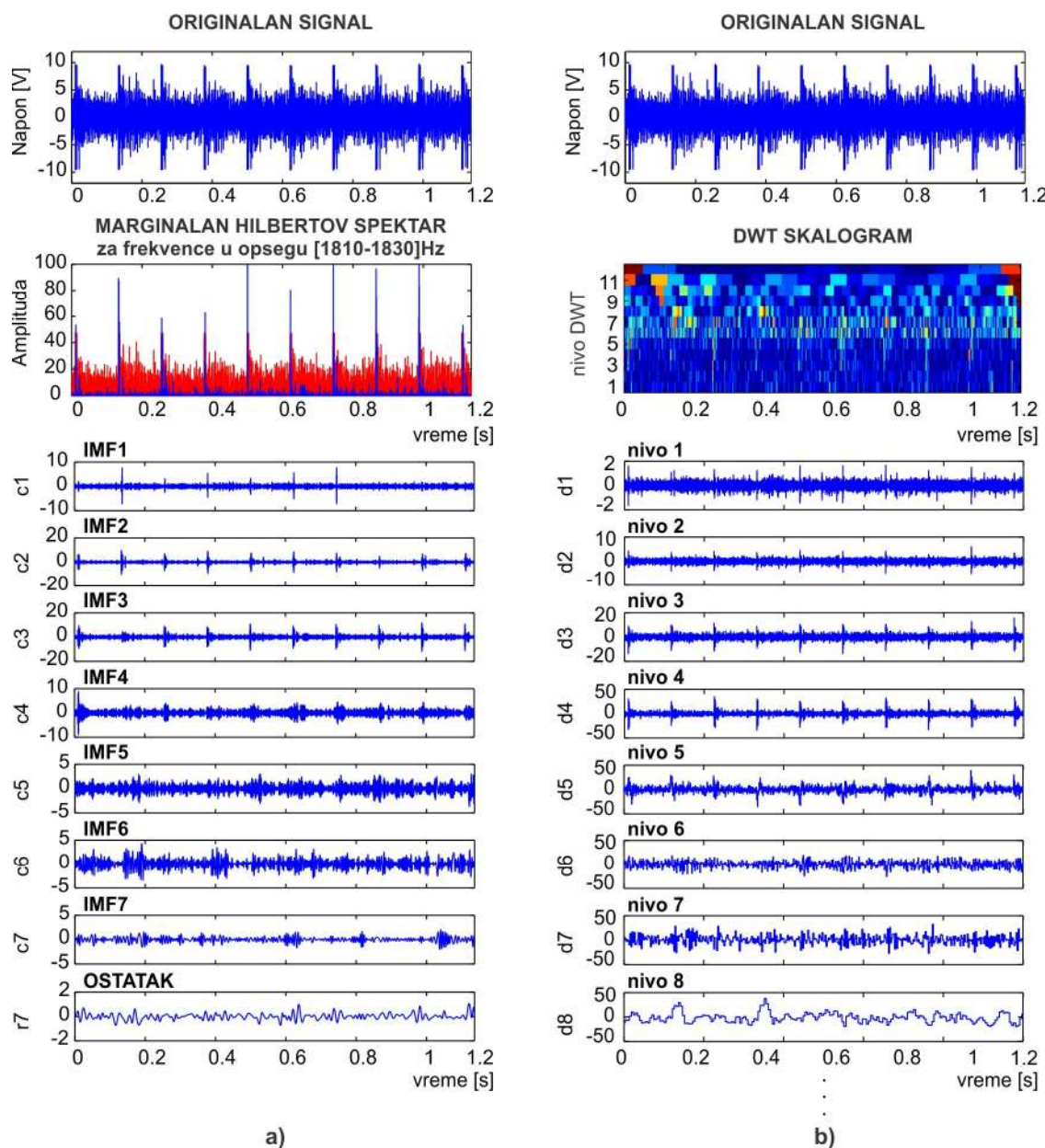
Analiza signala pomoću HHT je prikazana na slici 4a. Primenom modifikovane EMD sa pragom $\lambda=0,05$, identifikovano je sedam IMF. Analiza Hilbertovog spektra je pokazala da je trenutak izlaska alata iz procesa rezanja korelisan sa pojavom visoke energije u spektru na frekvencama od 1,81-1,83 KHz³. Marginalan spektar za ovaj frekventni opseg je prikazan na slici 4a. U navedenom frekventnom opsegu se prekid procesa rezanja jasno razlikuje od svih ostalih pojava sa sličnim potpisom u snimljenom signalu (prelazne pojave nakon prekida procesa rezanja, ponovni početak procesa rezanja, lom strugotine, itd.).

DWT analiza istog signala korišćenjem 'db2' vejevleta na 12 nivoa transformacije je prikazana na slici 4b. Skalogram prikazuje kompletnu dekompoziciju, dok su na zasebnim dijagramima prikazani koeficijenti detalja za prvih osam nivoa transformacije. U DWT skalogramu se u trenutku prekida procesa rezanja uočava porast nivoa detalja na prva četiri nivoa transformacije, koji je naročito izražen na trećem nivou transformacije.

Iz izloženog se može videti da su obe tehnike u stanju da na adekvatan način izvrše lokalizaciju u vremenu, tj. detekciju trenutka izlaska alata iz procesa rezanja. Međutim, ovde treba naglasiti da za sprovođenje DWT postoji brz jednoprolazni algoritam koji je pogodan za rad u realnom vremenu. HHT je, s druge strane primenljiva u realnom vremenu samo ako se iz celokupnog signala odseče određeni prozor (na isti način kao kod STFT). Uzimanje prozora iz signala uzrokuje kašnjenje trenutka u kome se vremenska lokalizacija izvršava za period diktiran širinom prozora. Kod DWT takođe postoji kašnjenje koje je posledica nivoa transformacije na kome se detekcija vrši. U ovom konkretnom slučaju – za analizu na tri nivoa pomoću 'db2'

³ Sličan zaključak je dobijen i u prethodnom radu [16] kada je razmatran signal dobijen merenjem vibracija pomoću akcelerometara.

vevjleta kašnjenje je 16 odbiraka, bez obzira na frekvencu odabiranja signala. Neophodno kašnjenje u slučaju primene HHT za datu frekvencu odabiranja je 15 odbiraka. Kašnjenje izraženo brojem odbiraka, ali i vremenom je kod primene HHT zavisno od konkretne frekvence odabiranja i frekvence na kojoj se vrši prepoznavanje pojave.



Slika 2. a) HHT dekompozicija snimljenog signala – na slici koja prikazuje marginalni Hilbertov spektar crvenom bojom je označena apsolutna vrednost originalnog signala pomnožena sa 5, a plavom marginalni Hilbertov spektar; **b)** DWT dekompozicija snimljenog signala na 12 nivoa korišćenjem vevjleta 'db2' – zasebno su prikazani koeficijenti detalja na prvih osam nivoa transformacije

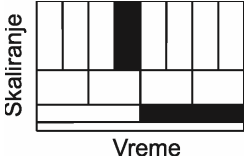
5. ZAKLJUČAK

U radu je razmatrana primena DWT i HHT u vremenskoj lokalizaciji nestacionarnosti u signalu sa ciljem vršenja njihove komparativne analize. Poređenje ove dve tehnike se može sumarno prikazati na način dat u tabeli 1.

HHT daje kompletnu, adaptivnu (IMF su vođene podacima) i skoro ortogonalnu (postoji ostatak) reprezentaciju signala, dok je reprezentacija signala korišćenjem DWT kompletna, apriorna (vevjlet se unapred bira) i ortogonalna (razlaže signal na atomske funkcije). HHT je u stanju da sa visokom tačnošću

odredi vrednost trenutne frekvence signala. DWT s druge strane nije u mogućnosti da odredi vrednost trenutne frekvence, već samo može detektovati relativnu promenu u frekventnom sadržaju signala. Za sprovođenje DWT postoji brz, jednodimenzionalni hijerarhijski algoritam koji je primenljiv u realnom vremenu. Izvršavanje HHT je, s druge strane, proračunski izuzetno zahtevno. Proces razdvajanja (sifting) podrazumeva višestruko pronalaženje lokalnih ekstremuma i provlačenje kubnih splajnova kroz njih i to za svaku IMF. Možda u ovoj činjenici, pored činjenice da je HHT deset godina mlađa tehnika, treba tražiti razlog za manji broj istraživanja usmerenih ka primeni HHT u proučavanju fenomena u procesu rezanja. Vremensko kašnjenje u donošenju odluke kod obe transformacije je relativno slično.

Tabela 1: Poređenje HHT i DWT po raznim osnovama

KARAKTERISTIKA	HHT	DWT
Gradivni blok	IMF – unutrašnji mod oscilovanja Vođen podacima - adaptivan	Familija vejevleta Aprioran
Tip superpozicije	Linearna	Linearna
Kompletnost	+	+
Ortogonalnost	-	+
Diskretizacija vreme-frekvenca prostora	Uniformna Potpuna	
Algoritam za brzo izvođenje i pogodnost rada u realnom vremenu	-	+
Kašnjenje u donošenju odluke	+	+
Inverzna transformacija	-	+

Kada je za odluku koje od dve transformacije koristiti ključna brzina njihovog izvršavanja, a tačan iznos trenutne frekvence nije bitan, već je bitna samo njena relativna promena, DWT predstavlja tehniku izbora. S druge strane, ako je neophodno tačno odrediti trenutnu frekvencu signala, HHT pokazuje najbolja svojstva od svih tehnika za obradu nestacionarnih signala koje su trenutno na raspolaganju. Takođe, kada se radi o proučavanju procesa, bez potrebe za njegovim upravljanjem u realnom vremenu, HHT predstavlja tehniku izbora.

Osnovni nedostatak HHT u odnosu na DWT je vezan za proračunsku kompleksnost izvršavanja. Međutim, sa daljim razvojem računarske tehnike ovaj nedostatak će biti sve manje značajan.

6. REFERENCE

- [1] Lee, D., E., Hwang, I. Valente, C.,M.,O., Oliveira, J.,F.,G., Dornfeld, D.A. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission, Int J of Machine Tools and Manufacture, Vol.46, pp 176–188, 2006
- [2] Liu, X., DeVor, R., E., Kapoor, S., G., Ehmann, K., F., The Mechanics of Machining at the Microscale: Assesment of the Current State of the Science, Trans of the ASME, Vol. 126, pp 666-678, 2004

- [3] Mian, A., J., Driver, N., Mativenga, P., T., Chip formation in microscale milling and correlation with acoustic emission signal, *Int J of Adv Manuf Techn*, Available online, DOI 10.1007/s00170-011-3185-x, 2011
- [4] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D., Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals - Manuf Technology* Vol. 59, pp 717–739, 2010
- [5] Jakovljević, Ž., Učenje i kontekstno prepoznavanje procesa spajanja u robotizovanoj montaži, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2010
- [6] Petrovic, P., B., Jakovljevic, Z., Milacic, V., R., Context sensitive recognition of abrupt changes in cutting process, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp 3721-3729, 2010
- [7] Huang, N., E., Shen, Z., Long, S., R., Wu, C., M., Shih, H., H., Zheng, Q., Yen, N., C., Tung, C., C., Liu, H., H., The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of Royal Society London*, Vol. 454, pp 903-995, 1998
- [8] Yan, R., Gao, R., X., Hilbert-Huang transform based vibration signal analysis for machine health monitoring, *IEEE Trans on Instr and Meas*, Vol. 55, pp 2320-2329, 2006
- [9] Peng, Z., K., Tse, P., W., Chu, F., L., An improved Hilbert Huang transform and its application in vibration signal analysis, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 286, pp 187-205, 2005
- [10] Bassiuny, A., M., Li, X., Flute breakage detection during end milling usin Hilbert-Huang transform and smoothed nonlinear energy operator, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.47, pp 1011-1020, 2007
- [11] Kalvoda, T., Hwang, Y., R., A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert–Huang transform, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp 495–501, 2010
- [12] Jakovljevic, Z., Time localization of abrupt changes in cutting process using Hilbert Huang Transform, VII Triennial International Conference Heavy Machinery 2011 - HM 2011, Proceedings, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljevo, pp. 55-60, Vrnjačka Banja, 2011
- [13] Daubechies, I., The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 36, No. 5, pp. 961-1004, september 1990
- [14] Mallat, S., G., A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol II, No. 7, pp.674-693, July 1989.
- [15] Pajić, Ž., Primena vejvlet transformacije u prepoznavanju nestacionarnih fenomana u oblasti proizvodnih tehnologija, Magistarska teza, Mašinski fakultet u Beogradu, oktobar 2004
- [16] Haili, W., Hua, S., Ming, C., & Dejin, H. On-line tool breakage monitoring in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, pp 237–242, 2003

Comparison of Hilbert Huang And Discrete Wavelet Transform In Nonstationary Signals Analysis: Application In Intermittent Turning

Abstract

Nonstationary signal analysis is one of the challenges in studying and control of dynamical processes such as cutting process. The most commonly used Short Time Fourier Transform, and scalogram as its result have significant shortcomings in analysis of signals acquired from dynamic systems. Two, relatively new techniques that have notably better properties in analysis of nonstationary signals are Hilbert Huang Transform (HHT) and Discrete Wavelet Transform (DWT). This paper presents the comparative analysis of HHT and DWT in order to give the guidelines for deciding which of these techniques is the technique of choice for the analysis of signals obtained from cutting process, considering the desired results of analysis. Beside brief mathematical bases of considered transformations, this paper gives two examples, one is numerical, and the other is experimental dealing with detection of cutting process stop during intermittent turning.



Milutinović, D.¹, Slavković, N.¹, Kokotović, B.¹, Dimić, Z.², Glavonjić, M.¹, Živanović, S.¹

NOVI PRISTUP KINEMATIČKOG MODELIRANJA KAO OSNOVA ZA RAZVOJ DOMAĆEG DELTA ROBOTA³

Rezime:

U radu je predstavljen specifični pristup kinematičkog modeliranja kao osnove za razvoj i gradnju domaćeg DELTA robota. Upravljački sistem razvijenog prototipa je baziran na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje mašina alatki i robota.

Ključne reči: DELTA robot, modeliranje robota, upravljanje i programiranje

1. UVOD

Zbog specifičnosti paralelnih mehanizama i složenosti modeliranja, upravljanja, projektovanja, izrade i korišćenja robota i mašina alatki zasnovanih na njima, istraživanje i razvoj ovih sistema su bazirani na visokom nivou kooperacije univerziteta, istraživačkih instituta i industrije [1]. Praktični rezultati ovih istraživanja su nekoliko komercijalno razvijenih robota i veći broj komercijalno razvijenih mašina alatki sa paralelnom kinematikom [2]. DELTA paralelni mehanizam na osnovu kojeg je razvijen prvi DELTA robot [3,4] je prihvaćen kao širi koncept iz koga je nastao veći broj paralelnih mehanizama sa 3-6 stepeni slobode, sa konstantnim dužinama spojki i translatornim ili obrtnim osnaženim zglobovima. DELTA robot je danas osnova savremenih linija i sistema za manipulaciju i pakovanje proizvoda prehrambene, konditorske i farmaceutske industrije. Takođe ima primenu i u montaži u mikroelektronici. Zahtevani standardi produktivnosti, pouzdanosti i higijene u ovim industrijama potiskuju postojeće serijske robote iz procesa proizvodnje.

Na složenost modeliranja, projektovanja, izrade i upravljanja ukazuje činjenica da mali broj proizvođača robota uključuje DELTA robot u svoj proizvodni program. S obzirom na potrebe za ovakvim robotima i u domaćoj industriji kao i za potrebe nastave i istraživanja pokrenut je projekat razvoja domaćeg DELTA robota čiji se rezultati u ovom radu ukratko predstavljaju [5].

2. O KONCEPTU DELTA ROBOTA

DELTA paralelni robot [3,4] je razvijen sa idejom da nema potrebe koristiti robote serijskih struktura sa motorima i od po nekoliko kilovata za manipulaciju objektima mase od nekoliko grama kao što je to slučaj kod manipulacije i pakovanja proizvoda prehrambene, konditorske i farmaceutske industrije. Slična potreba se javlja i pri montaži u mikroelektronici. Originalni shematski prikaz DELTA robota pokazan je na slici 1.

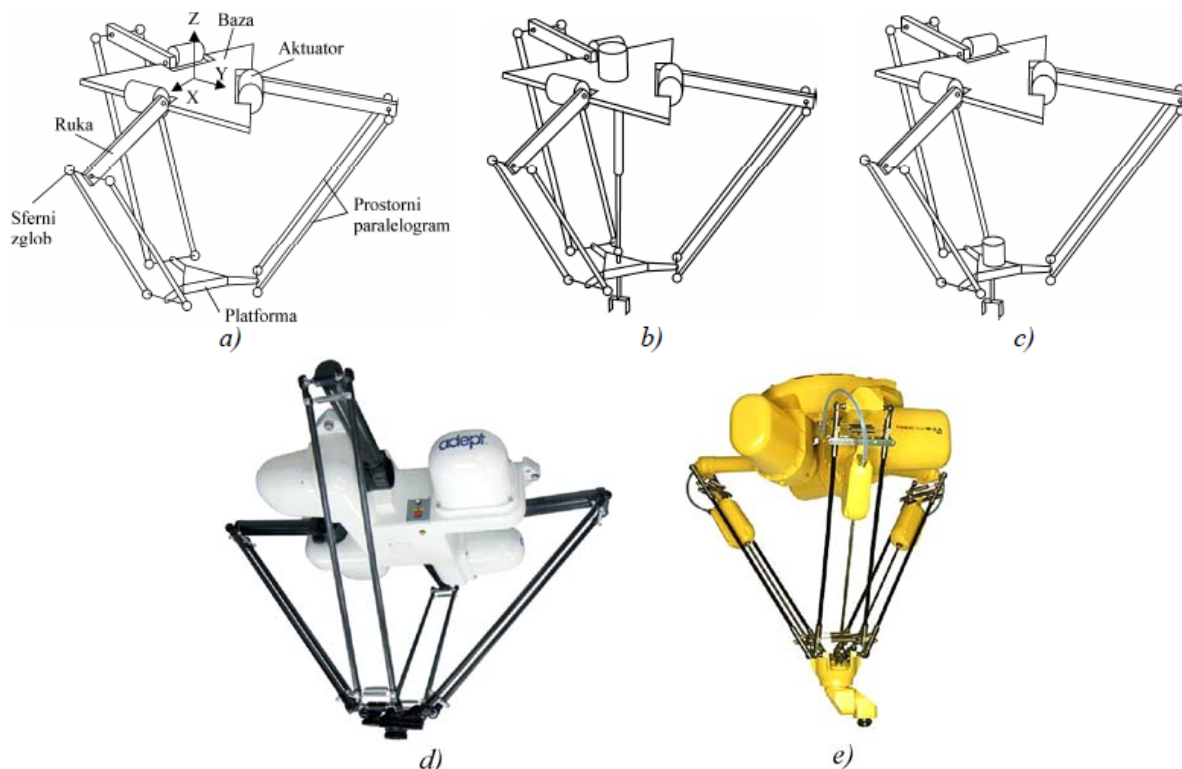
Ovakva, na prvi pogled kompleksna struktura mehanizma sa tri serijska kinematička lanca i većim brojem segmenata, slika 1a), omogućava da pokretna ploča - platforma ima samo 3 stepena slobode. Ovi stepeni slobode omogućavaju kretanje platforme duž X, Y i Z ose, pri čemu ona uvek ostaje paralelna nepokretnoj osnovi – bazi i bez rotacije oko ose normalne na nju. Četvrti stepen slobode, odnosno orijentacija end-efektora, se obezbeđuje na različite načine. Jedan od načina je postavljanjem aktuatora na

¹ Prof. dr Dragan Milutinović, dmilutinovic@mas.bg.ac.rs, Nikola Slavković, asistent, nslavkovic@mas.bg.ac.rs, mr Branko Kokotović, asistent, bkokotovic@mas.bg.ac.rs, prof. dr Miloš Glavonjić, mglavonjic@mas.bg.ac.rs, doc. dr Saša Živanović, szivanovic@mas.bg.ac.rs, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

² Zoran Dimić, zoran.dimic@li.rs, Lola institut, Kneza Višeslava 70A, 11030 Beograd

³ Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu TR35022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji je podržan od strane Ministarstva za prosvetu i nauku, Vlade Republike Srbije.

bazu, čiji se moment prenosi pomoću dva kardanska zgloba i teleskopskog vratila, slika 1b). Drugi način je pomoću aktuatora na unutrašnjoj strani platforme, slika 1c).



Slika 1. DELTA mehanizam

Takođe, postoje i složenija rešenja sa četvrtim kinematičkim lancem za orijentaciju end-efektora za specifične primene, slika 1d), kao i rešenja sa dodatna 2 ili 3 serijska stepena slobode za orijentaciju end-efektora, slika 1e). Sa aspekta kinematičkih mogućnosti DELTA robot može biti posmatran kao SCARA robot, s tim što mu je odnos nosivost/pokretna masa višestruko veći kao i brzine nego kod SCARA robota (brzine vrha preko 10 m/s uz ubrzanja i iznad 10g).

3. PRIKAZ REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Polazeći od značaja rešavanja problema kinematičkog modeliranja za projektovanje, upravljanje i izradu DELTA robota sa, danas zahtevanim visokim performansama, razvijena je metoda kinematičkog modeliranja na bazi minimalnog broja parametara, koja je efikasnija od postojećih pristupa [6] ne samo u pogledu projektovanja, izrade, upravljanja i programiranja već i u pogledu razvoja efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju [7,8].

Razvijena metoda kinematičkog modeliranja na bazi minimalnog broja parametara omogućava.

- analitičko rešavanje inverznog i direktnog kinematičkog problema nominalnog i tačnog modela (sa tzv. geometrijskim i negeometrijskim greškama) DELTA robota,
- izvođenje ukupne Jakobijan matrice kao i Jakobijan matrica direktne i inverzne kinematike u analitičkoj formi što je od posebne važnosti za analizu kombinovanih singulariteta i singulariteta inverzne i direktne kinematike,
- određivanje i optimizaciju projektnih parametara kao i analizu oblika i dimenzija radnog prostora,
- razvoj efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju.

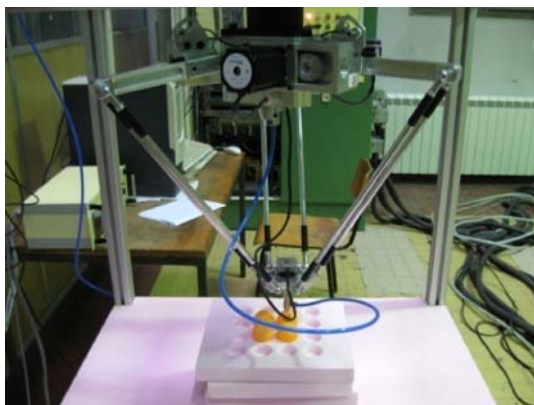
Ovo je dalje omogućilo razvoj:

- upravljačkog sistema otvorene arhitekture na PC real-time Linux platformi i sa upravljačkim sistemom EMC2 (Enhanced Machine Control),
- modularnog i rekonfigurabilnog DELTA robota.

Na slici 2 je pokazan CAD model sa radnim prostorom i okruženjem prototipa prvog domaćeg DELTA robota koji je kompletno razvijen i izrađen na Katedri za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Beogradu, slika 3.

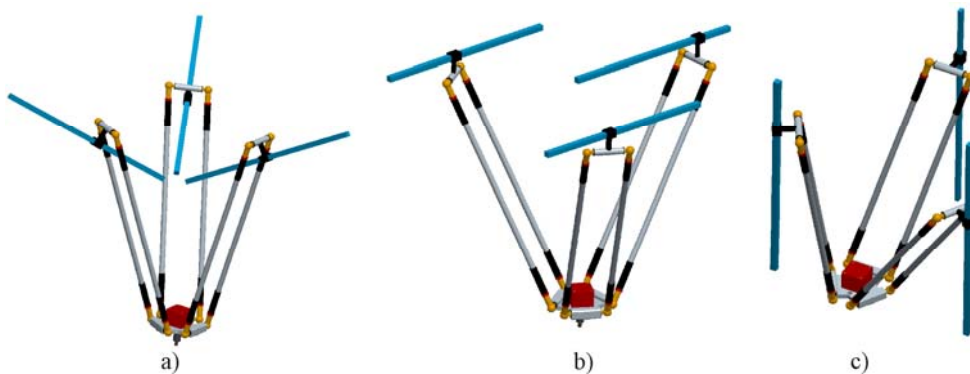


Slika 2. CAD model prototipa prvog domaćeg DELTA robota



Slika 3. Prototip domaćeg DELTA robota

Kao što je pomenuto, opštost usvojenog DELTA koncepta omogućava izrazitu modularnost i rekonfigurabilnost kao i stepenast napredak u razvoju, gradnji i primeni robota i mašina alatki baziranih na ovom konceptu. Razvojem prvog domaćeg DELTA robota pokazanog na slikama 2 i 3 stvoreni su uslovi za razvoj varijantnih rešenja robota i manjih mašina alatki koji je u toku. Koncept ovih rešenja čiji je razvoj u toku je pokazan na slici 4.

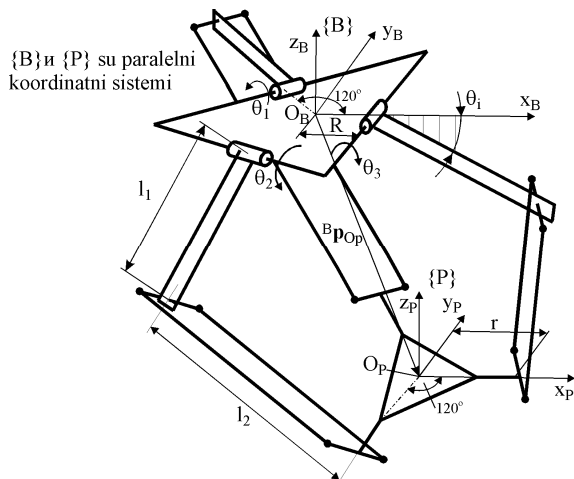


Slika 4. Koncept rekonfigurabilnih robota i malih mašina alatki sa translatorsnim osnaženim zglobovima

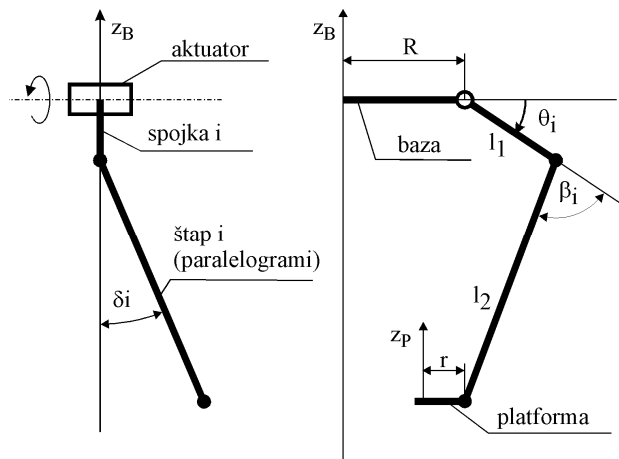
4. KINEMATIČKO MODELIRANJE

Geometrijski model osnove DELTA robota sa prva 3 stepena slobode je pokazan na slici 5. Koordinatni sistemi pridruženi bazi i platformi su označeni sa {B} i {P}. Tri kinematička lanca koja povezuju bazu i platformu čine spojke l_1 i zglojni paralelogrami l_2 . Centri osnaženih obrtnih zglobova na bazi su raspoređeni na krugu poluprečnika R pod uglom od 120° . Središta između centara pasivnih sfernih zglobova zglobnih paralelograma su raspoređeni na platformi po krugu poluprečnika r , pod uglom od 120° . Uglovi $\theta_i, i=1,2,3$ predstavljaju osnažene i upravljane unutrašnje koordinate dok vektor položaja centra platforme ${}^B \mathbf{p}_{Op} = [x_P \quad y_P \quad z_P]$ predstavlja vektor spoljašnjih koordinata. U nekim od dosadašnji metoda kinematičkog modeliranja su, čak i kod nominalnog modela, korišćene pomoćne promenljive,

β_i i $\delta_i, i=1,2,3$ [9], prikazane na primeru jednog kinematičkog lanca, kod kojeg je zglobni paralelogram l_2 zamenjen jednim štapom, slika 6.



Slika 5. Geometrijski model DELTA robota

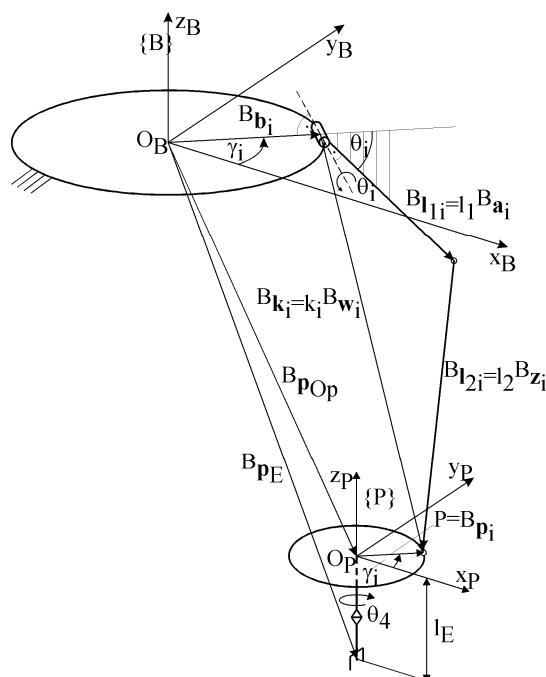


Slika 6. Uprošćeni model jednog kinematičkog lanca sa pomoćnim promenljivim β_i i $\delta_i, i=1,2,3$

Ovako složen model je zahtevao sračunavanje po nekoliko trigonometrijskih funkcija uglova β_i i δ_i da bi se rešili inverzni i direktni kinematički problem. Ovakvi pristupi su omogućavali zadovoljavajuća rešenja u pogledu brzine sračunavanja za PTP (Point To Point) upravljanje sa linearnom interpolacijom u unutrašnjim koordinatama kod robota koji su namenjeni za Pick & Place operacije.

4.1. Inverzni i direktni kinematički problem

Na slici 7 je prikazan kinematički model DELTA robota sa slike 5, pri čemu je svaki paralelogram predstavljen jednom spojkom. Koordinatni frejmovi $\{B\}$ i $\{P\}$, vezani za bazu i pokretnu platformu su zbog prirode mehanizma uvek uzajamno paralelni i iste orijentacije. Vektori \mathbf{v} definisani u koordinatnim sistemima $\{B\}$ i $\{P\}$ su označeni kao ${}^B \mathbf{v}$ i ${}^P \mathbf{v}$.



Slika 7. Kinematički model DELTA robota

Vektor spoljašnjih koordinata koji definiše poziciju i orijentaciju end-efektora se može izraziti kao

$$\mathbf{x}_E = \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{p}_E \\ \phi \end{bmatrix} = [x_E \quad y_E \quad z_E \quad \phi]^T \quad (1)$$

Vektor unutrašnjih koordinata se može izraziti kao

$$\Theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T \quad (2)$$

pri čemu su $\theta_i, i=1,2,\dots,4$ skalarne upravljačke promenljive. Uglovi θ_1, θ_2 i θ_3 su rotacije spojki l_1 , dok je θ_4 ugao rotacije end-efektora.

S obzirom da su koordinatni sistemi $\{B\}$ i $\{P\}$ paralelni to se između koordinata vektora položaja centra platforme ${}^B \mathbf{p}_{Op}$ i koordinata vektora položaja vrha end-efektora ${}^B \mathbf{p}_E$ mogu uspostaviti jednostavne relacije kao

$$x_P = x_E; \quad y_P = y_E; \quad z_P = z_E + l_E \quad (3)$$

gde je l_E dužina end-efektora.

Zbog činjenice da su koordinatni sistemi $\{B\}$ i $\{P\}$ paralelni takođe je lako uočiti da je

$$\phi = \theta_4 \quad (4)$$

Relacije (3) i (4) su važne zbog jednostavnijeg rešavanja inverznog i direktnog kinematičkog problema jer se za njihovo rešavanje može koristiti samo vektor položaja koordinatnog početka koordinatnog sistema vezanog za platformu ${}^B \mathbf{p}_{Op}$. Na ovaj način se vektori spoljašnjih i unutrašnjih koordinata datih u jednačinama (1) i (2) mogu redefinisati kao

$$\mathbf{x} = {}^B \mathbf{p}_{Op} = [x_P \quad y_P \quad z_P]^T \quad (5)$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T \quad (6)$$

Vektori definisani parametrima mehanizma:

- vektori položaja centara obrtnih zglobova na bazi

$${}^B \mathbf{b}_i = [R \cdot c\gamma_i \quad R \cdot s\gamma_i \quad 0]^T \quad (7)$$

- vektori položaja središta između centara pasivnih sfernih zglobova zglobnih paralelograma na platformi

$${}^P \mathbf{p}_i = [r \cdot c\gamma_i \quad r \cdot s\gamma_i \quad 0]^T \quad (8)$$

gde $\gamma_i = \frac{2\pi}{3} \cdot (i-1), i=1,2,3$ predstavlja ugaoni raspored centara na bazi i platformi dok su sa „s” i „c” označene funkcije *sin* i *cos*.

Drugi vektori i parametri su definisani kao što je pokazano na slici 7 gde su ${}^B \mathbf{a}_i, {}^B \mathbf{z}_i$ i ${}^B \mathbf{w}_i, i=1,2,3$ jedinični vektori dok su l_1 i l_2 konstantne dužine spojki. Pri ovome je važno uočiti da u jediničnim vektorima

$${}^B \mathbf{a}_i = [c\gamma_i \cdot c\theta_i \quad s\gamma_i \cdot c\theta_i \quad s\theta_i]^T, i=1,2,3 \quad (9)$$

figurišu unutrašnje koordinate θ_i .

Na osnovu ovako definisanih vektora i geometrijskih relacija sa slike 7 se mogu izvesti sledeće vektorske jednačine:

$$k_i \cdot {}^B \mathbf{w}_i = {}^B \mathbf{p}_{Op} + {}^P \mathbf{p}_i - {}^B \mathbf{b}_i \quad (10)$$

$$k_i \cdot {}^B \mathbf{w}_i = l_1 \cdot {}^B \mathbf{a}_i + l_2 \cdot {}^B \mathbf{z}_i \quad (11)$$

Vektori

$$k_i \cdot {}^B \mathbf{w}_i = [kw_{xi} \quad kw_{yi} \quad kw_{zi}]^T \quad (12)$$

se izračunavaju iz jednačine (10) u kojoj su, u slučaju rešavanja inverznog kinematičkog problema, sve veličine poznate. S obzirom da su svi vektori u jednačini (11) jedinični, to se kvadriranjem obe strane ove jednačine dobija da je

$$l_2^2 = k_i^2 - 2 \cdot l_1 \cdot ({}^B \mathbf{a}_i \cdot k_i \cdot {}^B \mathbf{w}_i) + l_1^2 \quad (13)$$

odnosno

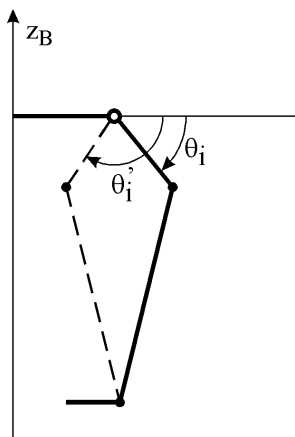
$$l_1^2 - 2 \cdot l_1 \cdot ({}^B \mathbf{a}_i \cdot k_i \cdot {}^B \mathbf{w}_i) + k_i^2 - l_2^2 = 0, i=1,2,3 \quad (14)$$

iz koje se mogu rešiti inverzni i direktni kinematički problem.

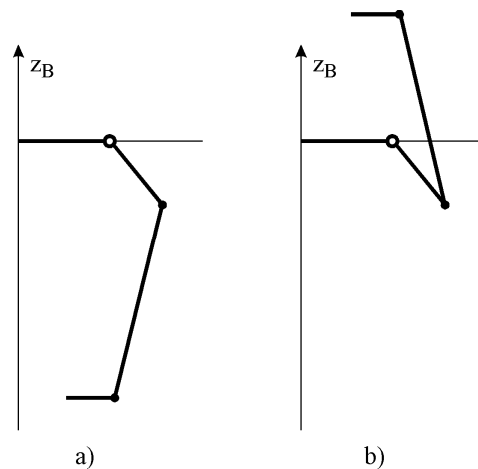
U slučaju rešavanja inverznog kinematičkog problema jednačine (14) čine ešalon odnosno nisu spregnute po unutrašnjim koordinatama θ_i . Rešavanjem svake od njih nezavisno dobijaju se po dva rešenja θ_i i θ_i' , slika 8. Kao što se može videti sa slike 8, u cilju izbegavanja singulariteta uvek se uzima prvo rešenje.

Efikasnost pokazanog pristupa modeliranja u pogledu brzine izračunavanja inverznog kinematičkog problema se ogleda ne samo u činjenici da se ne koriste pomoćne promenljive već i u tome što su, kao što je rečeno, jednačine u potpunosti raspregnute tako da je moguće paralelno procesiranje.

Jednačine (14), ali sada kao sistem, takođe omogućavaju i analitičko rešavanje direktnog kinematičkog problema odnosno izračunavanje spoljašnjih koordinata x_P, y_P i z_P koje figurišu u izrazima za kw_{xi}, kw_{yi} i kw_{zi} , $i = 1,2,3$, jednačina (12), a za zadate unutrašnje koordinate $\theta_i, i = 1,2,3$. Kao i u slučaju rešavanja inverznog kinematičkog problema, detaljni postupak rešavanja je ovde izostavljen kako zbog obimnosti tako i zbog ograničenosti cirkulacije rezultata ali se navodi da se pojavljuju dva rešenja, slika 9, od kojih je fizički izvodljivo samo rešenje sa slike 9a).



Slika 8. Dva rešenja inverznog kinematičkog problema

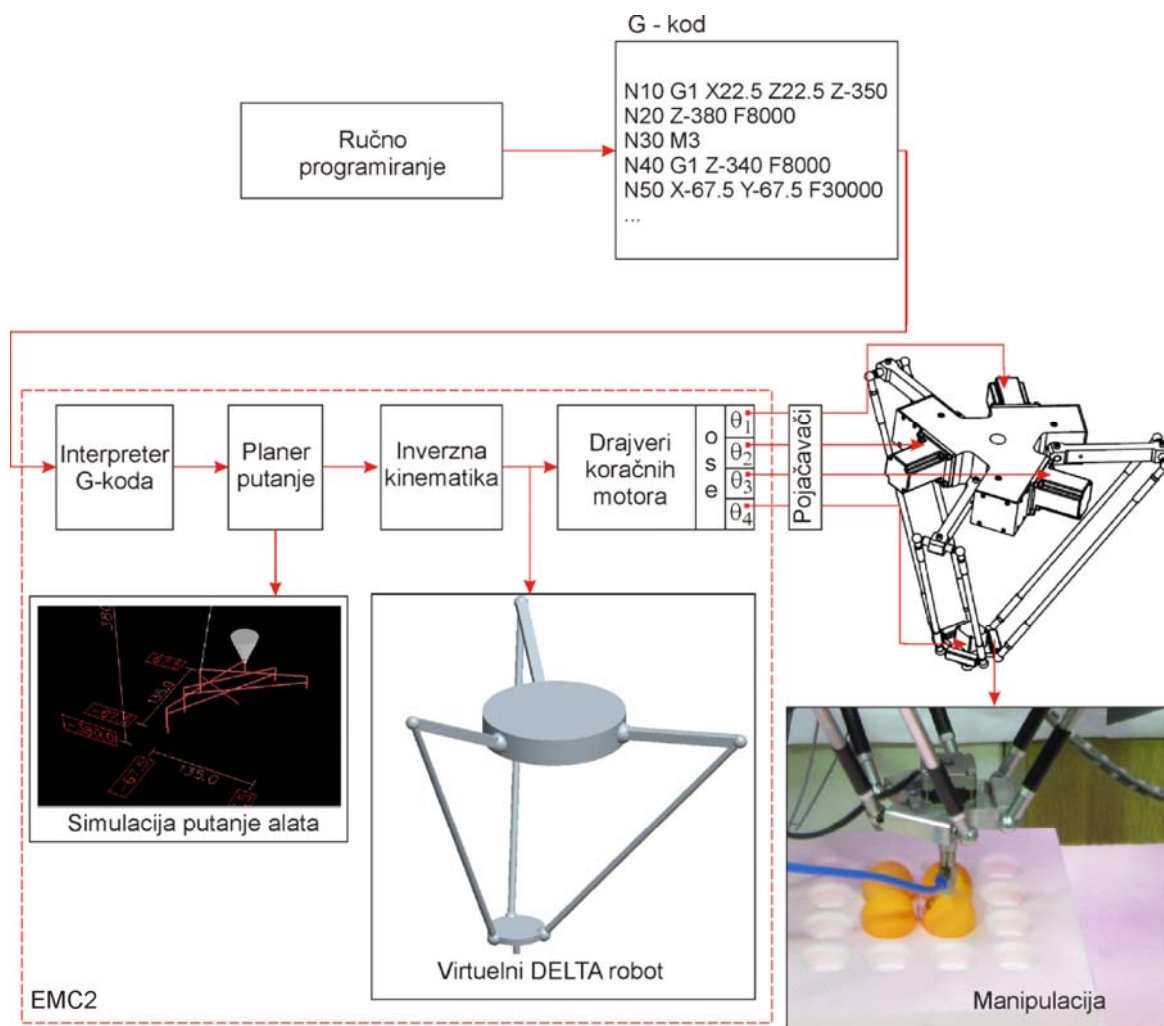


Slika 9. Dva rešenja direktnog kinematičkog problema

5. SISTEM UPRAVLJANJA I PROGRAMIRANJA

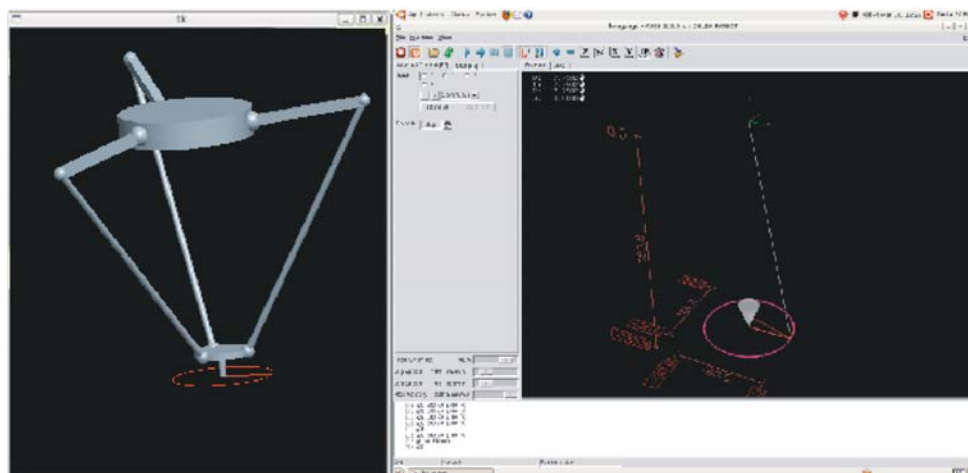
Upravljački sistem razvijenog prototipa je baziran na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje i ima strukturu koja je pokazana na slici 10.

Razvoj sistema upravljanja se odvijao u više faza. U cilju testiranja funkcija inverzne i direktne kinematike, ponašanja sistema u realnom vremenu i razvoja sistema programiranja prvo se konfiguriše virtuelni robot u EMC2 u Python grafičkom okruženju. Kinematički modul je baziran na jednačinama direktne i inverzne kinematike koje se programiraju u C jeziku i integrišu u jezgro EMC2 sistemskog softvera. Ovako konfigurisani sistem upravljanja omogućava testiranje funkcionalnosti novo konfigurisanih elemenata korisničkog interfejsa, interpolacionih parametara i programirane putanje u granicama radnog prostora, koji pored opsega unutrašnjih koordinata obuhvata i opsege kretanja pasivnih zglobova. Za kompletiranje sistema upravljanja razvijenog prototipa sa, u ovoj fazi, koračnim motorima korišćen je paralelni port PC-a za komunikaciju sistema upravljanja i pogona prototipa.



Slika 10. Struktura sistema upravljanja i programiranja

Kao što se vidi sa slike 10 programiranje je konvencionalno. U toku učitavanja G-koda EMC2 softver izvršava grafičku simulaciju putanje. Pri startovanju programa instrukcije G-koda se izvršavaju u realnom vremenu i generišu upravljački signali koji se mogu usmeriti na realni ili virtuelni robot. Virtuelni robot omogućava završnu verifikaciju G-koda slično postojećim sistemima za off-line programiranje robota, slika 11. Takođe, pored provere mogućnosti ostvarivanja kretanja u zadatim opsezima aktivnih i pasivnih zglobova moguća je i vizuelna provera kolizija sa objektima manipulacije odnosno perifernom opremom. Nakon verifikacije program se može bezbedno izvršiti na realnom robotu.



Slika 11. Virtuelni DELTA robot

6. ZAKLJUČAK

Polazeći od značaja rešavanja problema kinematičkog modeliranja za projektovanje, upravljanje i izradu DELTA robota sa, danas zahtevanim visokim performansama, razvijena je metoda kinematičkog modeliranja na bazi minimalnog broja parametara, koja je efikasnija od postojećih pristupa [6] ne samo u pogledu projektovanja, izrade, upravljanja i programiranja već i u pogledu razvoja efikasnih algoritama za kalibraciju i kompenzaciju [7,8]. U radu je predstavljen specifični pristup kinematičkog modeliranja kao osnove za razvoj i gradnju domaćeg DELTA robota. Upravljački sistem razvijenog prototipa je baziran na PC real-time Linux platformi i EMC2 softverskom sistemu za upravljanje mašina alatki i robota. Razvojem prvog domaćeg DELTA robota pokazanog na slikama 2 i 3 stvoreni su uslovi za razvoj varijantnih rešenja odnosno rekonfigurabilnih robota i manjih mašina alatki koji je u toku. Koncept ovih rešenja čiji je razvoj u toku je pokazan na slici 4.

7. LITERATURA

- [1] J.P. Merlet (2000) Parallel robots, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, ISBN 0-7923-6308-6.
- [2] M. Weck, D. Staimer (2002) Parallel Kinematic Machine Tool – Current State and Future Potentials, Annals of the CIRP, 51(2), pp. 671-681.
- [3] R. Clavel (1990) US patent No. 4,976,582.
- [4] L. Rey, R. Clavel (1999) The Delta Parallel Robot, Parallel Kinematic Machines, Eds. C. R. Boer, L. Molinari-Tosatti and K.S. Smith, Springer, pp. 401-417.
- [5] D. Milutinović, M. Glavonjić, Lj. Tanović, P. Bojanić, R. Puzović, S. Živanović, B. Kokotović, M. Popović, N. Slavković, G. Mladenović (2011) Rezultati istraživanja i razvoja nove generacije obradnih sistema, 37. JUPITER konferencija, 33. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. UR.51-UR.64, Mašinski fakultet, Beograd, ISBN 978-86-7083-724-9.
- [6] F. Pierrot, A. Fournier (1990) Fast models for the DELTA parallel robot, IFIP, Rome, Italy, pp. 123-130.
- [7] D. Milutinović, M. Glavonjić, S. Živanović (2002) Novi paralelni mehanizam na bazi DELTA koncepta, 28. JUPITER konferencija, 24. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.121-3.126, Mašinski fakultet, Beograd.
- [8] Lj. Tanović, P. Bojanić, M. Glavonjić, D. Milutinović, V. Majstorović, i drugi (2011) Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, TR-35022, Godišnji izveštaj, Mašinski fakultet Beograd.
- [9] F. Sternheim (1987) Computation of the direct and inverse kinematic models of the Delta 4 parallel robot, in: Robotersysteme, 3, pp. 199-203.

Milutinovic, D., Slavkovic, N., Kokotovic, B., Dimic, Z., Glavonjic, M., Zivanovic, S.

DEVELOPMENT OF THE DOMESTIC DELTA ROBOT BASED ON A NEW KINEMATIC MODELING APPROACH

Summary:

This paper presents a specific kinematic modeling approach as a basis for the design and development of domestic DELTA robot. The control system of the developed prototype is based on PC real-time Linux platform and EMC2 software for computer control of machine tools and robots.

Keywords: DELTA robot, robot modeling, control and programming system



M. Glavonjić¹⁾, S. Živanović²⁾

NOVI PRISTUP PROGRAMIRANJU NUMERIČKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI PRIMENOM STEP-NC³⁾

Rezime: Novi metod programiranja numerički upravljanih mašina alatki, koji se javlja kao alternativa G kôdu (po standardu ISO6983), je protokol AP238, ili STEP-NC, po standardu ISO 10303. U radu je dato poređenje klasičnog (G kôd) i novog načina programiranja (STEP-NC), struktura opreme potrebne za novi metod programiranja, struktura programa i aktuelni scenariji za primenu protokola STEP-NC.

Ključne reči: STEP-NC, programiranje, NUMA

1. UVOD

Izazovi u pogledu daljeg razvoja novih generacija numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) uvek su aktuelni. U domenu upravljanja istraživanja se odnose na razvoj upravljačkih sistema otvorene arhitekture, a u domenu programiranja otvoren je izazov za programiranje mašina alatki primenom STEP-NC standarda, kao novom metodu programiranja NUMA [1-6].

Izazov za razvoj novog metoda programiranja već je otvoren, ali još uvek nedovršen posao. Već više od pola veka programiranje numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) je zasnovano na G-kôdu, prema standardu RS274D (ISO 6983). Ovaj standard definiše proces obrade preko jednostavnih kretanja alata u odnosu na obradak, poput linearne i kružne interpolacije (pomoću pripremljenih, G funkcija, za definisanje vrsta tih kretanja alata) i raznih uključivanja i isključivanja u obradnom sistemu (korišćenjem pomoćnih, M funkcija). Programom ovakvog formata adresiraju se direktno pojedine ose mašine, pa je neophodno koristiti postprocesore za svaku upravljačku jedinicu i kinematiku mašine posebno. Prema tome, sadašnji CNC programi u obliku G kôda ne uključuju sve potrebne informacije o proizvodu, kao što su podaci o geometrijskim primitivima modela, tolerancijama, osobinama materijala, postavljanju pomoćnog pribora i drugim informacijama nastalih tokom projektovanja i planiranja tehnologije procesa obrade. Sve ove informacije su nestale prilikom konvertovanja proračunate putanje alata u G kôd.

U ovom radu se razmatraju mogući scenariji primene novog metoda programiranja u cilju uključivanja u aktuelne pravce istraživanja, korišćenjem raspoložive opreme, radi sticanja neophodnih znanja za dalje izazove u pogledu razvoja nove generacije domaćih obradnih sistema.

2. STANJE ISTRAŽIVANJA

U cilju prevazilaženja nedostataka G kôda, pristupilo se razvijanju novih standarda za programiranje CNC mašina, kompatibilnim sa standardima STEP iz serije ISO 10303 [3]. Ovaj standard za programiranje se sastoji iz više delova i protokola. Šire je poznat pod imenom STEP-NC (Standard for Product Model Data Exchange for Numerical Control, ili AP-238). Drugu grupu čini serija ISO14649, i razvijena je prvo za tehnologiju glodanja, u okviru nekoliko evropskih projekata, među kojima su i OPTIMAL i MATRAS.

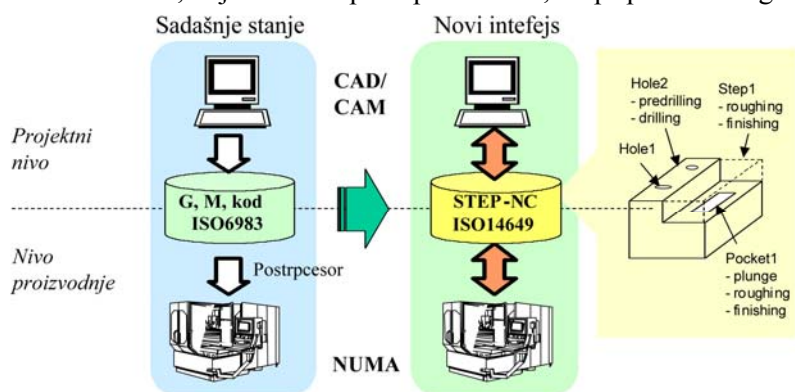
Protokol 238 (AP238, STEP-NC) standarda ISO 10303 rezultat je višegodišnjih napora na internacionalnom nivou da se zameni format programa po standardu RS274D (ISO 6983) novim jezikom koji zadržava vezu podataka iz CAD projektovanja i podataka koji se dobijaju primenom modula CAM, prilikom projektovanja jedne tehnologije mašinske obrade na numerički upravljanim mašinama alatkama.

¹⁾ dr Miloš Glavonjić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, mglavonjic@mas.bg.ac.rs.

²⁾ dr Saša Živanović, docent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, szivanovic@mas.bg.ac.rs.

³⁾ Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema (TR-035022), koji je podržan od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Vlade Republike Srbije.

STEP-NC je pravljjen prethodnih godina sa ciljem da se razvije STEP standard za oblast CAD projektovanja, uz korišćenje savremenih geometrijskih rešenja, da bi se definisala nezavisna putanja alata kao i nezavisni CAM primitivi, koji predstavljaju zapreminu koja se uklanja u procesu obrade. STEP-NC definiše program kao niz operacija kojima se uklanja višak materijala, definisan pomoću zapreminskih primitiva, koji se uklanjaju. Ovi zapreminski elementi predstavljaju rupe, otvore, džepove, kao i 3D zapremine definisane površima. Svakom operacijom vrši se obrada odgovarajućeg primitiva definisanjem zapremine materijala koja se uklanja, tolerancijom, vrstom alata koja se zahteva i nekim osnovnim tehnološkim karakteristikama, kao što je gruba ili fina obrada, korak, broj obrtaja i slično. Operacije se potom sekvencijalno uključuju u tehnološku listu, koja definiše postupak obrade, od priprema do gotovog dela.



Slika 1. Uporedni prikaz programiranja primenom G- kôda i primenom STEP-NC protokola [9,10]

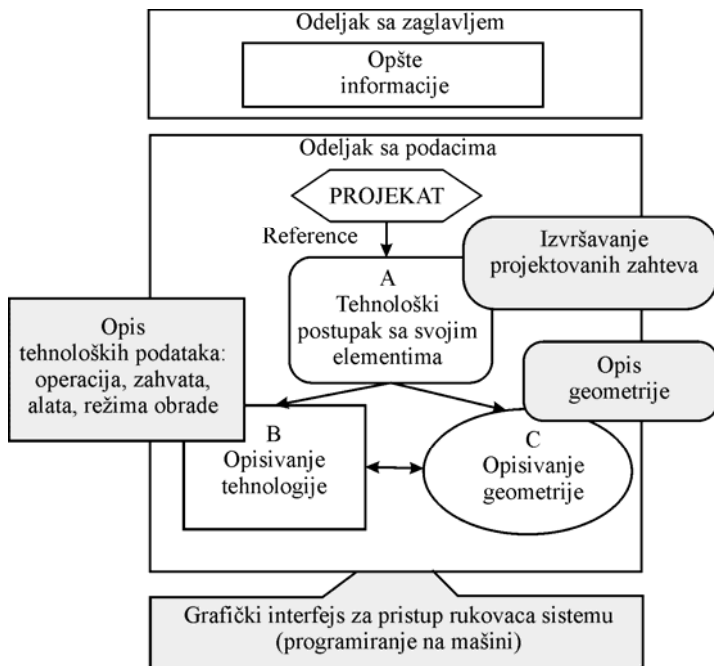
Novi metod programiranja NUMA sistema primenom protokola STEP-NC ovde je nazvan objektnim metodom programiranja NUMA. Ako se pojedini tehnološki oblici i/ili tehnološki primitivi, na delu koji treba napraviti, nazovu objektima (Features) i ako se program za tu izradu kompletira pomoću tih objekata, ne pomoću alfanumeričkih tekstova, onda je takvo programiranje nazvano objektnim. Međutim, klasična programiranja postoje još uvek, a i objektno programiranje do sada nije uvedeno u punom obimu

[13]. Ta dva metoda egzistiraju uporedo [9,10], kako je i ilustrovano na slici 1. U tradicionalnom programiranju primenom G kôda dosta informacija se gubi prilikom prevođenja putanje alata u G kôd pomoću jednostavnih naredbi za kretanja pojedinačno adresiranih osa mašine i pomoćnih funkcija. Tok informacija od sistema za programiranje ka upravljačkoj jedinici je jednosmerni. NUMA sistema sa ovakvim upravljanjem i interpreterom samo G koda ima mnogo. Oni su baza cele moderne industrije i ne mogu se lako zameniti sistemima sasvim druge koncepcije. Uporedo su doterivani i CAD/CAM sistemi za potrebe ovakvih tehnoloških resursa, pa je tako napravljen skladan globalni sistem tehnologija i kadrova koji podržavaju taj sistem. U međuvremenu su se odvijala i ova dva oprečna pokušaja za inoviranje NUMA sistema i sistema za njihovo programiranje [9-11]: (i) dopunjavanje standardnog G koda novim pripremnim funkcijama, bez izmene osnovnog standarda ISO 6983. To rade proizvođači sistema za upravljanje u kooperaciji sa proizvođačima modernih NUMA sistema za višeosnu obradu, višestranu obradu, merne cikluse na mašini i slične potrebe. Tada su redni brojevi raspoloživih pripremnih funkcija raspoređeni u velike grupe i ima ih daleko više od 100. Uporedo se razvijaju i korisnički interfejsi za rukovoce NUMA. U ponudi su i sasvim novi formati G koda, koji se ne mogu čitati interpreterima standardnog. Služe za pojednostavljeno programiranje, često i parametarsko, pomoću makroa i slično. Takvi formati prerastaju i u specifične jezike za programiranje NUMA, sa ugrađivanjem u sistem za upravljanje rešenja inverznog kinematičkog problema svake višeosne mašine posebno, rešenja za višestranu obradu itd. i (ii) uključivanje proizvođača upravljački jedinica u eksperimente sa interpretiranjem programa po protokolu STEP-NC.

Kod STEP-NC protokola raspoloživi su visok nivo informacija, objektno orijentisani opisi dela u neutralnom formatu, dvosmerna komunikacija informacija, kao i povratna informacija iz procesa. Ako bi se analiziralo sadašnje stanje programiranja NUMA moglo bi se zaključiti sledeće [13]: klasični metodi programiranja imaju mnogo konverzija podataka da bi se pokrenula jedna mašina. Pokretanje mašina se vrši programima koji su formatizovani po standardu ISO6983. To je poznati G kôd.

Prošlo je vreme kada su programi za NUMA mogli imati samo elementarne podatke o geometriji i tehnologiji dela, koji treba napraviti. Sada je došlo vreme kada treba jednu mašinu programirati pomoću projekta geometrije obratka (CAD), bez konverzija prilikom pripreme mašine za rad. Plan za to je sadržan u standardu ISO 14649, a onda i u velikoj grupi standarda ISO STEP, od kojih je najvažniji protokol AP-238 standarda ISO 10303 (STEP). Ili, AP-238 je oznaka standarda za STEP-NC, za objektno programiranje NUMA. Novi metod programiranja, zahvaljujući zajedničkoj bazi podataka, omogućava [13-16]:

- integrisani proces projektovanja svih tehnologija bez izostavljanja podataka,
- dvosmernu komunikaciju svih učesnika u projektovanjima i izradi, omogućavajući i uključivanje znanja i iskustava učesnika u tom poslu i
- rad sa bogatim bazama podataka, radi mogućeg stvaranja novih sofisticiranih aplikacija itd.

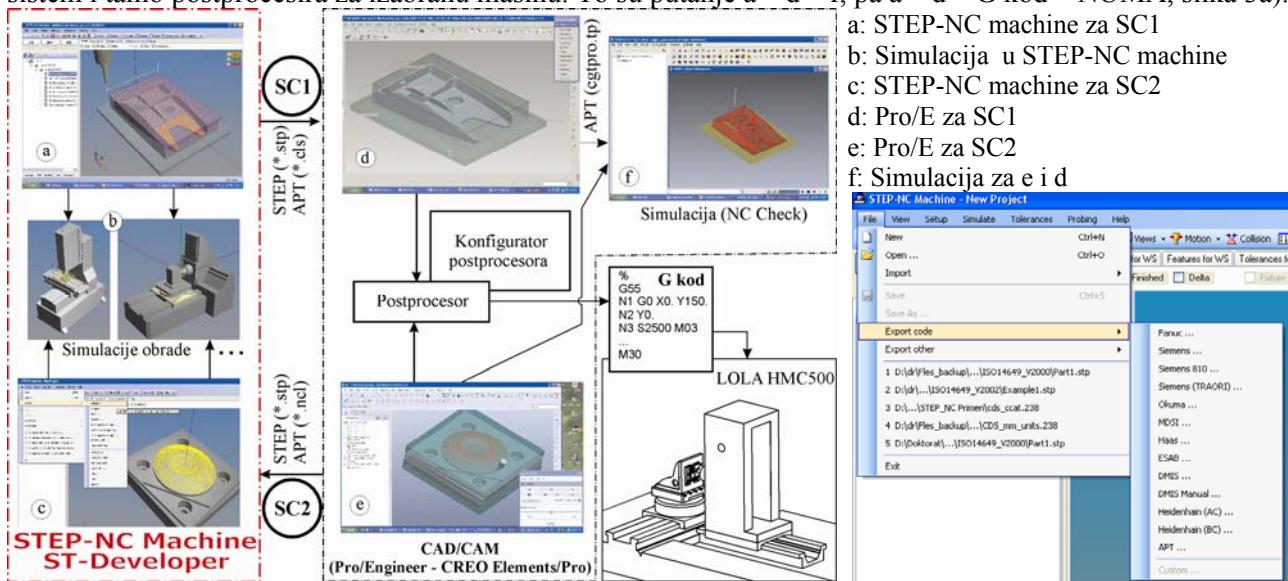


Slika 2. Struktura STEP-NC fajla [9,12,13]

Za sada se programom zove i datoteka kojom se objektno programira jedna mašina alatka po protokolu STEP-NC. U njoj su integrisani podaci o geometriji (koja se preslikava u pozicije mašine) i tehnologiji (koja se preslikava u kinematiku procesa obrade) dela koji treba napraviti. Ta datoteka ima tipsku strukturu, kakva je pokazana na slici 2. Osnovu te strukture čine zaglavlje i odeljak sa podacima. Program se ispisuje po standardu ISO 10303, Part 21. Datoteke, koje se formatizuju po ovom standardu, zovu se ili Part 21 files, ili Physical files i sve imaju zaglavlje i odeljak sa podacima). Sve ovakve datoteke imaju elegantan format i skoro isključivo se formiraju i čitaju pomoću adekvatnog softvera. Neuporedivo su duže od standardnih G kodova. Njih ne čita ni tehnolog ni rukovaoc mašine pa njihova veličina ne ometa funkcionalnost formata programa za NUMA tipa STEP-NC.

3. PRIMER JEDNOG HIBRIDNOG OBJEKTNOG PROGRAMIRANJA

Za sada ne postoje numerički upravljane mašine alatke koje se mogu programirati po svim odredbama protokola STEP-NC, koji je deo standarda STEP (ISO 10303), kao protokol pod oznakom AP-238. STEP-NC se često posmatra kao standard za pripremu podataka za novu generaciju numerički upravljanih mašina alatki, ne kao format programa za takve mašine. U ovom času nije moguće uvežbavanje ovog metoda programiranja, jer su resursi za to u razvoju i u posedu nekolicine istraživačkih institucija. Zato će ovde biti razmotrena dva moguća scenarija za primenu ovog metoda programiranja na postojećim mašinama i raspoloživim softverima, slika 3 i to: SC1 - Preuzimanje izvornog STEP-NC fajla, njegovo prevodenje u G kôd i obrada na mašini i SC2 - uvoz elemenata geometrije obratka, priprema i putanje alata iz uobičajenih CAD/CAM sistema u softver STEP-NC Machine [8]. Prvi pomenuti scenario je ostvariv i realno izvodljiv. Može se realizovati na dva načina. Prvi način koristi internu aplikaciju za direktan izvoz STEP-NC fajla u G kôd za neku od raspoloživih upravljačkih jedinica, koju nudi softver (Fanuc, Siemens, Heidenhain, ...). Drugi način je korišćenje CL fajla (u formatu APT), koji se na specifičan način uvozi u raspoloživi CAD/CAM sistem i tamo postprocesira za izabranu mašinu. To su putanje a→d→f, pa a→d→G kôd→NUMA, slika 3a).



a) Scenariji objektnog programiranja NUMA

b) Export opcija softvera STEP-NC Machine

Slika 3. Koncept primene razvojnog hibridnog objektnog programiranja NUMA [8]

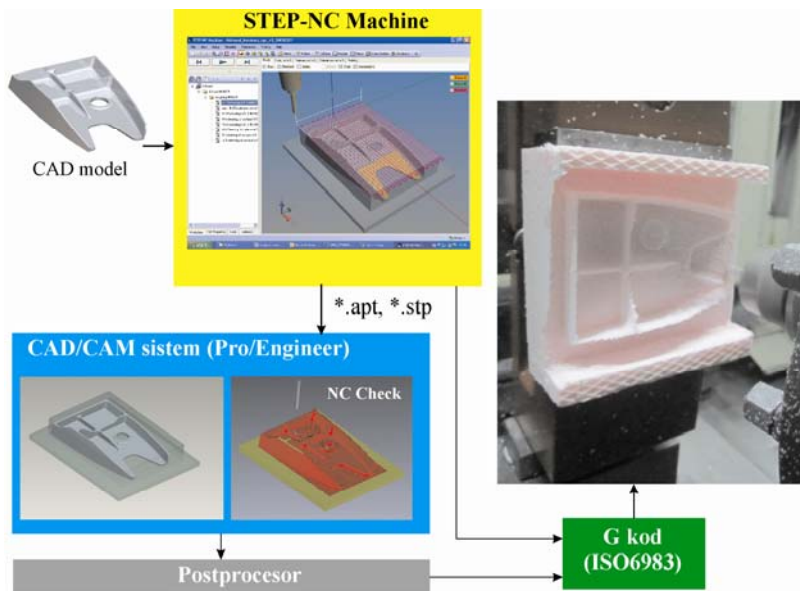
U putanji a→d→f CAD sistem preuzima program u formatu APT, kao na slici 3b), pa se prvo vrši simulacija u modulu f (NC Check). U putanji a→d→G kôd →NUMA CAD sistem koristi konfigurisani postprocesor za generisanje G koda, a ovaj se potom izvršava na NUMA (na slici 3a) i to obradni centar LOLA HMC500). Ovaj obradni centar ima i upravljačku jedinicu Fanuc pa je za ovu mašinu prihvatljiv i direktno konvertovati program na prvi način, izborom opcije Export code → Fanuc..., kao na slici 3b). Za drugi način, korišćenje CL fajla u formatu APT, potrebno je sprovesti proceduru sa sledećim redosledom aktivnosti:

- pribavljanje izvornog STEP-NC fajla,
- izvoz STEP-NC fajla u datoteku sa formatom APT,
- uvoz putanje alata u formatu APT u CAD/CAM sistem za dekodiranje geometrije putanje alata,
- simulacija obrade u CAD/CAM sistemu (NC Check),
- konfigurisanje postprocesora za konkretnu raspoloživu mašinu,
- postprocesiranje dekodirane putanje alata za tu raspoloživu mašinu i pravljenje G kôda i
- obrada dela na raspoloživoj mašini.

Kao klasični CAD/CAM sistem korišćen je Pro/Engineer WildFire 4, a za interpretaciju izvornog STEP-NC fajla korišćena je demo verzija STEP-NC Machine [8]. Na slici 3b) je pokazana EXPORT opcija softvera STEP-NC Machine sa spiskom raspoloživih formata programa za G kôd. U tom spisku je dodat i standardni format APT. Tako se već sada na istom mestu koristi većina važećih formata za programiranje NUMA. Oni su ilustrovani na slici 4. Za jednu probu odabran je mašinski deo pokazan na slici 5 [8].

<pre> \$\$ GENERATED FROM STEP-NC AP-238 \$\$ STEP-NC File: fishhead_bordeaux_opt_v3_20080201.238 \$\$ Generated: 2011-04-20T10:33:34+02:00 PARTNO unnamed workpiece UNITS/MM \$\$ Workingstep: # 1 Surfacing WS 1 TLDDATA/MILL,12,1.5,25,0,0 RAPID GOTO/-18.2,-108.4079,50 RAPID GOTO/-18.2,-108.4079,7 FEDRAT/3000 SPINDL/35000, CLW GOTO/-18.2,-108.4079,2.75 ... GOTO/40.3122,1.0216,-25 RAPID GOTO/40.3122,1.0216,50 SPINDL/OFF END FINI </pre>	<pre> % :0001(1.HMC.TAP) (F I S H E A D 319X222) (S T E P - N C) (NULA =====G56) (GLODALO FI6 HSS----H6) (P R E D O B R A D A) G54 G40 G49 G80 G90 G00 H00 Z0. M5 G56 X0. Y0. B0. S1250 M03 F1000. G43 H6 Z30. G0 Z5. G1 X-9.931 Y-51.272 F1000. Z2.2 ... G0 Z30. M05 (--KRAJ--) G54 G40 G49 G80 G90 G00 H00 Z0. M5 M30 % </pre>
<p>a) Putanja alata iz CAD/CAM sistema, *.cls</p> <pre> ISO-10303-21; HEADER; FILE_DESCRIPTION((' fishhead_bordeaux_opt_v3_20080201.238.'),'1'); FILE_NAME(' fishhead.stp',\$,('STEP-NC consortium'),('),'OPTIMAL parser package',","); FILE_SCHEMA(('stepnc')); ENDSEC; DATA; #1=PROJECT('Kontur',#2,(#3)); #2=WORKPLAN('Arbeitsplan',(#4),\$,#5); #3=WORKPIECE('Konturbauteil',#6,0.01,\$,\$,#8,()); #4=MACHINING_WORKINGSTEP('Kontur schrappen',#13,#16,#17); #5=SETUP('main_setup',#44,#48,(#51)); #6=MATERIAL('St50','Stahl',(#7)); #7=PROPERTY_PARAMETER('E200000 N/mm^2'); #8=BLOCK('Block',#9,260.000,210.000,110.000); #9=AXIS2_PLACEMENT_3D('BLOCK',#10,#11,#12); #10=CARTESIAN_POINT('(-5.0,-5.0,-5.0)); ... #56=COMPOSITE_CURVE_SEGMENT(CONTINUOUS.,T.,#57); #57=POLYLINE('Teilkontur2 des Profils P3-P1 ',(#29,#30,#31,#32,#33,#27)); ENDSEC; END-ISO-10303-21; </pre>	<p>b) G kôd</p> <p>c) STEP-NC fizički fajl po standardu ISO 10303-AP21</p>

Slika 4. Tipični važeći formati programa za NUMA [3,7,8-13]



Slika 5. Primer verifikacije jednog primera hibridnog objektnog programiranja na mašini LOLA HMC500 [8]

Za deo sa slike 5 je izvorni STEP-NC fajl preuzet sa sajta [8], a ovaj deo se može videti i u radovima [14,15]. On je iskorišćen za proveru scenarija SC1 i SC2 za konverzije STEP-NC u APT i G kôd, kao i za obradu na raspoloživoj mašini koja ima samo interpreter G koda, da bi se izvršila verifikacija sadašnjih mogućnosti primene protokola STEP-NC i na mašinama koje nemaju interpreter programa pravljenih po standardima ISO 10303 AP-238 i ISO 14649.

Po proceduri sa slike 5 odvija se scenario SC1 na oba načina: (i) prvi, sa direktnim izvozom G koda iz sistema STEP-NC i (ii) drugi, sa jednim specifičnim izvozom formata APT u CAD sistem i postprocesor za raspoloživu mašinu LOLA HMC500.

4. EKSPERIMENT OBRADE STEP NC PROGRAMA

Planiran je i izveden eksperiment obrade izvornog STEP-NC programa na numerički upravljanoj mašini alatki. Za ovaj eksperiment je korišćena raspoloživa oprema Zavoda za mašine alatke Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i to horizontalni obradni centar HMC 500. Primenjen je drugi način interpretacije STEP-NC formata sa slike 5, pomoću formata APT.

Zahvaljujući mogućnosti prevodenja STEP-NC u APT fajl, koji je postprocesiran i preveden u G kôd, problem je sveden na poznati slučaj CAD/CAM koji omogućava obradu na raspoloživim CNC mašinama. Za izvorni STEP-NC fajl, za deo Fishead [8], u demo softveru STEP-NC Explorer su izvršene potrebne simulacije i uobičajene analize programa i tehnologije obrade. Ova verzija programa dopušta konvertovanje STEP-NC programa u klasičan APT fajl. Na bazi ovog fajla uspešno je rekonstruisana tehnologija obrade u CAD/CAM sistemu Pro/Engineer Wildfire 4, gde je putanja alata takođe verifikovana simulacijom uklanjanja materijala u modulu NC Check sa slike 3a), primenom softvera VeriCUT za simulaciju obrade. Na bazi formata APT za putanju alata ostvareno je njeno postprocesiranje u konfigurisanom postprocesoru za raspoloživu CNC mašinu LOLA HMC500. Na ovoj mašini je i izvršena obrada dela pod nazivom fishhead. Gotov deo je pokazan na slici 6. Prvi put je on obraden na prezentaciji u Tuluzu u okviru stalne međunarodne promocije protokola STEP-NC [8].



Slika 6. Deo dobijen obradom na bazi STEP-NC programa prevedenog na G kôd

5. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen koncept za početak primene novog metoda programiranja NUMA sistema. Opisani su i mogući scenariji za primenu protokola STEP-NC za tu novu generaciju obradnih sistema. Operativni rad na protokolu STEP-NC može se pratiti na njegovoj živoj svetskoj promociji [8]. Ozbiljniji istraživački rad je u toku u nekoliko centara u svetu: U SAD, Nemačkoj, Velikoj Britaniji, Južnoj Koreji, Kini, Švajcarskoj i Novom Zelandu. Svi oni razvoj vode na specifičan način, doprinoseći afirmaciji objektnog programiranja mašina alatki. S obzirom na to da je razvoj svih aplikacionih protokola za podršku STEP-NC standarda skoro priveden kraju, u budućnosti se može očekivati zamena G kôda STEP-NC programima. Uporedo i konvencionalno CNC upravljanje može očekivati naslednika u novoj generaciji STEP-NC upravljanja.

Može se očekivati da će projektovanje proizvoda i u budućnosti odvijati primenom CAD sistema, dok bi se programiranje NUMA odvijalo po sasvim novoj proceduri zasnovanoj na formatizovanju integrisanog modela mašinskog dela po protokolu ISO 10303 AP-238 (STEP-NC) i/ili po standardu ISO 14649. Takav komplet svih relevantnih informacija o obratku treba da ostane sačuvan slanjem na izvršenje programirane tehnologije u adekvatnoj upravljačkoj jedinici budućeg NUMA sistema.

Smatra se da je sadašnje uporedno postojanje protokola AP-238 i celog standarda ISO 14649 privremeno i da će novi sistem programiranja NUMA, a time i upravljačkih jedinica takvih obradnih sistema, biti zasnovani na protokolu AP-238 STEP-NC. Ovaj rad je i koncipiran kao jedna ilustracija naše pripreme za već aktuelnu eru digitalnih proizvodnih tehnologija i NUMA sistema zasnovanih na PC i programiranju i upravljanju na bazi standarda STEP.

6. LITERATURA

- [1] Sokolov A, Richard J, Nguyen V.K, Stroud I, Maederx W, P. Xirouchakis P, Algorithms and an extended STEP-NC-compliant data model for wire electro discharge machining based on 3D representations, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 19, No. 6, September 2006, 603 – 613.
- [2] 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, p.1–16, 2007.
- [3] ISO 10303-238:2007, Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange-- Part 238: Application protocol: Application interpreted model for computerized numerical controllers, ISO, International Organization for Standardization.
- [4] Xu X, STEP into Distributed Manufacturing with STEP-NC, In Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2007, p. 393-421.
- [5] Zhao F, Xu X, Xie S, STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24, No. 2, p.200–216, 2008.
- [6] Valilai O.F, Houshmand M, INFELT STEP: An integrated and interoperable platform for collaborative CAD/CAPP/CAM/CNC machining systems based on STEP standard, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 23, No. 12, p. 1095–1117, 2010.
- [7] ESPRIT Project EP29708, STEP Compliant Data Interface for Numerical Controls (STEP-NC), Final report, Version 1, November 2001, http://www.step-nc.org/html/..data\eu1_final_report.pdf.
- [8] STEP-NC MACHINE, ST-Developer, Step Tools, Inc, <http://www.steptools.com/>, Released: 2012/02/24.
- [9] STEP-NC Newsletter, Issue 2, <http://www.step-nc.org>, July 2000.
- [10] STEP-NC Newsletter, Issue 3, <http://www.step-nc.org/data/newsletter3.pdf>, November 2000.
- [11] STEP-NC Newsletter, Issue 5, <http://www.step-nc.org/data/newsletter5.pdf>, September 2003.
- [12] Hardwick M, Manufacturing Integration using the STEP-NC DLL, ISO STEP-Manufacturing RPI & STEP Tools, Inc. (2008), pp. 1-14.
- [13] Glavonjić M, Objektno programiranje mašina alatki, Podsetnik za nastavu na predmetu Mašine alatke M, Mašinski fakultet Beograd, 2010.
- [14] Rauch M, Laguionie R, Hascoet J-Y, Suh S-H, An advanced STEP-NC controller for intelligent machining processes, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Vol. 28, p. 375–384, 2012.
- [15] Randelović S, Živanović S, CAD-CAM Data Transfer as a Part of Product Life Cycle, Facta Universitatis, UDC 681.31: 65.012, Series: Mechanical Engineering, Vol 5, No 1, p. 87-96, 2007.
- [16] Suh S.H, Lee B.E, Chung D.H, Cheon S.U, Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-Compliant CNC, Computer-Aided Design, Volume 35, Issue 12, pp 1069-1083, 2003.

M. Glavonjić, S. Živanović

A NEW CNC PROGRAMMING METHOD USING STEP-NC

Summary: A new programmig method of CNC Machine tools, which is developing as an alternative to G code, is AP238 protocol or STEP-NC, according to ISO 10303 standard. In this paper, a comparison between classical (G code) and new way of programming (STEP-NC) is given. A structure of equipment needed for new programming metod, program structure and current scenario for imlementation of STEP-NC are shown.

Key words: STEP-NC, NC programming, CNC



Nikola Lukić¹, Petar B. Petrović², Ivan Danilov³

OPTIMIZACIJA SENZORA SILE MEKOG ZGLOBA INDUSTRIJSKOG HUMANOIDNOG ROBOTA SA UPRAVLJANOM POPUSTLJIVOŠĆU ZA ZADATKE ROBOTIZOVANOG SPAJANJA DELOVA

Rezime:

U ovom radu predstavljena je analiza, izbor i optimizacija konstrukcije senzora sile mekog zgloba industrijskog humanoidnog robota sa upravljanom popustljivošću za primenu u robotizovanoj montaži. Upravljanje robotom u okviru zadatka spajanja zahteva informaciju o generalizovanom vektoru sile spajanja. Za razliku od konvencionalnih robotskih sistema, kod humanoidnih robota vrši se merenje pogonskog momenta u svim zglobovima robota i ova informacija se koristi za upravljanje svojstvima generalizovane popustljivosti. Ugradnja senzora sile u kinematski lanac aktuatora unosi poremećaj, jer je senzitivnost pretvaračkog elementa senzora sile obrnuto proporcionalna sa njegovom strukturnom krutošću. U cilju optimalnog razrešavanja ove kontradikcije uspostavljena je metodologija projektovanja tela senzora primenom metode konačnih elemenata. Ova metodologija je primenjena u konkretnom slučaju razvoja senzora za merenje momenta eksperimentalnog mekog obrtnog zgloba, koji se kao prva faza realizacije domaćeg industrijskog humanoidnog robota realizuje u okviru projekta TR35007 koji podržava Ministarstvo prosvete i nauke Srbije.

Ključne reči: Proces montaže, Industrijski humanoidni robot, Meki zglob, Senzor sile

1. UVOD

Globalni trend prelaska iz koncepta masovne proizvodnje prema novoj tehnološkoj paradigmi masovne kastomizacije proizvoda veoma je izvestan. Koncept masovne personalizacije sa fokusom na visoku fleksibilnost proizvodnog sistema, uključujući i slučaj pojedinačne proizvodnje, potiskuje koncept velikih serija identičnih delova ili proizvoda uz ponavljanje istih operacija. Razvoj i primena ovakvog koncepta zahteva implementaciju u sve faze realizacije proizvoda: od projektovanja [1] i planiranja, preko izrade sastavnih delova, do parcijalne i završene montaže. Koncept masovne kastomizacije zahteva ekstremnu diverzifikovanost u svakoj od navedenih faza proizvodnje [1]. Ovakve karakteristike i performanse u kontekstu robotizovanog procesa spajanja delova tj. montaže mogu se obezbediti primenom industrijskih humanoidnih robota.

Istraživanja i unapređenja u oblasti robotizovane montaže i koncepta robota za montažu se stalno razvijaju sa različitih aspekata. U [2] za krajni cilj postavlja se definisanje mehatronskog tehnološkog entiteta robot - mašina za montažu, kao inteligentnog sistema, koji će se svojim karakteristikama dovoljno približiti sposobnostima i veštinama koje poseduje čovek. Tu se razmatraju dinamički modeli robot - okruženje kroz proces spajanja delova, sa posebnim akcentom na značaj kontaktne sile iz ovog procesa na njegovo upravljanje. U [3] se daju polazne osnove metode konačnih elemenata, otpornosti materijala i pojma krutosti sa kojima se može pristupiti projektovanju i optimizacionim analizama konstrukcija. Sa druge strane, u [4] se pored mehaničkih razmatraju i kompletni mehatronski aspekti gradnje senzora sile bazirani na principu promene otpornosti mernih traka usled deformacija. U radu [5] daje se jedan pristup razvoju senzora sile

¹ Nikola Lukić, dipl. inž. maš., student druge godine doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: nlukic@mas.bg.ac.rs

² Dr Petar B. Petrović, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

³ Ivan Danilov, dipl. inž. maš., student druge godine doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: idanilov@mas.bg.ac.rs

baziranom na mernim trakama, koji je senzitivn samo za merenje jedne komponente momenta dok je u ostalim pravcima krut, uz primenu metode konačnih elemenata za optimizaciju njegove strukture. U radovima [6], [7] i [8], kao i u [5], opisuje se pristup razvoju senzora sile namenjenom za ugradnju u zglobove robota, ali u ovom slučaju baziranom na optičkom mernom elementu. U svakom od navedenih radova navodi se da se senzor sile razvija sa ciljem upravljanja impedansom, odnosno krutošću robota. U [8] se daje poseban osvrt na realizaciju i evaluaciju kompletne robotske ruke, sa ugrađenim senzorima sile u zglobovima, namenjene za fizičku interakciju čoveka i robota.

U ovom radu navodi se značaj merenja sile u zglobovima robota uzrokovane kontaktim opterećenjem usled interakcije robota sa okruženjem, i rešava projektovanjem i optimizacijom senzora sile (momenta) baziranog na mernim trakama. U drugom poglavlju daju se osnove dinamičkog modela robot-okruženje, sa osvrtom na moguće zakone upravljanja. Treće poglavlje obuhvata opis i značaj zadatka merenja sile, uz definisanje mogućih slučajeva opterećenja obrtnog mekog zgloba. U četvrtom i petom poglavlju, primenom metode konačnih elemenata, vrši se izbor varijante razmatranih senzora, a zatim i optimizacija variranjem odgovarajućih parametara. Na kraju je dat zaključak sa osvrtom na ostvarene rezultate i planom za dalja istraživanja.

2. POLAZNE OSNOVE DINAMIČKOG MODELA ROBOT-OKRUŽENJE U PROCESU SPAJANJA DELOVA

Istraživanja u oblasti robotizovanog procesa spajanja delova, odnosno inteligentnih sistema za monažu imaju za konačni cilj definisanje mehatronskog tehnološkog entiteta robot-mašina za montažu, koji će se svojim karakteristikama dovoljno približiti svojstvima fleksibilnosti koje poseduje čovek [2]. U ovoj oblasti sa mehaničkog aspekta razmatraju se kinematska struktura i dinamički model robot-okruženje. Kinematski koncept robota moguće je definisati kroz koncept distribuiranog kretanja, koji definiše primarnu i sekundarnu manipulacionu strukturu. One su međusobno sekvencionalno povezane i formiraju jednu jedinstvenu mehaničku strukturu - manipulacioni robot, [2].

Sa druge strane, potpuni dinamički model procesa robotizovanog spajanja delova definisan je skupom parcijalnih dinamičkih modela procesa spajanja. Jednačinama 2.1 i 2.2 definisani su dinamički modeli manipulacionog robota i okruženja [2], respektivno:

$$H(q, \theta)\ddot{q} + h(q, \dot{q}, \theta) = \tau - J(q)^T F^K, \quad (2.1)$$

$$M(q, \theta_E)\ddot{q} + L(q, \dot{q}, \theta_E) = -S_E(q)^T F^K, \quad (2.2)$$

gde su $\tau \in R^n$ - generalisani vektor pogonskih sila/momenata aktuatora robota, $q \in R^n$ - vektor generalisanih koordinata robota, $H(q, \theta) \in R^{n \times n}$ - pozitivno definitna matrica inercijalnih momenata robota, $h(q, \dot{q}, \theta) \in R^n$ - vektor nelinearnih funkcija, $J(\theta) \in R^{n_e \times n}$ - Jakobijanov matični operator, $M(q, \theta) \in R^{n \times n}$ - pozitivno definitna inercijalna matrica objekta okruženja, $L(q, \dot{q}, \theta_E) \in R^n$ - nelinearna vektorska funkcija, $S_E(q) \in R^{n \times n}$ - transformaciona matrica, F^K - vektor spoljašnjeg (kontaktnog) opterećenja, $\theta \in R^{mp}$ - vektor mehaničkih parametara manipulatora, $\theta_E \in R^{mp}$ - vektor mehaničkih parametara okruženja.

Sa aspekta upravljačkih zakona sa povratnom spregom po sili, proces montaže spada u grupu tehnoloških zadataka u kojima se kontaktna sila koristi F^K koristi kao posredni izvor informacija o procesu. Pored toga postoje dva osnovna modela upravljanja ograničenim kretanjem manipulacionih robota sa povratnom spregom po sili: model na bazi logičke povratne sprege i model na bazi kontinualne povratne sprege. Drugi navedeni model se odlikuje glatkim upravljačkim zakonima, što je neophodan uslov stabilnosti upravljačkog sistema. Izdvajaju se tri upravljačka zakona ovog modela sa naglašenim jednačinama kontaktne sile, [2]:

- Upravljački zakon na bazi generalizovane krutosti:

$$F = K_X(X - X_0), \quad (2.3)$$

- Upravljački zakon na bazi generalizovanog prigušenja:

$$F = B_X(\dot{X} - \dot{X}_0), \quad (2.4)$$

- Upravljački zakon na bazi mehaničke impedanse:

$$F = M_X(\ddot{X} - \ddot{X}_0) + B_X(\dot{X} - \dot{X}_0) + K_X(X - X_0), \quad (2.5)$$

gde su M_X , B_X , K_X , $\forall R^{n_e \times n_e}$ željene matrice generalizovane inercije, prigušenja i krutosti kompletnog sistema robot okruženje, a \ddot{X} , \ddot{X}_0 , \dot{X} , \dot{X}_0 , X , X_0 vektori stvarnog i nominalnog ubrzanja, brzine i položaja, respektivno.

3. ZADATAK MERENJA SILE (MOMENTA) U MEKIM ZGLOBOVIMA ROBOTSKE STRUKTURE

Kratkim osvrtom na polazne osnove dinamičkog modela robot-okruženje u procesu robotizovanog spajanja delova, datog u prethodnom poglavlju, jasno se uočava da je merenje kontaktne sile odnosno povratna sprega po sili neophodna za upravljanje jednim takvim procesom. Merenjem sile, odnosno momenta, u svakom od zglobova industrijskih humanoida, uzrokovanog kontaktnom silom iz procesa spajanja delova i korišćenjem tog informacionog sadržaja, realizuju se različiti algoritmi upravljanja robotskom strukturom. Neki od tih algoritama su: kompenzacija gravitacione sile, održavanje zadatog vektora sile tokom izvršavanja zadatka, programabilna/selektivna krutost/prigušenje u unutrašnjim i/ili spoljašnjim koordinatama, programiranje demonstracijom izvršenja zadatka, itd.

Prethodno navedeno ukazuje na to da je robotska struktura sa mekim zglobovima anizotropna, sa mogućnošću zadavanja/definisanja aktivne popustljivosti/krutosti u željenom pravcu. Praktično, upravlja se popustljivošću/krutošću, [6], [7]. Ovake karakteristike imaju suštinski uticaj i značaj za proces spajanja delova, kao i za otvaranje novih istraživanja i unapređenja u ovoj oblasti. Međutim, negativna strana uvođenja senzora sile (momenta) direktno u zglobove robotske strukture ogleda se u smanjenju ukupne krutosti iste. Razlog ovome je smanjenje ukupne krutosti manipulacione konstrukcije usled potrebe da se poveća senzitivnost na mestima merenja sile. Uzimajući u obzir da se ovde razmatraju serijske kinematske strukture, gde se senzori sile kao redno vezani elementi pojavljuju u svakom od zglobova, na osnovu izraza 3.1 zaključuje se da se ukupna krutost neminovno smanjuje. Ukupna krutost strukture čiji su elementi redno vezani izračunava se prema sledećem izrazu, [3]:

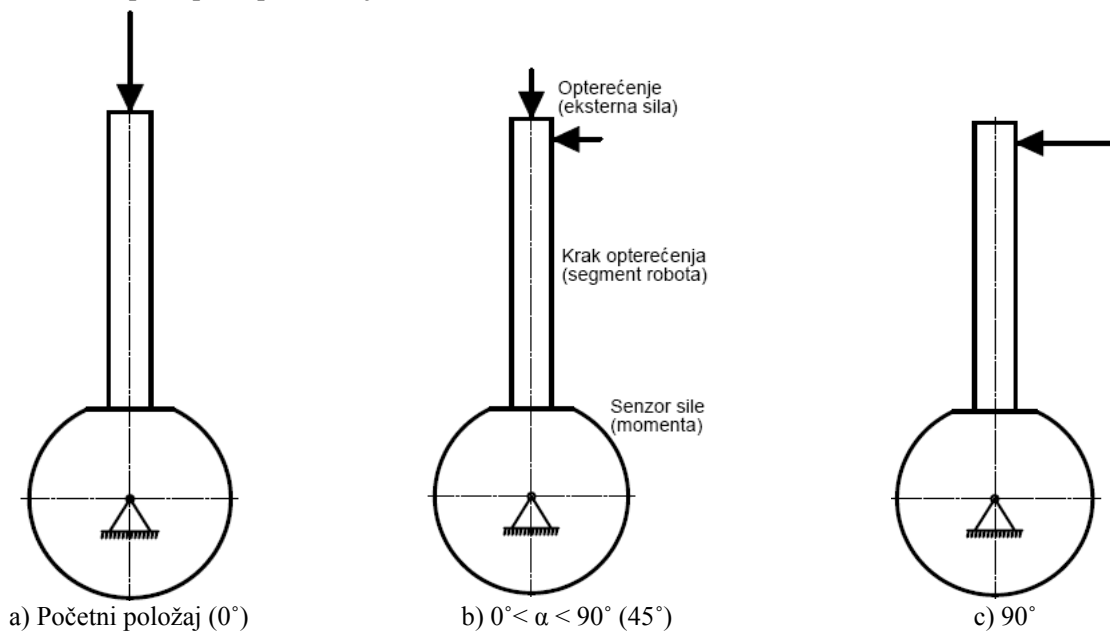
$$\frac{1}{c} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}, \quad (3.1)$$

gde je c_i parcijalna krutost elemenata strukture, a c ukupna krutost.

U skladu sa ustanovljenom potrebom merenja sile u procesu robotizovane montaže, uzimajući u obzir da pri gradnji manipulacionih robotskih struktura primarnu ulogu imaju obrtni zglobovi, odnosno obrtna veza između segmenata robota sa svojom krutošću, identifikovana su tri moguća slučaja opterećenja obrtnog mekog zgloba, kada je osa horizontalna:

- Segment robota je orijentisan u vertikalno (0° ili 180°) - početni položaj. Ukupno opterećenje seče obrtnu osu senzora i moment je jednak nuli, a senzor je opterećen na pritisak/istezanje (Slika 1.2a);
- Segment robota je pod proizvoljnim uglom u odnosu na vertikalni pravac, u intervalu $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Opterećenje se raspoređuje tako da jedan deo uzrokuje pritisak/istezanje senzora, a drugi uvijanje tj. moment. Za slučaj položaja pod uglom od 45° opterećenje se raspoređuje ravnomerno, po 50% (Slika 1.2b);
- Segment robota je pod uglom od 90° , tj. horizontalno orijentisan. Ukupno opterećenje uzrokuje moment (Slika 1.2c).

Kao relevantno opterećenje za projektovanje senzora, analize i optimizaciju uzima se treći slučaj opterećenja, jer je primarna namena senzora merenje momenta. Opterećenje senzora prvim i drugim slučajem biće provereno nakon postupka optimizacije.



Slika 3.1: Tri moguća slučaja pravca dejstva opterećenja senzora sile mekog zgloba u zavisnosti od položaja segmenta robota

Merenje sile se može izvesti na više načina, ali uvek indirektno, jer mi ne možemo da merimo silu na direktan način, uvek merimo odziv neke elastične konstrukcije na njeno dejstvo. Silu možemo da merimo primenom mernih traka, primenom piezorezistivnih pretvarača i jedne široke klase senzora koji su u osnovi projektovani za merenje malih pomeraja (induktivni senzori, optički senzori, itd.), [4]. U ovom radu, za primenu senzora sile u konstrukciji mekog zgloba, koristi se princip merenja baziran na mernim trakama, tj. na promeni njihove otpornosti usled deformacije tela senzora.

3.1 Princip merenja sile baziran na mernim trakama i odgovarajući konstrukcioni kriterijumi

Princip merenja sile pomoću mernih traka bazira se na promeni njihove otpornosti, usled elastične deformacije podloge na koju su postavljene, izazvane dejstvom sile. Kako pomenute deformacije izazivaju veoma nisku promenu otpornosti, u praktičnoj primeni merenje tih vrednosti moguće je povezivanjem mernih traka u specijalno električno kolo koje se naziva Vitstonov most. Merne trake karakteriše mogućnost merenja statičkih i dinamičkih opterećenja (posebno niskofrekventnih dinamičkih) i temperaturna osetljivost koja zahteva kompenzaciju, posebno za slučaj dugotrajnih merenja, [4].

Osnova od koje se polazi kod projektovanja senzora sile baziranih na mernim trakama jeste relacija koja povezuje napon i deformaciju, odnosno Hukov zakon, [3], [4]:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) = E \cdot \varepsilon, \quad (3.2)$$

gde su: σ - napon, F - sila, A - površina poprečnog preseka, E - modul elastičnosti i ε - deformacija. Naponsko polje koje generiše sila čiji se intenzitet meri treba tako fokusirati da ono bude što ravnomernije (uniformno) u zoni u kojoj se lepi merna traka. Pored toga, intenzitet napona treba da bude takav da je ponašanje strukture linearno i da se istovremeno ostvari dovoljna rezerva koja će štititi strukturu senzora od preopterećenja, [4]. U skladu sa ovim uslovima vrednost napona treba da se nađe u opsegu 50-100MPa, a maksimalno 200MPa. Podizanjem ovih vrednosti povećava se osetljivost, a smanjuje krutost senzora. Pored prethodnih uslova i zaključaka, koji se odnose na mehaničke aspekte konstrukcije senzora sile, važno je napomenuti da je naponski odziv (V) moguće povećati primenom konfiguracije mernih traka punog Vitstonovog mosta i naponom napajanja mernog mosta, [4].

4. POSTAVKA PARAMETARA ZA ANALIZU METODOM KONAČNIH ELEMENATA I VARIJANTNI MODELI SENZORA SA IZBOROM ZA DALJU OPTIMIZACIJU

4.1 Postavka analize- karakteristične dimenzije modela senzora, definisanje kraka sile i nominalnog opterećenja, i izbor materijala za simulaciju MKE

Gabariti modela senzora usvojeni su u skladu sa konstrukcionim karakteristikama postojećih elemenata eksperimentalne instalacije mekog zgloba opisane u 3.1. Dimenzije senzitivnih elemenata, odnosno mesta merenja, usvojeni su prema dimenzijama standardnih mernih traka. U razmatranju su bile veličine 1.5 i 3 milimetra, koje se odnose na širinu elementa čija se promena otpornosti, usled deformacija tela senzora pod opterećenjem, meri. Na osnovu ove veličine proističu i gabariti merne trake. Prema navedenim parametrima koji su uticali na karakteristične dimenzije senzora sile, nominalni prečnik predstavljenih varijantni modela senzora kretao se u opsegu 70-120mm, visina 15-30mm, a površina za postavljanje mernih traka 5x10-14x25mm.

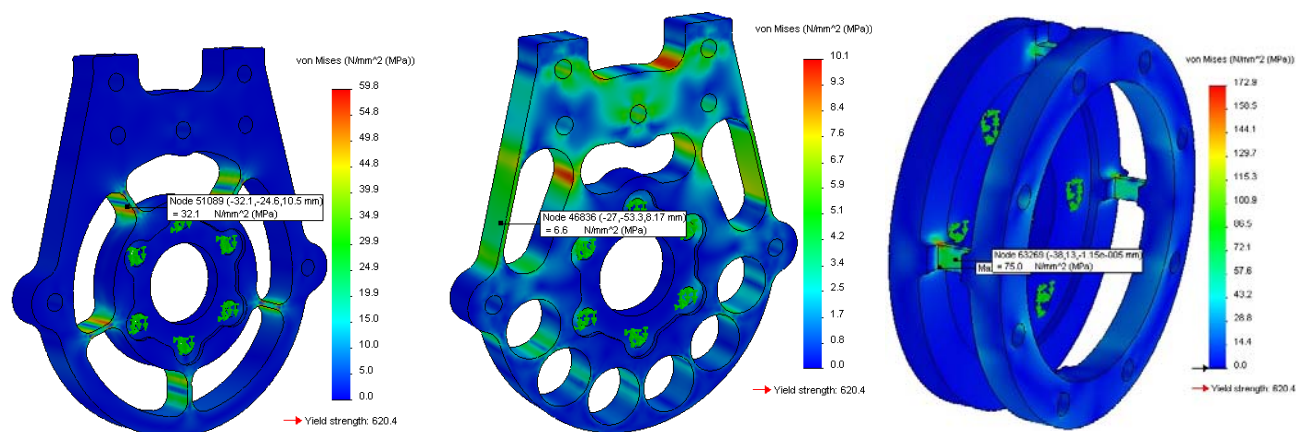
Krak (zavisno od dužine segmenta koji će se postaviti na senzor) na kome deluje opterećenje - sila, koja dalje uzrokuje moment u mekom zglobu, u okviru ove analize je 300mm. Nominalni intenzitet sile na zatom kraku je 100N. Na svakom od varijantnih modela senzora, iz razloga što realnije simulacije MKE, modelirani su i interfejsi za vezu sa ostalim elementima mekog zgloba. Na jednoj strani je veza sa vratilom motora preko prirubnice, a na drugoj veza sa segmentom robotske strukture. Model senzora u okviru simulacije MKE fiksiran je preko otvora za vezu sa prirubnicom, a zatom opterećenje se prenosi preko interfejsa za vezu sa segmentom robota, što odgovara realnoj situaciji.

Materijal modela senzora koji je definisan za potrebe analize i simulacije je legirani čelik, koji nudi softverski paket *SolidWorks*, sa sledećim karakteristikama: modul elastičnosti 210000 N/mm^2 ; zatezna čvrstoća 724 N/mm^2 ; napon tečenja 620 N/mm^2 ; Specifična masa 7700 kg/m^3 ; Poasonov koeficijent 0,28.

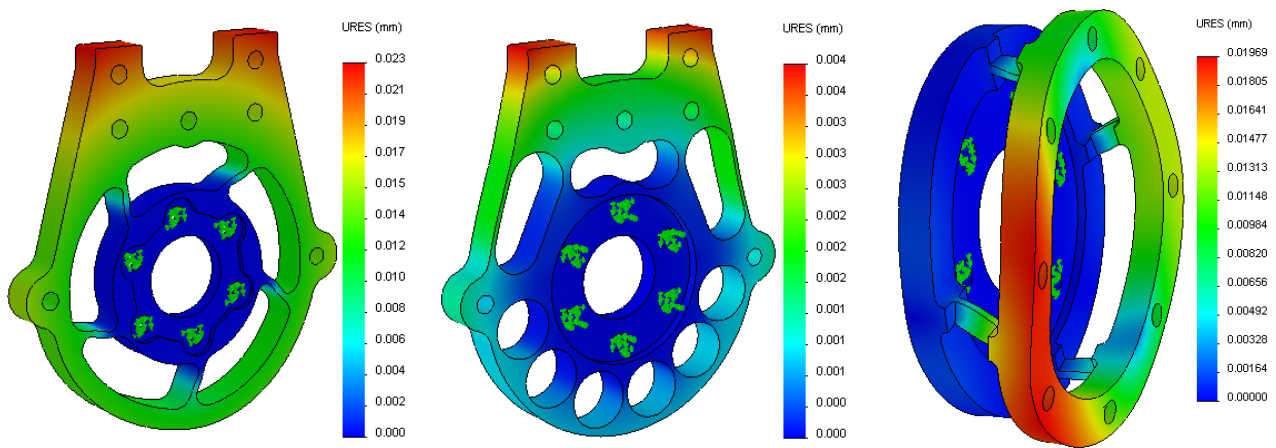
4.2 Varijantni modeli tela senzora. Prednosti, nedostaci i izbor modela za optimizaciju

U skladu sa prethodnim navodima u radu, gde je opisan značaj merenja sile u procesu robotizovane montaže, sa posebnim osvrtom na primenu kod mekog zgloba robotskih struktura industrijskih humanoida, usvojene su tri različite varijante tela senzora. Pored toga što su sve tri varijante namenjene za merenje sile bazirano na principu mernih traka, kod predstavljenih varijanti suštinska razlika je u načinu opterećenja senzitivnih elemenata tela senzora. U razmatranje su uzeta konstrukciona rešenja sa senzitivnim elementima opterećenim na savijanje, pritisak/izduženje i uvijanje (torziju), slika 4.1, respektivno.

Početnom simulacijom MKE, čiji su grafički rezultati prikazani na slikama 4.1 i 4.2, imajući u vidu konstrukcione kriterijume i ograničenja za definisanje geometrije tela senzora predstavljenje u trećem poglavlju rada, izvršena je analiza i izbor varijante modela senzora za optimizaciju. Rezultati simulacije primenom MKE ogledaju se u prikazu raspodele napona i pomeraja za definisano opterećenje u okviru tačke 4.1. Pregled rezultata predstavljenih na slikama 4.1 i 4.2, na osnovu kojih je izvršena dalja analiza i doneta odluka o izboru varijante za optimizaciju data je u tabeli 4.1.



Slika 4.1: Raspodela napona na varijantnim telima senzora za zadato opterećenje



Slika 4.2: Pomeraji varijantnih tela senzora za zadato opterećenje

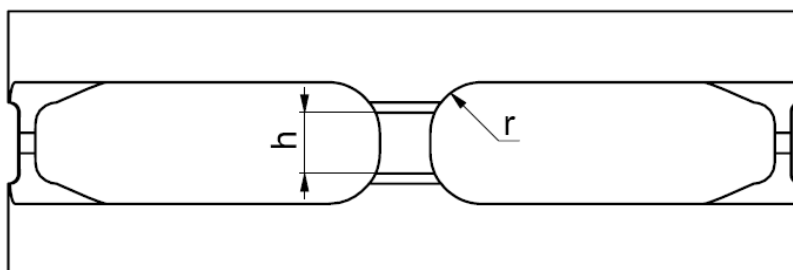
Tabela 4.1: Pregled rezultata simulacije MKE varijantnih modela senzora sile

Kriterijum/ model senzora	Uniformna raspodela napona na mestu merenja	Maksimalni napon [MPa]	Napon na mestu merenja [MPa]	Maksimalni pomeraj [mm]
Varijanta 1	Ne	60	32	0.025
Varijanta 2	Da	10	7	0.004
Varijanta 3	Da	173	75	0.020

Analizirajući rezultate date na slici 4.2 i u tabeli 4.1, zaključuje se da je prva varijanta nepovoljna iz razloga neuniformne raspodele napona na mestima postavljanja mernih traka. Druga varijanta poseduje izuzetno uniformnu raspodelu napona na senzitivnom delu konstrukcije uz veoma nizak nivo pomeraja. Međutim, naponski nivo u zoni merenja je nizak, odnosno daleko ispod preporučenog opsega 50-100 MPa. Treću varijantu modela tela senzora karakteriše visok naponski nivo na mestu merenja, uniformna raspodela i zadovoljavajući nivo pomeraja. Maksimalni napon kod ove varijante je posebno izražen, ali i dalje ispod definisane granice od 200 MPa. Na osnovu prethodno navedenog, za dalja unapređenja i optimizaciju uzima se treća varijanta, kod koje su senzitivni delovi konstrukcije opterećeni na uvijanje.

5. OPTIMIZACIJA I VERIFIKACIJA STRUKTURE SENZORA SILE PRIMENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA

Na osnovu analize date u prethodnom poglavlju, kao što je navedeno, za dalju optimizaciju konstrukcionih parametara izabrana je varijanta strukture senzora sile čiji su senzitivni elementi opterećeni na uvijanje. Dakle, zadati parametri opterećenja (krak i sila) i izabrani materijal senzora, koji su definisani u 4.1, ostaju isti i za optimizacionu analizu. U okviru ove analize, odnosno simulacije MKE, variraju se dva parametra konstrukcije senzora: h - efektivna visina senzitivnog elementa i r - radijus zaobljenja (Slika 5.1). Nepromeljive karakteristične dimenzije tela senzora, tokom procesa optimizacije, su debljina senzitivnog elementa (1,6mm), prečnik senzora (78mm) i visina interfejsnih prstena (7mm). Ukupna visina senzora zavisa je direktno od parametra koji se varira - efektivne visine senzitivnog elementa h .



Slika 5.1: Skica tela senzora sa označenim parametrima koji se variraju

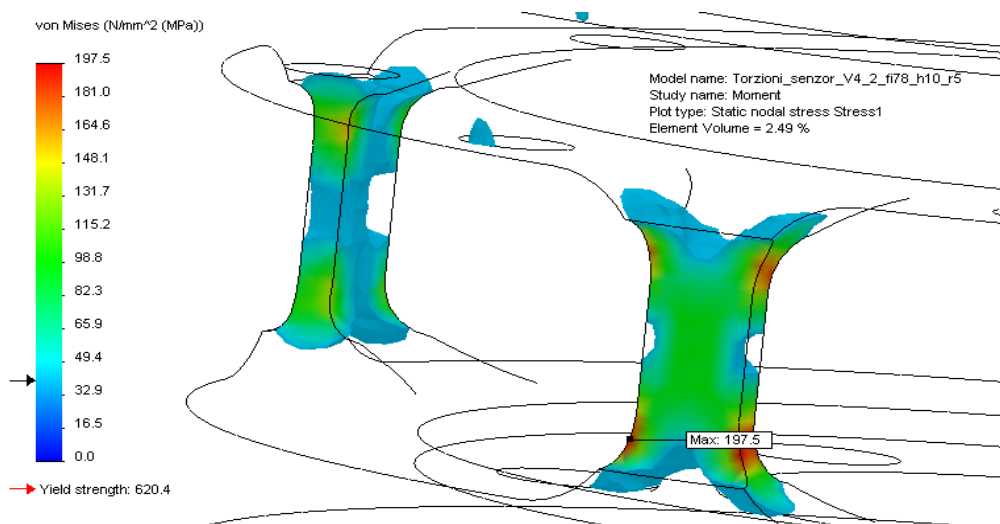
U okviru optimizacione analize efektivna visina senzitivnog elemnta varirana je u opsegu 6-10mm, a radijus zaobljenja 4-7mm. Relevantni rezultati analize (maksimalni naponi, naponi na mestu merenja - površini za

postavljanje mernih traka, pomeraji i deformacije senzitivnih elementa), za prethodno definisano opterećenje, dati su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Rezultati optimizacione analize izabrane varijante strukture senzora sile						
Efektivna visina h [mm]	Radijus zaobljenja r [mm]	Maksimalni napon [MPa]	Napon na mestu merenja [MPa]	Maksimalni pomeraj [mm]	Pomeraj na mestu merenja [mm]	Deformacije na mestu merenja [$\mu\epsilon$]
6	4	157,9	75,8	0,016	0,006	284
	5	140,9	69,1	0,015	0,005	268
	6	120	62,6	0,014	0,005	249
8	4	199,2	87,1	0,021	0,009	330
	5	167,1	79,6	0,019	0,008	304
	6	148,3	69,4	0,017	0,007	278
10	5	197,5	90,7	0,024	0,010	350
	6	182	78,9	0,022	0,009	300
	7	155,3	69,8	0,020	0,008	265

Posmatrajući rezultate date u tabeli 5.1 može se zaključiti da se smanjenjem radijusa i povećanjem efektivne visine senzitivnih elemenata povećava napon, odnosno deformacije, u zoni merenja. Takođe, važi obrnuto. Imajući u vidu neophodno povećanje senzitivnosti i gornju granicu dozvoljenog maksimalnog napona strukture senzora od 200MPa, izdvajaju se modeli sa parametrima h=8, r=4 i h=10, r=5, kao modeli sa najboljim odnosnom maksimalnog napona i deformacija na mestu merenja, što je u tabeli 5.1 i označeno. Ipak, kao optimalno rešenje izdvaja se senzor sa parametrima h=10 i r=5, jer su za niži maksimalni napon deformacije izraženije.

Na slici 5.2 prikazano je naponsko stanje izabranog modela senzora, za zadato opterećenje (100N, za slučaj na slici 3.1c), tako da se prikazuje napon u opsegu 40- 197,5MPa. Na ovakvom prikazu uočava se da su naponi, a samim tim i deformacije, kod izabrane varijante tela senzora, koncentrisani upravo na senzitivnim elementima njegove konstrukcije sa ukupno 2,49% pokrivenosti zapremine za definisani opseg. Takođe, uočava se da je izražena i uniformna zona raspodele napona na spoljašnjoj površini senzitivnih elemenata, dok je na unutrašnjim površinama napon daleko ispod ovih vrednosti. Odavde se zaključuje da su spoljašnje površine senzitivnih elemenata pogodne za postavljanje mernih traka.



Slika 5.2: Prikaz naponskog stanja optimalnog modela senzora za opseg 40-197,5 MPa

Odabrana varijanta tela senzora sa optimalnim vrednostima variranih parametara, pored opterećenja za koje je izvršena optimizaciona analiza (Slika 3.1c), proverena je i za preostala dva slučaja opterećenja. Za slučaj opterećenja prikazan na slici 3.1a i definisani intenzitet sile maksimalni napon je 33MPa, a za slučaj opterećenja prikazan na slici 3.1b 166,5MPa. Ovim rezultatima je dokazana opravdanost odluke da se optimizaciona analiza izvrši za treći slučaj opterećenja pod kojim je telo senzora sile najopterećenije - maksimalni napon je 197,5MPa.

6. ZAKLJUČAK

Radom su obuhvaćene dinamičke osnove modela robot-okruženje u procesu spajanja delova kako bi se istakao značaj i uticaj izmerene kontaktne sile distribuirane u zglobove robota na zakone upravljanja. U okviru zadatka merenja sile, odnosno momenta, navodi se kako implementacija senzora u zglobove robota ima negativan uticaj na ukupnu krutost sistema, tj. njegovo slabljenje. Zatim se ukazuje na moguće slučajeve opterećenja zgloba robota, odnosno senzora, i moguće načine merenja sile sa posebnim osvrtom na princip sa mernim trakama. Za potrebe simulacije metodom konačnih elemenata postavljeni su početni uslovi (geometrija senzora, poznato opterećenje, krak i materijal senzora), a nakon toga je primenom metode konačnih elemenata odabrana varijanta za dalju optimizaciju. Rezultati optimizacione analize varijante senzora, čiji su senzitivni elementi konstrukcije opterećeni na uvijanje, jasno ukazuju na optimalnu kombinaciju variranih parametara. Grafičkim prikazom rezultata uočava se uniformna raspodela napona i deformacija na mestu predviđenom za postavljanje mernih traka, što je posebno značajno za ovaj način merenja sile. Nastavak istraživanja u ovom pravcu prvenstveno će imati za cilj praktičnu realizaciju projektovanog senzora, ali i celokupne eksperimentalne instalacije mekog zgloba. Dalji koraci obuhvatiće razvoj različitih algoritama upravljanja, baziranih na pomenutim dinamičkim modelima, od kojih su neki navedeni u radu.

LITERATURA

- [1] Petrović, P.B., Danilov, I., Lukić, N., **Novi pristup projektovanju ekstremno varijantnih proizvoda**, XXXVII JUPITER konferencija, 33. Simpozijum NU-ROBOTI-FTS, str. 3.26-3.35, Beograd, 2011.
- [2] Petrović, P.B., **Inteligentni sistemi za montažu**, Serija monografskih radova: Inteligentni tehnološki sistemi, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1999.
- [3] Petrović, P.B., **Predavanja na predmetu Projektovanje obradnih sistema**, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za Proizvodno mašinstvo, 2009.
- [4] Petrović, P.B., **Predavanja na predmetu Mehatronski sistemi**, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za Proizvodno mašinstvo, 2010.
- [5] Aghili, F., Buehler, M., Hollerbach, J. M., **Design of a hollow hexaform torque sensor for robot joints**, The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 12, pp 967-976, 2001.
- [6] Tsetserukou, D., Tadakuma, R., Kajimoto, H., Tachi, S., **Development of distributed optical torque sensors for realization of local impedance control of the robot arm**, 36th International Symposium on Robotics (ISR'2005), TU415, Tokyo, Japan, 2005.
- [7] Tsetserukou, D., Tachi, S., **Torque sensor for robot joint control**, Sensors, Focus on Tactile, Force and Stress Sensors, I-Tech, pp. 444, Vienna, Austria, 2008.
- [8] Tsetserukou, D., Kawakami, N., Tachi, S., **Design, control and evaluation of a whole-sensitive robot arm for physical human-robot interaction**, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 6, No. 4, pp 699-725, 2009.

OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL HUMANOID ROBOT SOFT JOINT FORCE SENSOR WITH COMPLIANCE CONTROL FOR ROBOTIC PART MATING TASKS

Abstract:

This paper presents analysis, selection and optimization of soft joint force sensor construction of industrial humanoid robot with compliance control for robotic assembly application. Robot control in part mating tasks requires sensor information of generalized force vector. Unlike the conventional robotic systems, in humanoid robotic, information of joint drive torque acquisition is used for generalized compliance control. Force sensor implementation in actuators kinematic chain introduce disturbance, or unwanted behaviour, of robot structure, because sensitivity of force sensor transducer is inversely proportional to its structural stiffness. In order to optimally solving of this contradiction we have established methodology for desing of force sensor using finite element method. This methodology is further on used for development of physical sensor for investigation of torque measurment in experimental soft joint. This soft joint is the first stage realisation of industrial humanoid robot within the TR35007 project supported by Ministry of education and science of Serbia.

Keywords: Assembly process, Industrial humanoid robot, Soft joint, Force sensore



P.B. Petrović¹, N. Lukić¹, I. Danilov¹

INDUSTRIJSKI HUMANOIDI - NOVI KONCEPT ROBOTA ZA KOLABORATIVNI RAD ČOVEK-MAŠINA U SISTEMIMA ZA ROBOTSKU MONTAŽU

Rezime:

U okviru ovog rada navode se rezultati sprovedenih istraživanja za oblast tehnologije robotizovane montaže u kontekstu razvoja novog koncepta industrijskih robota koji će posedovati bitno unapredjene tehnološke mogućnosti u odnosu na konvencionalne industrijske robote, uskladjene sa zahtevima nove proizvodne paradigme masovne personalizacije. Novi koncept robota, odnosno industrijski humanoidni robot, zasnovan je na tehnološkim svojstvima koja se približavaju svojstvima čoveka u okviru sistema za manuelnu montažu, posebno u delu efikasnog funkcionisanja u nedovoljno struktuiranom okruženju i brzom promeni radnih zadataka. Takođe, industrijski humanoidi poseduju svojstvo kolaborativnog rada sa čovekom. U radu se navodi pregled relevantnih istraživačkih projekata sa opisom eksperimentalnih koncepta industrijskih humanoida koji su razvijeni kroz te projekte i pregled tekućih i planiranih aktivnosti po ovom osnovu u okviru projekta Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju (TR35007) koji zajednički realizuju Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu i kompanija Ikarbus iz Beograda.

Ključne reči: Tehnologija montaže, Humanoidni robot, Adaptivno ponašanje

1. UVOD

Industrijskim humanoidom nazivamo fundamentalno novi koncept industrijskih robota koji se decenijama razvija, ali svoju punu tehnološku vrednost pokazuje tek kroz nove zahteve koje je u prostor proizvodnih tehnologija donela paradigma masovne personalizacije [1, 2], odnosno ekstremne diverzifikacije proizvoda. Aktuelne istraživačko-razvojne aktivnosti uvode humanoidne robote u domen proizvodnih tehnologija, gde im se izvorni pojam humanoid proširuje novim značenjem, pa se inicijalna asocijacija i korelacija između čovekove ruke i geometrijsko-kinematske konfiguracije robota, sada proširuje na mnogo bitniji aspekt, a to je korelacija u dinamičkom, upravljačkom i funkcionalnom smislu. Industrijski humanoid je robot koji je sličan čoveku, pre svega u kontekstu ponašanja, i koji je smešten u kontekst industrijskih proizvodnih tehnologija.

Praktična primena paradigme masovno personalizovane proizvodnje nametnula je potrebu za izgradnjom radikalno novih proizvodnih tehnologija. Problem je u tome što se u postojećim okvirima tehnoloških i inženjerskih znanja ovakve tehnologije praktično ne mogu da ostvare, niti je realno očekivati da se to desi u narednih par decenija. Tehnološka znanja kojim raspolažemo nisu dovoljna da realizujemo veštačke tehnološke entitete koji će posedovati takav stepen fleksibilnosti da mogu da ostvare prividno kontradiktoran zahtev između produktivnosti i cenovne kompetitivnosti, uspostavljen kroz okvir masovne proizvodnje za slučaj kada se obim serija drastično smanji i praktično dovede na nivo pojedinačne, ili čak unikatne proizvodnje. Rešenje koje se prirodno nameće jeste hibridni proizvodni sistem, odnosno prelazno rešenje zasnovano na simbiotski spregnutoj manualnoj i automatskoj proizvodnji, sa takvim stepenom

¹ Prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, Ivan Danilov, Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija; e-mail: pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

preplitanja da su granice tehnoloških podprostora u kojima funkcionišu čovek i mašina vrlo razudjene, a nekada i teško prepoznatljive. Kod hibridnih sistema ovi podprostori se preklapaju, sa funkcionalnom interakcijom koja se praktično svodi na kolaborativni rad čoveka i mašine, na način koji postoji u kolaborativnom radu između ljudi.

Novi tehnološki i inženjerski zahtevi ove vrste su posebno delikatni za domen tehnologije montaže, gde je evidentna funkcionalna nedovoljnost postojećih tehnoloških entiteta. Za razliku od obradnih sistema kod kojih je stepen automatizacije i autonomnosti doveden na vrlo visok nivo, tehnologija automatske montaže ne poseduje tako profilisane tehnološke entitete koji bi se mogli uporediti sa obradnim centrom za glodanje, ili struganje, plazma i lasersko rezanje. Rešenje ovog problema traži se u razvoju fundamentalno novog konceptu industrijskih robota, koji će svojim performansama, pre svega u ponašanju, biti sposobni da ostvare performanse koje su vrlo slične čoveku u okviru izvršavanja zadataka manuelne montaže.

Koncept industrijskih humanoida, kao odgovor na navedene potrebe, razvija se sa eksponencijalnim ubrzanjem akumulacije istraživačkih aktivnosti. Prateći ovaj trend, koji ima veliki značaj za tehnologiju montaže, u okviru Katedre za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, pokrenut je korpus istraživačko-razvojnih aktivnosti sa ciljem da se sadržaji ove vrste približe akademskom i industrijskom prostoru Srbije. Ove aktivnosti su smeštene u okvir projekta TR 35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju², koje podržava Ministarstvo prosvete i nauke u okviru ciklusa projekata tehnološkog razvoja za period 2011. do 2014. godine. U ovom radu daje se pregled osnovnih istraživačkih aktivnosti koje se sprovode u okviru evropskog istraživačkog prostora za domen industrijskih humanoida (strateški EU projekti u okviru FP6 i FP7 ciklusa projekata), navode se osnovni tehnički okviri koji definišu koncept industrijskih humanoidnih robota i sa tim u vezi osnovne informacije o tekućim i planiranim istraživačkim aktivnostima na projektu TR35007.

2. PREGLED STRATEŠKIH RAZVOJNIH PROJEKATA

U okviru ovog poglavlja navodi se kratak pregled izabranih strateških projekata sa internacionalnim konzorcijumom i višegodišnjim vremenskim okvirom, koji u jednom svom delu, ili u celosti, imaju razvoj industrijskih humanoida za oblast proizvodnih tehnologija, sa fokusom na specifične zahteve paradigme masovne personalizacije i sa tim u vezi zadatka kooperativnog rada čoveka i robota u zajedničkom radnom prostoru i na zajedničkom radnom zadatku. Navedeni projekti su povezani sa konceptom Evropskih tehnoloških platformi i imaju za cilj sistemski razvoj robotike u cilju iskorišćenja njenih potencijala kao jedne od generičkih tehnologija, [3, 4], za industrijsku proizvodnju, povezujući robotiku sa korpusom industrijskih ICT i mehatronikom kao strateškim multidisciplinarnim okvirom za razvoj proizvodnih tehnologija u budućnosti. Teza o potrebi iskorišćavanja potencijala robotike proističe iz uverenja koje postoji u naučnoj zajednici za domen proizvodnih tehnologija i mehatroniku da je, bez obzira na dramatični razvoj u proteklom decenijama, aktuelno stanje industrijske robotike bliže početku nego fazi tehnološke zrelosti i istraživačko-razvojne iscrpljenosti.

3.1. Projekat PHRIENDS

Projekat PHRIENDS je FP6 projekat pod nazivom: *Physical Human-Robot Interaction: Dependability and Safety*, finansiran u periodu 2006. do 2009. godine, sa panevropskim konzorcijumom od 6 institucija, uključujući i industrijske kompanije. U okviru ovog projekta polazi se od stava da je kooperativni rad robota i čoveka samo konceptualno moguć, a da u praksi on ne postoji zbog toga što su konvencionalni industrijski roboti opasne mašine koje lako mogu da povrede ili usmrte čoveka. Kao formalna osnova za ovakav stav uzima se Evropska direktiva za mašine 98/37/EC (*European Machine Directive*) u kojoj se eksplicitno navode potrebne zaštitne mere za interakciju čoveka i mašinske opreme, gde se za slučaj industrijskih robota eksplicitno navodi da je projektant obavezan da obezbedi **striktno razdvajanje radnog prostora** u kojem rade robot i čovek, pa se eksplicitno navodi da nije poželjno niti izvodljivo da robot i čovek dele zajedničko radno mesto u kolaborativnom izvodenju nekog konkretnog zadatka.

Osnovni inovativni sadržaj ovog projekta podrazumeva istraživanje novog koncepta za gradnju industrijskih robota koji će omogućiti bezbedan kolaborativni odnos čoveka i robota, uključujući i radikalne inovacije koje će suštinski promeniti konvencionalni koncept industrijskog robota. U tom smislu se navodi: *“We propose an integrated approach to the co-design of robots for safe physical interaction with humans, which revolutionizes the classical approach for designing industrial robots – rigid design for accuracy, active control for safety – by creating a new paradigm: design robots that are intrinsically safe, and control*

² Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije kroz projekat: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju; Identifikaciona oznaka projekta: TR35007.

them to deliver performance". Suština inženjerske kompleksnosti sadržana je u kontradikciji između bezbednosti i performansi robota. Konkretno, važeći standard koji propisuje tehničke aspekte za slučaj fizičke interakcije čoveka i robota kolaborativnog tipa, ISO-10218 iz 2006. godine [5] (bez obzira na godinu izdavanja, ovde treba spomenuti i američki nacionalni standard: American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems - Safety Requirements, ANSI/RIA R15.06-1986. [6]), eksplicitno zahteva da bude ispunjen jedan od tri uslova: 1) Brzina TCP / terminalna ploča ≤ 0.25 m/s, 2) Maksimalna dinamička snaga ≤ 80 W i 3) Maksimalna statička sila ≤ 150 N. Ovi uslovi su opštevažeći i nisu povezani sa veličinom i nosivošću robota. Sasvim je očigledno da se ovakvim uslovima drastično redukuju ukupne performanse tipičnog industrijskog robota i da je nova konceptualna osnova neophodna da bi se postavljeni zadatak rešio. Ova kontradikcija praktično predstavlja osnovu za uspostavljanje odgovarajućeg formalnog okvira za razvoj industrijskog humanoida. U ovom kontekstu postavljeni su vrlo ambiciozni istraživački ciljevi sa konkretnim ishodima:

- Novi koncept aktuatora i izrada prototipova;
- Novi medjuzavisni algoritmi za nadzor i planiranje kretanja;
- Novi upravljački algoritmi za obezbeđivanje bezbedne fizičke interakcije čoveka i robota sa ponašanjem koje je tolerantno na greške i nesavršenosti.

Istraživanja su usmerena u pravcu razvoja lakih i popustljivih robota, sa aktuacijom koja omogućava promenljivu impedansu i sistemima za detekciju kolizije (integrisani senzorski sistem u svim zglobovima robota sa upravljačkim algoritmima koji garantuju prevenciju dodatnih povreda u postimpaktnoj fazi). U osnovi pristupa koji je korišćen nalazi se popustljivi, odnosno meki zglob, u svojim varijantnim konceptualnim rešenjima koja podjednako zahvataju oblast hardvera i oblast upravljačkog softvera [7, 8, 9] i novi upravljački koncepti izvedeni iz ekstenzivnih eksperimentalnih studija kolizija i izbegavanja kolizije čoveka i robota [10, 11, 12, 13].

Projekat PHRIENDS je u istraživačkom kontekstu povezan sa individualnom evropskom tehnološkom platformom za oblast robotike EUROP.

3.2 Projekat SMERobot

Projekat SMERobot je FP6 projekat pod nazivom: *The European Robot Initiative for Strengthening the Competitiveness of SMEs in Manufacturing*, finansiran u periodu 2005 do 2009. godine, koordinator Fraunhofer IPA, budžet projekta 14.9 miliona EUR, sa panevropskim konzorcijumom od 22 institucije, uključujući i 14 industrijskih kompanija. Mada na prvi pogled fokusiran na domen konvencionalnih industrijskih robota, ovaj projekat istražuje jedan vrlo delikatan prostor u kome industrijski humanoidi nose veliki potencijal. Primena industrijskih robota u okviru malih i srednjih preduzeća (SME – *Small and Medium Enterprises*) je u strateškom smislu prepoznata kao vrlo bitna za evropsku industriju kroz dve činjenice. Prvo, u evropskom industrijskom prostoru (preradivačka industrija) postoji 228000 malih i srednjih kompanija i taj resurs je prepoznat kao strateški za rast kompetitivnosti Evropske unije, stvaranje bogatstva, kvaliteta života i zaposlenosti. Drugo, jačanje konkurentnosti ovog korpusa u budućnosti dominantno je uslovljeno jačanjem proizvodnih osnova baziranih na znanju, odnosno stepenom uvođenja novih tehnologija, među kojima je jedna od ključnih tehnologija bazirana na širokoj primeni industrijskih robota. Problem u vezi sa ovim je u tome što su robotske tehnologije uglavnom koncipirane tako da se uspešno mogu da primenjuju u okviru velikih kompanija i ta činjenica predstavlja glavni limitirajući faktor za tehnološki razvoj malih i srednjih kompanija. Male i srednje kompanije se ovim dovode u tehnološku zamku (*'automation trap'*) jer svoju kompetitivnost mogu da razvijaju samo kroz primenu tehnološki nedovoljne automatizacije i niske cene rada. Za rešenje ovog problema projekat SMERobot robot polazi od stava da se ograničenje obima finansiranja, ograničenja u raspoloživim inženjerskim resursima i inherentna dinamičnost u proizvodnom procesu, može prevazići ukoliko se razvije nova generacija robota koji će omogućiti niske troškove primene ove tehnologije, odnosno niske troškove inicijalne investicije, niske troškove njenog korišćenja, niske troškove promene namene kao posledice promena u proizvodnom programu i efikasan rad u uslovima ograničenja u ljudskom resursu. Rešenje se traži kroz rešavanje tri osnovna zadatka:

- Izgradnja SMERobot tehnologije robotskih sistema različitog stepena automatizacije po ceni koja nije veća od 1/3 cene postojeće automatizacije ove vrste;
- Novi poslovni modeli koji nude opcije za finansiranje i korišćenje robotski sistema u uslovima nesigurnosti u obimu proizvodnje, tržišnog veka proizvoda i promenljive kvalifikacije radne snage;

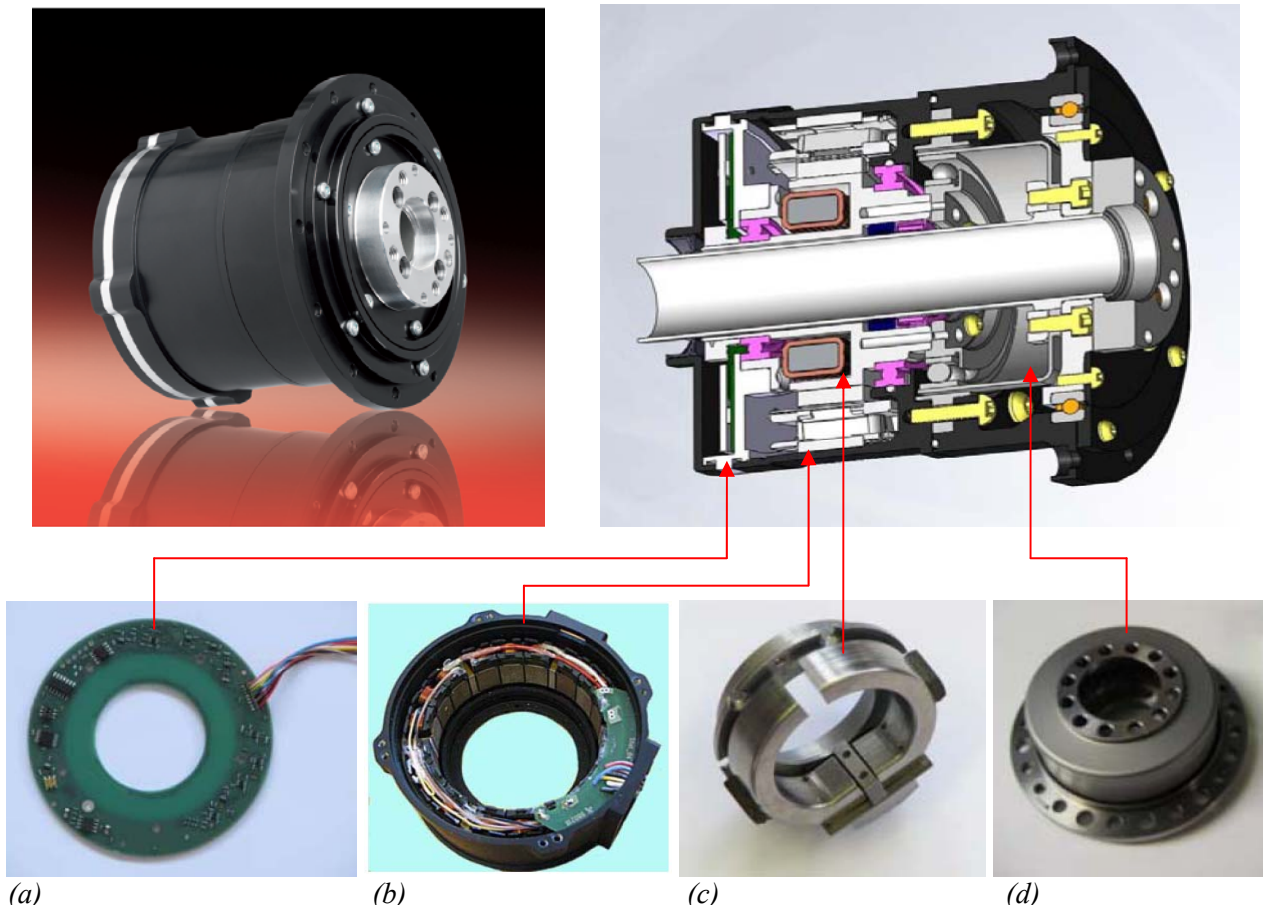
- Jačanje lanca snabdevanja za robotske sistema kroz fokusiranje na potrebe i specifičnu kulturu industrijske proizvodnje u malim i srednjim preduzećima, u odnosu na planiranje, primenu i održavanje.

koji su bazirani na tri osnovna inovativna sadržaja:

- Robot sposoban da razume instrukcije u formi koje koristi čovek u međusobnoj komunikaciji (govor, gestikulacija i grafika);
- Bezbedan i produktivni robot svestan čovekovog prisustva u zajedničkom radnom prostoru (kooperativan, bez ograda);
- Instalisanje i konfigurisanje robotskog sistema u roku od tri dana (modularan sa *plug-and-produce* komponentama).

Projekat je generisao niz inovativnih sadržaja povezanih sa kompleksnim pristupom u okviru kooperativnog rada čovek-robot, upravljive popustljivosti robotske ruke implementirane na konvencionalnim (tržišno raspoloživim) robotima i inovativnim humanoidnim robotima: 1) *Programming by demonstration*, gde je iskorišćen vektor generalizovane sile za izgradnju interfejsa čovek-mašina i prenos veštine/znanja čoveka na robota, i dodatno obogaćivanje ovog interfejsa glasovnim komandama [14, 15], 2) *The SME Worker's Third Hand*, gde je rešenje traženo u okviru primene robotskog humanoida. Takodje, kao podrška razvoju koncepta industrijskih humanoida, razvijen je niz specifičnih komponenti i podsistema (laki aktuacioni sistemi, mekih zglobovi sa varijabilnom popustljivošću, senzorski sistemi za merenje sile, uključujući i MEMS varijantu šestokomponentnog senzora sile), slika 1 i slika 2.

Projekat SMERobot je u istraživačkom kontekstu povezan sa individualnom evropskom tehnološkom platformom za oblast proizvodnih tehnologija ManuFUTURE.

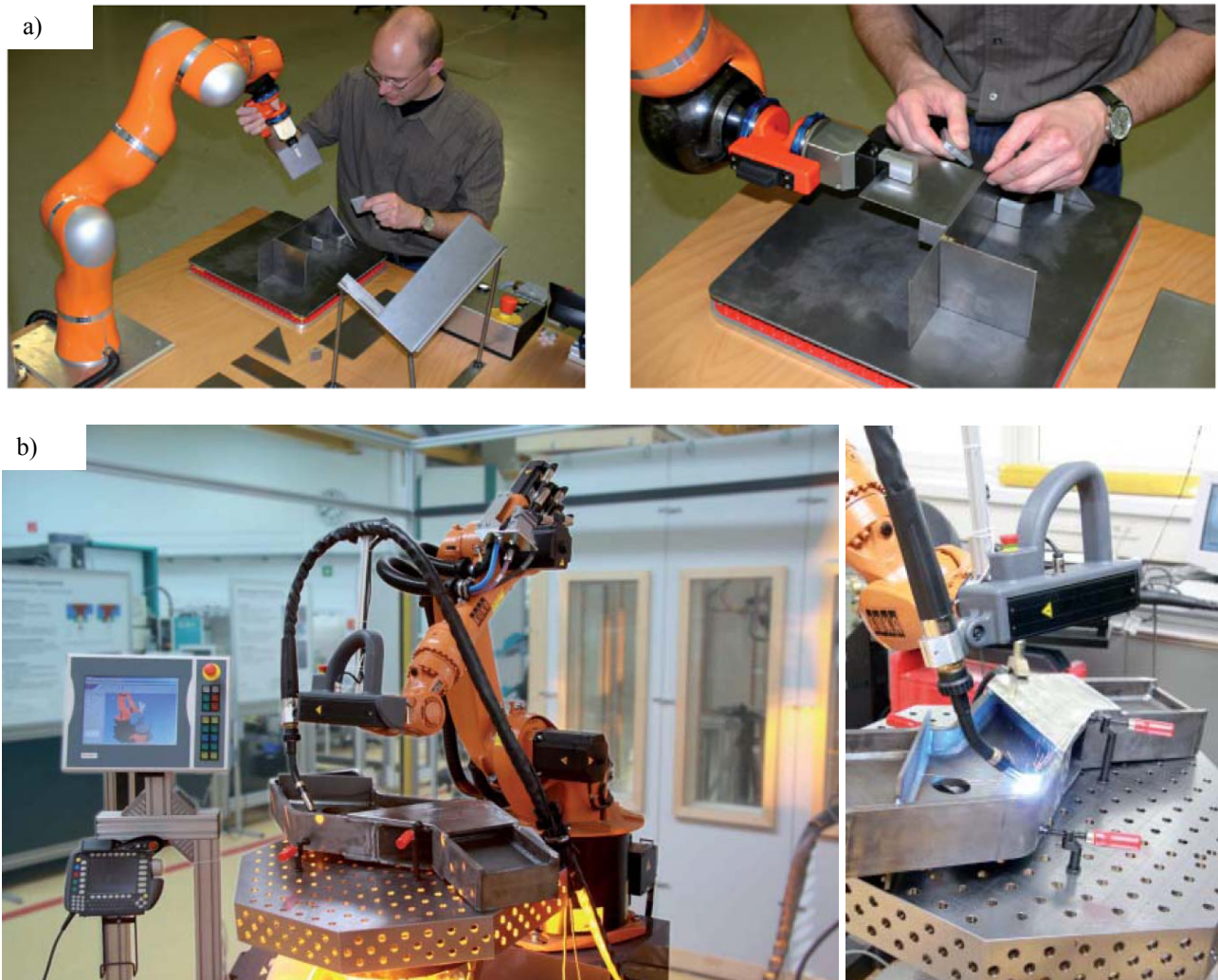


Težina: 2.3 kg; Maksimalni broj obrtaja: 50 rpm; Specifična snaga: 140 W/kg; Specifični pogonski moment u dinamičkom režimu rada: 70 Nm/kg; Specifični pogonski moment u statičkom režimu rada: 40 Nm/kg;

Slika 1: Primeri specijalnog robotskog aktuatora ekstremne specifične snage, razvijenog u okviru SMERobot projekta (ABB) – levo: izgled aktuatora; desno: poprečni presek aktuatora. Osnovne komponente: Specijalni višepolni motor sa šupljim rotorom (a), specijalni harmonic-drive reduktor male mase (b), specijalna sigurnosna kočnica male mase (c), specijalni visokorezolutni kapacitivni obrtni enkoder (d), (sve patentom zaštićeno kao inovativni proizvodi).



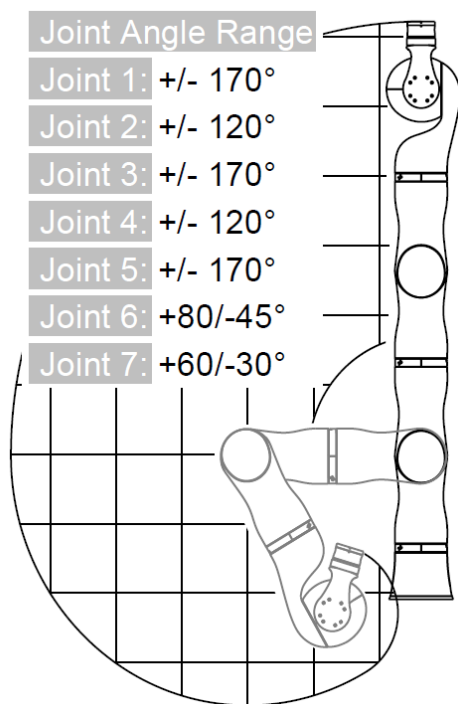
Slika 2: Primeri šestokomponentnog senzora MEMS tehnologije razvijenog u okviru SMErobot projekta za potrebe čovek-robot interakcija/interfejs, sa ključnim performansama: ekstremna kompaktnost, mala masa i jeftina konstrukcija prilagođena masovnoj produkciji.



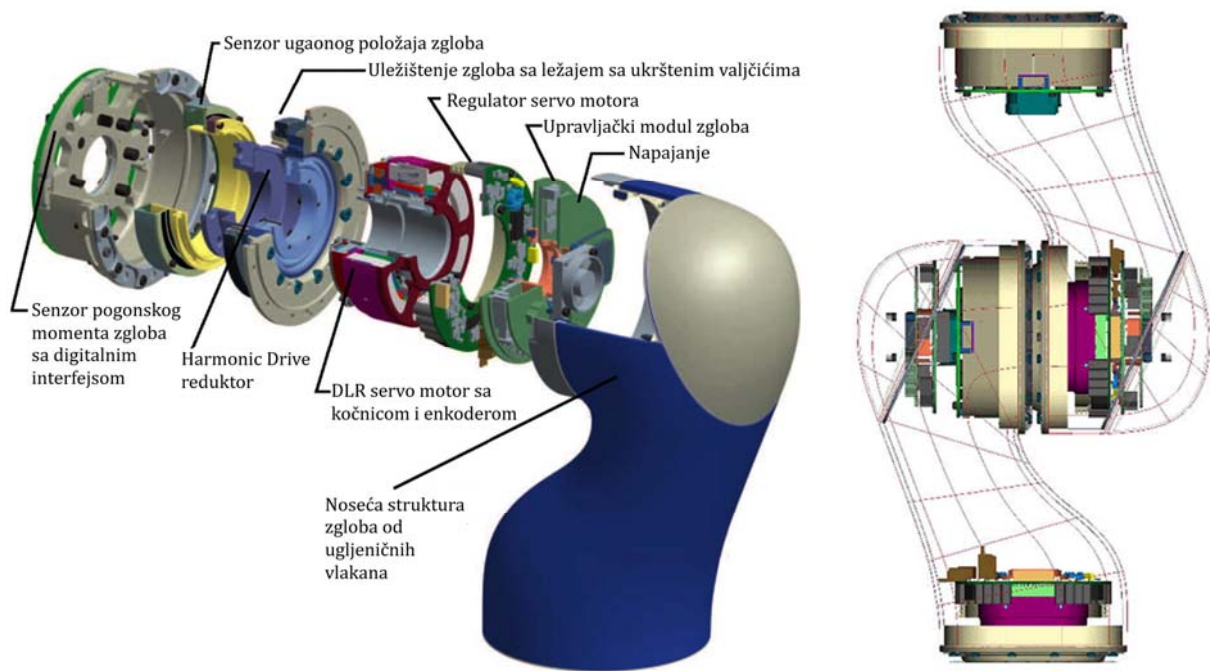
Slika 3: Modeli kolaborativnog rada čoveka i robota razvijeni i praktično verifikovani u okviru projekta FP6 SMErobot: a) Bliska interakcija industrijskog humanoida i čoveka u okviru demonstracione instalacije: The SME Worker's Third Hand (DLR / KUKA); b) Demonstracija koncepta brzog programiranja i interaktivnog rada kroz funkcionalnu i hardversku ekstenziju/adaptaciju konvencionalnog robota na primeru zadatka elektrodušnog zavarivanja u maloserijskoj i pojedinačnoj proizvodnji: Programming by demonstration (KUKA). Ključne komponente su manuelno vođenje robota priemenom programabilne popustljivosti ukupne konfiguracije i brzog prelaska sa upravljanja po poziciji na upravljanje po sili ili kombinovano, dinamički CAD – Robot – Čovek interfejs, automatsko struktuiranje okruženje kroz autonomnu izgradnju dinamičkih modela.

3.3 Projekat DLR / KUKA LWR 4

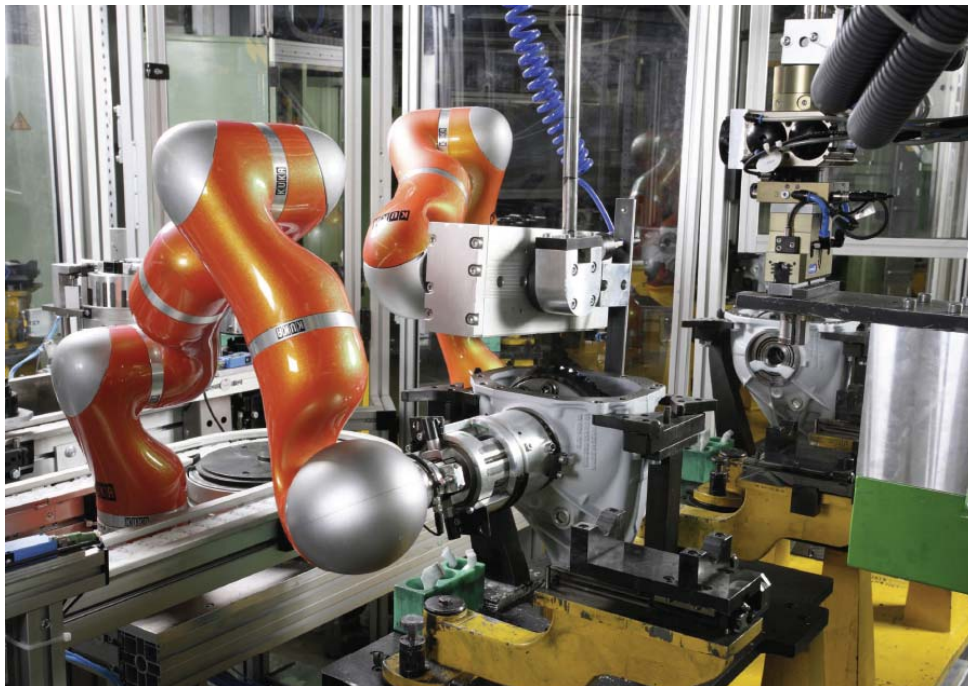
Projekat LWR (Light Weight Robot) je dugogodišnji razvojni projekat Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR (German Aerospace Center), Institute for Robotics and Mechatronics, čije je ishodište širok kompleks razvojnih aktivnosti na izgradnji specijalnih manipulacionih sistema za istraživanje svemira, uključujući i Space Shuttle program američke svemirske agencije NASA (početne aktivnosti tokom 1993. godine, ROTEX misija, Light Weight Robot). Različiti roboti razvijani u okviru ovog programa odlikovali su se čitavim nizom specifičnosti koje su se pokazale vrlo korisnim za izgradnju industrijskog humanioda. Pre svega, to je rigorozno ograničenje mase, zatim specifičnosti u radu u bestežinskom stanju i sensorika kojom je omogućena teleoperacija, odnosno prirodni kooperativni rad čoveka i robota na zadacima koji nisu mogli da budu do kraja unapred planirani i u sredini koja poseduje inherentnu nestruktuiranost. Na slici 4 prikazan je koncept humanoidnog industrijskog robota četvrte generacije koji je spreman za napuštanje istraživačkog prostora i ulazak u masovnu serijsku proizvodnju za primenu u industriji kroz poslovni sistem kompanije KUKA. Robot poseduje gotovo fascinantan odnos sopstvene mase i mase tereta kojim može da operiše i on iznosi 1 : 1 – robot je težak 14 kilograma i može da u modu redukovane brzine radi sa teretom mase 14 kg, dok u modu maksimalnih dinamičkih performansi može da operiše sa masom od 7 kg. Robot poseduje 7 stepeni slobode sa vrlo originalnim i specifičnim konstrukcionim rešenjima. Osnovna specifičnost ogleda se u tome što je kompletan zglob rešen sa integrisanim mehaničkim, upravljačkim i senzorskim hardverom. Ovim omogućeno značajno pojednostavljivanje složenog elektrorazvoda i ostavljen prostor za razvod instalacija za izvršne uređjaje. Svaki zglob poseduje dva senzora za registrovanje ugaonog položaja i jedan senzor za merenje pogonskog momenta, odnosno opterećenje zgloba. Upravljački sistem deluje u prostoru stanja četvrtog reda, slobodno kombinujući upravljanje po poziciji i upravljanje po sili, uz mogućnost potpune električne kompenzacije gravitacione komponente zglobne ruke, upravljanje krutošću i upravljanje prigušenjem – upravljanje aktuacionog sistema svakog zgloba ostvaruje se kroz upravljanje njegovom mehaničkom impedansom, uz mogućnost variranja svih parametara impedanse. Svaki zglob je izveden kao funkcionalno zaokruženi mehatronski sistem (slika), a sprega zglobova u jedinstvenu manipulacionu strukturu ostvaruje se preko eksternog upravljačkog sistema koji je sa lokalnim upravljačkim sistemima zglobova hardverski povezan optičkim putem preko SERCOS bus interfejsa. Detalji se mogu pronaći u okviru [16 , 17]. Sa funkcionalnog i praktičnog aspekta, posebno je značajno da je kompletan robot izveden modularno (rekonfigurabilnost) i iz kompozita, uz rigoroznu redukciju mase svih sastavnih komponenti i čitavog niza po tom osnovu ostvarenih originalnih konstrukcionih rešenja komponenti i sistema u celini.



Slika 4: Industrijski humanoid DLR / KUKA LWR – Redundantna antropomorfna zglobna ruka sa 7 stepeni slobode i upravljanja po poziciji, sili i impedansi. Odnos mase i nosivosti 1:1. Mala ukupna masa od samo 14 kg za dohvata od 936 mm obezbeđuje istinsku bezbednost po čoveka u kooperativnom radu.



Slika 5: Konstrukciono rešenje aktuatora zgloba industrijskog humanoida DLR / KUKA LWR IV.



Slika 6: Test u realnim uslovima industrijske proizvodnje, dva KUKA LWR inudstrijska humanoida na liniji za montažu menjača u proizvodnom pogonu kompanije Mercedes (delikatna operacija montaže spojnice).

3.4 Projekat ROSETTA

Projekat ROSETTA je FP7 projekat pod nazivom: *RObot control for Skilled ExecuTion of Tasks in natural interaction with humans; based on Autonomy cumulative knowledge and learning*, koji se finansira u periodu 2009 do 2013. godine, sa budžetom od 10 miliona EUR (large-scale integrated project, Challenge 2: Cognitive systems, Interaction, Robotics) i panevropskim konzorcijumom od 8 institucija, uključujući i 3 industrijske kompanije, koordinator projekta kompanija ABB Robotics.

ROSETTA projekat je prvi projekat iz robotike koji je na najdirektniji način usmeren ka izgradnji industrijskih humanoidnih robota koji će biti inherentno pogodni za kolaborativni rad sa čovekom, u industrijskim uslovima, na linijama za montažu. U istraživačkom smislu, ROSETTA projekat ima četiri osnovna cilja:

- Obezbediti primenljivost robota za izvršavanje kompleksnih zadataka sa visokom fleksibilnošću i robusnošću;
- Pojednostaviti aktivnosti na prilagodjavanju robota za prelazak sa jednog na drugi rani zadatak (proizvod);
- Stvaranje sistema za lako programiranje ROSETTA robotskih funkcionalnosti bez potrebe za visokoverziranih programera;
- Razvoj novih senzorskih i upravljačkih metoda za bezbednu interakciju čoveka i robota u realnom industrijskom okruženju.

Osnovni praktični izlaz ovog projekta je koncept robot u obliku industrijskog humanoida pod nazivom FRIDA, koji je u skladu sa postavljenim ciljevima i istraživačkim rezultatima konzorcijma projekta, razvijen od strane kompanije ABB Robotics.

FRIDA robot poseduje složenu kinematsku strukturu, koja se sastoji iz dva serijska lanca sa po 7 stepeni slobode. Robot poseduje proporcije i apsolutne mere koje su slične ljudskim, što uz primenu odgovarajućih materijala (kompozitni polimeri), omogućava malu masu ruku, vrlo sličnu onoj kod čoveka. Ugrađeni mehanizmi aktivne i pasivne zaštite, stvaraju sve preduslove za rad ovog robota u vrlo bliskom kontaktu sa čovekom.



Slika 7: Bimanualni industrijski humanoid FRIDA realizovan za potrebe demonstracionih aktivnosti u okviru FP7 projekta ROSETTA. Robot se sastoji iz razgranate sekvencijalno-paralelne strukture sa ukupno 14 stepeni slobode. Ekstremna redundantnost omogućava mu da jednu ruku koristi kao programabilni pribor, a drugu kao programabilni alat za montažu, čime se suštinski približava modelu funkcionisanja čoveka. Mala masa, proporcije čoveka i drugi oblici zaštite, omogućavaju mu da nesmetano deli radni prostor sa čovekom na proizvodnim linijama za montažu.

3. KLJUČNI ZAHTEVI ZA KOLABORATIVNI RAD

Konvencionalna konstrukcija industrijskog robota ne može na adekvatan način primeniti za kolaborativni rad sa čovekom čak i uz ekstenzivne modifikacije po svim podsistemima. Faktički, konvencionalni robot i čovek mogu da rade jedan pored drugog, ali nikada zajedno, deleći isti radni prostor i međusobno saradjujući u izvršavanju zadataka na simbiotskim osnovama. Konvencionalni industrijski roboti su isuviše glomazne mašine da bi usavršavanjem mogle da postanu bezopasne za čoveka. Problem je u tome što su industrijski roboti građeni po konceptu mašina alatki, odnosno oni su projektovani da budu precizni i brzi, što dalje implicira visoku krutost mehaničke i aktuacione strukture, a to kao svoj konačni ishod ima veliku masu robota. Tipičan industrijski robot ima vrlo nepovoljan odnos sopstvene mase i mase tereta kojom može da manipuliše. Ovaj odnos se kreće u intervalu 10:1 pa do 100:1 (u izvesnim slučajevima i više).

Konvencionalni industrijski roboti ne mogu da zadovolje rigorozne zahteve koje propisuje ISO-10218 [5]. Zato, industrijski humanoidi moraju da ispune prvi zahtev: mala masa pokretne strukture robota. To dalje implicira drastično drugačiji odnos sopstvene mase i mase tereta kojom može da manipuliše, koji mora da bude za red veličine bolji nego kod konvencionalnih robota, odnosno da sopstvena masa robota bude približno jednaka masi kojom robot manipuliše. Ovakav zahtev vodi ka fundamentalno novom konstrukcionom konceptu robota, uz primenu drugačijih materijala i tehnologija za izradu ključnih komponentni njegove noseće strukture. Na slici 8 prikazan je primer konstrukcionog rešenja lakog segmenta izvedenog na bazi kompozita (polimer + ugljenična vlakna), spregnutog sa lakim metalnim priključnim površinama za vezu aktucionog sistema i ostalih mehaničkih modula.



Slika 8: Primer noseće strukture DLR industrijskog humanoida sa jediničnom specifičnom nosivošću. Smanjenje svakog grama potrošenog na noseću strukturu robota povećava masu korisnog tereta kojim robot može da manipuliše (priroda se takodje ne razbacuje materijalom, već restriktivnim optimizacionim mehanizmima ostvaruje visoke specifične performanse).

Pored zahteva male mase i visoke specifične nosivosti, industrijski humanoidni robot mora da poseduje inherentnu popustljivost upravljivog tipa. To znači da inudstrijski humanoid mora da poseduje laki aktuacioni sistem sa varijabilnom popustljivošću, takvom da obezbedi dve funkcionalnosti: 1)da popustljivo reaguje na koliziju ne samo vrha robota već bilo kog pokretnog dela njegove noseće strukture i 2)da generiše matricu generalisane krutosti proizvoljnih svojstava, uključujući i izotropna svojstva, kao vrlo poželjna za proces robotizovane montaže, odnosno spajanja delova [18, 19, 20, 24]. Može se pokazati da se ovakva svojstva ne mogu ostvariti konvencionalnim rešenjima aktucionog sistema.

Po definiciji, generalizovana krutost manipulacionog robota u spoljašnjem koordinatnom sistemu određena je opštom relacijom:

$$F = K_X (X - X_0) \quad (1)$$

gde je: $F \in R^n$ - spoljašnja sila koja deluje na vrh robota (tačka H šematskog prikaza robota na slici 9), $K_X = K_H \in R^{n \times n}$ - matična funkcija generalizovane krutosti manipulacionog robota, $X_0 \in R^n$ - vektor nominalnog položaja vrha robota i $X \in R^n$ - vektor stvarnog položaja vrha robota. Osnovni zadatak upravljanja na bazi generalizovane krutosti je da se ostvarivanjem određene krutosti lokalnih servo regulatora, obezbedi zadata generalizovana krutost vrha manipulacionog robota u spoljašnjem koordinatnom sistemu Q_R .

Uticaj krutosti segmenata noseće strukture robota na generalizovanu krutost nije dominantna, dominantan uticaj na generalizovanu krutost ima aktuacioni sistem. Za uslov malih odstupanja od nominalne trajektorije, na osnovu definicije Jakobijanovog matičnog operatora, relacija (1) se dovodi na oblik:

$$F = K_x J(q)(q - q_o), \quad (2)$$

odakle se na osnovu relacije:

$$\tau = J(q)^T F, \quad (3)$$

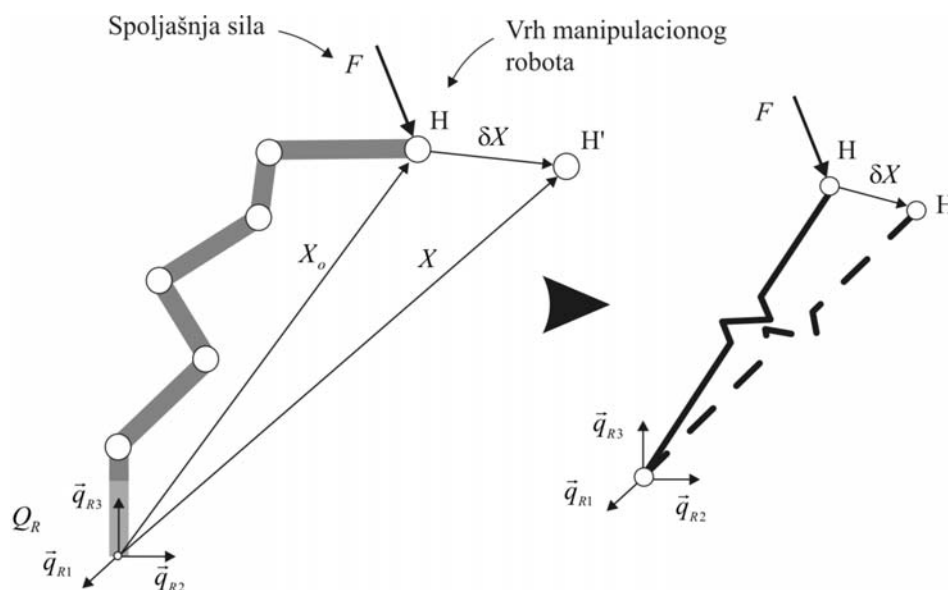
gde je sa τ označen vektor sila/momenata u zglobovima robota, koji uravnotežava dejstvo spoljašnjeg opterećenja F , izvodi relacija:

$$\tau = J^T(q) K_x J(q)(q - q_o), \quad (4)$$

kojom se vrši preslikavanje zadate generalizovane krutosti u unutrašnji koordinatni sistem manipulacionog robota. Preslikavanje (4) definiše ekvivalentnu matricu krutosti u unutrašnjim koordinatama:

$$K_q = J^T(q) K_x J(q), \quad K_q \in R^{m \times m}, \quad (5)$$

koja je simetrična, pozitivno definitna i u opštem slučaju nedijagonalna [21]. Nedijagonalni članovi su posledica mehaničke sprege unutrašnjih koordinata i ova sprega se prenosi na lokalne regulatore.



Slika 9: Model generalizovane krutosti industrijskog humanoida antropomorfne konfiguracije.

Relacija (5) ima izuzetan značaj za projektovanje aktacionog sistema industrijskog humanoida. Mi uvek želimo da u tehnološkom smislu ostvarimo potrebnu generalizovanu krutost u odnosu na vrh robota, koji je neka fizička ili fiktivna tačka u prostoru, značajna za izvršavanje nekog konkretnog zadatka. Da bi se ostvarila potrebna generalizovana krutost neophodno je da se aktuatori, koji poseduju varijabilnu, odnosno programabilnu krutost, podese tako da zadovolje kongruentnu transformaciju definisanu relacijom (5).

U opštem slučaju, transformacija (5) generiše nedijagonalne elemente, što praktično znači da aktacioni sistem robota koji poseduje sposobnost generisanja proizvoljne generalizovane krutosti u proizvoljno izabranoj tački konfiguracionog prostora, mora da poseduje redundantna svojstva. Primer aktacione redundanse za slučaj planarnog robota sa dva stepena slobode, koja generiše nedijagonalne elemente prikazan je na slici 10a. Fizička realizacija aktucije ove vrste je vrlo delikatan inženjerski zadatak, mada je u prirodi ovakva aktucija sasvim uobičajena. Bez aktacione redundanse ove vrste potrebnu generalizovanu krutost u opštem slučaju moguće je ostvariti samo u delu konfiguracionog prostora robota, odnosno samo za neke od poza robota. Konstrukciona kompleksnost jako limitira praktičnu vrednost ovog rešenja.

Alternativno rešenje, koje ima bitno jednostavniju konstrukcionu izvodljivost, je takodje bazirano na redundansi, ali u ovom slučaju je to kinematska redundansa.

Kinematska predodređenost robotskog mehanizma se može da iskoristi za ostvarivanje potrebne generalizovane krutosti vrha robota bez uticaja na kinematske veličine određene radnim zadatkom (unutrašnja kretanja robota koja ne utiču na poziciju i orijentaciju vrha robota, takozvani nulti prostor). Primer ovog rešenja koji je funkcionalno ekvivalentan primeru na slici 10a prikazan je na slici 10b. Nasuprot rešenju baziranom na aktacionoj redundansi, kinematska redundansa stvara probleme analitičke prirode, jer Jakobijanova matrica kinematski redundantnog robota postaje pravougaona. Inverzija matrice kao matematički operator važi samo za kvadratnu matricu, dok se u slučaju pravougaone matrice koriste postupci

pseudoinverzije, po pravilu Mur-Penrouz pseudoinverzija [31]. Pseudoinverzija je generalno vrlo kompleksan matematički zadatak i zato se za praktične potrebe koriste alternativni inženjerski pristupi, kojim se kroz dodatne uslove redukuje kinematska preodređenost. Kriterijum generalizovane krutosti može vrlo efikasno da se upotrebi u tom kontekstu i tako operacioni prostor robota učini neredundantnim. Poza robota koja zadovoljava uslov:

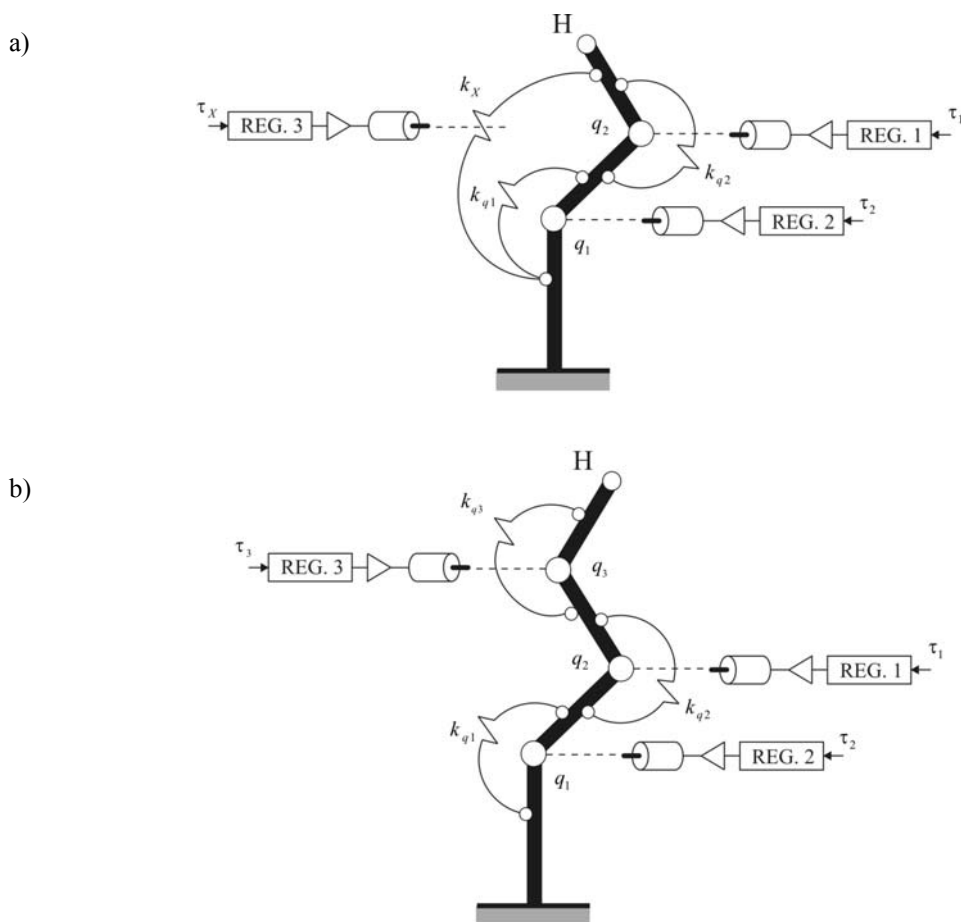
$$K_{q_{ij}} = 0, \quad \forall i \neq j \quad (6)$$

može se ostvariti unutrašnjim kretanjem u okviru granica nultog prostora. Izbor rešenja u okviru (6) treba razmatrati u kontekstu kriterijuma manipulabilnosti, odnosno distance poze robota od singulariteta:

$$U(q) = \sqrt{\det J(q)J^T(q)} \quad (7)$$

Prethodno navedena argumentacija objašnjava zašto je, pored male mase i popustljivosti aktuacionog sistema, neophodno da industrijski humanoid bude kinematski redundantan mehanizam, odnosno da kinematska konfiguracija robota bude sastavljena od najmanje 7 stepeni slobode. Čovekova ruka (bez prstiju i šake) je takodje kinematski redundantna i poseduje 7 upravljivih stepeni slobode.

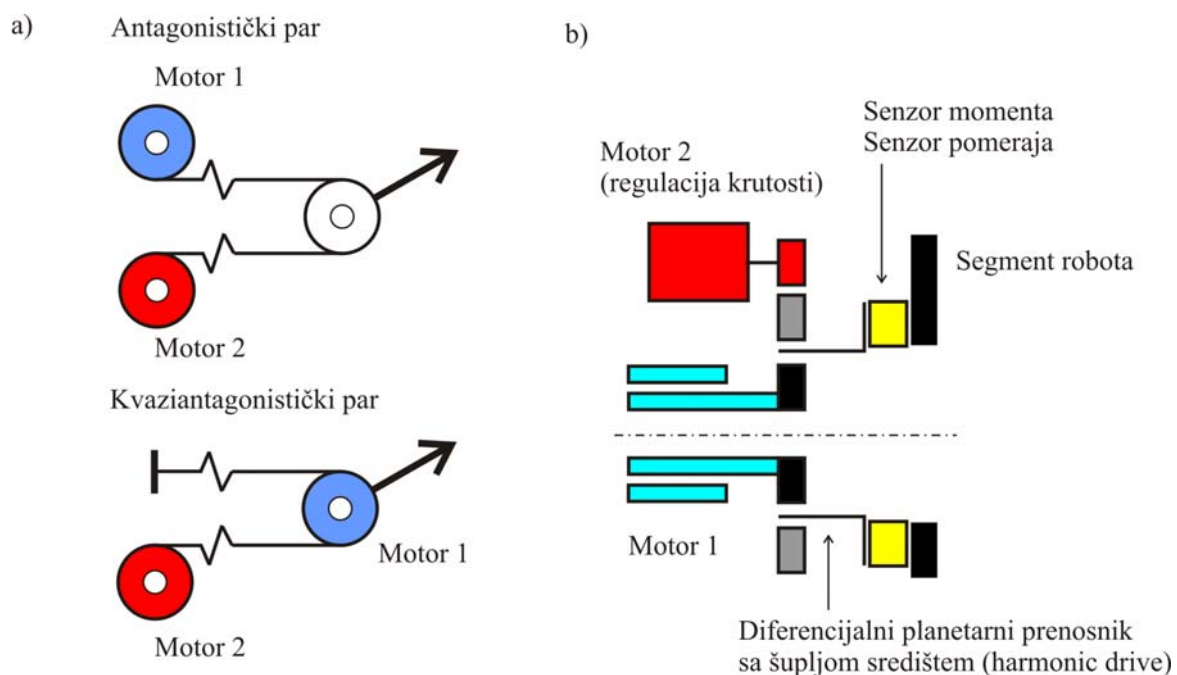
Problematika redundanse je vrlo delikatna i zahteva dalje intenzivne istraživačke aktivnosti, odnosno matematičku i konstrukcionu razradu i to je jedan od zadataka na kome se radi u okviru projekta TR35007. Istraživanja u ovom domenu ne isključuju i hibridna rešenja dobijena kroz kombinaciju akcije i kinematske redundanse, inspirisana rešenjima dobijenih biomimetičkim pristupima.



Slika 10: Redundansa kao koncept za ostvarivanje željene generalizovane krutosti planarnog industrijskog humanoida: a)Aktuaciona redundansa tipa simultane pobude dva zgloba jednim (zajedničkim) aktuatorom i b)Kinematska redundansa kod koje se problem kinematske preodređenosti razrešava dodatnim uslovom zadate generalizovane krutosti za proizvoljno izabran vrh robota (tačka H).

Drugi istraživački zadatak je ostvarivanje funkcije varijabilne krutosti u okviru svakog posebnog zgloba, odnosno rešenje zadatka inherentne popustljivosti robotskih servoaktuiranih osa, na takav način da je variranjem lokalne popustljivosti moguće ostvarivanje potrebne generalizovane krutosti vrha robota. Popustljivost robota je dominantno uslovljena popustljivošću njegovih zglobova. Mada je popustljivost kod humanoidnog robota neophodna za ostvarivanje ponašanja koje je slično čovekovom, popustljivost sama po

sebi ima vrlo negativan uticaj na dinamičke performanse i tačnost. Generalno, popustljivost se ostvaruje na dva načina: 1)neredundantnom aktuacijom sa promenom parametara pojačanja u povratnim spregama regulatora servomotora i 2) antagonističkom i kvaziantagonističkom redundansom akucionog tipa [17, 22, 23]. Drugi pristup pruža čitav niz mogućnosti, a zasnovan je na prosto superpoziciji kretanja dva servoupravljana aktuatora, koji u slučaju sinhronog kretanja u istom smeru ostvaruju kretanje zgloba i visoku krutost, dok u slučaju kretanja u suprotnom smeru, odnosno relativnog kašnjenja, ostvaruju željenu karakteristiku popustljivosti, (konstantnog, progresivnog ili nekog drugog tipa). Na slici 11a prikazan je koncept aktuatora sa varijabilnom popustljivošću tipa nelinearne progresivne opruge u varijanti aktivnog antagonističkog para i u varijanti kvaziantagonističkog para. Sa aspekta lokalne akucione redundanse i praktične implementacije, moguće je iskoristiti diferencijalni prenosnik i to tako što se preko jednog ulaznog kanala ostvaruje funkcija kinematske akucije, a preko drugog ulaznog kanala ostvaruje funkcija upravljanja krutošću (slika 11 b). Zahvaljujući prirodnim specifičnostima diferencijalnog planetarnog prenosnika, ova vrsta sprege omogućava potpunu funkcionalno rasporezanje na nivou upravljanja servomotorima, odnosno da jedan motor funkcionise kao konvencionalni pogonski motor za kretanje zgloba, dok drugi ima funkciju modulacije njegove krutost. Time se otvara prostor za sintezu vrlo kompleksnih upravljačkih zakona za upravljanje mehaničkom impedansom u četvorodimenzionom prostoru stanja $(q, \dot{q}, \tau, \dot{\tau})$. Popustljivi zglob industrijskog humanoida uvek je opremljen senzorom momenta koji precizno identifikuje intenzitet pogonskog momenta koji se saopštava segmentu zglobne ruke. Takodje, nezavisno od toga što servomotori moraju da za potrebe regulacije broja obrtaja poseduju lokalni senzorski sistem za merenje ugaonog pomeraja i ugaone brzine, popustljivi zglob industrijskog humanoida uvek ima enkoder na svom izlazu koji precizno dojavljuje ostvareni ugaoni položaj i dalje, njegov prvi derivativ po vremenu. Istraživanja lokalne akucione redundanse su u najužem istraživačkom fokusu projekta TR35007.



Slika 11: Lokalna redundansa akucije zgloba industrijskog humanoida: a)varijantni oblici antagonističke akucije, b)koncept redundanse ostvaren primenom planetarnog diferencijalnog reduktora.

Treći istraživački zadatak je proširenje koncepta popustljivog upravljanja sa statičkog na dinamički domen, odnosno uvođenje koncepta upravljanja mehaničkom impedansom [25, 26, 27, 28]. Pored upravljanja elastičnom komponentom, u upravljački zakon se uvode i funkcija prigušenja i funkcija inercijalnosti, čime se oblikuje dinamičko ponašanje robotskog mehanizma. Promenom parametara zadate impedanse, menja se dinamičko ponašanje robota, odnosno dinamička svojstva robotskog mehanizma postaju programabilna. Programabilnost dinamičkih ponašanja i promena dinamičkih svojstava je jedna od osnovnih odlika upravljanja ponašanjem industrijskog humanoida kojom se obezbeđuje prilagodjavanje dinamike robota dinamici okruženja [18, 19, 20]. Suština je u tome da upravljački sistem treba da obezbedi takvu dinamiku robota da ona bude komplementarna admitansi okruženja u konkretnom tehnološkom zadatku [21]. U slučaju bimanualnih industrijskih humanoida koji su od izuzetnog značaja za uspostavljanje

novog konceptualnog okvira za inteligentnu robotsku montažu, upravljanje impedansom se proširuje na upravljanje admitansom, na takav način da se jedna robotska ruka upravlja po impedansi – aktivna ruka koja izvodi proces spajanja, dok se druga robotska ruka upravlja po admitansi – pasivna ruka koja ostvaruje funkciju programabilnog pribora za montažu. Ovakav kooperativni rad dve robotske ruke se po svom ponašanju približava ponašanju čoveka u manuelnoj montaži. U ovom kontekstu, upravljanje kretanjem robota na nivou zadatka se dopunjuje adaptivnim funkcijama baziranim na inferentnim mehanizmima koji su izvedeni iz kontekstnog prepoznavanja kontaktnih stanja [29, 30].

4. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada su izložene osnove koncepta humanoidnih robota za primenu u industrijskoj proizvodnji u kontekstu nove proizvodne paradigme masovne personalizacije, odnosno ekstremne varijantnosti proizvoda. U prvom delu rada navodi se pregled ključnih istraživačkih projekata za ovu oblast, ograničavajući se na evropski istraživački prostor, odnosno projekte iz FP6 i FP7 poziva. U drugom delu rada navode se osnovni okviri za razvoj i realizaciju industrijskih humanoida, fokusirajući se na dva ključna aspekta: sposobnost kolaborativnog rada sa čovekom i upravljanje popustljivošću. Polazeći od značaja popustljivosti za proces robotske montaže, navedene su osnovne matematičke osnove za generisanje potrebne generalizovane krutosti i u tom smislu značaja aktuatorne i kinematske redundanse. Pokazano je da je kinematska redundantnost osnovni mehanizam za generisanje željene generalizovane krutosti bez bitnih ograničenja u smislu praktične primenljivosti. Takodje, u drugom delu rada definišu se i osnovni istraživački pravci u okviru projekta TR35007.

Reference

- [1] Jovane, F., Westkämper, E., and Williams, D., "THE MANUFUTURE ROAD - Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing", 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-77011-4.
- [2] Jovane, F., Koren, Y., Boër, C.R., "Present and Future of Flexible Automation - Towards NewParadigms", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 2, 2003, Pages 543–560, DOI 10.1016/S0007-8506(07)60203-0.
- [3] Aschhoff, B., Crass, D., Cremers, K., Grimpe, C., and Rammer, C., "European Competitiveness in Key Enabling Technologies - FINAL REPORT", Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim, Germany, 2010.
- [4] European commission, Directorate-general for research, Directorate G – Industrial technologies, "FACTORIES OF THE FUTURE - PPP Strategic Multi-annual Roadmap", 2010, ISBN 978-92-79-15227-6.
- [5] ISO10218. Robots for industrial environments - Safety requirements - Part 1: Robot. 2006.
- [6] American National Standards Institute. American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems - Safety Requirements, ANSI/RIA R15.06-1986. 1986.
- [7] Filippini, R., Sen, S., Bicchi, A., "Toward soft robots you can depend on: A study of antagonistic actuation", IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 15, no. 3, pp. 31-41 (September 2008).
- [8] A. Albu-Schäffer, O. Eiberger, M. Grebenstein, S. Haddadin, C. Ott, T. Wimböck, S. Wolf, G. Hirzinger, "Soft robotics - From torque feedback controlled light-weight robots to intrinsically compliant systems", IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 15, no. 3, pp. 20-30 (September 2008).
- [9] A. De Luca, F. Flacco, R. Schiavi, A. Bicchi, "Nonlinear decoupled motion-stiffness control and collision detection/reaction for the VSA-II variable stiffness device", 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Saint Louis, MO, USA (October 2009).
- [10] Haddadin, S., Suppa, M., Fuchs, S., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G., "Towards the robotic co-worker, 14th International Symposium on Robotics Research", Luzern, Switzerland (August/September 2009).
- [11] Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., De Luca, A., Hirzinger, G., "Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction", 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France (September 2008).
- [12] Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G., "Dummy crash-tests for the evaluation of rigid human-robot impacts", IARP-IEEE/RAS-EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, Roma, Italy (April 2007).
- [13] Filippini, R., Sen, S., Tonietti, G., Bicchi, A., "A comparative dependability analysis of antagonistic actuation arrangements for enhanced safety", 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, April 2007.
- [14] Pires, J. N., Robot-by-voice: "Experiments on commanding an industrial robot using the human voice", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 32 Iss: 6, 2005, pp.505 – 511.
- [15] Pires, J.N., Veiga, G., Araujo, R., "Programming-by-demonstration in the coworker scenario for SMEs", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 36 Iss: 1, 2009, pp.73-83.
- [16] Albu-Schäffer, A., et al., "The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments", Industrial Robot: An International Journal 34/5 (2007), pp: 376–385 Emerald Group Publishing Limited [ISSN 0143-991X], [DOI 10.1108/01439910710774386].

- [17] Albu-Schaffer, A., Eiberger, O., Grebenstein, M., Haddadin, S., Ott, C., Wimbock, T., Wolf, S., Hirzinger, G., "Soft robotics", IEEE Robotics Automation Magazine (2008), Volume: 15, Issue: 3, Publisher: IEEE, pp: 20-30, ISSN: 10709932, DOI: 10.1109/MRA.2008.927979.
- [18] Ott, C., Albu-Schaffer, A.; Kugi, A.; Stamigioli, S.; Hirzinger, G. "A passivity based Cartesian impedance controller for flexible joint robots - part I: Torque feedback and gravity compensation", Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp2659 - 2665 Vol.3, 2004, DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1307462.
- [19] Albu-Schaffer, A., Ott, C.; Hirzinger, G.: "A passivity based Cartesian impedance controller for flexible joint robots - part II: full state feedback, impedance design and experiments", Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp2666 - 2672 Vol.3, 2004, DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1307463.
- [20] Ott, Ch. Albu-Schäffer, A.; Kugi, A.; Hirzinger, G.: "On the Passivity Based Impedance Control of Flexible Joint Robots", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 2, pp. 416 - 429, 2008.
- [21] Petrović P., "Model aktivnog adaptivnog upravljanja procesom spajanja delova u montaži primenom redundantnih robota", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Oktobar 1996.
- [22] Visser, L.C. and Stramigioli, S. and Bicchi, A., "Embodying Desired Behavior in Variable Stiffness Actuators", Proceedings of the 18th IFAC World Congress 2011, 28 Aug - 02 Sep 2011, Milan, Italy. pp. 9733-9738. IFAC. ISBN 978-3-902661-93-7.
- [23] Schiavi, R., Grioli, G.; Sen, S.; Bicchi, A., "VSA-II: a novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans", Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp2171 - 2176 Vol.3, 2004, DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543528.
- [24] Bischoff, R., et al., "The KUKA-DLR Lightweight Robot arm – a new reference platform for robotics research and manufacturing", Proceeding of ISR/ROBOTIK 2010 - Joint conference of ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) und ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics), pp1-8, 2010. ISBN: 978-3-8007-3273-9.
- [25] Hogan, N., "Impedance control: An approach to manipulation: Part I – Theory", Trans. ASME J. Dyn. Systems Measur. and Control. (107) pp.:1-7, 1985.
- [26] Hogan, N., "Impedance control: An approach to manipulation: Part II – Implementation", Trans. ASME J. Dyn. Sys. Measur. and Control. (107) pp.:8-16, 1985.
- [27] Hogan, N., "Impedance control: An approach to manipulation: Part III – Applications", Trans. ASME J. Dyn. Sys. Measur. and Control. (107) pp.:17-24, 1985.
- [28] Hogan, N., "Stabile execution contact tasks using impedance control", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. pp.:1047-1054, 1987.
- [29] Jakovljević, Ž., Petrović P. B., "Prepoznavanje kontaktnih stanja u robotizovanoj montaži", Mašinski fakultet u Beogradu, 2011, ISBN: 978-86-7083-750-8.
- [30] Jakovljevic, Z., Petrovic, P., B., Hodolic, J., "Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machines", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp: 1-19, DOI 10.1007/s00170-011-3501-5, ISSN 0268-3768.
- [31] A.M. Zanchettin, L. Bascetta, P. Rocco - "Human-like redundancy resolution for anthropomorphic industrial manipulators", IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012.

INDUSTRIAL HUMANOIDS: A New Concept of Intrinsically Collaborative Robots for Assembly

Abstract:

This paper presents the results of research activities conducted in the field of robotic assembly in the context of developing a new concept of industrial robots, which will have significantly improved technological capabilities, compared to conventional industrial robots and requirements imposed by new production paradigm of mass customization. The new robot concept, i.e., industrial humanoid robot, is based on fundamentally new design which enables robots to collaborative work with humans and effectively copes with uncertainties in insufficiently structured environment as well as rapid changes in production. The paper provides an overview of relevant European research projects with description of the experimental concepts of industrial humanoids that have been developed through these projects. It is also given the overview of ongoing and planned activities within the project Smart Robotic Systems for Customized Manufacturing (TR35007) which jointly realize Faculty of Mechanical Engineering at Belgrade University, Faculty of Technical Sciences in Novi Sad and Ikarbus Company.



Ivan Danilov¹, Petar B. Petrović², Nikola Lukić³

EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA ZA ULTRA BRZU OPTIČKU TRIANGULACIJU STRUKTURIRANE SVETLOSTI U ROBOTIZOVANOJ MONTAŽI

Rezime:

U ovom radu prikazuju se osnove koncepta adaptivnog upravljanja robotima u uslovima slabo strukturiranog okruženja u procesu robotskog zavarivanja na bazi optičke triangulacije strukturirane svetlosti. Identifikacija statičke i dinamičke komponente greške geometrije sklopa koji se zavaruje je generički problem tehnologije montaže zavarenih sklopova. Postojeći sistemi optičke ili mehaničke (kontaktne) prirode angažuju veliko pomoćno vreme, čime se bitno smanjuje proizvodni kapacitet sistema u celini. Strukturirana svetlost omogućava drastično podizanje performansi sistema i omogućava dodatne funkcionalnosti, uključujući i identifikaciju kompletnosti sklopa. U okviru projekta TR35007 razvija se ovakav senzorski sistem. U okviru ovog rada pored osnovnih konceptualnih okvira navode se rezultati sprovedenih istraživanja u delu razvoja laboratorijskog eksperimentalnog sistema, sa posebnim fokusom na različite aspekte kalibracije optičkog sistema, odnosno identifikacije transformacionih operatora koji omogućavaju da se iz dvodimenzionog lika zahvaćenog optoelektroničkim pretvaračem verno generiše prostorna geometrija dela, odnosno sklopa koji se zavaruje i okruženja u kome se izvodi proces. Izgradnja efikasnih matematičkih operatora, primenljivih u realnom vremenu, je jedan od osnovnih zahteva za praktičnu implementaciju ove tehnologije u realnim proizvodnim uslovima.

Ključne reči: Robotizovana montaža, Optička triangulacija, Strukturirana svetlost, Kalibracija

1. UVOD

Danas sve više dobija na značaju trend kojim se u fokus stavlja realizacija proizvoda prema individualnim zahtevima, uključujući i slučaj unikatne proizvodnje, gde se proizvodi realizuju po specifičnim zahtevima konkretnog kupca. Kroz uvođenje nove paradigme proizvodnih tehnologija, definiše se pojam masovne kustomizacije, odnosno masovne personalizacije proizvoda, koja po tehnološkoj efikasnosti i troškovima proizvodnje mora biti ekvivalentna troškovima masovne proizvodnje [1]. Da bi ovakav koncept mogao da funkcioniše neophodno je da čitav proizvodni sistem poseduje veliku fleksibilnost. Jedna od ključnih stvari koja dodatno povećava fleksibilnost jeste sistem za prepoznavanje stvarne geometrije delova, pod sklopova i sklopova, njihovog međusobnog položaja, i njihovog položaja u radnom prostoru.

Industrijski roboti su bitne komponente današnjih fabrika, kao i fabrika budućnosti. Zahtev za korišćenje robota proizilazi iz mogućnosti njihove fleksibilnosti i inteligencije, koja im se može dodati, tako da mogu obavljati poslove na ponavljajući način i to sa stohastičkim promenama u radnom okruženju, prihvatljivom cenom i nivoom kvaliteta. Najveća primena robota je na poslovima montaže, a najveći procenat tih robota izvršava zadatke zavarivanja. Procenjuje se da se čak 25%, od svih industrijskih robota, koristi baš za zavarivanje. Robotsko zavarivanje je jedno od najuspešnijih primena industrijskih robota. Veliki broj proizvoda zahteva operacije zavarivanja u njihovim procesima montaže. Proces zavarivanja je kompleksan, težak za parametrizaciju i praćenje, kao i za efikasnu kontrolu. Zbog toga roboti se najčešće koriste za tačkasto zavarivanje uglavnom u automobilskoj industriji. Da bi roboti mogli uspešno da se bave i kontinualnim zavarivanjima, različitim postupcima, neophodno je da pored nominalne (isprogramirane)

¹ **Ivan Danilov**, dipl. inž. maš., student druge godine doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: idanilov@mas.bg.ac.rs

² **Dr Petar B. Petrović**, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: pbpetrovic@mas.bg.ac.rs

³ **Nikola Lukić**, dipl. inž. maš., student druge godine doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, e-pošta: nlukic@mas.bg.ac.rs

putanje imaju i dodatne senzorske informacije o stvarnoj lokaciji šava (putanje). To je neophodno zbog različitih grešaka koje se pojavljuju prilikom robotizovanog zavarivanja. Najčešće greške su:

- greške usled netačnosti izrade sastavnih komponenti sklopa,
- greške usled lošeg međusobnog položaja delova u sklopu,
- greške pozicioniranja i steznog pribora i
- greške termičkih deformacija nastale prilikom zavarivanja prethodnih šavova.

Sistem veštačkog gledanja bi sa lakoćom mogao da otkrije sve navedene greške i ukoliko je potrebno koriguje rad robota. Identifikacija geometrije je ključan zahtev sa aspekta izvodljivosti procesa, ostvarenog kvaliteta finalnog proizvoda i ekonomičnosti proizvodnje u celini [2].

Postoje dva načina određivanja prostornih koordinata neke proizvoljno postavljene i orijentisane prostorne površine. To su aktivni i pasivni način. Oba načina koriste optičku triangulaciju kao matematički model. Najpoznatija pasivna metoda je stereo-vid (stereovision) u kojoj se objekat snima iz dva ugla, odnosno dve pozicije optičkog senzora (kamere). Te dve pozicije moguće je ostvariti jednom kamerom koja se može pomerati na zadate pozicije, ili sa dve i više kamere koje su postavljene na fiksne pozicije [3]. Površ koja se meri prolazi kroz žižnu tačku (žižu) optičkog uređaja (objektiva) i projektuje se na ravan senzora (kamere). Ukoliko se jedna od dve kamere zameni projektorom dobija se aktivni sistem. Projektovanjem struktuiranog svetla kroz projektor dobija se sistem za optičku triangulaciju struktuirane svetlosti.

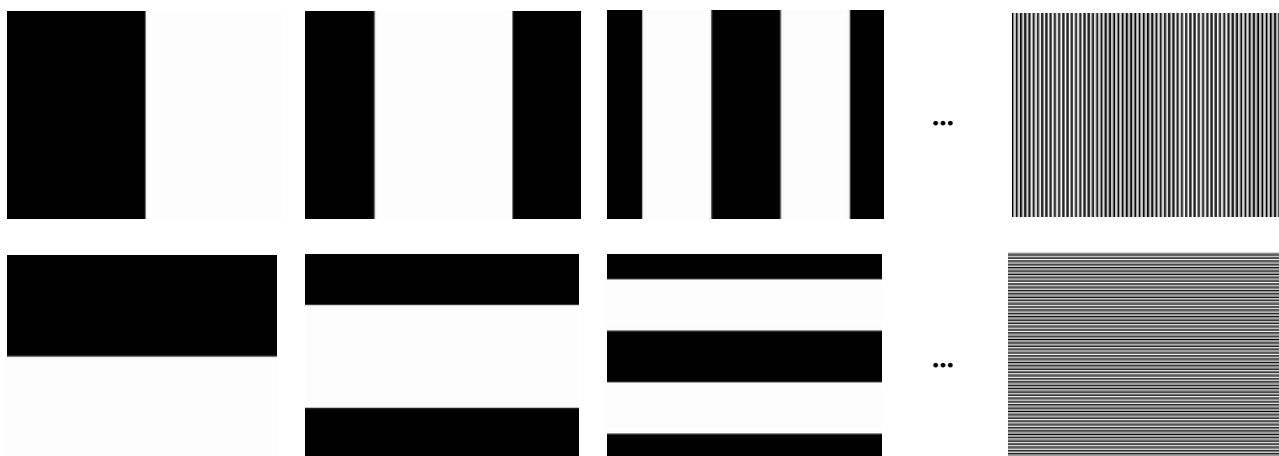
U ovom radu bliže je objašnjen pojam optičke triangulacije sa akcentom na struktuirano svetlo. Zatim je predstavljen koncept robotizovane montaže koja koristi sistem optičke triangulacije struktuiranog svetla. Dat je prikaz početne eksperimentalne laboratorijske instalacije za prostornu digitalizaciju struktuiranom svetlošću na kojoj je vršena kalibracija. Objašnjen je značaj brze kalibracije i prikazani rezultati kalibracije postojećeg sistema.

2. OPTIČKA TRIANGULACIJA STUKTURANE SVETLOSTI

Senzorski sistemi bazirani na struktuiranoj svetlosti osvetljavaju objekat, koji se digitalizuje, ravanskim izvorom svetlosti. Na objekat izvor svetlosti projektuje dvodimenzionalnu mapu, koja je poznatog i definisanog sadržaja, uglavnom mrežu horizontalnih i vertikalnih traka [4]. One mogu biti monohromatske ili polihromatske i sa različitim profilima osvetljenja. Zadatak ovakve mape je da segmentira prostor oko objekta snopom svetlosnih ravni.

Upoređivanjem emitovanog informacionog sadržaja i informacionog sadržaja svetlosnog odraza od objekta koji se digitalizuje, a koji se registruje nekim dvodimenzionalnim senzorskim sistemom, generiše se neki novi informacioni sadržaj iz kojeg je moguće jednoznačno izračunati treću dimenziju osvetljenog dela površi tog istog objekta [4]. Izračunavanje treće dimenzije moguće je zahvaljujući elementarnom principu optičke triangulacije.

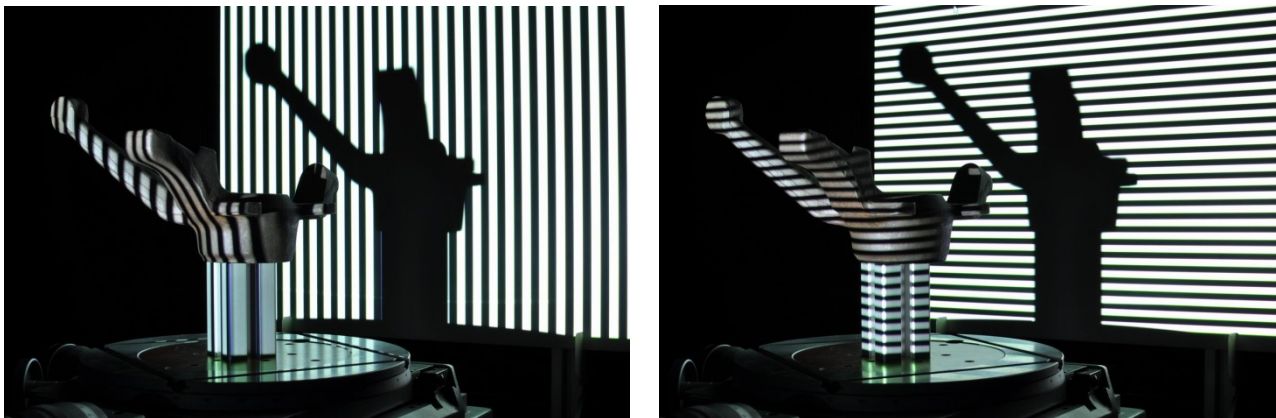
Struktuirana svetlost je sekvenca proizvoljne dužine različito kodiranih mapa koje se projektuju pomoću svetlosno-optičkog uređaja na objekat koji se digitalizuje. Sekvence se uglavnom sastoje od deset ili više sukcesivnih mapa. Na slici 2.1 prikazane su vertikalne i horizontalne trake na monohromatskim mapama koje su kodirane Grejevim kodom. Mape su potpuno parametrizovane i dobijene su u specijalno razvijenom softverskom modulu za generisanje struktuirane svetlosti.



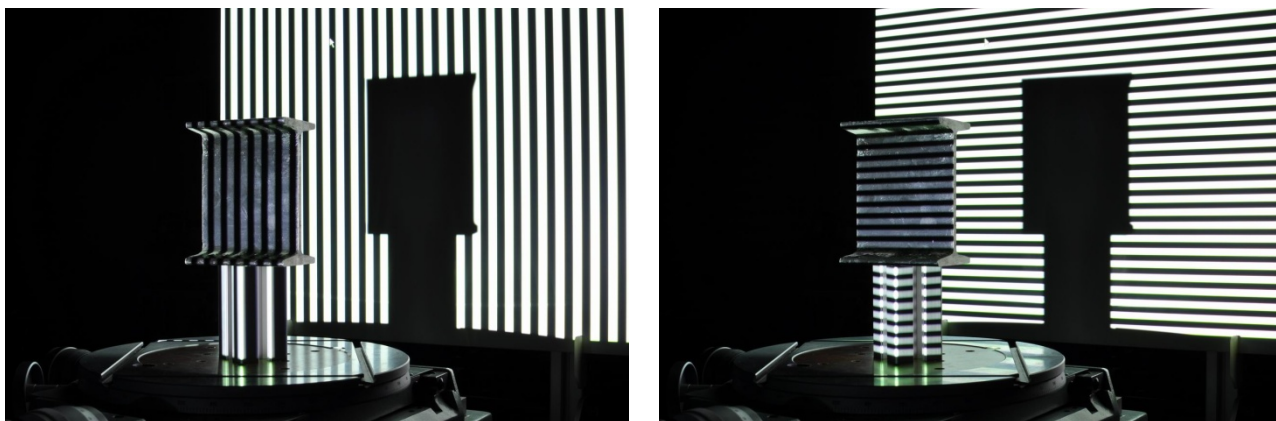
Slika 2.1 Generisane monohromatske binarne sekvence mapa kodirane Grejevim kodom

Pomoću projektora se generisanom sekvencom mapa osvetljava objekat. Na slici 2.2 dat je primer osvetljenog otkovka nepoznate geometrije jednom mapom iz sekvence sa vertikalnim i jednom sa horizontalnim trakama, dok je na slici 2.3 prikazan primer osvetljenog I-profila poznate geometrije istim mapama iz sekvence.

Analizom zahvaćenog odraza u senzorskom sistemu kamere, potrebno je matematički prepoznati oblik, odnosno prepoznati izmenjeni sadržaj koji je kodiran u projektovanoj strukturanoj svetlosti. Nad tim sadržajem sprovode se korekcije greške aberacije optičkih sistema i primenom transformacione matrice dvodimenzionalnom sadržaju se dodaje treća dimenzija.



Slika 2.2 Primer nepoznate geometrije osvetljene strukturanim svetlom

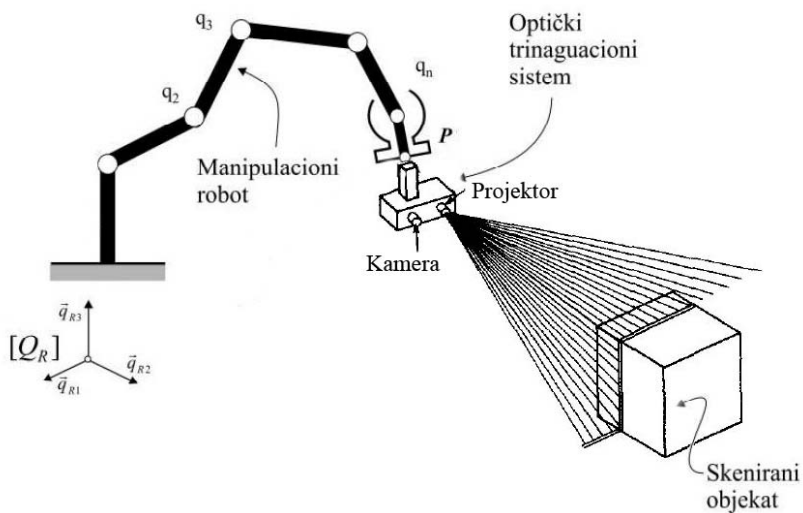


Slika 2.3 Primer poznate geometrije osvetljene strukturanim svetlom

3. KONCEPT ROBOTIZOVANOG SKENIRANJA OBJEKATA I POČETNA EKPERIMENTALNA INSTALACIJA

Ugradnjom optičkog senzora na mesto end-efektora industrijskog robota dobija se moćan tehnološki sistem velike fleksibilnosti i zadovoljavajuće tačnosti. Industirjski robot u ovakvom sistemu ima funkciju pokretne programabilne platforme pomoću koje se optički triangulacioni senzorski sistem kreće u prostoru, zauzima i zadržava optimalni položaj za vreme skeniranja. Tačnost čitavog sistema nikako ne može biti veća od apsolutne tačnosti robota na koji je sistem optičke triangulacije zakačen.

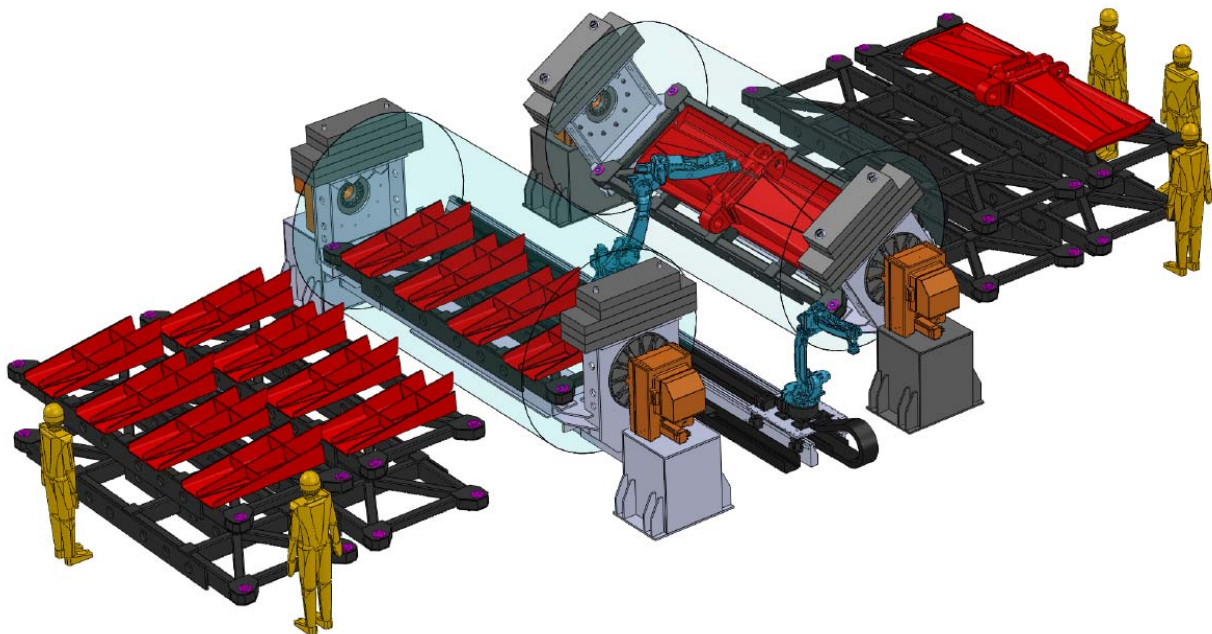
Koncept ovakvog sistema, prikazan na slici 3.1, sastoji se iz: industrijskog robota sa n stepeni slobode, optičkog triangulacionog sistema i sistema za akviziciju. Optički triangulacioni sistem strukturane svetlosti sastoji se od projektora koji osvetljava objekat različito kodiranim svetlom i kamere koja memoriše reflektovanu svetlost od objekta. Akvizicioni sistem služi za kondicioniranje i prikupljanje senzorskih podataka. On sinhrono vrši akviziciju unutrašnjih koordinata robota, kako bi odredio poziciju i orijentaciju optičkog triangulacionog sistema u lokalnom koordinatnom sistemu (Q_R) i fotografiju skeniranog objekta. Zadatak skeniranja sastoji se iz kretanja po zadatoj trajektoriji i sinhronog fotografisanja skeniranog objekta iz željenih pozicija i orijentacija.



Slika 3.1 Koncept robotizovanog skeniranja objekta

Ukoliko se ovaj sistem primenjuje u tehnološkoj ćeliji za robotizovano zavarivanje kontinualnih šavova u kojem služi za praćenje šava i korekciju nominalne putanje možemo razlikovati tri sistema. Senzorski sistem se nalazi na robotu na koji je istovremeno priključena i mlaznica za zavarivanje. Ovakva konfiguracija sistema omogućava istovremeno (real-time) praćenje i zavarivanje šava, ali je senzorski sistem izložen štetnim produktima koji nastaju usled procesa zavarivanja. U drugom sistemu robot može imati sistem za izmenu završnih uređaja (end-efektora) i da

prvo izvrši skeniranje senzorskim sistemom, a zatim ostavi senzorski sistem i priključi mlaznicu za zavarivanje. Ovakva konfiguracija sistema zahteva više vremena za obavljanje procesa i komplikovani sistem izmene završnih uređaja, ali je senzorski sistem sklonjen iz procesa zavarivanja. Treći sistem čine dva robota iste ili različite veličine. Jedan robot nosi na sebi senzorski sistem za optičku triangulaciju i zadužen je za skeniranje šavova, dok drugi ima pričvršćenu mlaznicu i obavlja poslove zavarivanja. Kod ovakve konfiguracije sistema nema potrebe za skupim i komplikovanim sistemima za izmenu završnih uređaja. Jedna ovakva tehnološka ćelija za robotizovano zavarivanja sklopa papuče bagera radena je u okviru Studije izvodljivosti koja se nalazi u završnoj fazi realizacije, po bilateralnom ugovoru Mašinskog fakulteta i Kolubara Metal, prikazana je na slici 3.2. Posедуje 15 (6+6+3) sinhronih servo osa, manjeg robota za skeniranje i većeg robota za zavarivanje koji su postavljeni na linearnom modulu, i obrtni pozicioner na kojem se postavljaju palete na kojima se vrši predmontaža i montaža sklopova.

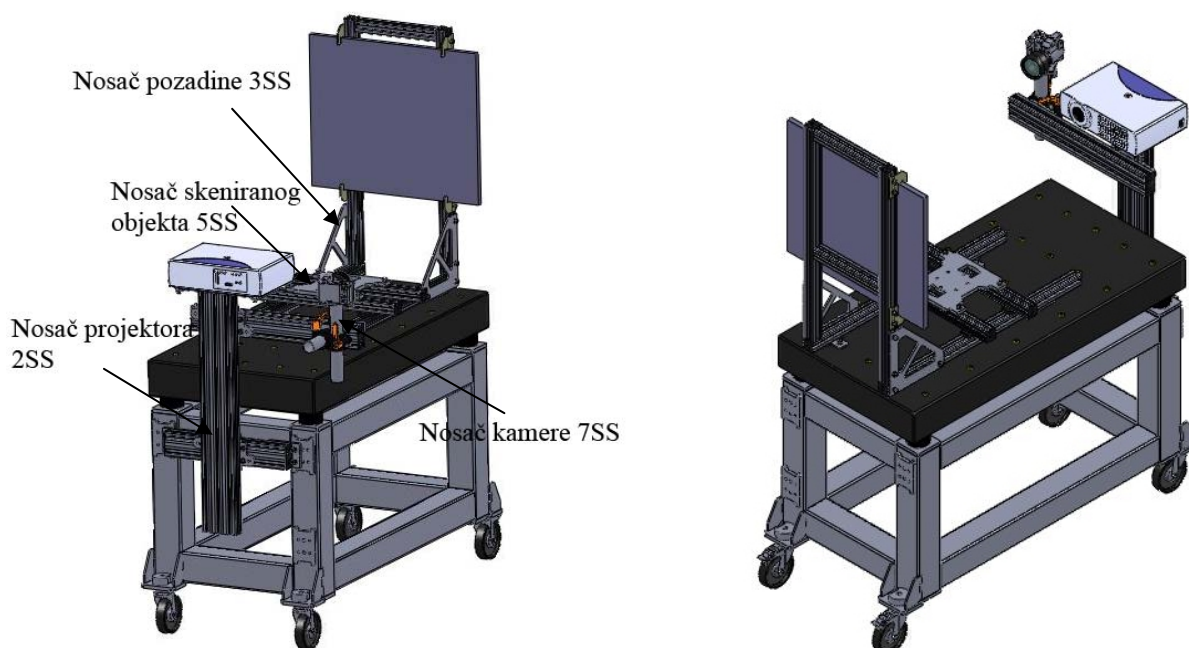


Slika 3.2 Virtuelni model tehnološke ćelije za završnu montažu sklopa papuče bagera iz proizvodnog programa kompanije Kolubara Metal

Savremeni 3D softverski paketi za modeliranje prerasli su u korisne alate koji se mogu koristiti i za simulaciju putanje robota prilikom zavarivanja. Ona nakon verifikacije, u virtuelnom modelu, može da direktno prebaci u upravljačku jedinicu robota u tehnološkoj ćeliji [5]. Međutim virtuelni model sklopa i realni sklop nikad ne mogu biti identični, tako da dolazi do odstupanja u trajektoriji. Ideja je da se u

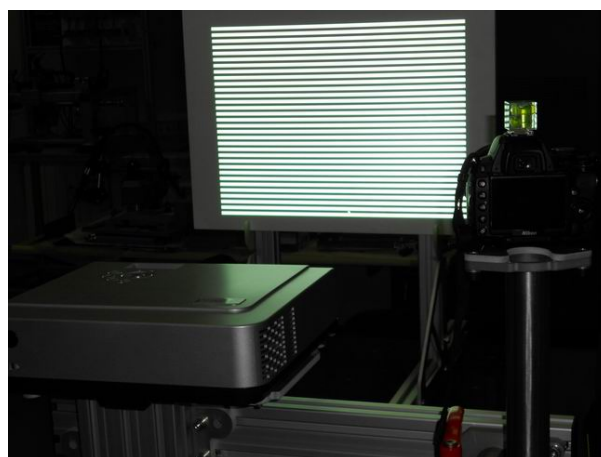
softverski paket za modeliranje povratnom spregom vrte informacije o realnom sklopu nakon skeniranja urađenog pomoću senzorskog sistema za optičku triangulaciju.

Laboratorijska eksperimentalna instalacija za prostornu digitalizaciju objekata složene geometrije primenom optičke triangulacije na bazi strukturane svetlosti je modularno građena i stacionarnog je tipa ali poseduje veliki broj stepeni slobode (17) koja omogućavaju gruba i fina podešavanja svake od ključnih komponenti koje se na njoj nalaze. Cela instalacija čvrsto je pričvršćena za granitni radni sto, a njen 3D model dat je na slici 3.3. Nosač projektora poseduje 2 stepena slobode (oba translatorna). Na njega je pričvršćen nosač kamere koji ima 7 SS (5 translatornih, od kojih su dva redundantna i 2 obrtna). Nosač pozadine omogućava 3 SS (sva 3 translatorna) za pomeranje pozadine. Nosač skeniranog objekta raspolaže sa 5 SS (4 translatorna, 2 za gruba i 2 za fina podešavanja (rezolucije 0.01mm) i 1 obrtni).



Slika 3.3 3D model eksperimentalne instalacije za optičku triangulaciju strukturanom svetlošću

Njena namena je precizna verifikacija koncepta koji će se kasnije preseliti na pokretnu strukturu (industrijskog robota) i razvoj odgovarajućih algoritama za analizu slike i rešavanja problema triangulacije i kalibracija uz mogućnost provere pod precizno kontrolisanim uslovima. Na slici 3.4 prikazane su neke od početnih faza verifikacije.



Slika 3.4 Eksperimentalna instalacija za optičku triangulaciju strukturanom svetlošću - verifikacija

4. KALIBRACIJA EKSPERIMENTALNE INSTALACIJE

Osnovni cilj kalibracije kod strukturiranog svetla je pronaći formulu koja će 2D koordinate snimljenih piksela na ravni foto senzora u kameri, pretvoriti u 3D koordinate snimljenog objekta u globalnom koordinatnom

sistemu [6]. Kalibracijom se vrši identifikacija stvarnih geometrijskih konstanti eksperimentalne instalacije (pozicija i orijentacija kamere i projektora u globalnom koordinatnom sistemu), kao i nepoznata greška optičkih sistema kamere i projektora koja nastaje usled sferne i hromatske aberacije [4]. Najvažniji delovi u kameri su ravan slike odnosno senzor slike (nekada je to bilo fotoosetljivi film) i objektiv koji prevodi objekte iz okruženja i smešta ih na senzor slike. Ovo prevođenje (transformacija) nikada nije idealno zbog distorzije koja se javlja između tačaka na objektu i lokacije tih tačaka na slici [7].

Najveći uticaj na razliku između stvarnih i snimljenih koordinata pomoću optoelektroničkog pretvarača imaju radijalna distorzija (poremećaj u radijalnom pravcu), decentrična distorzija (razlika između ose objektiva i centra senzora slike) i faktor skaliranja piksela [8]. Matematički opisi ovih pojava date su relacijama (1), (2) i (3):

$$r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$$

$$\Delta x_1 = x \frac{k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots + k_i r^{2i+1}}{r}$$

$$\Delta y_1 = y \frac{k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots + k_i r^{2i+1}}{r}$$
(1)

$$\Delta x_2 = P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy$$

$$\Delta y_2 = P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy$$
(2)

$$\Delta x_3 = B_1x + B_2y$$
(3)

gde su x i y izmerene koordinate piksela, x_p i y_p koordinate pomerenog centra senzora slike, k_i i-ti koeficijent radijalne distorzije, P_1 i P_2 koeficijent decentralne distorzije, B_1 i B_2 faktor skaliranja piksela.

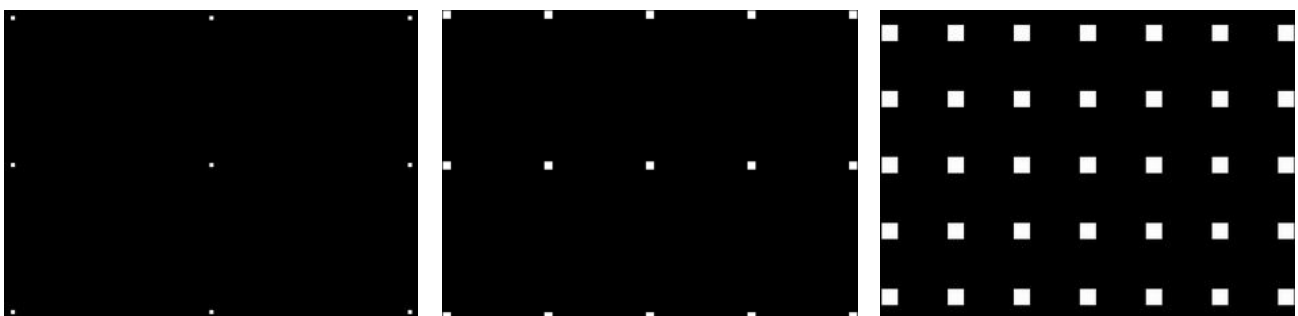
Kako bi se uspostavila veza između globalnog koordinatnog sistema i koordinatnog sistema kamere potrebno je pronaći zavisnost između geometrijskih konstanti eksperimentalne instalacije. To se postiže izračunavanjem ukupne transformacione matrice T , prikazana je relacijom (5). Ona se dobija množenjem dve translacione i jedne rotacione matrice transformacije, koje su date relacijom (4):

$$T_t^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & ps \\ 0 & 1 & 0 & hs \\ 0 & 0 & 1 & es \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_r^1 = \begin{bmatrix} cU & 0 & sU & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sU & 0 & cU & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_t^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A \\ 0 & 1 & 0 & B \\ 0 & 0 & 1 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4)

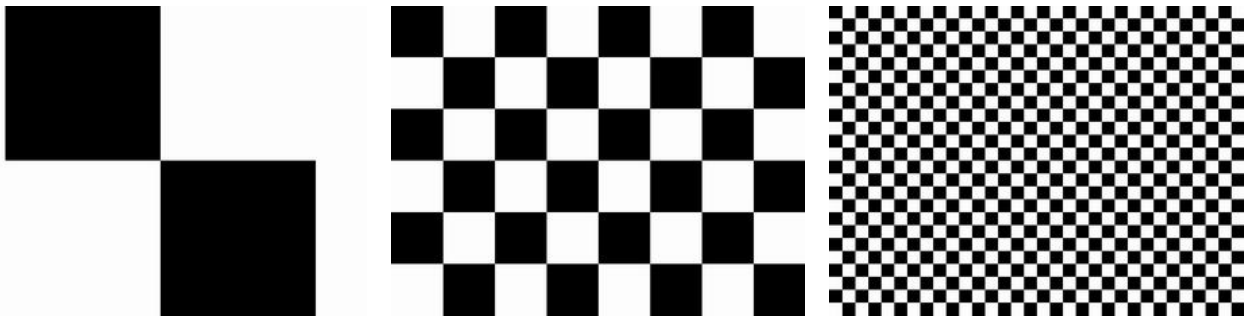
$$T = T_t^2 \cdot T_r^1 \cdot T_t^1 \quad T = \begin{bmatrix} cU & 0 & sU & cU \cdot ps + sU \cdot es + A \\ 0 & 1 & 0 & hs + B \\ -sU & 0 & cU & cU \cdot es - sU \cdot ps + C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

gde su A , B i C udaljenosti koordinatnog početka globalnog koordinatnog sistema do ose rotacije kamere, sU i cU sinus i kosinus ugla rotacije kamere oko y ose i ps , hs i es udaljenost početka koordinatnog sistema kamere od ose rotacije kamere.

Prilikom kalibracije eksperimentalne instalacije korišćene su mape koje su generisane u potpuno parametrizovanom specijalno razvijenom modulu za automatsko generisanje. Postoje dva tipa mapa, sa kvadratima različitih veličina, koji se pojavljuju u matricnim formama (npr. 3x3, 5x3, 7x5,...) i sa različitim brojem šahovskih polja. Nekoliko mapa za kalibraciju prikazano je na slikama 4.1 i 4.2.

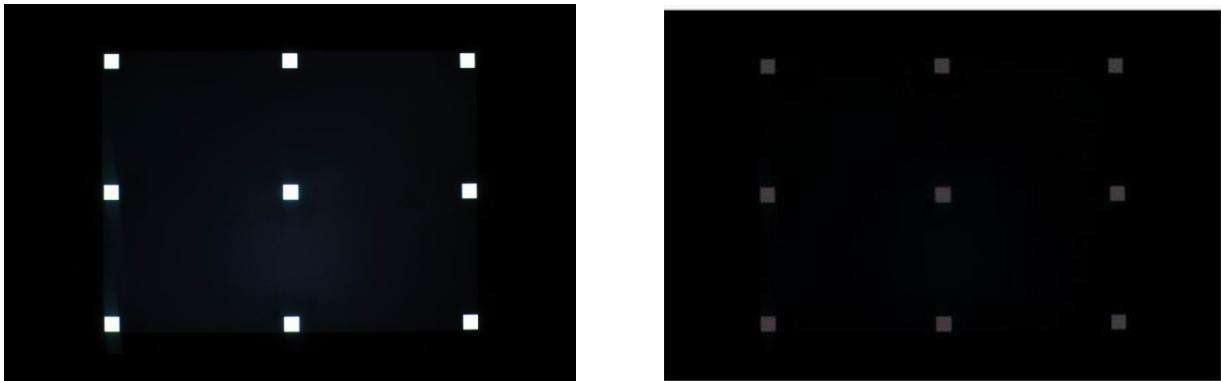


Slika 4.1 Mape za kalibraciju tipa kvadrata



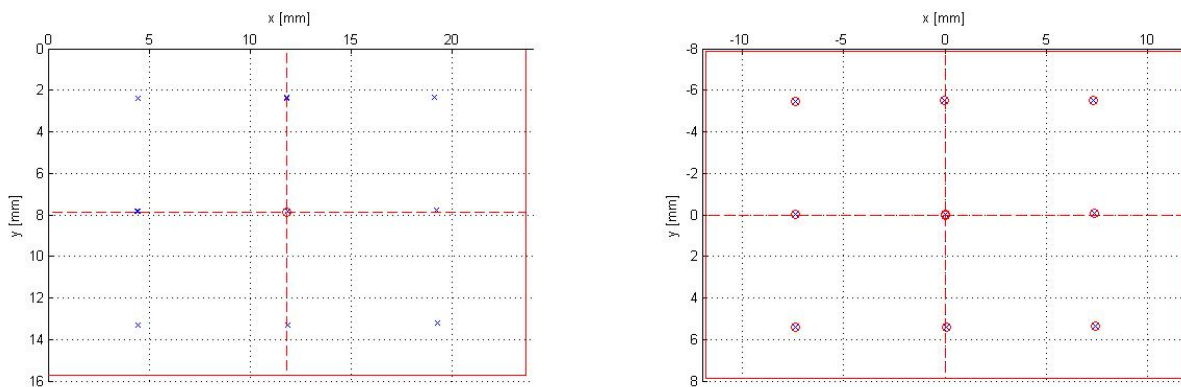
Slika 4.2 Maske za kalibraciju tipa šahovskog polja

Mape su na eksperimentalnoj instalaciji fotografisane fotoaparatom Nikon D5000 sa objektivom Nikkor 35mm f/1.8, koji ima fiksnu fokalnu dužinu od 35mm i maksimalni otvor blende od f/1.8. Izabran je objektiv sa fiksnom fokalnom dužinom zato što takvi objektivni imaju mnogo manju distorziju (izobličenje slike) od objektiv sa promenljivom fokalnom dužinom. Na slici 4.3 sa leve strane prikazana je originalna fotografija jedne od mapa za kalibraciju. Fotografije mapa su zatim učitane u specijalno napravljeni programski modul za prepoznavanje oblika i određene su vrednosti piksela u kojima se nalaze težišta svakog od kvadrata. Vizuelni prikaz kontura i težišta dat je na slici 4.3 desno.



Slika 4.3 Originalna slika i slika nakon pronalaženja i analize kontura

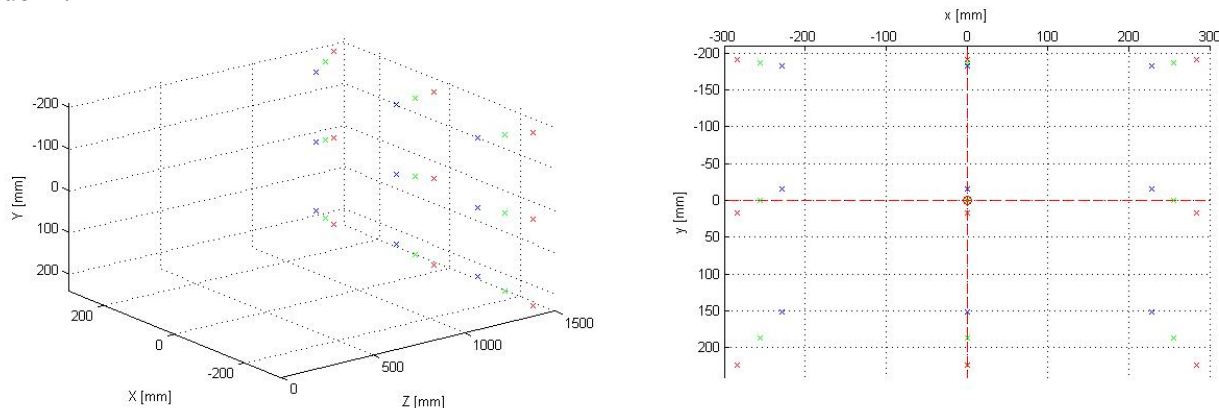
Vrednosti piksela su zatim učitane u programski modul koji ih na osnovu veličine senzora prevodi u koordinatni sistem kamere. Na slici 4.4 levo može se videti izgled koordinatnog sistema kamere koji počinje u gornjem levom ćošku (zbog načina na koji program zapisuje matrice slike), a na slici 4.4 desno može se videti translirani koordinatni početak koji se nalazi u centru senzora slike.



Slika 4.4 Prikaz pozicija tačaka na senzoru slike u pravom i centralnom koordinatnom sistemu

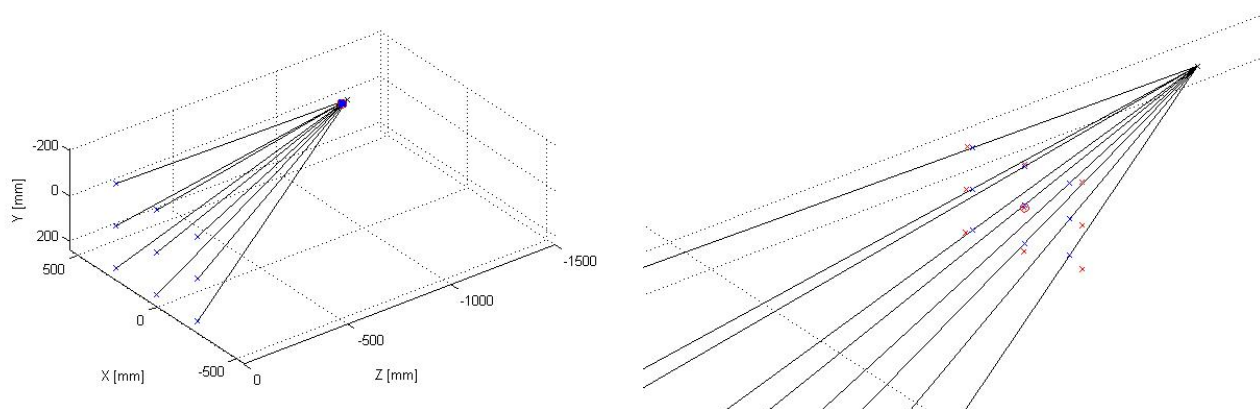
Pored dobijenih koordinata sa senzora kamere potrebne su i poznate (izmerene) koordinate iz okruženja. Težišta kvadrata mapa za kalibraciju koje su projektovane na pozadinu, izmerene su u globalnom koordinatnom sistemu i unete u razvijeni programski modul koji prebacuje te koordinate u centralni globalni koordinatni sistem i vrši prikaz izmerenih koordinata u prostoru i xy ravni, što je prikazano na slici 4.5.

Pored različitih mapa, varirana je i udaljenost pozadine od kamere kako bi se mogla odraditi i kalibracija po dubini.

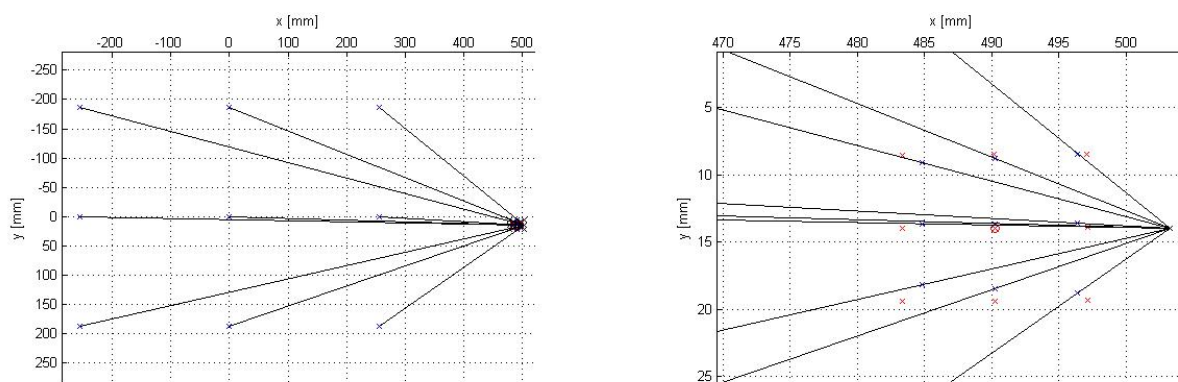


Slika 4.5 Prikaz izmerenih pozicija tačaka projektovanih mapa na različitim udaljenostima pozadine

Na osnovu izmerenih i izračunatih koordinata i ukupne matrice transformacije, urađena je kalibracija pomoću koje su određene tačne geometrijske konstante eksperimentalne instalacije, kao i poremećajni faktori senzorskog sistema (kamere i objektiva). Na slikama 4.6 i 4.7 mogu se videti izmerene koordinate u globalnom koordinatnom sistemu čije se linije seku u tački fokusa i pritom prolaze kroz ravan slike (senzora). Crvene tačkice predstavljaju izračunate vrednosti koordinata kamere u globalnom koordinatnom sistemu pre, a plave nakon izvršene kalibracije.



Slika 4.6 Prikaz pre i nakon kalibracije u xyz koordinatnom sistemu



Slika 4.7 Prikaz pre i nakon kalibracije u xy koordinatnom sistemu

5. ZAKLJUČAK

U poređenju sa tačkastim ili linijskim izvorom svetlosti ovakav sistem ima sposobnost ekstremno brze triangulacije, što mu omogućava rad čak i u realnom vremenu (real time).

Trenutna eksperimentalna instalacija će dalje biti unapređivana i počće se sa razvojem i izgradnjom funkcionalnog ekvivalenta, koji će biti mnogo manjih dimenzija i koji će moći da se postavlja na vrh

industrijskog robota. Takav robot biće testiran na zadacima elektrolučnog zavarivanja u kojima dominira problem geometrijske nesavršenosti sklopova, kao i ostale vrste grešaka o kojima je bilo reči u uvodu, i koji se ne može uspešno realizovati bez precizne senzorske povratne sprege.

LITERATURA

- [1] Petrović, P., Danilov, I., Lukić, N., *Novi pristup u projektovanju ekstremno varijantnih proizvoda*, Zbornik radova 37. JUPITER konferencija, 33. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2011, str. 3.26-3.35, ISBN: 978-86-7083-724-9
- [2] Petrović, P., Jakovljević, Ž., Miković, V., *Robotizovani sistemi za beskontaktnu dimenzionu metrologiju bazirani optičkoj triangulaciji - Deo 2: Praktična implementacija i validacija*, Zbornik radova 36. JUPITER konferencija, 16. simpozijum Menažment kvalitetom, Beograd 2010, str. 5.43-5.46, ISBN: 978-86-7083-696-9
- [3] Batlle, J., Mouaddib, E., Salvi, J., *Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A Survey*, *Pattern Recognition*, Vol. 31, No. 7, pp. 963-982, 1998, PII: S0031-3203(97)00074-5
- [4] Petrović, P., Jakovljević, Ž., Miković, V., *Robotizovani sistemi za beskontaktnu dimenzionu metrologiju bazirani optičkoj triangulaciji - Deo 1: Koncept*, Zbornik radova 36. JUPITER konferencija, 16. simpozijum Menažment kvalitetom, Beograd 2010, str. 5.35-5.42, ISBN: 978-86-7083-696-9
- [5] Pilipovic, M., Danilov, I., Lukić, N., Petrović, P., *Virtual manufacturing - Advanced manufacturing examples*, *34th International Conference on Production Engineering*, Niš 2011, str. 217-220, ISBN: 978-86-6055-019-6
- [6] Chen, C., Kak, A., *Modeling and calibration of a structured light scanner for 3-D robot vision*, Robot Vision Lab, School of Electrical Engineering, Purdue University West Lafayette, 1987, IN 47907
- [7] Clarke, A., Fryer, F., *The development of camera calibration methods and models*, *Photogrammetric Record*, London 1998, 16(91): pp 51-66.
- [8] Moe, D., Sampath, A., Christopherson J., Benson, M., *Self calibration of small and medium format digital camera*, ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B

CALIBRATION OF EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR OPTICAL TRIANGULATION OF STRUCTURED LIGHT IN ROBOTIC ASSEMBLY

Abstract:

This paper presents the basics of the concept of adaptive control of robots in conditions with poorly structured environment in the robotic welding based on optical triangulation of structured light. Identification of static and dynamic geometry fault components of an assembly, which is welded, is a generic problem of assembly technology for welded structures. Existing systems, optical and mechanical (contact), consume a lot of auxiliary time, which significantly reduces the production capacity of the system as a whole. Structured light dramatically increases system performance and provides additional functionality, including the identification of the completeness of the assembly. In the project TR35007 this sensor system is being developed. In this paper, besides the basic conceptual framework, are given the results of research conducted in the development of laboratory experimental system, with particular focus on different aspects of calibration of the optical system, and identification of transformation operators that allow the dimensional character of the affected optoelectronic converter to accurately generate the geometry of space, or assembly that is welded and the environment in which the process is performed. Building effective mathematical operators, applicable in real time, is one of the main requirements for practical implementation of this technology in real production conditions.

Keywords: Robotic assembly, Optical triangulation, Structured light, Calibration



Марко Митић¹, Зоран Миљковић², Бојан Бабић³

ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТНОГ РОБОТСКОГ СИСТЕМА - ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА⁴

Резиме:

Емпиријско управљање представља нов приступ у концепцијском пројектовању управљачких система мобилних робота и робота вертикалне зглобне конфигурације. У односу на конвенционалне приступе, емпиријски системи имају способност машинског учења на основу прикупљених информација из технолошког окружења, перманентно унапређујући своје понашање сходно постављеном задатку. У раду је дат детаљан преглед истраживања у овој области са посебним освртом на развој и имплементацију емпиријских управљачких система на бази машинског Q -учења ојачавањем и *soft computing* техника вештачке интелигенције. Извршена је анализа актуелних праваца истраживања са становишта карактеристичних проблема управљања роботских система (проблем навигације, избегавања препрека, праћења зида технолошког окружења, и/или визуелног навођења). Сваки од презентованих истраживачких резултата је укратко описан, са јасно наглашеном предношћу примене теорије емпиријског управљања у процесу концепцијског пројектовања управљачких система.

Кључне речи: емпиријско управљање, мобилни робот, робот вертикалне зглобне конфигурације, машинско учење ојачавањем, интелигентни технолошки системи, вештачке неуронске мреже

1. УВОД

Захтеви производних инжењера и пројектаната за повећањем продуктивности производних процеса и константним порастом квалитета производа довели су у питање одрживост класичних система управљања. Нова достигнућа науке и технологије почетком 21. века допринела су развоју роботских система који, поред извршавања прописаних задатака, могу да уче и да се прилагођавају реалним условима на основу прикупљених информација из окружења. Сходно томе, истраживање и развој у оквиру интелигентних технолошких система усмерени су ка пројектовању система управљања који имају могућност разумевања процеса у окружењу, односно способност одабира најбољег могућег понашања. У овом раду је приказан преглед истраживања у области емпиријског управљања интелигентних роботских система, са освртом на развој емпиријских управљачких система мобилног робота и робота вертикалне зглобне конфигурације у оквиру активности на пројекту технолошког развоја Министарства просвете и науке - ТР 35004.

Филозофске поставке емпиријског управљања инспирисане су природом и њеним сложеним процесима. Сходно понашању бића у природи која интуитивно осећају које понашање је најповољније у датим условима и према постављеном задатку, теорија емпиријског управљања указује на неопходност адаптивног понашања машина у раду. Самоодрживо понашање интелигентних агената, који своји будући рад заснивају на оцени успешности извршавања прописаног задатка у прошлости, крајњи је циљ емпиријског концепта пројектовања управљачког

¹ **Марко Митић**, дипл. маш. инж., истраживач-сарадник, стипендиста Министарства просвете и науке, студент докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, mmitic@mas.bg.ac.rs

² **Др Зоран Миљковић**, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, zmiljkovic@mas.bg.ac.rs

³ **Др Бојан Бабић**, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, bbabic@mas.bg.ac.rs

⁴ Рад је настао у оквиру истраживања на пројекту „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ (евид. бр. ТР-35004) Министарства просвете и науке Републике Србије.

система. Овакви системи инспирисани природним процесима се називају „природни“ управљачки системи (енгл. *Natural control systems*) [1].

„Природни“ управљачки систем сваког интелигентног агента подразумева тзв. емпиријски процес који обухвата: истраживање окружења, запажање односно „разумевање“ догађаја у њему, као и примену успешног понашања у домену изабраног задатка [1]. Издваја се пет фаза емпиријског процеса које представљају основ за генерисање алгоритма управљања базираног на прикупљеним информацијама из технолошког окружења. Ови основни елементи (фазе) емпиријског процеса, са инжењерске тачке гледишта, приказани су у табели 1.1.

Табела 1.1: Елементи емпиријског процеса
➤ Предвиђање излаза на основу нивоа поузданости за сваки улазно-излазни уређени пар
➤ Покушај остваривања изабраног излаза
➤ Поређење оствареног излаза са предвиђеним излазом
➤ У случају подударања оствареног и предвиђеног излаза, меморисаће се скуп управљачких одлука и модел предвиђања
➤ Уколико се не може остварити конзистентност у спровођењу управљачких одлука при извршавању задатка, треба одбацити тренутни модел предвиђања а затим усвојити нови који је боље успостављен

Табела 1.2: Елементи емпиријског система
➤ Сензорска информација из окружења
➤ Актуатори у функцији остваривања промене стања
➤ Поступак мерења извршене акције
➤ Управљачки систем за праћење и меморисање успешно изведених одлука
➤ Технолошко окружење које садржи информације неопходне за правилно функционисање управљачког система

Једна од најбитнијих поставки везаних за емпиријско управљање је та да емпиријски систем мора самостално да учи током процеса истраживања окружења. У том процесу је неопходно да систем „испроба“ неку од могућих акција, као што то чине системи у природи. Целокупан процес учења се може посматрати као скуп позитивних награда стања, у смислу да управљачки систем мора да научи погодно деловање односно акцију, уз истовремено одбацивање оне акције која се не може извести или која није најповољнија за тренутно стање система. Елементи емпиријског система неопходни за остваривање овако дефинисаног процеса учења представљени су у табели 1.2.

Постоји више различитих решења за математичко моделирање процеса учења интелигентног емпиријског система. Најчешће коришћене методе су машинско учење применом: вештачких неуронских мрежа [2], генетичких алгоритама, „фази“ логике, и/или хибридног приступа комбиновањем ових техника вештачке интелигенције. Последњих година све чешће се поступак учења поменутих система остварује применом тзв. машинског учења ојачавањем (енгл. *Reinforcement Learning*) [3]. Машинско учење ојачавањем обезбеђује математички апарат за меморисање и одабир дефинисаних акција интелигентног агента у складу са његовим тренутним положајем и стањем окружења у коме се налази. Путем интеракције са окружењем и повратне информације од спољашњих сензора агенту се, за одређени скуп унапред дефинисаних акција, додељује тзв. вредносна оцена или награда стања којом се процењује успешност изведене акције сходно постављеном задатку. Једно од најчешће примењених типова машинског учења ојачавањем је свакако машинско Q-учење ојачавањем (енгл. *Q-learning*) [4].

Овај алгоритам машинског учења ојачавањем обезбеђује роботском систему да учи тзв. вредносне оцене парова стање-акција, $Q(s,a)$, омогућавајући тиме да се свако могуће стање робота заједно са акцијом која је довела интелигентног агента у то стање може математички приказати као нумеричка вредност. То значи да ће, у случају да систем има два стања и ако постоје три дефинисане акције, укупан број вредносних оцена стање-акција бити шест.

Свака итерација (односно интеракција са окружењем) подразумева читавање са сензора у тренутном стању, избор одговарајуће акције сходно прописаној стратегији одабира акција, одређивање вредносне оцене новог стања интелигентног агента и ажурирање функције $Q(s,a)$ према једначини (1):

$$Q_{t+1}(s,a) \leftarrow Q_t(s,a) + \alpha \left[r_{t+1} + \gamma \max_a Q_t(s_{t+1},a) - Q_t(s_t,a) \right] \quad (1)$$

где је: $Q_t(s, a)$ - вредносна оцена пара стање-акција у тренутку t ; $Q_{t+1}(s, a)$ - вредносна оцена пара стање-акција у тренутку $t+1$; γ - коефицијент; r_{t+1} - вредносна оцена стања након одабира одлуке a у стању s ; α - параметар учења; $t+1$ - временски тренутак у наредном стању робота.

Описани емпиријски управљачки систем интелигентног робота на бази машинског Q-учења ојачавањем омогућава роботу да учи и да се прилагођава променама у окружењу, и то у реалном времену. Главне предности оваквог приступа пројектовању управљачког система огледају се у томе да приликом истраживања технолошког окружења интелигентном агенту није потребан математички модел средине у којој се налази, као ни динамика објекта управљања - роботског система.

Садржај овог рада организован је у пет тематских целина. У другом поглављу рада представљен је преглед стања истраживања у области емпиријског управљања интелигентног мобилног робота са освртом на развој таквог система у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја. Трећи део рада односи се на преглед стања у наведеној области истраживања за робот вертикалне зглобне конфигурације. На крају рада дат је закључак са препорукама за будућа истраживања у домену емпиријског управљања заједно са списком коришћене литературе.

2. ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТОГ МОБИЛНОГ РОБОТА

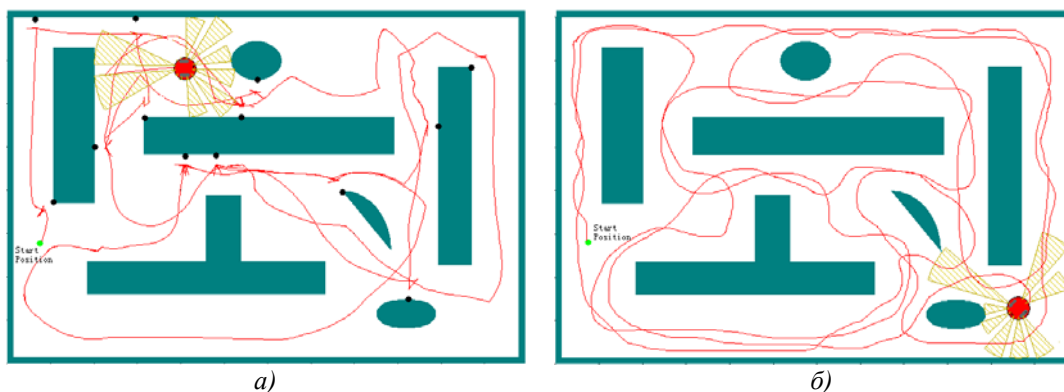
Једно од првих истраживања у области емпиријског управљања мобилног робота у технолошком окружењу, и то са фиксном камером изнад објеката у сцени, дато је у [5]. Хијерархијска структура интелигентног управљања роботом обухвата три хијерархијска нивоа: (1) анализу слике објеката и издвајање њихових карактеристика помоћу развијеног система препознавања, као и идентификацију тих објеката коришћењем ART-1 вештачке неуронске мреже [2], (2) нелинеарно пресликавање објекта=>енд-ефектор робота применом „*backpropagation*” вештачке неуронске мреже, и (3) део функција управљачке јединице робота у циљу одређивања унутрашњих координата односно угла ротације у зглобовима. Показано је да аутономни мобилни робот са управљачким системом базираним на алгоритму емпиријског управљања, након машинског учења коришћењем ВМ, несметано прилази траженом објекту.

Проблем навигације мобилног робота у симулираном окружењу коришћењем механизма памћења, SOM и „фази“ ART вештачких неуронских мрежа третиран је у [6]. Перформансе развијеног управљачког система указују да робот учи претходно успешно изведено понашање, као и да на основу аналогије са сличним ситуацијама успешно детектује локалне минимуме у окружењу. Такође, овај алгоритам уводи и побољшани критеријум одлучивања приликом праћења зида или путање базиран на искуству из претходних сродних стања мобилног робота.

Занимљиво решење проблема избегавања препрека, како у непознатом тако и у познатом окружењу, које обухвата управљачки систем мобилног робота базиран на „фази“-генетичком хијерархијском алгоритму дато је у [7]. Мобилни робот, за разлику од других сличних приступа, учи формирајући индуктивна правила на основу искуства избегавајући препреке у локалној средини. Другим речима, мобилни робот прво учи како да заобиђе сваки тип препреке понаособ (тзв. локално решење) пре него што почне да истражује технолошко окружење у реалном времену. Додељивањем позитивних оцена стања фаворизује се пожељно понашање робота у домену изабраног задатка. Усвајањем „базе искуства“ (енгл. *Experience bank*) убрзава се „*on line*” учење робота, пошто се иницијализација генетичког алгоритма врши помоћу оптималног пара стање-акција у простору стања. Поред тога, дефинисањем „ограничења у домену разматраног проблема“ (енгл. *Contextual Constrains*) додатно се убрзава процес учења јер се претражује само одређени, очекивани опсег простора мерења (са доступних спољашњег сензора). Коришћењем ова два додатна блока у хијерархијској схеми управљања, мобилни робот има способност избегавања свих типова препрека у технолошком окружењу (укључујући и оне које нису припадале обучавајућем скупу). Добијени резултати указују на брзу конвергенцију ка оптималном решењу проблема избегавања препрека у реалном времену.

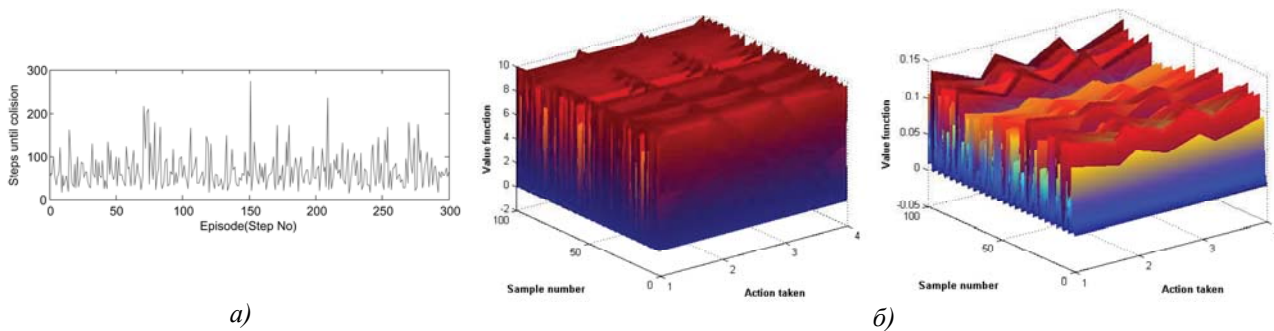
Истраживања у домену проблема избегавања препрека помоћу мобилног робота применом правила емпиријског управљања представљена су у [8-10]. Решење овог проблема базирано на машинском учењу ојачавањем и вештачким неуронским мрежама први пут је дато у [8]. Аутономно избегавање препрека у непознатом окружењу обезбеђено је синергијским деловањем машинског Q-учења ојачавањем и „*backpropagation*“ вештачке неуронске мреже. Улази у мрежу представљају сензорске информације од мобилног робота приликом истраживања непознатог окружења, док се излази односе на вредносне оцене парова стање-акција. Однос између истраживања непознатог окружења и експлоатације наученог понашања, сходно прикупљеним подацима и механизму учења

(енгл. *Exploration vs Exploitation problem*), регулисан је применом Болцманове расподеле, односно помоћу тзв. *Softmax* стратегије одабира акција. Резултат обучавања мобилног робота за посматрани проблем дат је на слици 2.1.



а) Почетна фаза учења; б) Избегавање препрека на крају експеримента.

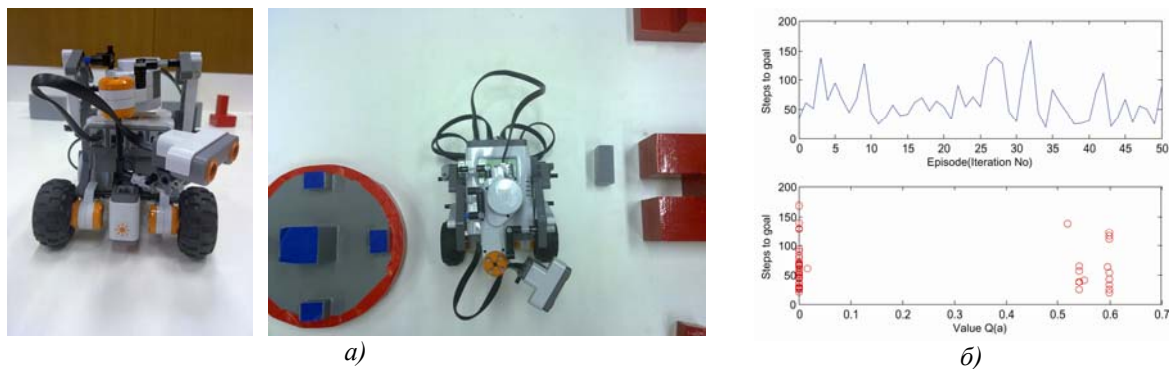
Слично решење истог проблема наведено је у [9,10] као резултат активности у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја (евиден. број *TP-35004*). *Matlab*[®] софтверски пакет коришћен је за имплементацију решења проблема избегавања препрека. У референци [9], емпиријско управљање на бази машинског Q-учења ојачавањем коришћено је као основа управљачког система мобилног робота са осам светлосних сензора. Наградна оцена дефинисана је тако да се фаворизује кретање робота унапред, а кажњава колизија са препреком у непознатом окружењу. Одабир акције у тренутном стању у овом раду вршен је помоћу тзв. ϵ -greedy стратегије [3]. Наставак истраживања у овом домену указао је на потребу апроксимације вредносне оцене пара стање-акција применом вештачке неуронске мреже у циљу убрзања процеса учења [10]. „*Backpropagation*“ вештачка неуронска мрежа са пет улаза и једним излазом имплементирана је у управљачки систем мобилног робота. За разлику од приступа у [8], вештачка неуронска мрежа има само један излаз који означава вредносну функцију $Q(s,a)$ за тренутно стање и акцију изведену у претходном тренутку. Овакав приступ апроксимацији вредносне функције $Q(s,a)$ познат је као директно машинско Q-учење ојачавањем [11]. Резултати ових истраживања представљени су на слици 2.2.



а) Број итерација до колизије са препреком [9]; б) Апроксимација вредносне функције $Q(s,a)$ за првих 100 стања мобилног робота и за различите вредности параметара учења [10].

У циљу примене емпиријског управљачког система мобилног робота на бази вештачких неуронских мрежа у реалном времену, додатна база са информацијама о тренутном и претходном стању, као и о претходној изведеној акцији и одговарајућој наградној оцени дефинисана је у [12,13]. Уведен је тзв. параметар сличности, по коме се стари узорак из базе (који садржи поменуте информације) замењује новим. Формирање базе са карактеристичним узорцима значајно убрзава процес конвергенције вештачке неуронске мреже јер се обучавање врши коришћењем свих узорака у бази уместо само скупа тренутних информација. Такође, овиме је решен и проблем *интерференције* који се јавља јер не постоји експлицитан скуп жељених излазних вредности мреже (циљ је да се апроксимира вредносна функција $Q(s,a)$ према једначини (1)). Алгоритам је примењен у реалном времену коришћењем *iRobot Magellan Pro* мобилног робота за проблем избегавања препрека и праћења карактеристичног објекта уз помоћ компатибилне камере.

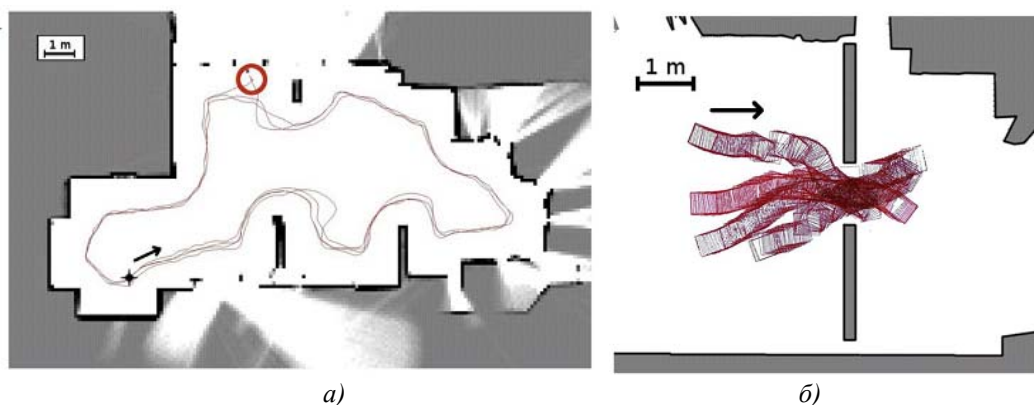
Убрзавање процеса учења мобилног робота базираног на емпиријском управљању и машинском Q-учењу ојачавањем односи се и на приступе који не укључују технике вештачке интелигенције. *Moreno* и др. користе претходно забележене сензорске податке из „тренинг“ фазе како би убрзали конвергенцију развијеног алгоритма у „тест“ фазе [14]. Меморисани подаци из фазе обучавања користе се као „савети“ при одлучивању током истраживања окружења у домену изабраног задатка. Решење је имплементирано у симулацији за карактеристични проблем праћења зида (енгл. *Wall following*). Сличан приступ представљен је у [15], где су подаци са ултразвучног сензора у претходним итерацијама обучавања употребљени у процесу одлучивања са становишта задатка избегавања препрека. Примењени аксиоми аксиоматске теорије пројектовања омогућавају развијање минималног скупа захтева који остварују захтеване функције пројектовања у реалном времену. За мобилни робот усвојене конфигурације одабране су произвољне вредности стартне и циљне позиције. Усвојени скуп акција је дефинисан на следећи начин: робот се може кретати право, скретати лево под углом од 45 степени, као и скретати у десну страну под истим углом. Нови алгоритам је имплементиран на роботу *LEGO Mindstorms NXT* применом *Matlab*[®] софтверског пакета (слика 2.3).



Слика 2.3: Експериментална верификација алгоритма емпиријског управљања мобилног робота у домену избегавања препрека [15]:

а) Конфигурација *LEGO Mindstorms NXT* мобилног робота; б) Број итерација до колизије са препреком и одговарајућа вредносна функција $Q(s,a)$.

Од новијих истраживања издвајају се резултати презентовани у [16,17]. *Quintia* и др. указали су на проблем учења мобилног робота са статичким пресликавањем (мапирањем) простора мерења у простор стања [16]. Предложен је нови алгоритам који, након иницијалне фазе обучавања, продужава време успешног понашања у домену посматраног проблема. За разлику од конвенционалних решења базираних на машинском учењу ојачавањем, простор стања није унапред дефинисан већ се он формира приликом *онлајн* истраживања окружења. Оваквом динамичком репрезентацијом простора стања избегава се подешавање параметара учења из једначине (1). „Фази“ ART вештачке неуронске мреже имплементиране у управљачки систем омогућавају ненадгледано учење кроз груписање („кластеровање“) континуалних вредности мерења у коначан број стања. Извршено је поређење са конвенционалним типовима учења доступним у литератури путем решавања проблема праћења зида и навигације кроз узани пролаз, и јасно је указано на предности овог приступа (слика 2.4).

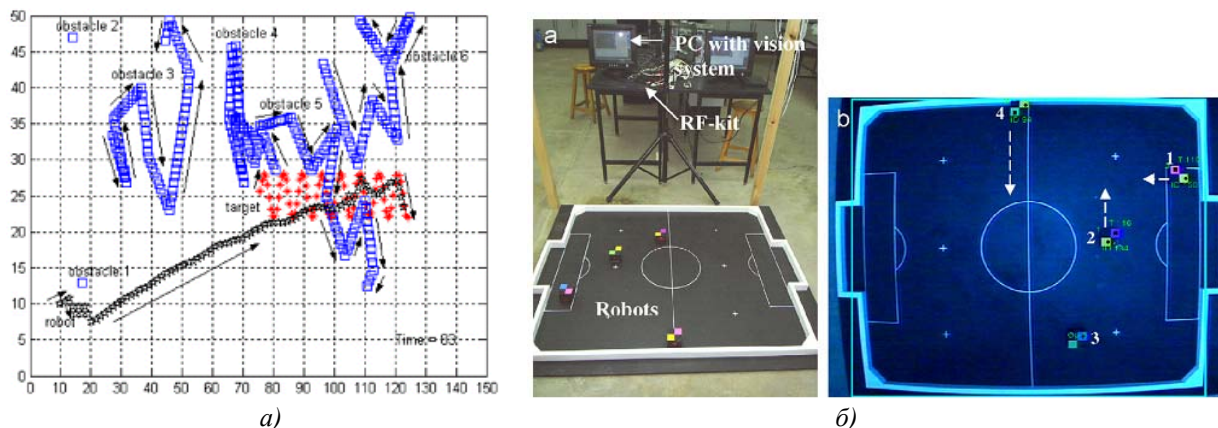


Слика 2.4: Нови алгоритам са динамичком репрезентацијом простора стања мобилног робота [16]:

а) Праћење зида; б) Навигација кроз узани пролаз.

У [17] је дато решење проблема избегавања динамичких препрека у окружењу. Кроз побошљани поступак дефинисања простора стања, мобилном роботу је омогућено да учи избегавање

препрека и других робота у реалном времену. Поређењем са методом „потенцијалних поља“ експериментално су потврђене предности оваквог решења. Слика 2.5 приказује симулационе резултате у присуству 6 објеката који имају познате брзине и облике, као и експеримент са 4 робота у лабораторијском моделу динамичког окружења.



Слика 2.5: Динамичко избегавање препрека на бази емпиријског управљања и машинског учења ојачавањем [17]:

а) Симулациони резултати; б) Експериментална верификација.

Посебну пажњу истраживача у свету привукла је интеграција емпиријског управљања и теорије компјутерског (машинског) гледања. Неколико експерименталних решења у којима је приказана синергија машинског Q-учења ојачавањем, вештачких неуронских мрежа и информација од спољашњег сензора-камере представљено је у [18-25]. Проблем појаве континуалних вредности мерења са спољашњих сензора у [18,19] решен је развојем и имплементацијом новог типа мреже названог „*Wire fitted neural network*“. Ова мрежа омогућава интерполацију улазних вредности стања и акција тако да излаз из мреже представља вредносну функцију $Q(s,a)$ (слика 2.6а). Слично решење дато је у [20], где се дефинисањем тежинских коефицијената за простор стања и простор акција, уз измењени алгоритам машинског Q-учења ојачавањем, обезбеђује успешна навигација мобилног робота ка карактеристичном објекту од интереса. У [21] представљен је резултат обучавања мобилног робота применом новог механизма названог „учење помоћу једноставних задатака“ (енгл. *Learning from Easy Missions*) у домену истог проблема. Занимљиви приступи решавању проблема приступања објектима од интереса (енгл. *Docking*) и проблема „паркирања“ представљени су у [22,23,24] и [25], респективно. Нови алгоритам учења на бази машинског Q-учења ојачавањем и информација од камере који фаворизује природно груписање елемената простора стања и омогућава бржу транзицију између суседних вектора стања наведен је у [22]. Сегментацијом слике карактеристичног објекта и имплементацијом емпиријског управљања на бази машинског Q-учења ојачавањем и вештачким неуронским мрежама (слика 2.6б) омогућена је успешна навигација робота у реалном времену [23]. Наставак истраживања истих аутора презентован је у [24], где је развијени алгоритам имплементиран на омнидирекционалној (360°) камери применом *Actor-Critic* технике машинског учења ојачавањем. Резултати добијени помоћу *PeopleBot* мобилног робота у „онлајн“ режиму потврђују валидност овог приступа. У референци [25], модификоване базисне функције (енгл. *Modified basis functions*) коришћене су за репрезентацију вредносне функције $Q(s,a)$, а верификација овог приступа спроведена је на *Pioneer P3-AT* мобилном роботу за проблем паралелног паркирања. Интеграцијом методе најмањих квадрата у процес учења, додатно је убрзана конвергенција представљеног алгоритма ка оптималном решењу.



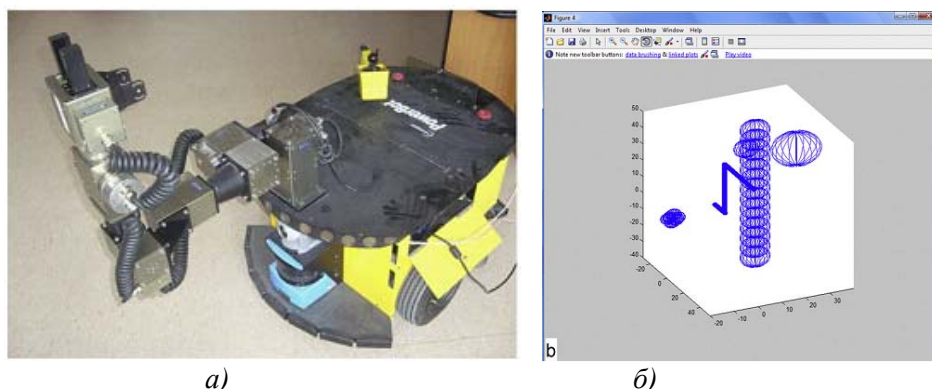
Слика 2.6: Експериментална верификација алгоритама интеграције машинског учења ојачавањем и информација од камере: а) Проблем навигације [18,19]; б) Проблем приступања објекту [24].

Интересантно истраживање које обухвата интеграцију елемената машинског Q-учења ојачавањем и информација од камере наведено је у [26]. Развијени управљачки систем примењен је на мобилни робот и састоји се од два управљачка подсистема базираних на добијеним информацијама од камере. Поред класичног управљачког система на основу грешке у параметрима слике [27], имплементиран је и подсистем на бази машинског Q-учења за положај карактеристичних „тачака“ (енг. „*Point features*“) у равни слике. Основна идеја је да се управља кретањем мобилног робота на основу информација од камере тако да се карактеристична „тачка“ налази увек у специфичном делу равни слике. Сходно томе, дефинисана је жељена област у равни слике ка којој карактеристична „тачка“ треба увек да тежи. У случају да је карактеристична „тачка“ изван жељене области, емпиријски управљачки систем базиран на машинском учењу ојачавањем има улогу „коректора“ положаја мобилног робота, са задатком обезбеђивања најповољнијег могућег положаја посматране „тачке“ на слици у наредном тренутку. Поред основног недостатка овог приступа који се састоји у томе што се довољан број података мора сакупити „офлајн“, употреба додатних сензора као што су ласери значајно усложњавају и поскупљују целокупан роботски систем.

3. ЕМПИРИЈСКО УПРАВЉАЊЕ ИНТЕЛИГЕНТОГ РОБОТА ВЕРТИКАЛНЕ ЗГЛОБНЕ КОНФИГУРАЦИЈЕ

У стручној литератури не постоји много примера који комбинују машинско учење ојачавањем и управљање базирано на информацијама од камере за робот вертикалне зглобне конфигурације. Први рад који обједињује поменуте научне методе објављен је 2000. године и у њему је алгоритам машинског Q-учења, базиран на резултатима сегментације слике са објектима познатог сферног облика и познатим одговарајућим радијусом, имплементиран на робот вертикалне зглобне конфигурације „*PUMA 560*“ [28]. Главни недостатак оваквог управљачког система представља раздвајање постављеног задатка визуелног навођења на две подкласе, што условљава генерисање две независне вредносне функције $Q(s,a)$. Такође, велико ограничење је и то што је неопходно унапред дефинисати карактеристике сферног објекта којем се приступа. Истовремено, део података је морао да буде прикупљен пре експерименталне верификације, како би табеларни запис вредносних функција парова стање-акција садржао довољан број валидиних нумеричких вредности.

Од новијих резултата посебно је занимљив приступ у коме се машинско учење ојачавањем на бази вештачких неуронских мрежа примењује за решавање проблема избегавања препрека у непознатом окружењу [29]. Два независна система вештачких неуронских мрежа, за решавање инверзног кинематичког проблема и за апроксимацију вредносне функције $Q(s,a)$, имплементирана су у управљачки систем *PowerCube* редундантног манипулатора приказаног на слици 3.1а. Симулационом анализом извршена је валидација предложеног концепта са аспекта успешног избегавања препрека у непознатом окружењу (слика 3.1б). Експериментална верификација развијеног алгоритма остварена је на роботу применом технике „виртуелне реалности“ (енгл. *Virtual reality*) у програмском језику C++.

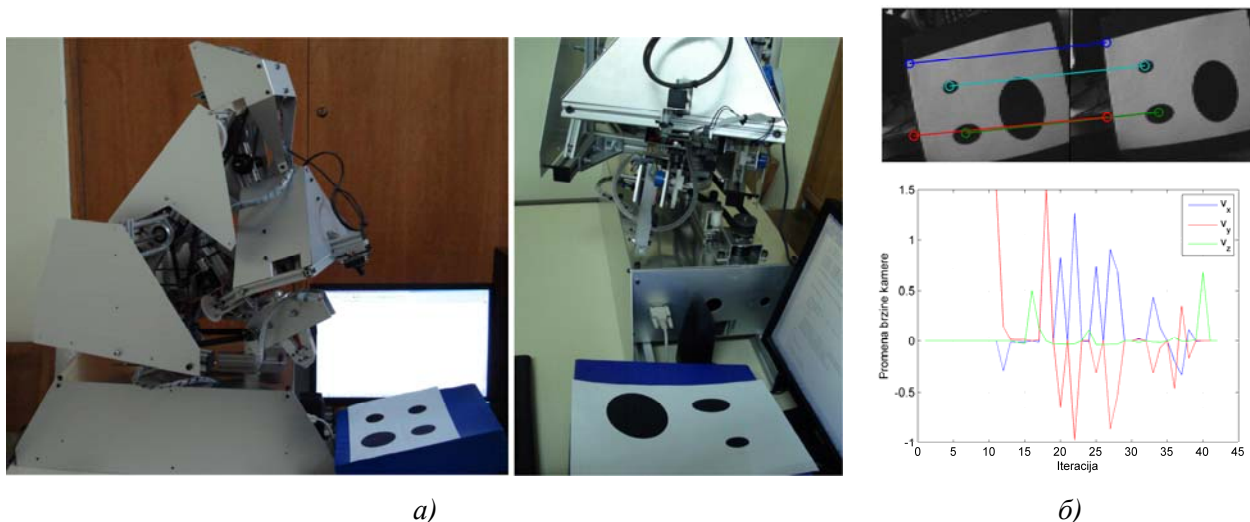


Слика 3.1: Емпиријско управљање на бази машинског Q-учења ојачавањем и двоструког система вештачких неуронских мрежа [29]: а) Редундантни манипулатор; б) Симулациона анализа решења избегавања препрека.

Учењем применом новог алгоритма машинског учења ојачавањем који има могућност генерисања модела међузависности стања (тј. успостављања зависности између стања у простору стања), обезбеђена је успешна манипулација објеката од интереса применом робота конфигурираног од јефтних, лако доступних компоненти [30]. Машинско Q-учење ојачавањем на бази „*multi-agent*“

технологије успешно је имплементирано у симулацији са задатком стабилизације двосегментног манипулатора [31].

У складу са трендовима истраживања приказаних у овом поглављу, у оквиру актуелног пројекта технолошког развоја (евиден. број *TP-35004*), развијен је хибридни емпиријски управљачки систем робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама добијеним од камере који обухвата две фазе управљања (слика 3.2) [32]. Прва фаза подразумева кориговање оријентације камере у простору применом машинског Q-учења ојачавањем на бази вештачких неуронских мрежа, док се друга фаза односи на кориговање положаја (позиције и оријентације) камере приликом смањења разлике параметара тренутне и циљне слике. Друга фаза обухвата два подсистема управљања: класични подсистем управљања на основу грешке у параметрима слике и „корекциони“ подсистем на бази Q-учења. Робустним алгоритмом препознавања издвојене су и упарене карактеристичне тачке тренутне и циљне слике. Дефинисањем жељених области у равни циљне слике (за обе фазе управљања) обезбеђен је основни корекциони елемент управљачког система на бази Q-учења ојачавањем. На основу разлике у положају карактеристичних тачака у равни слика, грешка управљања уведена је у класични управљачки подсистем базиран на информацијама од камере. Резултати примене предложеног емпиријског управљачког система обухватају симулациону анализу у *Matlab*[®] програмском пакету и експерименталну верификацију на антропоморфном роботу вертикалне зглобне конфигурације. Остварени резултати имају за крајњи циљ увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима.



Слика 3.2: Емпиријско управљање на бази система вештачких неуронских мрежа, машинског Q-учења ојачавањем и информација добијеним од камере [32]:

а) Роботски систем *NeuroArm Manipulator System*; б) Експериментални резултати.

4. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада дат је приказ стања истраживања у области емпиријског управљања. Основне теоријске поставке представљене су у првом поглављу у циљу описа концептуалних разлика између конвенционалног типа управљања и овог приступа. Главни преглед истраживачких резултата односи се на примену емпиријске теорије у домену управљања мобилних робота и робота вертикалне зглобне конфигурације. Посебно су издвојени резултати везани за развој и имплементацију емпиријских управљачких система на бази машинског Q-учења ојачавањем са становишта карактеристичних задатака навигације, избегавања препрека, праћења зида технолошког окружења, и/или визуелног навођења. Такође, велики број представљених научноистраживачких радова укључује имплементацију техника вештачке интелигенције (вештачких неуронских мрежа, генетичких алгоритама, „фази“ логике, и/или хибридних приступа) у циљу генерализације решења посматраног проблема и убрзавања процеса учења. У складу са актуелним трендовима истраживања, приказани су и резултати у оквиру пројекта технолошког развоја (евиден. број *TP-35004*) који обухватају развој и имплементацију емпиријског управљачког система мобилног робота у домену

избегавања препрека у технолошком окружењу, као и експерименталну верификацију хибридног емпиријског управљачког система робота вертикалне зглобне конфигурације базираног на информацијама добијеним од камере. Крајњи циљ описаних научноистраживачких активности пројекта технолошког развоја је увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима. На основу анализе описаних резултата закључује се да адаптивно понашање роботских система базирано на емпиријском управљачком систему представља велику предност у односу на друге приступе, поготово у технолошким системима подложним честим стохастичким променама.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brown R.A., **Machines That Learn**, Oxford University Press, 1994.
- [2] Миљковић З., Александрић Д., **Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије**, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.
- [3] Sutton R. S., Barto, A. G., **Reinforcement Learning: An Introduction**, MIT Press, 1998.
- [4] Watkins C., **Learning from Delayed Rewards**, PhD Thesis, King's College, London, 1989.
- [5] Миљковић З., **Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама**, Серија монографских дела - ИТС, Књига 8, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2003.
- [6] Madhava Krishna K., Kalra P. K., **Perception and Remembrance of the Environment During Real-Time Navigation of a Mobile Robot**, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 37, Issue 1, pp. 25–51, 2001.
- [7] Nagras H., Callaghan V., Colley M., **Learning and Adaptation of an Intelligent Mobile Robot Navigator Operating in Unstructured Environment Based on a Novel Online Fuzzy–Genetic System**, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 141, Issue 1, pp. 107–160, 2004.
- [8] Huang Q-B., Cao Q-Y., Guo M., **Reinforcement Learning Neural Network to the Problem of Autonomous Mobile Robot Obstacle Avoidance**, Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, pp. 85–89, 2005.
- [9] Mitić M., Miljković Z., Babić B., Majstorović V., **Q-Learning Framework as a Solution for an Obstacle Avoidance Problem in Unknown Environment**, Introduction paper, 6th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", Published in Conference Proceedings (ISBN 978-86-7083-727-0), Belgrade, Serbia, pp. 463–468, 2011.
- [10] Miljković Z., Mitić M., Babić B., Diryag A., **Q-learning Algorithm for a Mobile Robot Obstacle Avoidance in an Unknown Environment Based on Artificial Neural Networks**, Proceedings of the 4th International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN 2011), pp. 431–440, Thessaloniki, Greece, 2011.
- [11] Baird L., **Residual Algorithms: Reinforcement Learning with Function Approximation**, In: Machine Learning: Twelfth International Conference, San Francisco, USA, 1995.
- [12] Carreras Perez M., **A Proposal of a Behavior Based Control Architecture with Reinforcement Learning for an Autonomous Underwater Robot**, PhD Thesis, University of Girona, Italy, 2003.
- [13] Carreras M., Yuh J., Battle J., Ridao P., **Application of SONQL for Real-Time Learning of Robot Behaviours**, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 53, Issue 8, pp. 628–642, 2007.
- [14] Moreno D. L., Regueiro C. V., Iglesias R., Barro S., **Using Prior Knowledge to Improve Reinforcement Learning in Mobile Robotics**, In: 5th Conference Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2004), UK, pp. 109–116, 2004.
- [15] Mitić M., Miljković Z., Babić B., **Empirical Control System Development for Intelligent Mobile Robot Based on the Elements of the Reinforcement Machine Learning and Axiomatic Design Theory**, FME Transactions (ISSN 1451-2092), New Series, Vol. 39 No. 1, pp. 1–8, University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, 2011.
- [16] Quintía P., Iglesias R., Rodríguez M. A., Regueiro C. V., **Simultaneous Learning of Perception and Action in Mobile Robots**, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 58, Issue 12, pp. 1306–1315, 2010.
- [17] Jaradat M. A. K., Al-Rousan M., Qadan L., **Reinforcement Based Mobile Robot Navigation in Dynamic Environment**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, Issue 1, pp. 135–149, 2011.
- [18] Gaskett C., **Q-Learning for Robot Control**, PhD Thesis, The Australian National University, Australia, 2002.

- [19] Gaskett C., Fletcher L., Zelinsky A., **Reinforcement Learning for a Vision Based Mobile Robot**, In: Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), pp. 403–409, 2000.
- [20] Takahashi Y., Takeda M., Asada M., **Continuous Valued Q-learning for Vision-Guided Behavior Acquisition**, In: Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 255–260, 1999.
- [21] Asada M., Noda S., Tawaratsumida S., Hosoda K., **Purposive Behavior Acquisition on a Real Robot by Vision-Based Reinforcement Learning**, Machine Learning, Vol. 23, pp. 279–303, 1996.
- [22] Martínez-Marín T., Duckett, T., **Fast Reinforcement Learning for Vision-Guided Mobile Robots**, In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005), pp. 4170–4175, 2005.
- [23] Weber C., Wermter S., Zochios A., **Robot Docking with Neural Vision and Reinforcement**, Knowledge-Based Systems, Vol. 17, Issues 2–4, pp. 165–172, 2004.
- [24] Muse D., Weber C., Wermter S., **Robot Docking Based on Omnidirectional Vision and Reinforcement Learning**, Knowledge-Based Systems, Vol. 19, Issue 5, pp. 324–332, 2006.
- [25] Shaker M., Duckett T., Yue S., **A Vision-Guided Parallel Parking System for a Mobile Robot Using Approximate Policy Iteration**, In: 11th Conference Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS'2010), Plymouth, Devon, 2010.
- [26] Wang Y., Lang H.X., de Silva C.W., **A Hybrid Visual Servo Controller for Robust Grasping by Wheeled Mobile Robots**, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 15, Issue 5, pp. 757–769, 2010.
- [27] Hutchinson S., Hager G., Corke P., **A Tutorial on Visual Servo Control**, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, pp. 651–670, 1996.
- [28] Distanto C., Anglani A., Taurisano F., **Target Reaching by using Visual Information and Q-Learning Controllers**, Autonomous Robot, Vol. 9, pp. 41–50, 2000.
- [29] Duguleana M., Barbuceanu F. G., Teirelbar A., Mogan G., **Obstacle Avoidance of Redundant Manipulators using Neural Networks based Reinforcement Learning**, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 28, Issue 2, pp. 132–146, 2012.
- [30] Deisenroth M., Rasmussen C., Fox D., **Learning to Control a Low-Cost Manipulator using Data-Efficient Reinforcement Learning**, In: Proceedings of the International Conference on Robotics: Science and Systems, Los Angeles, USA, 2011.
- [31] Busoniu L., De Schutter B., Babuska R., **Decentralized Reinforcement Learning Control of a Robotic Manipulator**, In: Proceedings of the 9th International Conference of Control, Automation, Robotics, and Vision (ICARCV-06), Singapore, pp. 1347–1352, 2006.
- [32] Митић М., Миљковић З., Вуковић Н., Бабић Б., Лазаревић И., **Нови хибридни емпиријски управљачки систем интелигентног робота вертикалне зглобне конфигурације базиран на информацијама од камере**, Техничко решење (M85) у оквиру пројекта технолошког развоја Министарства просвете и науке (евид. бр. TP-35004), 2011.

EMPIRICAL CONTROL FOR INTELLIGENT ROBOTIC SYSTEMS – STATE-OF-THE-ART

Abstract:

Empirical control presents a new approach in the domain of the conceptual design of the control systems for mobile robots and robot manipulators. Compared to the conventional design methods, empirical control systems have the ability to learn based on the information obtained from the environment, continuously improving robot's behaviour. This paper presents a review on current research results, with emphasis on control systems based on the Q-learning algorithm and soft computing techniques. Comparative analysis has been conducted in terms of common robot-based and vision-based tasks. Described algorithms and experimental evaluations in real world clearly points out the advantages of implementation of the empirical theory in the conceptual design process of the control systems.

Keywords: empirical control, mobile robot, robot manipulator, Q-learning, intelligent manufacturing systems, artificial neural networks



Б. Бојовић¹, Б. Бабић², И. Милеуснић³, М. Ђукић⁴

ФРАКТАЛНА АНАЛИЗА ТОПОГРАФИЈЕ СУПСТРАТА ПРЕВЛАКА КОД АЛАТА ЗА ИЗВЛАЧЕЊЕ

Резиме

Превлаке на полираним површинама алата за пластично деформисање смањују абразивно хабање и побољшавају подмазивање, што се користи и код извлакача и прстена за извлачење. Са еколошког аспекта посматрано, ради унапређења процеса извлачења челичне лименке за прехранбене сврхе би требало да се разматра увођење не само превлака на металне радне органе алата, већ и на полимерне супstrate, као тенденција у истраживању. Управо зато су развијене процедуре за фракталну анализу површине полимерног супстрата, која одређује нумерички показатељ квалитета, на основу ког је могуће оценити оптималну површину супстрата са аспекта триболошког понашања. Генерисање топографије површине танког филма, са адекватним распоредом неравнина, који потиче од супстрата, додатно обезбеђује боље подмазивање, а самим тим и мањи коефицијент трења.

Кључне речи: Превлаке, Извлачење, Фрактална анализа, Коефицијент трења

1.0 УВОД

Превлаке су у области производног машинства нашле одавно примену код алата за резање [1] као танки филмови на бази титанијума (титанијум нитрид TiN, титанијум карбид TiC) или хрома (хром нитрид CrN, хром карбид CrC) или угљеничних (Diamond-Like Carbon DLC) превлака, чија је тврдоћа блиска дијаманту. Оне омогућавају дужи век алата и бољи квалитет обрађене површине уз мањи коефицијент трења. Превлаке од титанијум нитрида (TiN) олакшавају подмазивање и смањују абразивно хабање, за које се у случају клизних површина, посебно, препоручују превлаке од титанијум карбонитрида (TiCN). Угљеничне превлаке (DLC) обезбеђују најмањи коефицијент трења. Поступци за наношење материјала у виду танких филмова су физичко (Physical Vapor Deposition-PVD) и хемијско (Chemical Vapor Deposition-CVD) напаравање. Физичким напаравањем се остварује чврста (физичка) веза између супстрата и превлаке на температурама од око 500 °C, а хемијским настају хемијске и металуршке на температурама и преко 1000°C [2].

Касније у односу на резне алате, превлаке су се почеле примењивати и на радним деловима алата за обраду пластичним деформисањем [3]. Нови поступци као што је процес термореактивне дифузије (Thermoreactive Diffusion-TD) се користи за добијање танких филмова од нпр. ванадијум

¹ Доц др Божица Бојовић, дипл.маш.инж., Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, Краљице Марије 16. Београд, e-mail: bbojovic@mas.bg.ac.rs, 011/3302236

² Проф. др Бојан Бабић, дипл.маш.инж., Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, Краљице Марије 16. Београд, e-mail: bbabic@mas.bg.ac.rs, 011/3302274

³ Ивана Милеуснић, маст.инж.маш., Универзитет у Београду, Машински факултет, Биомедицинско инжењерство, Краљице Марије 16. Београд, e-mail: ivana131@gmail.com, 011/3302376

⁴ Марко Ђукић, маст.инж.маш., Универзитет у Београду, Машински факултет, Биомедицинско инжењерство, Краљице Марије 16. Београд, e-mail: stonoga@open.telekom.rs, 011/3302376

карбида (VC) или алуминијум титанијум нитрида (AlTiN) које су дифузионо везане за супстрат. Поготову у области обраде полимера истакнута је у [4] отпорност алата на абразивно хабање, лакши ток истопљеног материјала, лакше избацивање готовог дела и елиминисање чишћења алата. У области обраде лима, последњих деценија, превлаке имају улогу у смањеном подмазивању, поузданости и дуготрајности алата [5].

Превлаке које настају од флуорополимера, ксилана или молибден дисулфида (MoS_2) су „клизаве“, тј спречавају приањање и на тај начин, ако су нанешени на радне органе алата, и при великим оптерећењима елиминишу подмазивање током процеса обраде [6]. За примену код алата за пластично деформисање, међу најбољим решењима се издваја комбинација две превлаке, првог филма од уобичајених материјала (TiC, CrN, CrC, AlTiN, VC) и другог од непријањајућих (флуорополимера, ксилана или молибден дисулфата).

Проблем унапређења процеса извлачења лименки са аспекта примене еколошких принципа се може решити увођењем радних органа алата са комбинованом превлаком. На тај начин би се економски не претерано захтевна улагања превела у еколошки оправдана побољшања у виду смањеног подмазивања или обраде „на суво“, што је у складу са резултатима приказаним у [7,8]. Поготово што се досадашњи лубрикант испира током процеса пуњења лименке прехранбеним производом. Могућност, примене комбинованих превлака на радним деловима алата за израду дводелних лименки процесом извлачења у фабрици ФМП д.о.о, која је корисник резултата пројекта под називом „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“ је тема овог рада. Почетни истраживачки напори који су овде представљени се односе на фракталну анализу површине супстрата, односно основне површине на коју се наноси превлака, јер топографија супстрата умногоме утиче на коначан распоред неравнина превлаке, према [9].

2.0 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА

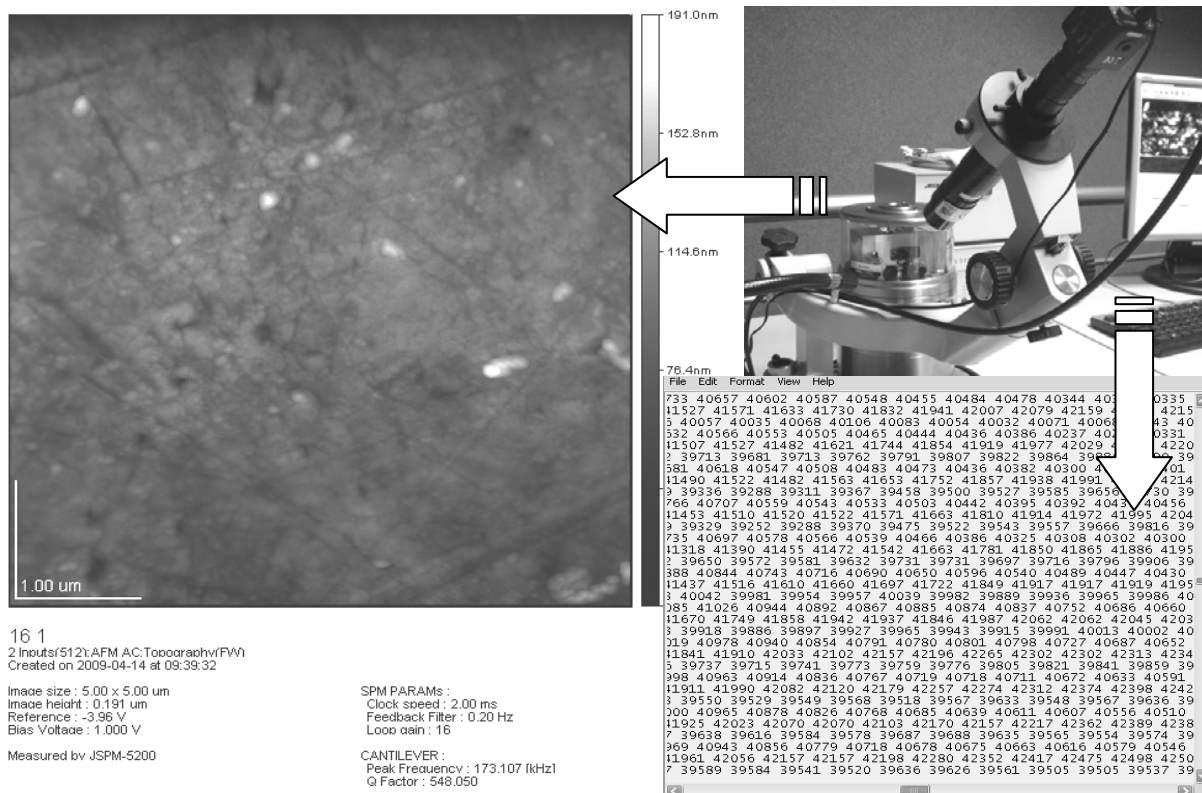
Материјали за алате за обраду лима су алатни челици за хладни рад, односно легирани челици са хромом, молибденом, никлом и ванадијумом. Примењују се код процеса као што су пробијање, просецање и извлачење То су нпр. \check{C} .4150, \check{C} .4850, \check{C} .6444, \check{C} .4141 и \check{C} .3840, према [10]. Примена алата од полимерног материјала (нпр. полиуретана) са превлаком базираном на волфрам карбиду (WC-FeCSiMn) примењена за извлачење челичног лима је у раду [11] позитивно окарактерисана, што је утицало на нашу одлуку да се за материјал супстрата изабере полимер.

Површине супстрата су формиране на стругу грубим и финим стругање, а затим полиране полир пастом. Карактеризација топографије обрађених површина служи као витална веза између израде, анализе и предикције функционалних перформанси површина. У ту сврху је примењена микроскопија атомским силама (AFM), која нуди разне могућности за истраживање и развој захваљујући анализи својстава обрађене површине недеструктивном методом у нанометарској резолуцији.

2.1 Скенирајућа микроскопија полиране површине

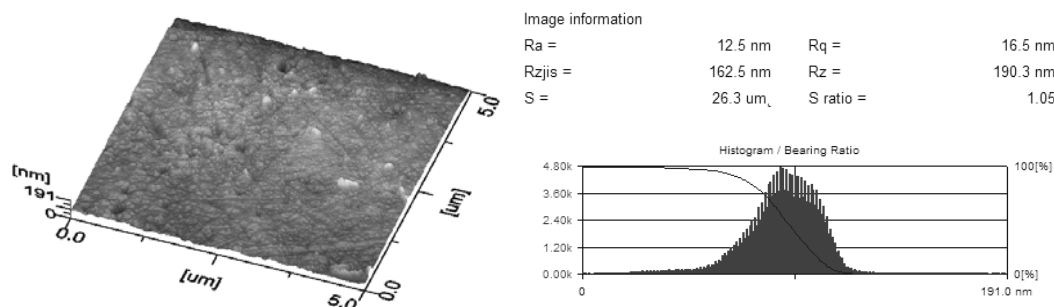
Принцип рада AFM-а је заснован на скенирању површине помоћу сензора, на растојању довољно малом да мери атомске интеракције и постиже квази тродимензионално мапирање атома на самој површини. Аквизиција података, тј. скенирање обрађене површине је извршено на Универзитету у Београду, на Машинском факултету, у оквиру *Nanolab* лабораторије у којој се налази инструмент JSPM5200, познате фирме JEOL, који је приказан на слици 1. горе десно. Један од излаза скенирајућег микроскопа је топографски снимак који је представљен као слика у 8-битном tiff формату величине 512×512 пиксела, видљив на слици 1. лево. Услови под којима су вршена сва мерења, приказани су на слици 1: величина слике; мод, датум и време снимања; величина снимљене површине и највећа висина неравнина, којој одговара бела боја.

Програмски пакет WinSPM нуди конвенционалну анализу храпавости преко неколико стандардних параметара храпавости, хистограма и криве ношења, што је на слици 2. приказано. Управо је потреба да се, са више стандардних параметара истовремено, описује обрађена површина, главни недостатак конвенционалне анализе храпавости. Стога се, фрактална анализа храпавости обрађене површине, која следи у наставку, намеће као бољи приступ у карактеризацији обрађених површина, што је у [12] и показано.



Слика 1. Топографски снимак (лево), скениран на микроскопу JSPM5200 (десно горе) и одговарајући текстуални запис (десно доле)

Микроскопу придружен софтвер WinSPM, омогућава извоз снимка површине узорка у различитим стандардним форматима за слике, али и у ASCII формату са 16-битним бројевима, тј. са петочифреним бројевима који представљају висину неравнина у сваком пикселу, што је парцијално приказано на слици 1. доле десно. Улаз у процедуре развијене у конвенционалном пакету Matlab је управо датотека у ASCII формату.



Слика 2. Тродимензионални приказ снимљене површине и стандардни параметри храпавости

2.2. Фрактална анализа

Топографија површина супстрата за превлаке, представљена текстуалном датотеком, се може увести у конвенционални пакет Matlab, ради даљег процесирања, тј. примене модификоване методе „небодера“. Модификована метода „небодера“ као ново техничко решење прихваћена је од стране Истраживачко-стручног већа Машинског факултета Универзитета у Београду и детаљно описана у претходном раду групе аутора [13].

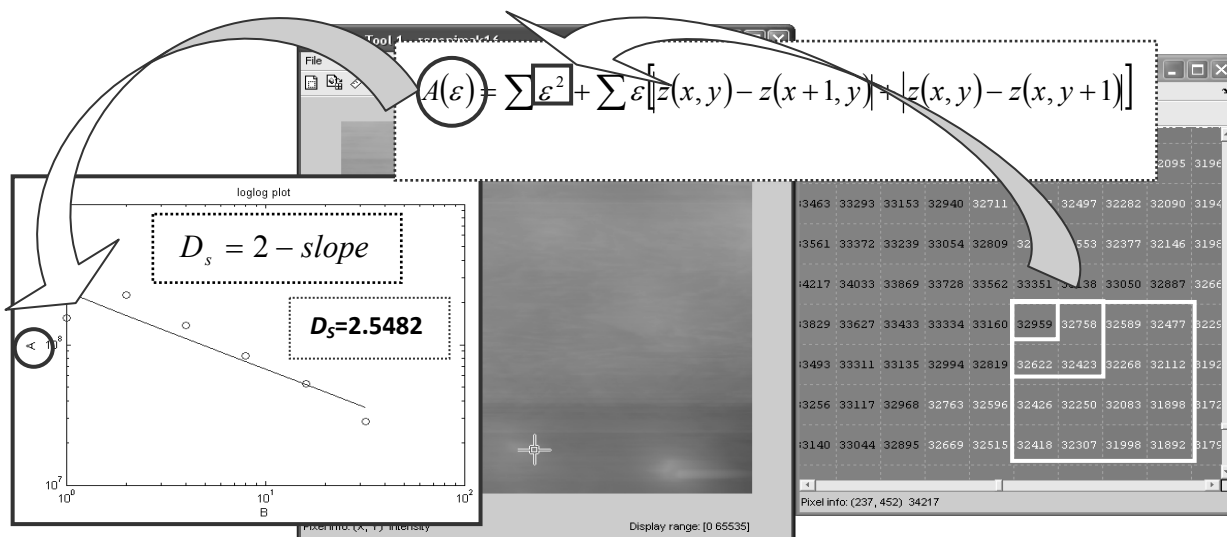
Методу чине сопствено развијене процедуре у Matlab-у за генерисање матрица које представљају снимак површине са умањеним резолуцијама, одн. sukcesивно увећаним мерилем $\varepsilon=1,2,4,8,16,32$, које представља „кров небодера“. Површина снимка $A(\varepsilon)$ обухвата видљиве стране замишљених небодера и сумирање њихових површина, као и површина кровова. Коришћењем израза

(1), одређене су површине свих видљивих страна небодера за одговарајућу величину мерила пиксела, која се sukcesивно увећава и захтева усредњавање нијансе сиве. Добијене вредности за сваку матрицу представљају површине снимка за различите величине мерила ε , које се могу представити као парови тачака (A, ε) на дијаграму са дуплом логаритамском скалом. Провлачење праве кроз парове тачака је извршено у постојећем "Curve fitting toolbox"-у. Нагиб праве је преко израза (2) у релацији са фракталном димензијом D_s , која се одређује као мера неравномерности, одн. храпавости.

$$A(\varepsilon) = \sum \varepsilon^2 + \sum \varepsilon [|z(x,y) - z(x+1,y)| + |z(x,y) - z(x,y+1)|] \quad (1)$$

$$\log A = (2 - D_s) \log \varepsilon + c \quad (2)$$

На слици 3, је приказан метод небодера примењен на снимак узорка полиране површине и вредност фракталне димензије срачуната за ту површину.



Слика 3. Одређивање фракталне димензије методом „небодера“ на основу 16-битног записа

3.0 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Полиране површине полимера као примера за супстрат превлаке су снимљене у полу-контактном моду на скенирајућем микроскопу. За прикупљене податке увезене у конвенционални пакет Matlab, срачунате су фракталне димензије помоћу сопствено развијених процедура. У табели 1 су приказане фракталне димензије 38 узорка површина супстрата, срачунате применом методе „небодера“. Вредности фракталне димензије се налазе у интервалу [2.1755, 2.5389], што је у табели 1 приказано.

Идентификација, компарација и оцена супстрата, као и предикција функционалног понашања, се на основу вредности фракталне димензије може спровести једноставно и недвосмислено. Већа вредност фракталне димензије површине супстрата одговара храпавијој површини и обрнуто. Наведено се базира на чињеници [14] да је неуређеност фрактала већа са већом вредношћу фракталне димензије. Најмање храпава површина је она која припада узорку број 111 са фракталном димензијом 2.1755. Најхрапавија је површина узорка број 161 са вредношћу фракталне димензије 2.5389. На први поглед се не уочава експлицитна веза између трајања полирања, као завршне обраде и вредности параметра храпавости. Међутим, генерално су вредности параметара мање код сочива која су дуже полирана.

Оцењивање на основу вредности фракталне димензије, даје потпуно другачије закључке, од оних који се намећу, када се посматра понашање површине у употреби. У нашем случају је реч о танком филму, који има улогу у смањењу трења, те према истраживањима у [15], фрактална димензија блиска вредности 2.5, одговара површини која има најбоља триболошка својства. Избор адекватних површина супстрата је, зато извршен на основу одступања од оптималне вредности фракталне димензије од 2.5, које је мање од 0.05 и се налази у интервалу (0,0233; 0,0461). У табели 1 су осенчене адекватне површине са аспекта распореда неравнина, које имају ознаку 14, 54, 71, 81, 102, 123, 161, 162. Према [9] распоред неравнина супстрата утиче и на храпавост превлаке касније нанесене на супстрат.

Табела 1. Фракталне димензије полимерних супстрата

Ознака узорка	Фрактална димензија	Ознака узорка	Фрактална димензија
13	2.3836	82-1	2.4333
14	2.4539	82-2	2.3851
21	2.3037	83	2.4333
31	2.3110	93	2.3907
32-1	2.3869	94	2.3653
32-2	2.4084	102	2.3908
34	2.3025	103-1	2.3589
43	2.3977	103-2	2.4102
52	2.4242	111	2.1755
53	2.3237	112	2.3294
54	2.4550	113	2.3291
61	2.4209	114	2.3856
62	2.3889	121	2.3578
63	2.3036	123	2.4676
64	2.4306	142	2.3760
71	2.4718	143	2.3331
72	2.3041	161	2.5389
73	2.2519	162	2.5287
81	2.5233	163	2.2527

Тако се поређењем вредности фракталних димензија површина супстрата на које ће се касније наносити превлака, може извршити избор одговарајућих површина и сходно томе и одговарајућих параметра обраде, у овом случају полирања, као завршне обраде, што је у оквиру [12] и показано.

4.0 ЗАКЉУЧАК

У раду је описана методологија фракталне анализе топографије на примеру полимерног супстрата, који се примењује и изради радних делова алата за извлачење, који се касније методом наношења танких филмова пресвлачи комбинованим превлакама. Ово су прелиминарна истраживања везана за топографије супстрата, која се преноси и на топографију превлаке у циљу генерисање повољне површинске храпавости, са аспекта распореда контактних зона, који уз својства материјала превлака, додатно утиче на смањење коефицијента трења. Превлаке код радних органа алата за извлачење смањују абразивно хабање и побољшавају подмазивање, захваљујући физичко хемијским својствима материјала од ког се наносе, поготово ако се примене комбиноване превлаке типа титанијум карбида и молибден дисулфида.

Карактеризација површине супстрата, је саставни део истраживања и подразумева прорачун фракталне димензије, као мере храпавости. Методологија подразумева технике скенирајуће микроскопије атомским силама и излаз у облику датотеке у ASCII формату са петоцифреним бројевима који представљају висину неравнина у сваком пикселу. Фракталном анализом се одређују вредности фракталне димензије, на основу којих се може извршити оптимизација процеса обраде супстрата, али и оптимизација процеса наношења танког филма, што се планира у даљем току истраживања у оквиру пројекта „Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима“.

Удружени ефекти комбинованих превлака, које обезбеђују извлачење без подмазивања и оптималног распореда контактних зона, који смањују коефицијент трења, повољно се одражавају не само на коначан квалитет изратка и производност, што је са економског аспекта оправдање за додатно улагање. Мора се истаћи да сем економског, наставак и посебно примена овде наведених унапређења има и еколошки утицај, што је и основни мотив наших истраживачких напора.

Литература

- [1] Venkatesh, V.C., Ye, C.T., Quinto, D.T., Hoy, D.E.P., „Performance Studies of Uncoated, CVD-Coated and PVD-Coated Carbides in Turning and Milling”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 40, pp. 545-550, 1991.
- [2] www.td.co.za
- [3] Kim, H., Han, S., Yan, Q., Altan, T., „Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)”, CIRP Annals-Manufacturing technology, Vol. 57, pp. 299-304, 2008.
- [4] Neto, V.F., Vaz, R., Oliveira M.S.A., Gracio, J., „CVD diamond-coated steel inserts for thermoplastic mould tools – Characterization and preliminary performance evaluation”, Journal of materials processing technology, Vol. 209, pp. 1085-1091, 2009.
- [5] Guillon, O., Roizard, X., Belliard, P., „Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing – application to aluminium alloy sheets and tool coatings”, Tribology International, Vol. 34, pp. 757-766, 2001.
- [6] Stoyanov, P., Strauss, H.W., Chromik, R.R., „Scaling effects between micro- and macro-tribology for a Ti-MoS₂ coating”, Wear, Vol. 274-275, pp. 149-161, 2012.
- [7] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T., „Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 53, pp. 511-537, 2004.
- [8] Klocke, F., Masmann, T., Bobzin, K., Lugscheider, E., Bagcivan, N., „Carbon based tool coating as an approach for environmentally friendly metal forming processes” Wear, Vol. 260, pp. 287-295, 2006.
- [9] Ohmori, H., Katahira, K., Komotori, J., Mizutani, M., Maehama, F., Iwaki, M., „Investigation of Substrate Finishing Conditions to Improve Adhesive Strength of DLC Films” CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 54, pp. 511-514, 2005.
- [10] http://www.efunda.com/Materials/alloys/tool_steels/
- [11] Witulski, J., Trompeter, M., Tekkaya, A.E., Kleiner, M., „High wear resistant deep drawing tools made of coated polymers, CIRP Annals-Manufacturing technology, Vol. 60, pp 311-314, 2011.
- [12] Бојовић, Б. „Истраживање интеракције стања инжењерских површина и фракталне геометрије“, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2009.
- [13] Bojović, B., Kalajdžić, M., Miljković, Z., Babić, B., „Fractal Approach for Substrates Surface Topography Image Evaluation”, 3rd ICMEN, Proceedings (ISBN 978-960-243-649-3), pp. 443-452, Kalithea, Greece, 2008.
- [14] Mandelbrot, B., The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman and Co, New York, 1982.
- [15] Russ, J., „Fractal dimension measurement of engineering surfaces”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38/5-6, pp. 567-571, 1998.

B.Bojovic, B.Babic, I. Mileusnic, M. Djukic

TOPOGRAPHY FRACTAL ANALYSIS OF COATING'S SUBSTRATE FOR DEEP DRAWING TOOLS

Abstract

Coatings on polished substrate of metal forming tools decrease abrasion wear and increase lubricity, which is case for deep drawing punch and die, also. Enhancement of food beverage deep drawing process, based on ecology, suppose to take in account tolls and dies coating on metal as well as polymer substrates. In house made procedures for fractal analysis are developed for the polymer substrate surface numerical indices calculation, in order to determine optimal surface topography for tribology behavior. Thin film generation with proper asperities distribution additionally provides excellent lubricity, and therefore lowest coefficient of friction.

Key words: Coatings, Deep drawing, Fractal analysis, Coefficient of friction



Nemanja Zorić, Zoran Mitrović, Aleksandar Simonović, Zorana Posteljnić¹

OPTIMALNA KONTROLA VIBRACIJA KOMPOZITNOG ELASTIČNOG PIEZOELEKTRIČNOG MANIPULATORA PRIMENOM FAZI-LOGIČKOG UPRAVLJANJA²

Rezime:

Prostorni manipulatori su elastične strukture i vibracije se mogu javiti usled kretanja ili spoljne pobude. Neželjene vibracije direktno utiču na performanse manipulatora. Ovaj rad predstavlja optimalnu kontrolu vibracija kompozitnog piezoelektričnog manipulatora upotrebom fazi-logičkog upravljanja (FLC). Funkcije pripadnosti optimizovane su primenom „Particle swarm“ optimizacione metode (PSO). Manipulator je modelovan „TSD“ teorijom i diskretizovan metodom konačnih elemenata. Numerički primer je prikazan za jedno segmentni manipulator.

1. UVOD

Tankozide kompozitne strukture široko su rasprostranjene u vazduhoplovstvu, automobilskoj industriji i robotici. Pojava neželjenih vibracija može dovesti do nestabilnosti sistema, smanjenja performansi, smanjenja radnog veka strukture i katastrofalnih lomova. U cilju kontrole i smanjenja vibracija tankozidnih kompozitnih struktura tokom eksploatacije, konvencionalne strukture se kombinuju sa sensorima i aktuatorima i na taj način obrazuju takozvane „pametne structure“. U poslednjih nekoliko godina, veliki broj istraživača koriste piezoelektrične aktuatore i senzore za aktivnu kontrolu vibracija.

Performanse i funkcionalnost pametnih struktura zavise od algoritma upravljanja. Postoje mnogo algoritama upravljanja koji se mogu primeniti za smanjenje vibracija tankozidnih manipulatora. Najčešće upotrebljavani algoritmi upravljanja su: „PD“ algoritam [1], „LQR“ optimalno upravljanje [2, 3], „PPF“ i „PID“ algoritmi [4].

Navedeni algoritmi pružaju adekvatnu redukciju vibracija za veliki dijapazon problema, ali su osetljivi na promene osobina strukture i zahtevaju tačan matematički model strukture. Alternativa je upotreba inteligentnih algoritama upravljanja baziranih na „Soft computing“ metodama kao što je fazi-logičko upravljanje (FLC). Teoriju fazi skupova je predstavio profesor Lotfi Zadeh [5] i od tada se koristi za rešavanje različitih inženjerskih problema. Glavna prednost FLC u odnosu na konvencionalne algoritme upravljanja je ta da je FLC baziran na veštačkoj inteligenciji gde se zakoni upravljanja dizajniraju na „ljudskoj inteligenciji“, a ne na determinističkom numeričkom pristupu. FLC ne zahteva tačan matematički model objekta i može da zameni bilo koje „konvencionalno“ upravljanje. Zbog navedenih prednosti, FLC se uspešno upotrebljava u kontroli vibracija elastičnih struktura [6, 7]. Sinteza FLC-a se sastoji od tri stepena. Prvi stepen je sinteza pravila zaključivanja, drugi je podešavanje funkcija pripadnosti, a treće je podešavanje parametara upravljanja. Drugi stepen, podešavanje funkcija pripadnosti, je dosta težn i kompleksniji od ostala dva.

U ovom radu je predstavljena optimalna kontrola vibracija kompozitnog piezoelektričnog manipulatora upotrebom FLC-a. Funkcije pripadnosti FLC-a optimizovane su primenom „Particle swarm“ optimizacione metode (PSO). Manipulator je predstavljen kao konzola, modelovan je „TSD“ teorijom i diskretizovan metodom konačnih elemenata. Numerički primer je prikazan za jednosegmentni manipulator.

¹ Nemanja Zorić dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, e-mail: nzoric@mas.bg.ac.rs
prof. dr Zoran Mitrović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3370-377,
email: zmitrovic@mas.bg.ac.rs

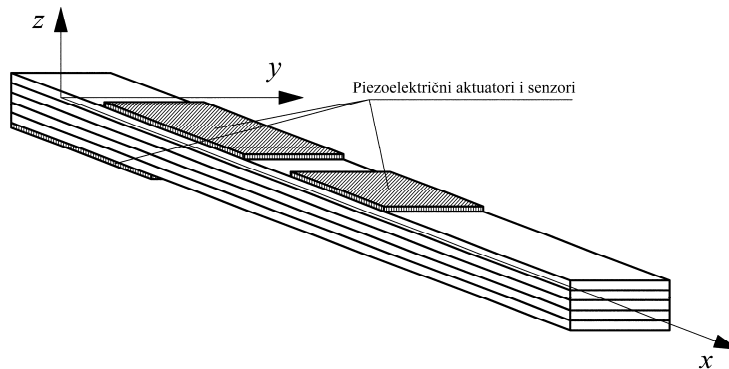
doc. dr Aleksandar Simonović dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345,
email: asimonovic@mas.bg.ac.rs

Zorana Posteljnić, dipl. inž, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, tel. 3302-345, email: zposteljni@mas.bg.ac.rs

² Rad predstavlja deo istraživanja za projekat TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

2. MATEMATIČKA FORMULACIJA

Konzola sa integrisanim piezoelektričnim sensorima i aktuatorima prikazana je na Slici 1. Pretpostavlja se da su elastični i piezoelektrični slojevi tanki, tako da se može primeniti ravno stanje napona. Aktuatori i senzori su idealno vezani za gornju i donju površinu konzole i pokrivaju površinu duž čitave širine.



Slika 1. Konzola sa piezoelektričnim aktuatorima i sensorima.

Elastični slojevi se dobijaju tako što se za njih uzme da su piezoelektrični koeficijenti jednaki nuli. Greda je diskretizovana primenom metode konačnih elemenata bazirane na „TSD“ teoriji. Spregnute jednačine kretanja su:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C_d]\{\dot{u}\} + [K^*]\{u\} = \{F_m\} - [K_{me}]_A \{\phi\}_{AA} \quad (1)$$

gde je $\{u\}$ vektor generalisanih mehaničkih pomeraja, $[M]$ je matrica masa, $[K_{me}]_A$ je piezoelektrična matrica krutosti aktuatora, $\{\phi\}_{AA}$ je vektor spoljašnjih napona koji deluju na aktuatore, $\{F_m\}$ je vektor spoljašnjih mehaničkih sila, $[C_d]$ je matrica strukturalnog prigušenja, a $[K^*]$ je spregnuta matrica krutosti koja se može predstaviti na sledeći način:

$$[K^*] = [K_m] + [K_{me}]_A [K_e]_A^{-1} [K_{me}]_A^T + [K_{me}]_S [K_e]_S^{-1} [K_{me}]_S^T \quad (2)$$

gde $[K_m]$ predstavlja elastičnu matricu krutosti, $[K_{me}]_S$ je piezoelektrična matrica krutosti senzora, a $[K_e]_A$ i $[K_e]_S$ su dielektrične matrice krutosti aktuatora i senora, respektivno. Jednačina (1) se može napisati u modalnim koordinatama:

$$\{\ddot{\eta}\} + [\Lambda]\{\dot{\eta}\} + [\omega^2]\{\eta\} = [\Psi]^T \{F_m\} - [\Psi]^T [K_{me}]_A \{\phi\}_{AA} \quad (3)$$

gde $\{\eta\}$ predstavlja vektor modalnih koordinata, $[\Psi]$ predstavlja modalnu matricu, $[\omega^2]$ je dijagonalna matrica kvadrata sopstvenih frekvencija, a

$$[\Lambda] = \text{diag}(2\zeta_i \omega_i)_{i=1,r} \quad (4)$$

je modalna matrica prigušenja gde je ζ_i modalni koeficijent prigušenja i -tog moda. Jednačina (3), zapisana u prostoru stanja je:

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + [B]\{\phi\}_{AA} + \{d\}, \quad (5)$$

gde

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{Bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[\omega^2] & -[\Lambda] \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} [0] \\ [\bar{B}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ -[\Psi]^T [K_{me}]_A \end{bmatrix}, \{d\} = \begin{bmatrix} [0] \\ [\Psi]^T \{F_m\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

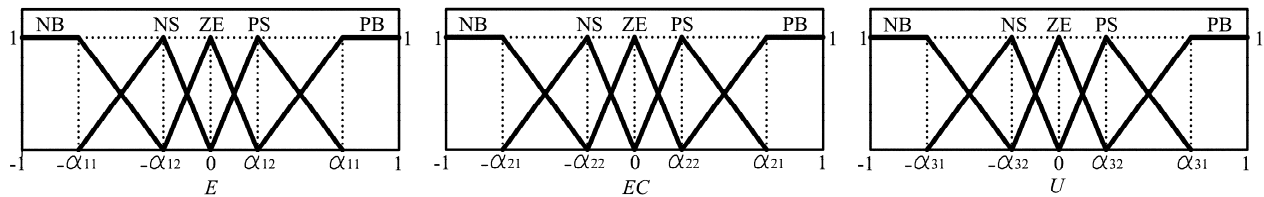
prestavlja vektor stanja, matricu sistema, vektor ulaza i vektor poremećaja, respektivno, a $[0]$ i $[I]$ su nula i jedinična matrica.

3. FAZI-LOGIČKO UPRAVLJANJE I KRITERIJUMI OPTIMIZACIJE

Za ulazne veličine u FLC su uzete: modalno pomeranje i prvi izvod modalnog pomeranja – modalna brzina. Izlazna veličina je napon na aktuatoru. Ulazne i izlazna veličina su u fazi prostoru definisani uz pomoć 5 fazi promenljivih: NB (negativno-veliko), NS (negativno-malo), ZE (nula), PS (pozitivno-malo), PB (pozitivno-veliko). Domeni fazi skupova su u opsegu $[-1 \ 1]$, tako da se ulazi u FLC i izlaz iz FLC-a moraju skalirati na sledeći način:

$$E = K_d \eta, \quad EC = K_v \dot{\eta}, \quad \phi_{AA} = K_{act} U \quad (7)$$

gde su K_d i K_v skalirajući faktori pomeraja i brzine, a K_{act} je izlazni skalirajući faktor koji je jednak maksimalnom dozvoljenom naponu koji može delovati na aktuator. Funkcije pripadnosti su parametrizovane parametrima koji se mogu prikazati matricom $[\alpha]$, i prikazane su na Slici 2.



Slika 2. Funkcije pripadnosti ulaznih veličina u FLC i izlazne veličine iz FLC-a.

Fazi zaključivanje je bazirano na Mamdanijevom principu [8], i pravila zaključivanja su prikazana u Tabeli 1.

Tabela 1. Pravila zaključivanja.

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	PB	PB	PB	PS	PS
	NS	PS	PS	PS	ZE	ZE
	ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
	PS	ZE	ZE	NS	NS	NS
	PB	NS	NS	NB	NB	NB

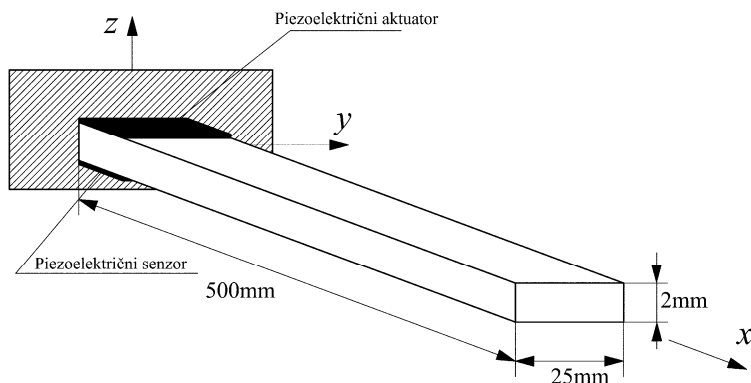
Sledeći korak je nalaženje optimalnih vrednosti parametara funkcija pripadnosti predstavljenih matricom $[\alpha]$. U cilju poboljšanja performansi FLC-a, optimalni parametri će biti traženi tako da se maksimizira sledeća ciljan funkcija:

$$\text{maximize } \left| \frac{\eta_{\max 1}}{\eta_{\max 2}} \right| \quad (8)$$

gde su $\eta_{\max 1}$ i $\eta_{\max 2}$ vrednosti prve i druge amplitude modalnog pomeraja. Optimalne vrednosti će biti tražene uz pomoć „Particle swarm“ optimizacione metode (PSO) [9].

4. NUMERIČKI PRIMER

U numeričkom primeru razmatra se jednosegmentni manipulator predstavljen konzolom. Dužina manipulatora je 05m, a širina 0.025m. Manipulator se sastoji od osam slojeva napravljenih od grafit-epoksija. Slojevi su postavljeni simetrično, sa orijentacijama: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$. Piezoelektrični senzor i aktuator napravljeni su od PZT-a, a njihove debljine su 0.2mm, a dužine 50mm, postavljeni su u koren manipulatora. Na Slici 3 prikazan je manipulator sa piezoelektričnim aktuatorima i senzorima. U Tabeli 2 date su karakteristike grafit-epoksi slojeva i PZT keramike.



Slika 3. Manipulator predstavljen konzolom sa aktuatorom i senzorom.

Tabela 2. karakteristike grafit-epoksi slojeva i PZT keramike.

Karakteristike	Grafit-epoksi	PZT
E_1 (GPa)	174	63
E_2 (GPa)	10.3	63
G_{13} (GPa)	7.17	24.6
G_{23} (GPa)	6.21	24.6
ν_{12}	0.25	0.28
ρ (kg/m ³)	1389.23	7600
e_{31} (C/m ²)	/	10.62
k_{33} (F/m)	/	15.55×10^{-9}

Optimizacija funkcija pripadnosti izvršena je za slučaj impulsnog udara od 5N u trajanju od 0.1ms na vrh manipulatora. Razmatran je samo prvi mod, a za modalno prigušenje je uzeta vrednost $\zeta_1 = 0.2\%$. Broj iteracija je 100. Skalirajući su podešeni na sledeće vrednosti $K_d = 1000$ i $K_v = 10$. Maksimalni dozvoljeni napon na aktuatoru je $K_{act} = 200$ V. U Tabeli 3 data je optimalna vrednost matrice $[\alpha]$, vrednost funkcije cilja i maksimalni napon koji se javlja prilikom upravljanja.

Tabela 3. Optimalna vrednost matrice $[\alpha]$ i vrednost funkcije cilja

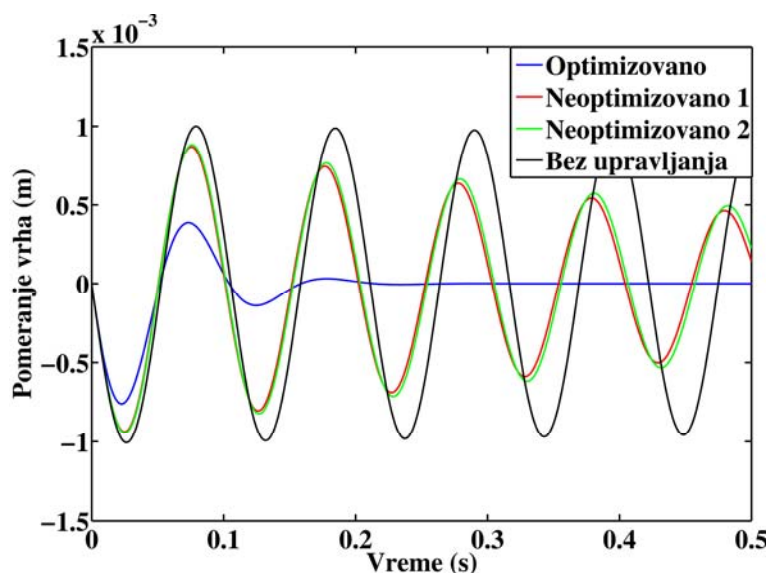
K_d	K_v	$[\alpha]$	Funkcija cilja
1000	10	$\begin{bmatrix} 0.743 & 0.415 \\ 0.679 & 0.05 \\ 1 & 0.322 \end{bmatrix}$	1.971

U cilju poredjenja, numerička simulacija je izvršena za slučajeve neoptimalne funkcije pripadnosti, i rezultati su prikazani u Tabeli 4.

Tabela 4. Matrica $[\alpha]$ i vrednost funkcije cilja za neoptimalne funkcije pripadnosti.

$[\alpha]$	$\begin{bmatrix} 1 & 0.4 \\ 1 & 0.4 \\ 1 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.25 \end{bmatrix}$
Funkcija cilja	1.078	1.071

Na Slici 4 prikazano je pomeranje vrha manipulatora za optimizovani slučaj, prikazan u Tabeli 3, neoptimizovane slučajeve, prikazane u Tabeli 4, i slučaj kada nema upravljanja.



Slika 4. Pomeranje vrha manipulatora.

Poredeći Tabele 3 i 4, u uzimajući u obzir Sliku 4, može se videti da je redukcija vibracija značajno efikasnija u slučaju kada je funkcija pripadnosti optimizovana nego u slučajevima kada su funkcije pripadnosti slučajno izabrane.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je optimalna kontrola vibracija kompozitnog manipulatora primenom fazi-logičkog upravljanja, koristeći piezoelektrične senzore i aktuator. Funkcije pripadnosti FLC-a su optimizovane primenom „Particle swarm“ optimizacione metode. Numerički primer je prikazan za jednosegmentni manipulator koji je predstavljen konzolom. Razmatran je samo prvi mod. Poredeći rezultate optimizovanog FLC-a sa neoptimizovanim, može se zaključiti da je redukcija vibracija značajno efikasnija u slučaju kada je funkcija pripadnosti optimizovana nego u slučajevima kada su funkcije pripadnosti slučajno izabrane. Iako ovaj rad razmatra samo jednosegmentni manipulator, predstavljena metoda se može koristiti, kako za više-segmentne manipulatore, tako za slučajeve gde se javljaju više modova.

LITERATURA

- [1] Sun D., Mills J. K. Shan J., Tso S. K. “A PZT actuator control of a single-link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement”. *Mechatronics* 14:381-401, 2004.
- [2] Zabihollah A., Sedaghti R., Ganesan R. “Active vibration suppression of smart laminated beams using layerwise theory and an optimal vibration control strategy”. *Smart Materials and Structures* 16:2190-2201, 2007.
- [3] Vasques C.M.A., Rodrigues J.D. “Active vibration control of smart piezoelectric beams: Comparison of classical and optimal feedback control strategies”. *Computers and Structures* 84:1402-1414, 2006.

[4] Wang, Y., Inman, D.J. "Comparison of Control Laws for Vibration Suppression Based on Energy Consumption". Journal of Intelligent Material Systems and Structures 22:795-809, 2011.

[5] Zadeh L. A. "Fuzzy sets". Information and Control 8:338-353, 1965.

[6] Wei, J., Qiu Z., Han, J and Wang, Y. "Experimental Comparison Research on Active Vibration Control for Flexible Piezoelectric Manipulator Using Fuzzy Controller". Journal of Intelligent and Robotic Systems 59:31-56, 2010.

[7] Wenzhong, Q., Jincai, S. and Yang, Q. "Active control of vibration using fuzzy control method". Journal of Sound and Vibration 275:917-930, 2004.

[8] Lee K. H. "First Course on Fuzzy Theory and Applications". Springer-Verlag, 2005.

[9] Kennedy, J. and Everhart, R.C. "Particle swarm optimization". Proceedings of the IEEE international conference on neural networks 4:1942-1948, 1995.

Optimal Vibration Control of Composite Flexible Piezoelectric Manipulator using Fuzzy Logic Controller

Space manipulators are flexible structures and vibration can appear due to motion or external disturbance excitation. Unwanted vibrations affect directly on performances of the manipulator. This paper presents an optimal vibration control of composite smart manipulator using fuzzy logic controller (FLC). The membership function of FLC are optimized using Particle swarm optimization (PSO) algorithm. The manipulator is modeled by third-order shear deformation theory (TSDT) and discretized using finite element method. Numerical example is provided for single-link manipulator.



Ž. Pavićević¹, M. Sofrenović²

POSLEDNJI TREND OVI U INDUSTRIJI ALATNIH MAŠINA: SVETSKA KRIZA

Rezime

Turbulencija u ekonomiji ima isti karakter kao i u prirodi: nepredvidiva je, destruktivna, brza i teška za modeliranje. Poslednja turbulencija u globalnoj ekonomiji nastala je kao rezultat dominantnog uticaja privrednih subjekata vođenih ekonomijom moralnog hazarda. Sinergija koja neminovno prati globalizaciju, ali i tranziciju, pokazala je svoju negativnu stranu. Globalna ekonomska kriza o kojoj se intezivno govori poslednjih godina ima sve karakteristike turbulentne pojave. „Strah od straha“ je iz finansijskog sektora prvo prenesen u realni sektor, a zatim u institucije i politički sistem. Najjači udar kriza je imala na realni sektor, pre svega industriju. Zbog svoje prirode da omogućava razvoj tehnologije, mašinska industrija, odnosno, mašine alatke kao tradicionalno vrlo cikličan sektor, dovele su do toga da klijenti odlože ulaganja u trajna kapitalna dobra u vreme ekonomske krize odnosno vreme nedostatka poslovnog poverenja. S druge strane, aktuelna ekonomska kriza je i dobra prilika za razvoj novih poslovnih modela koji vode ostvarivanju novih ključnih konkurentskih prednosti. Mašine alatke su neophodne danas kao što će biti neophodne i sutra, da svojom sposobnošću reše probleme i u budućnosti počev od industrijalizacije zemalja u razvoju.

1. UVOD

Sinergija je pojava koja neminovno prati globalizaciju ali i tranziciju. Prema Kotleru, globalizacija i informacione tehnologije su snage koje dovode do rasta povezanosti i međuzavisnosti. Povezanost i međuzavisnost su pretpostavke pozitivne i negativne sinergije. Glavni razlog negativne sinergije je fenomen *interlocking fragility*, odnosno, fenomen iznadproporcionalnog uticaja negativne pojave na nestabilnost sistema uslovljen međusobnom povezanošću. Moralni hazard je negativna pojava koja se lako pretvara u turbulenciju čija je osnovna manifestacija opšti rast izloženosti rizicima. Poslednja turbulencija u globalnoj ekonomiji nastala je kao rezultat dominantnog uticaja privrednih subjekata koji ne veruju u ništa drugo osim u progres. Tipične manifestacije gladi za rizik kod ovakvih subjekata su hiperprodukcija i/ili rast zaduživanja i/ili rast emitovanog kapitala.

Ekonomija moralnog hazarda dovela je najpre do finansijske krize, a „*strah od straha*“ je krizu iz finansijskog prelio u realni sektor pri čemu se ista zahvaljujući sinergiji jako brzo širila pomerajući granice delovanja na institucije i politički sistem. Recesija, ali i socijalne manifestacije izražene u promeni političkih modela, pritisaka i uslovljavanja postale su realnost. Nova realnost u globalnoj ekonomiji odražava promenu paradigme, od makroekonomske stabilnosti prema „*chaotics*“ menadžmentu. U svetu nakon krize održivost je ključna reč. Mnoge privrede primorane su na promenu dosada uspostavljenog ekonomskog poretka kao i na promene društveno-političkog modela u cilju prevazilaženja efekata ekonomske krize.

Proces horizontalnog povezivanja među kompanijama koje se bave proizvodnjom alatnih mašina (Npr. CECIMO - European Committee for Cooperation of the Machine Tool Industries), koji je pre izbivanja krize bio dosta izražen iz razloga bojazni od rizika koji mogu rezultirati gubitkom ili promašajem, omogućio je prenošenje krize iz jednog poslovnog sistema u drugi, iz sektora u sektor. Zbog svoje prirode da omogućava razvoj tehnologije, mašinska industrija, odnosno, mašine alatke kao tradicionalno vrlo cikličan sektor, dovele su do toga da klijenti odlože ulaganja u trajna kapitalna dobra u vreme ekonomske krize, odnosno, vreme nedostatka poslovnog poverenja. Ovo je značajno uticalo na širenje „*straha*“ i povećanje nezaposlenosti ali i do preliivanja krize u druge industrijske grane.

S druge strane, aktuelna ekonomska kriza je i dobra prilika za razvoj novih poslovnih modela koji vode ostvarivanju novih ključnih konkurentskih prednosti. Savremeni tokovi transfera znanja i iskustva su

¹ Mr Željko A. Pavićević, dipl.ing.maš., BAS a.d., Železnička 4, Beograd, zeljkopavicevic@aol.com

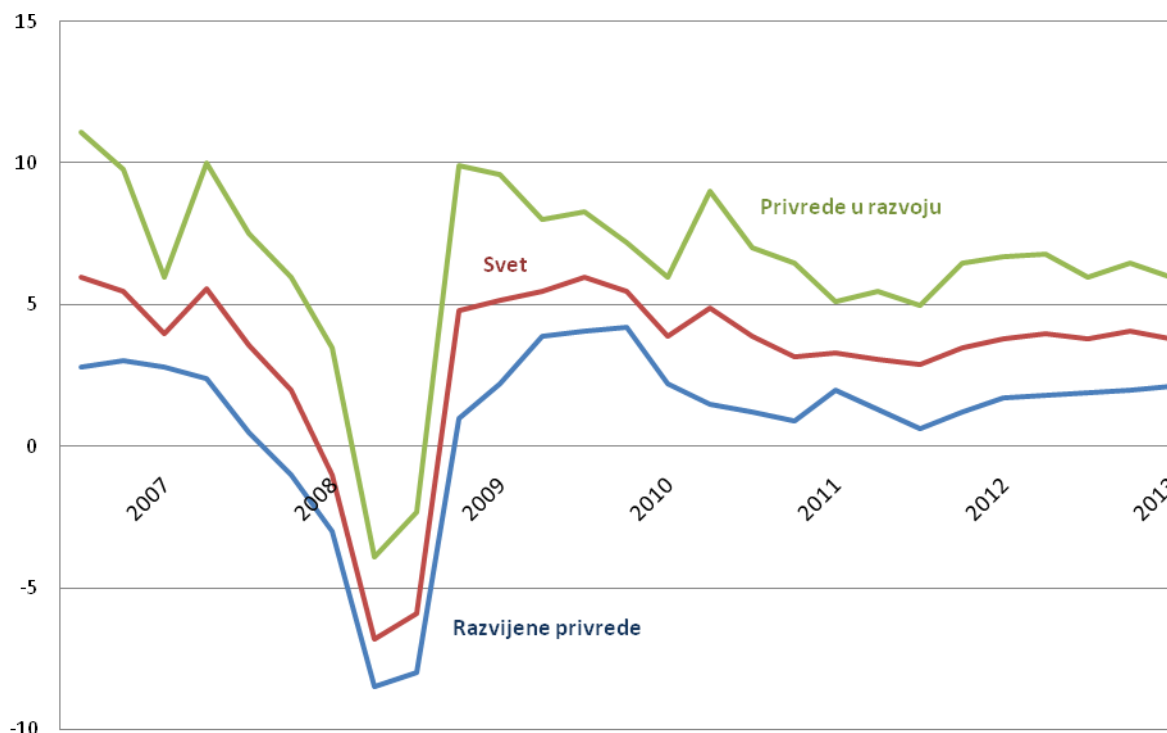
² Mirjana Sofrenovic, dipl.ing.maš., DT termo d.o.o., Neznanog junaka 15a, Beograd, mirjanas.sofrenovic@dttermo.rs

sastavni deo ovih procesa, a porast značaja ovih transfera na planu tzv. »mezaštićenih prava« u smislu specifičnog *know-how* sve više ima mesta u praksi pri čemu ne mislim samo o tehnološkom već i organizacionom, preduzetničkom, marketing znanju ili *know-how*.

2. SVET U KRIZI

Pokazalo se da globalna ekonomska kriza nema podjednak uticaj na sve zemlje. Ranjivost na krizu meri se promenom stopa rasta bruto društvenog proizvoda (BDP) i izvoza. Primera radi, kao što se vidi sa Ilustracije 1, nagli pad BDP za oko 10% zabeležen je u zemljama evro zone u trenutku izbijanja krize. Oporavak i izlazak iz recesije usledio je u 2009. i 2010. godini. Svetska privreda je u 2010. godini ostvarila rast od 5%. Takvom rastu najviše su doprinele privrede u razvoju (preko 7%) koje primenjuju druge doktrine ekonomske i razvojne politike u odnosu na razvijene privrede koje su zabeležile manji rast (3%).

Ilustracija 1 / Globalni rast BDP u %, kvartalni pregled na godišnjoj osnovi



Izvor / preuzeto iz IMF / World Economic Outlook-Update 2012, str.1

Zemlje visokog stepena izvozne zavisnosti su istovremeno zemlje koje su najviše pogođene globalnom krizom. Kina, zemlja koja je u predhodnom periodu predstavljala motor ekonomskog rasta u svetu, poslednjih godina pokazuje ozbiljne znake slabljenja. Veliki problemi kineske privrede su izgleda u vezi sa padom potraživanja robe proizvedene u Kini od strane njenih ključnih kupaca, prvenstveno onih iz Evrope. Kriza je zemlje Evrope pogodila jače nego ostale regione imajući različite manifeste na različite ekonomije. Sve zemlje su bile pogođene finansijskom krizom i kolapsom u globalnoj trgovini, uz uticaj srazmeran obimu izloženosti toksičnoj aktivni, oslanjanje na sekjuritizaciju i zavisnost od svetske trgovine. Pored toga neke zemlje su patile od potresa izazvanih na tržištu nekretnina pucanjem spektakularnih kreditnih balona (Irska, Španija, Velika Britanija i zemlje Baltika), pojedine su bile ugrožene usled zabrinutosti oko fiskalne održivosti (Italija i Grčka) ili zbog brige o velikom deficitu tekućih računa (Mađarska i zemlje Balkana). U svom poslednjem izveštaju Svetska Banka predviđa da, i pored stalnih reformi i odličnog manervisanja u izbegavanju udara na privredu Kine, godišnji rast će opasti za 5,9% do 2021. godine, odnosno 5% do 2026. godine. I u ovakvim okolnostima Kina će zameniti USA kao najveću svetsku ekonomiju do 2030. godine, a njen uticaj na globalnu ekonomiju mogao bi se porediti sa uticajem Velike Britanije iz 1870. godine ili USA iz 1945. godini.

Kako će zemlja izaći iz recesije prvenstveno zavisi od sposobnosti i mogućnosti vlade da stabilizuje privredu u uslovima krize. Jedan broj zemalja je pribegao upumpavanju novca u finansijski sistem dok je drugi krenuo na zaduživanje. Štampanje novca utiče na inflaciju, dok se zaduživanjem utiče na spoljnu

likvidnost. Takođe, kriza dovodi do pada ekonomske aktivnosti jedne zemlje što uzrokuje pad zaposlenosti. Posledično, javlja se opasnost od socijalnih i političkih nemira.

Poslednja kriza u prvi plan je istakla rastuću ulogu države u savladavanju krize što je i jedna od vodećih preporuka Svetske Banke. Prisustvo države raste kako u realnom tako i u finansijskom sektoru. U borbu protiv krize država se uključuje kroz aktivnosti centralne banke i ministarstva finansija. U savladavanju krize centralne banke poštuju dva načela. Prvo, apsorbovati sve dubioze relevantnih finansijskih posrednika koje se mogu apsorbovati. Drugo, garantovati sve što se može garantovati za relevantne finansijske posrednike. Konkretno mere su vezane za upumpavanje kapitala u poslovne banke i osiguravajuće kompanije, izdavanje garancija za međubankarske kredite i konverziju potraživanja u kapitalu. Trenutno u najrazvijenijim tržišnim privredama sveta (Japan, EU i SAD) država je glavni kreditor i bitan ili većinski vlasnik najvažnijih banaka i osiguravajućih društava. Takođe dolazi i do monetarne relaksacije i na međunarodnom planu preko međunarodnih finansijskih organizacija MMF i Svetske Banke koje su značajno relaksirale uslove kreditiranja zemljama u razvoju i tranziciji.

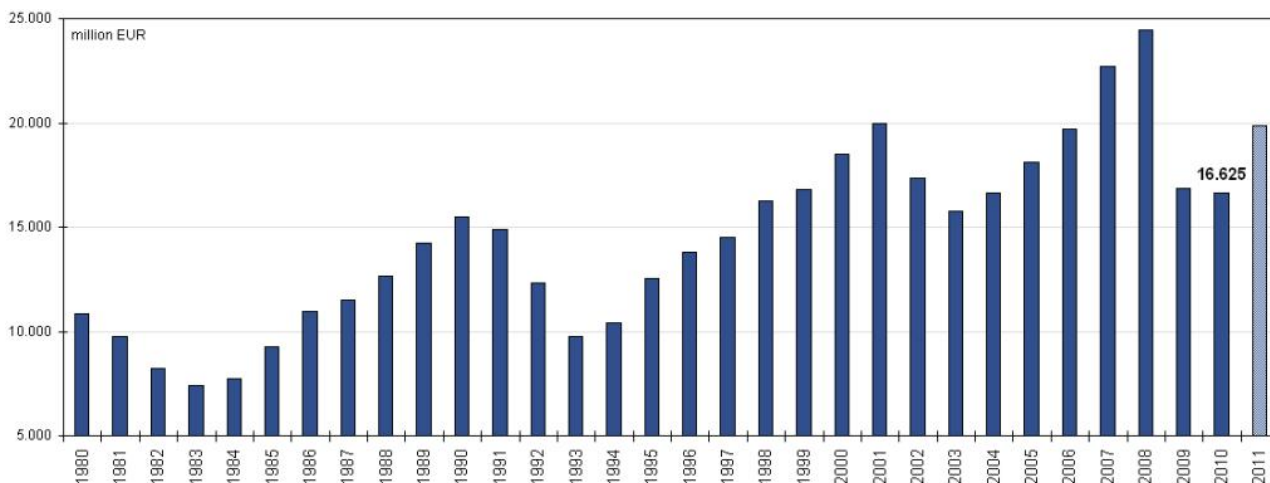
U nešto nepovoljnijem položaju su banke EU koje imaju visoku izloženost rizicima po osnovu poslovanja sa krizom najpogođenijih područja sveta (Istočna Evropa i Istočna Azija). Ipak najveći problem finansijskog sistema EU je fiskalna decentralizacija. Zemlje koje imaju visok stepen zaduženosti (Grčka, Italija, Belgija) imaju sužen prostor za delovanje finansijskih stimulansa. Rešenje je rast državnog duga pri čemu ova mera povećava troškove finansiranja zbog rasta kuponske stope državnih obveznica i rasta diskonta pri aranžmanima konverzije duga. Ugroženost Grčke izazvana usled zabrinutosti oko fiskalne održivosti okončana je merama EU u vezi sa restrukturiranjem duga. Aktivnosti koje su prethodile ovoj meri dovodile su u pitanje opstanak valute EU ali i opstanak evro zone.

Država utiče i na regulativu u smislu zaoštavanja uslova u vezi kapitalne adekvatnosti, upravljanja rizicima i ograničavanja vanbilansnih transakcija sa kreditnim derivatima. Uloga države značajno raste u sektoru stambene izgradnje, auto industrije i energetike. Preko tendera i finansiranja namenskih programa (subvencija), država je indirektno prisutna i u poljoprivredi, farmaciji i telekomunikacijama.

3. VODEĆI TRENDVI I UPOREDNA ANALIZA

Mašine alatke su kapitalno intezivna investiciona dobra sa visokom dodatnom vrednošću i velikim know-how ulazom. Biti pozicioniran na početku industrijskog lanca snabdevanja istovremeno znači biti izložen turbulencijama i nestabilnostima uprkos industrijskim trendovima i potrebama potrošača. Poslednja ekonomska kriza imala je izuzetno negativan uticaj na mašinsku industriju u svetu, pre svega u Evropi. Nakon izuzetnih rezultata u godini pre izbivanja krize, 2008. godini, kada je izvoz CECIMO postigao rekordni nivo od preko 24 milijarde € imamo značajan pad proizvodnje i izvoza. Posledice recesije u 2008. godini bile su veoma teške za proizvođače alatnih mašina na šta ukazuje i podatak da se proizvodnja u 2009. i 2010. godini kretala skoro oko 17 milijardi €. Krajem 2009. godine dolazi do blagog oporavka mašinske industrije u svetu. Prema poslednjim podacima Evrostat-a proizvodnja alatnih mašina u zemljama članicama CECIMO u 2011. godini mogla bi da dostigne vrednost od oko 20 milijardi € (Ilustracija 2).

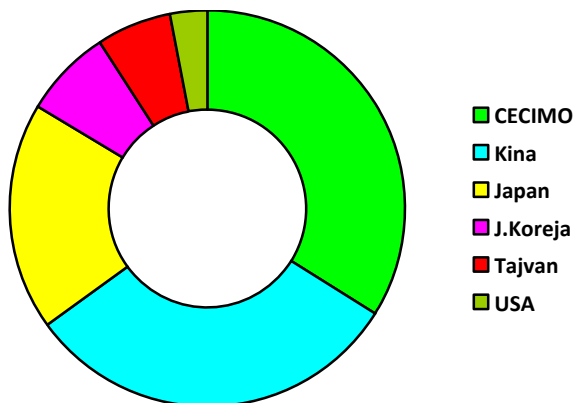
Ilustracija 2 / Proizvodnja alatnih mašina u zemljama CECIMO



Izvor / CECIMO

Oporavak mašinske industrije u Evropi zahteva znatno više vremena nego u glavnim konkurentnim zemaljama sveta (Kina, Japan i USA). Evropski proizvođači alatnih mašina su fokusirani na *high-end machines*, specijalne mašine sa relativno dužim proizvodnim ciklusom za razliku od standardnih mašina sa relativno kraćim i ustaljenim ciklusom proizvodnje. Ono što izdvaja evropske proizvođače alatnih mašina (Nemačka, Italija, Češka i dr.) i postavlja ih u sam vrh proizvođača, lidere na globanom tržištu, jeste inovativnost, raznovrsnost i preciznost kao i tačnost ponuda. Kupci evropskih alatnih mašina su skoro sve grane industrijske proizvodnje ukuljučujući auto, avio i građevinsku industriju, kao i proizvođače elektro i medicinske opreme (Ilustracija 3).

Ilustracija 3 / Učešće proizvođača alatnih mašina u svetu u ukupnoj proizvodnji MA



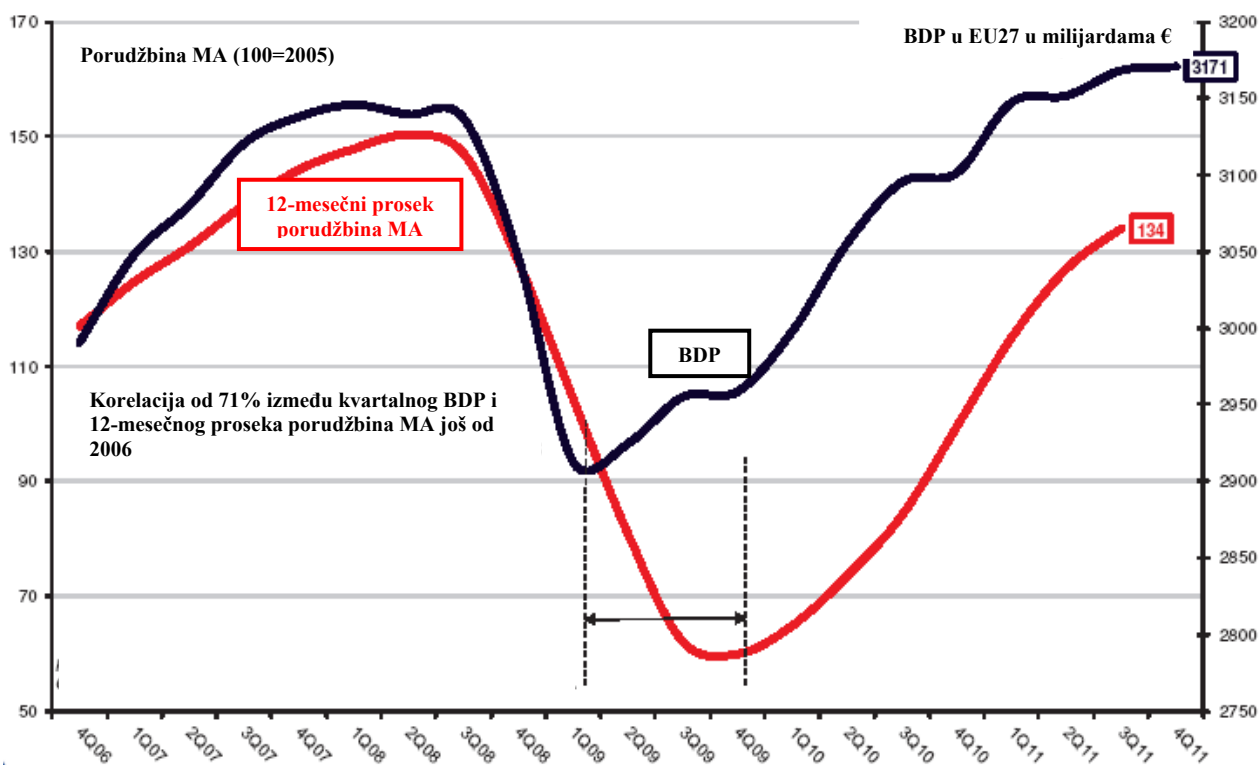
Izvor / CECIMO, National Associations & Gardner Group

Specijalne i napredne mašine alatke napravljene u Evropi tražene su u celom svetu. Osim na evropskom tržištu potražnja za ovakvim tipom mašina je velika i u zemljama u razvoju poput Kine, Rusije, Indije i Brazila ali i u visoko razvijenim zemljama kao što su Japan, Južna Koreja i Tajvan. Evropske mašine alatke obezbeđuju svoje korisnike visoko sofisticiranom tehnologijom. Zahvaljujući stalnim inovacijama, stalnom napretku i razvoju proizvoda, *state-of-the-art* mašine alatke napravljene u Evropi omogućavaju korisnicima da ostanu konkurentni na svojim tržištima. Baš kao što je omogućio širenje krize po sektorima, horizontalni proces povezivanja proizvođača alatnih mašina u Evropi omogućio je i izlazak iz recesije i blagi, ali sigurni, oporavak mašinske industrije. CECIMO je najveća grupacija proizvođača alatnih mašina u Evropi i svetu. Okuplja oko 1500 industrijskih preduzeća u Evropi (EU, EFTA i Turska) od kojih su preko 80% mala i srednja preduzeća. CECIMO pokriva više od 97% od ukupne proizvodnje alatnih mašina u Evropi i više od jedne trećine u svetu.

Kriza i njome izazavana recesija destruktivno su uticale na ekonomske aktivnosti u zemljama Evrope i sveta. Smanjenje proizvodnje, nagli pad BDP, pad direktnih stranih ulaganja, rast nezaposlenosti i izražavanje različitih oblika političkih i socijalnih patologija su samo neke od manifesta globalne ekonomske krize. Neposredno pred otpočinjanje finansijske krize cene energenata, hrane i retkih metala su došle do istorijskih maksimuma. Kriza je uticala na dramatičan pad tražnje i cena ovih proizvoda. Investicije u energetske i mašinski sektor su takođe opale. Međutim nizak volumen tražnje za energentima i nekim retkim metalima usled niskog nivoa investiranja može da dovede do kontigentiranja proizvodnje i rasta cena, obzirom da se radi o ultimativnim proizvodima. U 2011. godini došlo je do povratka tražnje za električnom energijom na nivo koji je imala pre otpočinjanja krize u kojoj je zabeležila značajan pad. Na stranu ponude, verovatno je da će neto ponuda električne energije biti 77% veća. Očekuje se kontinualan rast cene električne energije iz godine u godinu kao rezultat smanjenog snabdevanja i veće potražnje.

Rast BDP u evro zoni i EU 27 u četvrtom kvartalu 2011. godine veći je za od oko 0,3% u odnosu na predhodni kvartal iste godine. Na godišnjem nivou ukupna proizvodnja povećana je za 0,7%, odnosno 0,9%, u obe regije. Kako se na Ilustraciji 4 može videti, BDP u EU27 neznatno je povećan u poslednjem kvartalu 2011. godine u odnosu na predhodni kvartal iste godine i iznosio je 3171 milijardi €. Istovremeno evro zona je zabeležila pad BDP u poslednjem kvartalu 2011. Prema izveštaju Evropske banke postoje znaci stabilizacije ekonomskih aktivnosti iako su još uvek na niskom nivou. Prema procenama pojedinih eksperata u narednoj godini očekuje se blagi oporavak privrede, a uvedenim merama se osigurava krhka stabilnost monetarnog sistema evro zone i smanjuju političke i socijalne tenzije .

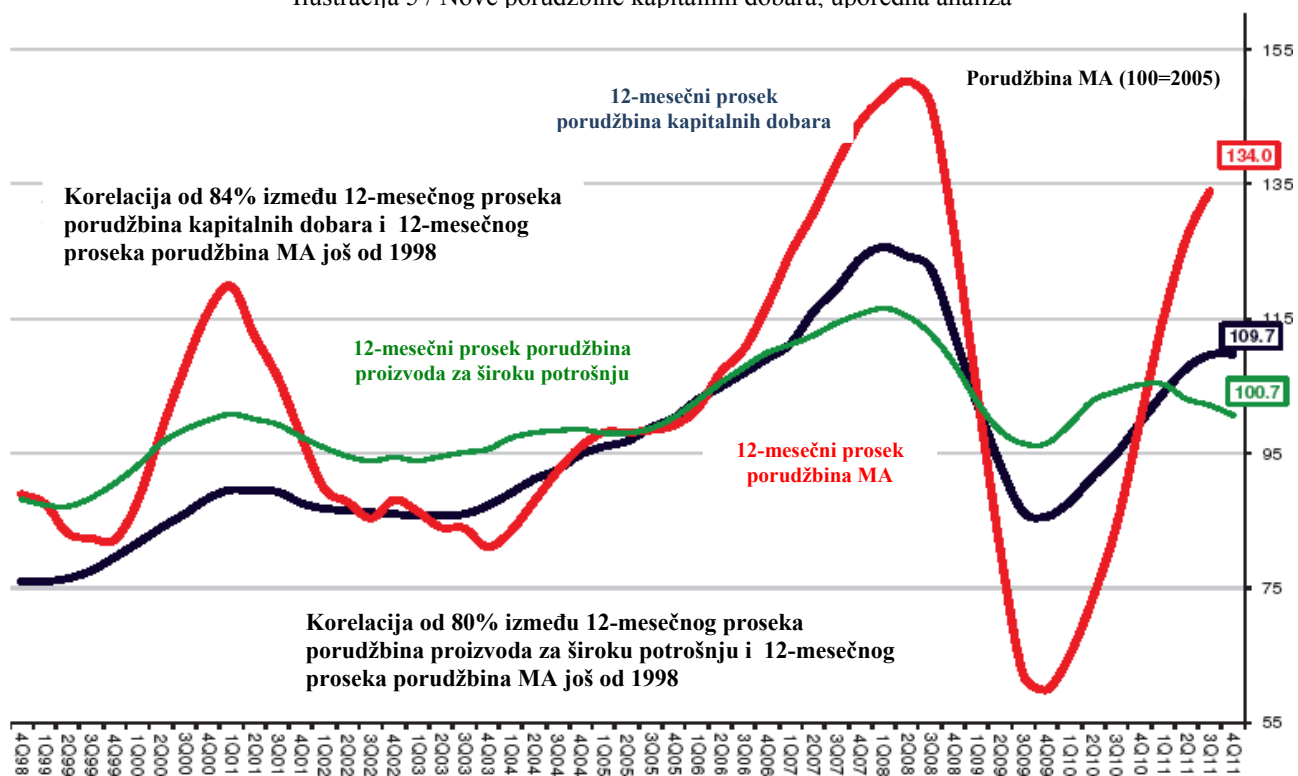
Ilustracija 4 / Globalni rast GDP i rast porudžbina MA, uporedni pregled po godinama



Izvor / Evrostat & CECIMO Statistical Toolbox

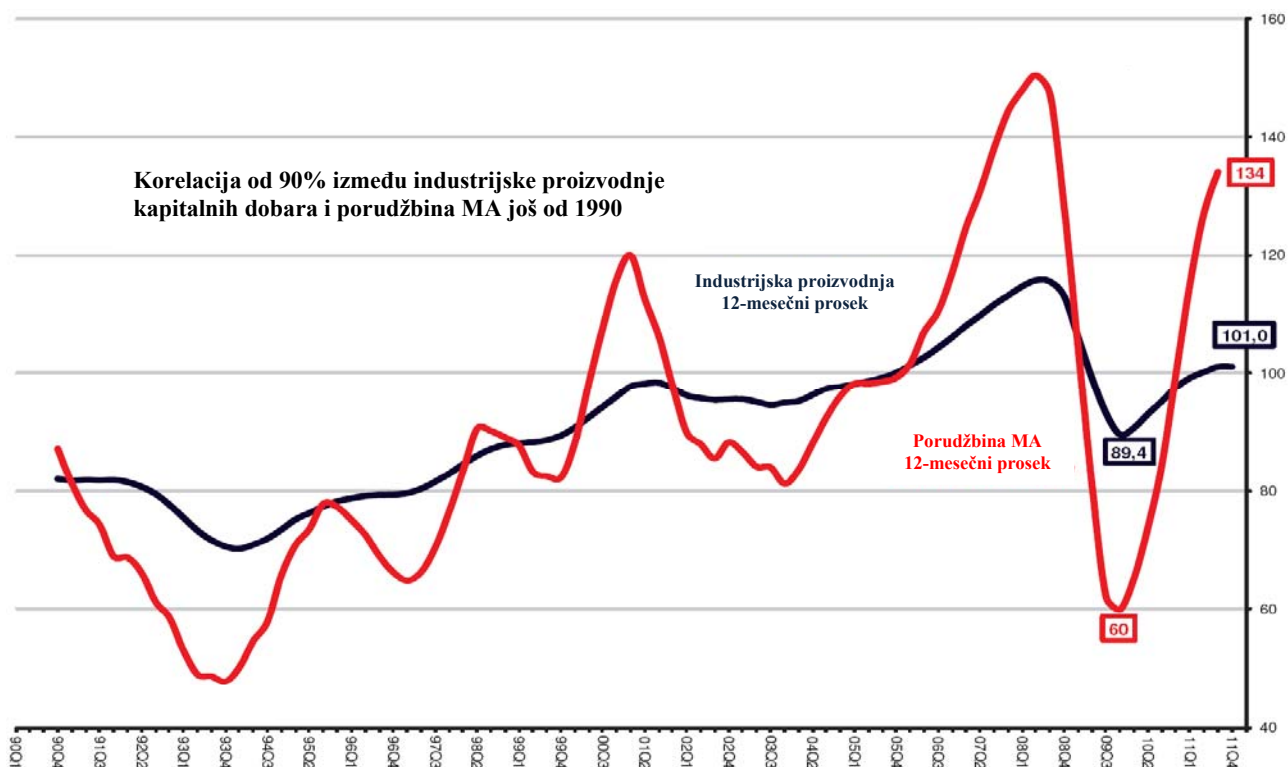
U decembru 2011. godine u poređenju sa novembrom 2011. godine imamo rast indeksa novih porudžbina industrijskih proizvoda u evro zoni od oko 1,9% nakon pada od 1,1% u novembru. Rast novih porudžbina u zemljama EU27 nakon novembarskog pada od 1,2% iznosio je 1,3% u decembru. U decembru 2011. godine, u poređenju sa decembrom 2010. godine, nove porudžbine industrijskih proizvoda smanjene su za 1,7% u obe regije. U poređenju sa 2010. godinom prosečan indeks novih porudžbina za 2011. godinu povećan je za 8,3% u evro zoni i za 7,6% u EU27 (Ilustracija 5).

Ilustracija 5 / Nove porudžbine kapitalnih dobara, uporedna analiza



Izvor / Evrostat & CECIMO Statistical Toolbox

Ilustracija 6 / Industrijska proizvodnja, uporedna analiza



Izvor / Evrostat & CECIMO Statistical Toolbox

Industrijska proizvodnja se stabilizovala krajem trećeg kvartala 2011. godine. U poređenju sa januarom 2011. godine, industrijska proizvodnja je u januaru 2012. godine opala za 1,2 % u evro zoni i 1% u EU 27 (Ilustracija 6)

U narednom periodu stratezi preduzeća moraju da pronađu načine da odgovore na izazove koje stvara recesija posebno u vezi sa strategijama rasta (ofanzivnim i defanzivnim) istovremeno prateći evoluciju u grani u dugom roku u kojoj se nalazi njihovo preovlađujuće poslovanje kako bi na vreme pristupili startegijskim prilagođavanjima. Startegijsko prilagođavanje se najbolje postiže razvojem i implementacijom inovativnih rešenja u proizvodnji, proizvodnim programima i prodaji. Ulaganje u istraživanje i razvoj, odnosno, stavljanje akcenta na upravljanje nematerijalnom aktivom je najbolji način da se ostvari konkurentna prednost preduzeća u periodu posle krize. Progres u nauci i tehnologiji ne zavisi direktno od tražnje i profitnih margina.

4. ZAKLJUČAK

Poslednja ekonomska kriza ukazala je na sve mane dosadašnjeg ekonomskog modela primoravajući nosioce ekonomskih aktivnosti na povratak sa ekonomije moralnog hazarda na tradicionalnu ekonomiju. Liberalizacija i deregulacija finansijskih tržišta kao i sinergija otvorile su pandorinu kutiju problema, a privrede, kako one razvijene tako i one u razvoju, okreću se proverenim modelima upravljanja pomerajući akcent na „nevidljive ruke“ tržišta na „vidljivu ruku“ države. S druge strane, danas je možda najočiglednija promena u strategiji jedne perspektivne firme koja želi da unapredi svoj izvoz i konkurentnost, a time obezbedi i rast, jasno naglašena orijentacija ka ulaganju u tzv. neopipljivu imovinu (R&D, tehnologiju, upravljačko i preduzetničko znanje i veštine zaposlenih, poslovnu organizaciju, razvoj tržišta, softverske aplikacije, marketing i upravljanje rizicima).

Baš kao i sve ostale grane privrede i mašinska industrija trpi posledice recesije. Uporišta ekonomskih i strukturnih politika postala su investicije u realni sektor, konkurentna strategija usmerena na razmenljive proizvode, nearogantna monetarna politika i konzistentna poreska politika. Okretanje domaćem tržištu, inovacijama i razvoju kao i širenju know-how predstavljaju aktivnosti kojima se prevazilaze štete preduzeća nanete udarnim talasom ekonomske krize.

LITERATURA

- [1.] Prof. Dr Dragan Đuričin, „The 2011 Anti-crisis Program and Strategy for Sustainable development“, Savez Ekonomista Srbija, Ekonomika preduzeća, Beograd, 2011.
- [2.] Mr Željko Pavićević, „Značaj strategije u sprovođenju tranzicije na primeru Srbije“, Ekonomski fakultet, Beograd, 2010.
- [3.] European Association of the Machine Tool Industries, „CECIMO Statistical Toolbox“, Brusseels, 2012.
- [4.] World Economic Outlook Update, International Monetary Fund, Washington D.C., USA, Januar, 2012.
- [5.] Prof. Dr Dragan Đuričin, „Kako iz ekonomije moralnog hazarda preći u ekonomiju inteligentnog upravljanja rizicima: Slučaj Srbije“, Savez Ekonomista Srbije, Ekonomika preduzeća, Beograd, 2009.
- [6.] www.cecimo.be

LATEST TRENDS IN MACHINE TOOL INDUSTRY: WORLD IN CRISIS

Resume

Turbulence in the economy has the same character as in nature: is unpredictable, difficult to be modeled, fast and has a destructive effect. Last turbulence in the global economy is a result of dominant influence businesses driven economics of moral hazard. Synergies that inevitably follows the globalization and transition also, has shown its negative side. The global economic crisis which has been intensively says the last few years has all the characteristics of turbulent phenomena. The general “fear of fear” was transmitted from the financial sector to real one and then into institutions and the political system. Deep impact of crisis has been first in real sector, primarily on the industry. Due to its “enabling technology” nature, machine tools have traditionally been a very cyclical sector, with clients deciding to postpone their investments of durable capital goods in periods of economic downturn or of lack of business confidence. The current economic downturn is also a good opportunity to develop new business models leading to new key competitive advantages. Machine Tools are as indispensable today as they will be tomorrow in their capacity to provide aid to the solution of future problems, starting the industrialization of the emerging countries.

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



40. simpozijum

UPRAVLJANJE PROIZVODNOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA

Beograd, maj 2012.

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

Glavonjić, D., Dimić, Z., Cvijanović, V., Kvrđić, V. REALIZACIJA AKVIZICIONOG GPIB INTERFEJSA I PRAĆENJE RADA STANICE LASS POMOĆU NJEGA.....	4.1
Pršić, D., Đordjević, V. OPTIMIZACIJA PARAMETARA PID REGULATORA ZA UPRAVLJANJE INVERZNIM KLATNOM	4.10
Murar, Ž. GEOMETRIJA PRESEKA DVA CILINDRA PRIMENJENA U MAŠINAMA ZA AUTOMATSKO ZAVARIVANJE SPOJA DVE CEVI.....	4.16
Knežević, B., Blanuša, B. ONE SOLUTION FOR EFFICIENCY OPTIMIZED CONTROL OF ELEVATOR DRIVE	4.19
Pilipović, M. SEKVENCIJALNO UPRAVLJANJE PRIMENOM PROGRAMABILNIH KONTROLERA.....	4.24





D. Glavonjić, Z. Dimić, V. Cvijanović, V. Kvrđić¹⁾

REALIZACIJA AKVIZICIONOG GPIB INTERFEJSA I PRAĆENJE RADA STANICE LASS POMOĆU NJEGA²⁾

Rezime:

U radu je pokazana realizacija jednog GPIB akvizicionog interfejsa, kako sa softverskog tako i sa hardverskog aspekta. Takođe, prikazana je praktična upotreba ovog interfejsa u sprezi sa digitalnim osciloskopom HP54501A, u snimanju stanja i praćenju rada Laboratorske analogne servo stanice (LASS). Stanica je napravljena u Lola institutu, u cilju testiranja upravljačkih jedinica industrijskih robota i mašina alatki, koje su u razvoju.

Ključne reči: GPIB interfejs, standard IEEE-488.2, PSoC, LASS, akvizicija podataka.

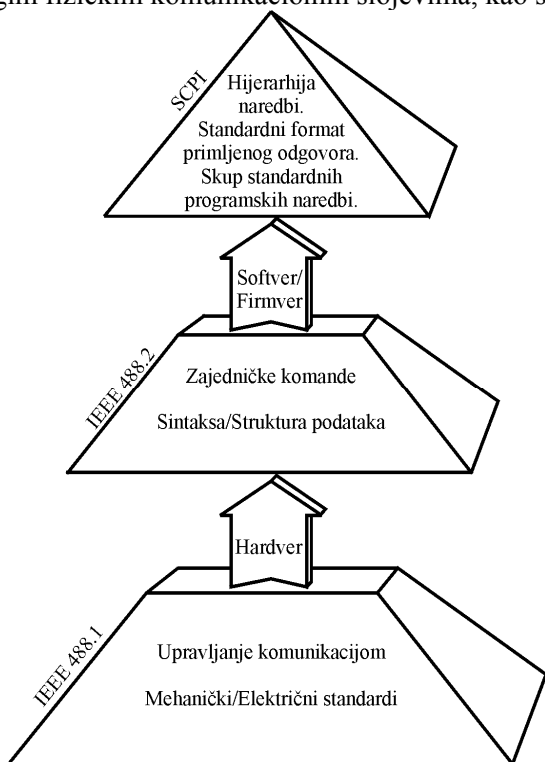
1. UVOD

Firma Hewlett-Packard je šesdesetih godina prošlog veka razvila originalni GPIB komunikacioni interfejs (General Purpose Interface Bus), da omogući povezivanje, kontrolu i prenos podataka između svojih programabilnih mernih instrumenata, kao i prenos podataka ka računarskim sistemima, radi dalje obrade i analize [1]. Radni naziv ovog interfejsa je bio HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus). Kasnije je on doživeo veliku popularnost. Ostali proizvođači merne i test opreme (Tektronix, National Instruments) su u svoje instrumente ugrađivali podršku za HP-IB komunikaciju, tako da je ovaj interfejs ubrzo postao poznat pod imenom GPIB (General Purpose Interface Bus), kao prihvaćeni standard za povezivanje i komunikaciju mernih i test instrumenata. Postoji nekoliko standarda koji se odnose na GPIB komunikacioni interfejs. Godine 1975. IEEE je standardizovao GPIB interfejs pod imenom *Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation*, odnosno IEEE-488 [2]. Ovaj standard je propisao mehaničke i elektronske parametre interfejsa, kao i osnove komunikacionog protokola. Međutim, ovaj standard nije propisao ništa vezano za format i sintaksu podataka i naredbi, kojima se upravljalo radom instrumenta. Danas je ovaj standard poznat kao IEEE-488.1. Godine 1987. IEEE je uveo proširenje standarda IEEE-488.1 pod nazivom *Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands*, danas poznat pod nazivom IEEE-488.2 [2]. Ovaj dodatak je dopunio standard IEEE-488.1 i, između ostalog, propisao sintaksu i format naredbi koje su se koristile u komunikaciji. Iako je uvođenjem dodatka IEEE-488.2 prvobitni standard IEEE-488.1 dosta poboljšana, još uvek nisu postojale standardne komande, koje bi izvršavale iste operacije u okviru iste klase mernih instrumenata, nezavisno od proizvođača instrumenta i zasebnih karakteristika samog instrumenta. Godine 1990. uveden je još jedan dodatak, koji rešava problem nekompatibilnosti komandi između instrumenata iz iste klase (na primer voltmetara), ali od različitih proizvođača. Ovaj dodatak nosi ime SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation), slika 1 [2]. Dodatak SCPI je uveo komande i klase instrumenata, tako da svaka klasa instrumenata mora podržavati određeni skup komandi, bez obzira na proizvođača instrumenta i performanse samog instrumenta. Tako, na primer, nezavisno od proizvođača i modela, svaki voltmetar mora izvršiti merenje naizmeničnog napona zadavanjem iste komande. Iako je SCPI

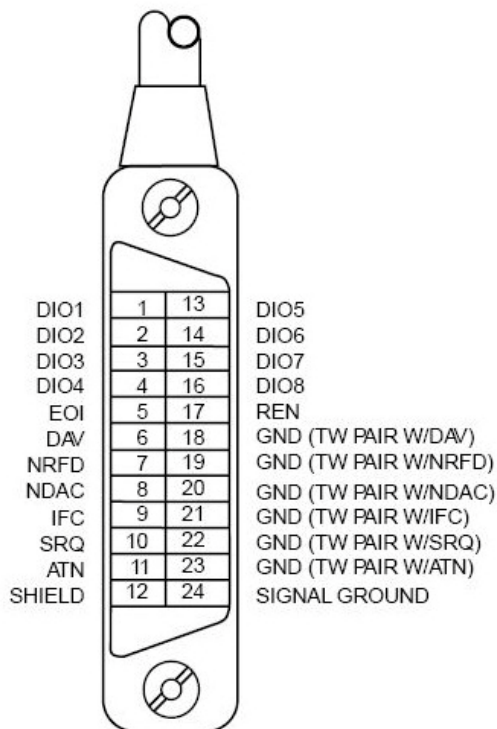
¹⁾ Dušan Glavonjić B. Sc. E. E. (dušan.glavonjic@li.rs), Zoran Dimić, dipl. el. inž. (zoran.dimic@li.rs), Vojkan Cvijanović dipl. inž. inf. (vojkan.cvijanovic@li.rs), dr Vladimir Kvrđić, dipl. maš. inž. (vldimir.kvrgic@li.rs), LOLA Institut, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd, Srbija.

²⁾ Rađeno u okviru projekta TR35023 Razvoj uređaja za trening pilota i dinamičku simulaciju leta modernih borbenih aviona i to 3-osne centrifuge i 4-osnog uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota, koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

prvenstveno bio namenjen za upotrebu sa GPIB protokolom, otvorena je mogućnost njegovog korišćenja i sa drugim fizičkim komunikacionim slojevima, kao što su RS-232, USB, Ethernet itd.



Slika 1. Struktura GPIB standarda



Slika 2. Raspored pinova na GPIB konektoru

2. PSoC AKVIZICIONI GPIB INTERFEJS

U cilju modernizacije merne opreme koju poseduje LOLA Institut, projektovan je i praktično realizovan GPIB akvizicioni interfejs na bazi PSoC mikrokontrolera. HP instrumenti sa GPIB interfejsom, koje poseduje Institut, stari su oko dvadeset godina. Kako većinu te merne opreme Instituta upravo čine HP instrumenti, koji koriste GPIB interfejs za komunikaciju sa računrom, ovaj projekat ima značajnu upotrebnu vrednost, jer obezbeđuje komforniji rad u modernoj analizi i obradi signala. Samim tim, instrumentima je povećana upotrebna vrednost uz minimalne izdatke. Za potrebe laboratorijskih merenja njihova primena je sada sasvim zadovoljavajuća, posebno kada se ima u vidu da su ovi instrumenti neospornog kvaliteta i performansi, koje se i danas mogu koristiti u okviru najzahtevnijih merenja.

2.1 Hardverske karakteristike GPIB magistrale

GPIB, odnosno IEEE-488 je 8-bitna paralelna magistrala. Postoji ukupno 16 signalnih linija. Od toga su 8 linija za dvosmerni prenos podataka i to su linije sa oznakama DIO1 do DIO8, slika 2. Tri linije se koriste za pravilnu realizaciju protokola (Protocol Handshake) i to su linije DAV, NRFD i NDAC, slika 2 [2]. Ostalih pet linija, sa oznakama ATN, EOI, IFC, SQR i REN koriste se za konfiguraciju stanja magistrale i kao pomoćne linije pri slanju, ili primanju određenih tipova komandi, ili podataka. Ostalih 8 linija su zajedničko uzemljenje i povratne signalne linije, slika 2. Maksimalna brzina prenosa može ići i do jednog megabajta u sekundi. Postoji i varijanta magistrale sa brzinama protoka podataka i do 8 megabajta u sekundi. Povećanje brzine se postiže jednostavnijim *handshake* protokolom. Brzina protokola je određena brzinom najsporijeg instrumenta na magistrali. Naponski nivoi signala odgovaraju TTL negativnoj logici.

Svaki instrument je na magistrali određen svojom 5-bitnom primarnom adresom. Na magistralu može biti priključeno ukupno 15 instrumenata, uključujući i kontroler, odnosno računar. Dužina kablova može da bude ukupno 20 metara. Instrument u jednom trenutku može biti slušalac (Listener), ili govornik (Talker).

Na magistrali može biti u jednom trenutku više govornika, ili slušaoca, ali samo jedan može slati podatke u jednom trenutku. Kontroler određuje koji će instrument raditi kao govornik, a koji kao slušalac, slanjem posebnih komandi MTA (My Talk Address) i MLA (My Listen Address).

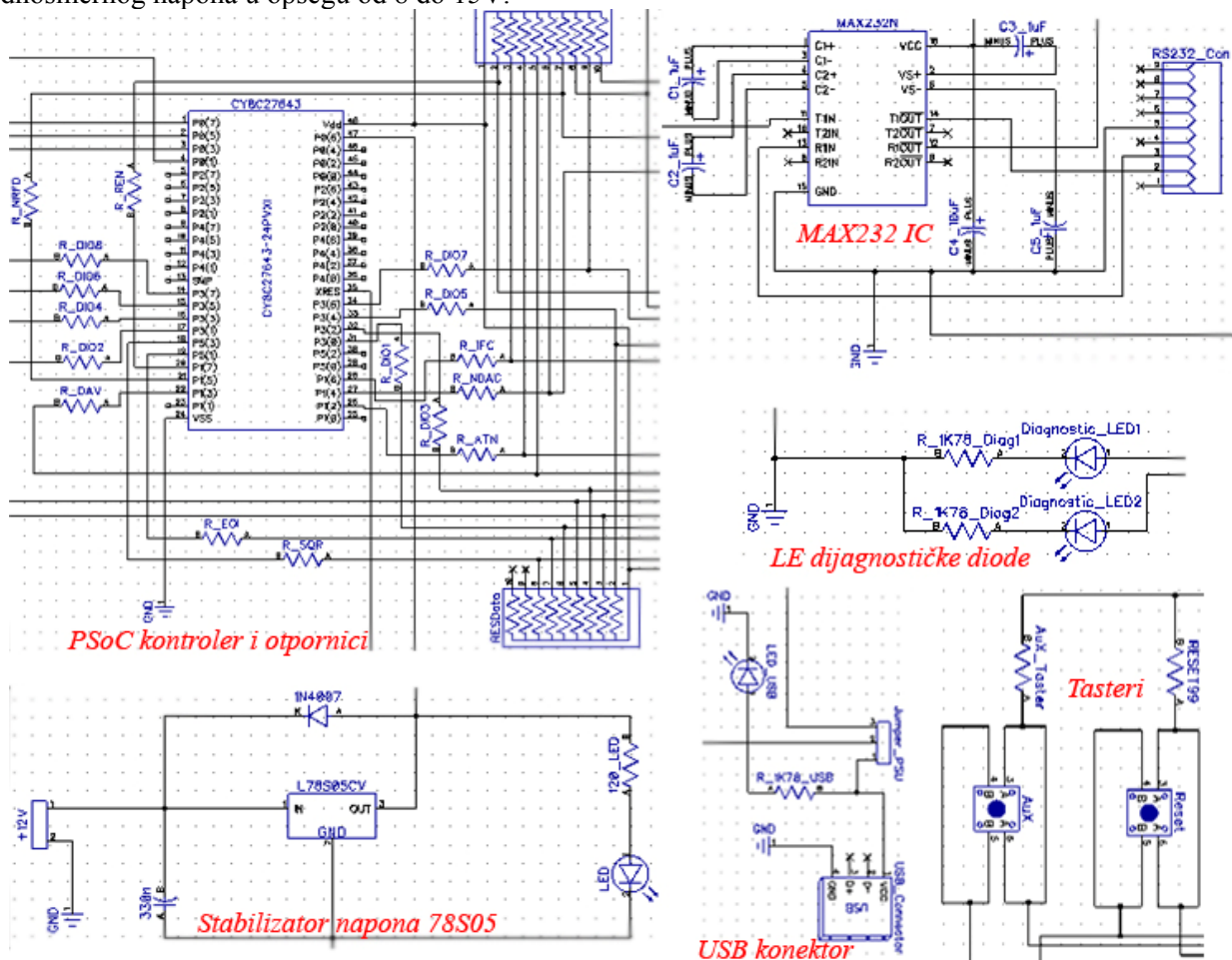
U okviru ovih komandi je sadržana adresa instrumenta, kojem se kontroler obraća (prvih 5 bitova), dok šesti i sedmi bit određuju da li će instrument raditi kao govornik, ili kao slušalac. Osmi bit u ovim naredbama nije od značaja. Na magistralu može biti priključeno i više kontrolera, ali samo jedan može biti aktivan kontroler u jednom trenutku (CIC – Controller In Charge).

3. PSoC KAO GPIB KONTROLER

U realizaciji GPIB akvizicionog interfejsa korišćen je mikrokontroler PSoC CY8C27643-24PVXI [3]. PSoC je skraćenica od “Programable System on Chip“, ili programabilni sistem na jednom čipu. Kako mu i samo ime govori, to je kontroler koji ima integrisane pomoćne sklopove zajedno sa samim jezgrom mikrokontrolera. Ovi sklopovi se nazivaju korisnički moduli. Konfiguracija korisničkih modula, kao i razvoj kompletnog softvera, izvodi se upotrebom softverskog paketa pod nazivom PSoC Designer [3]. Korisnički moduli mogu biti: A/D konvertori, operacioni pojačavači, širinski modulatori, tajmeri itd. Modul, koji je korišćen u realizaciji GPIB interfejsa, je UART. To je modul koji realizuje RS-232 komunikaciju. Korišćeni kontroler je 8-bitni. Posедуje 256 bajta RAM memorije, 16 kilobajta programske ROM memorije, a radni takt mu može biti do 24 MHz.

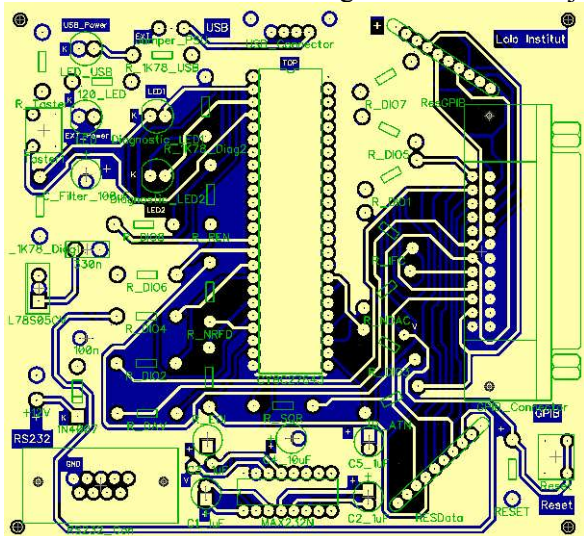
3.1 Hardver interfejsa

Hardver interfejsa je projektovan u softverskom paketu DipTrace [4]. Na osnovu projektovane šeme, slika 3, dizajnirana je dvoslojna štampana ploča, slika 4, koja je napravljena u kućnim uslovima, slika 5. Upotrebljeni hardver se sastoji od PSoC mikrokontrolera CY8C27643-24PVXI, čipa MAX232, koji obavlja RS-232 komunikaciju, stabilizatora napona L78S05, kao i nekoliko desetina pasivnih komponenti, kao što su otpornici i kondenzatori. Interfejs se može napajati iz USB porta računara, ili korišćenjem eksternog izvora jednosmernog napona u opsegu od 8 do 15V.

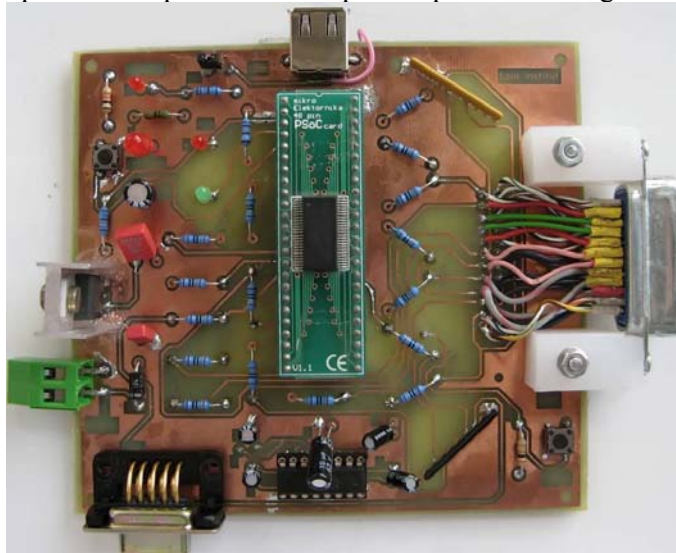


Slika 3. Deo šeme GPIB interfejsne ploče sa mikrokontrolerom

Interfejs se povezuje sa računarem putem RS232 porta. Korišćenjem USB/RS232 konvertora na bazi čipa FT232, moguće je komunikaciju sa računarem izvesti upotrebom USB magistrale. Ovo rešenje radi sasvim zadovoljavajuće, a i sama ploča se može napajati iz USB porta, čime je rad dosta komforniji. U cilju smanjenja potrošnje, radni takt kontrolera je spušten na 3 MHz, što je sasvim dovoljna brzina za obavljanje svih potrebnih operacija. Sprega sa mernim instrumentima je izvedena malo drugačije nego što standard nalaže. Po standardu GPIB se uređaji povezuju na magistralu upotrebom sprežnih trostatičkih bafera, odnosno kola DS75160 i DS75161. Pošto nije postojala mogućnost nabavke ovih integrisanih kola, sprega PSoC kontrolera sa GPIB magistralom izvedena je upotrebom otpornika. Ovi otpornici pravilno konfiguriraju



Slika 4. Izgled projektovane štampe u paketu DipTrace



Slika 5. Napravljena GPIB interfejsna kartica

stanje magistrale i onemogućavaju protok struje iznad dozvoljene granice. Ploča sadrži i dve LE diode, koje su korišćene u dijagnostičke svrhe tokom procesa razvoja sistema. U finalnoj verziji interfejsa one označavaju stanja u kojima se nalazi instrument: govornik, ili slušalac. Takođe, na ploči se nalaze i dva tastera. Jedan je za dovođenje mikrokontrolera u početno programsko stanje, odnosno RESET taster i u normalnim uslovima rada se ne koristi. Drugi taster služi sa pokretanje rada GPIB interfejsa i nosi oznaku AUX (Auxilliary, ili pomoćni taster). Funkcija AUX tastera kao i LE diode, podložna je programskim izmenama, odnosno, ove periferije se mogu po potrebi koristiti i za druge svrhe.

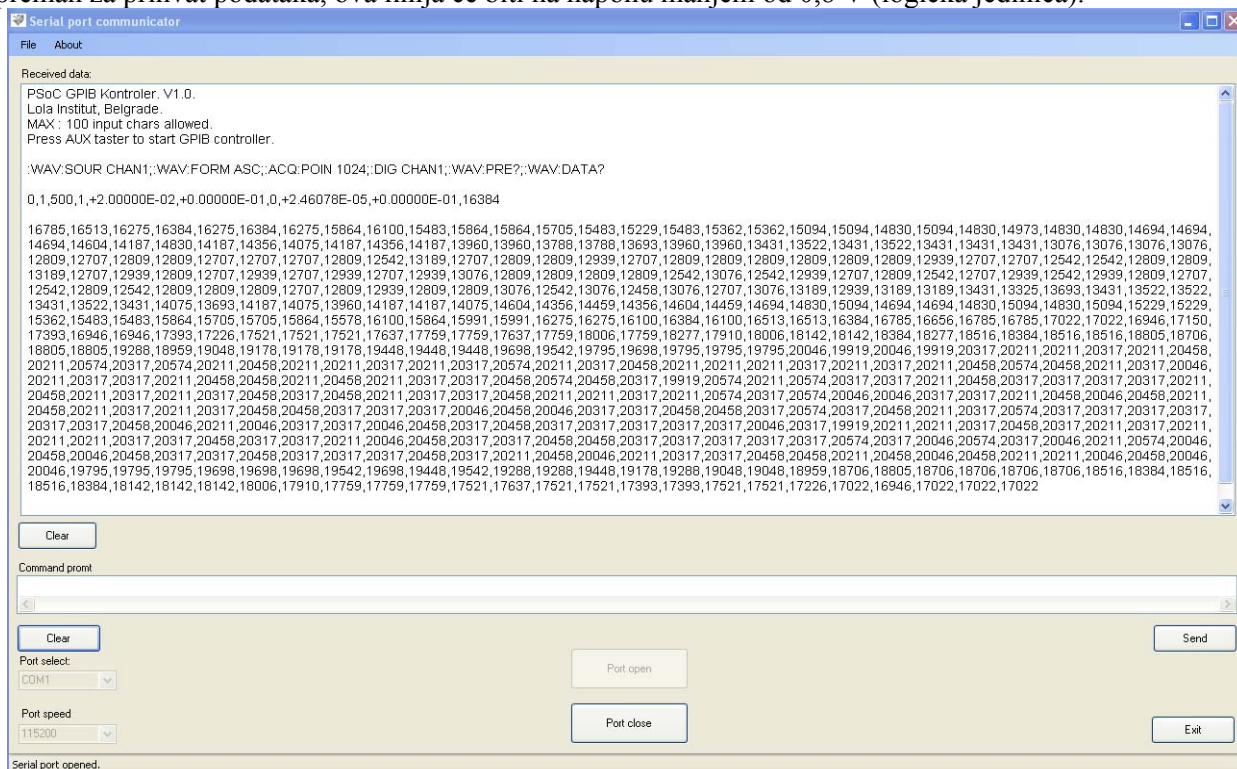
3.2 Softverska rešenja

U cilju kompletne realizacije GPIB interfejsa, prikazanog u ovom radu, bilo je neophodno razviti dva odvojena programa. Prvi, pod nazivom "Serial port Communicator" (skraćeno SPC), slika 6, razvijen je u programskom jeziku Visual C++ i koristi se na računaru sa kojim komunicira GPIB kontroler [5]. Njegova uloga, u trenutku pisanja ovog rada, bila je da prihvati podatke koje PSoC kontroler šalje putem RS-232 komunikacionog interfejsa, kako bi se ti podaci kasnije procesirali u programskim paketima kao što Matlab, ili NI LabView. Po potrebi, funkcionalnost ovog programa bi se mogla proširiti, tako da samostalno vrši analizu i obradu preuzetih podataka (operacije poput isertavanja talasnih oblika signala preuzetih sa osciloskopa, spektralnu analazu signala itd.). Takođe, ovaj program se koristi za slanje naredbi PSoC mikrokontroleru, odnosno mernom uređaju, kojima se zahteva obavljanje određenih operacija od strane mernog instrumenta. Drugi deo softverskog rešenja odnosi se na program koji izvršava sâm PSoC mikrokontroler. Program, koji obavlja PSoC, ima ulogu konverzije RS-232 protokola u GPIB protokol. Komande, koje se šalju putem SPC-a, moraju u potpunosti poštovati format i sintaksu propisanu GPIB standardom. Na ovaj način je olakšano programiranje samog PSoC mikrokontrolera, a sam akvizicioni interfejs se može primenjivati univerzalno, nezavisno od tipa i vrste instrumenta kojim se upravlja.

Glavne operacije, koje kontroler obavlja, predstavljene su u okviru funkcija Listen i Talking, slike 7 i 8. Prve dve stvari, koje kontroler mora da obavi, jesu resetovanje svih uređaja na magistrali postavljanjem logičke jedinice na IFC (Interface Clear) i REN (Remote Enable) linije. Funkcija Talking, slika 8, poziva se uvek kada PSoC, odnosno instrument, dobiju da izvrše neku operaciju. Iz definicije funkcije se vidi da se očekuju tri parametra. Prvi je pokazivač na niz u kome se nalaze podaci koje treba preneti, drugi je kontrolni parameter, koji pravilno setuje ATN liniju (slika 2) i treći je broj podataka koje treba preneti. Kontrolni

parametar služi da za vreme slanja podataka, koji predstavljaju interfejsne naredbe, kao što su naredbe za postavljanje instrumenta u režim slušaoca, ili govornika (MLA ili MTA naredbe) postavi ATN liniju na logičku jedinicu, odnosno, na napon manji od 0.8V. Ovo je obaveza koju propisuje GPIB standard. Kontrolu nad ATN linijom poseduje isključivo PSoC kontroler. Pošto je stanje ATN linije postavljeno u skladu sa tipom podatka, slika 8 (Attention komentar) postavlja se podatak koji treba preneti na linije DIO1-8. Potom se ulazi u petlju u kojoj se čeka da NRFD (Not Ready For Data) linija postane logička nula (slika 8, NRFD komentar).

Ovim postupkom se vrši provera da li je instrument spreman da primi podatke. Sve dok instrument nije spreman za prihvatanje podataka, ova linija će biti na naponu manjem od 0,8 V (logička jedinica).



Slika 6. Serial port communicator (SPC) program

Kada instrument postane spreman za prihvatanje podataka, kontroler postavlja DAV (Data Valid) liniju na nivo logičke jedinice, čime obaveštava instrument da su podaci na DIO linijama validni. Pošto su podaci postavljeni, sledi provera da li ih je instrument prihvatio, (slika 8, komentar NDAC HIGH?). Kada instrument prihvati podatke postaviće liniju NDAC (Not Data Accepted) na logičku nulu. Posle ovoga linija DAV se takođe postavlja na logičku nulu, čime je jedan bajt podataka poslat u skladu sa pravilima koja nalaže GPIB protokol. Na slici 7 je prikazana funkcija koja vrši prihvatanje podataka koje šalje instrument. Ova funkcija će biti pozvana uvek kada instrument primi naredbu koja se završava karakterom „?”. Po GPIB standardu, ovakve naredbe se nazivaju upiti i od instrumenta se uvek očekuje da vrati odgovor posle prijema komandi ovog tipa. Kada PSoC mikrokontroler detektuje da je naredba, koju je prihvatio, u formi upita, mora obaviti sledeće korake:

Korak 1. Da adresira instrument kao slušaoca i da mu pošalje celokupnu naredbu koju je prihvatio od računara. Kontroler ovu operaciju obavlja pozivanjem funkcije Talking sa slike 8, čiji je princip rada opisan.

Korak 2. Instrument se prevodi u stanje govornika, slanjem MTA interfejsne komande, jer se očekuje odgovor na upit koji treba da pošalje instrument.

Korak 3. Pošto sada kontroler vrši prijem podataka, potrebno je prebaciti pinove mikrokontrolera iz predajnog u prijemni mod (HighZ drive mod). Ovo se odnosi na linije DIO1-8 i liniju DAV. Takođe, linije NDAC i NRFD se prebacuju u predajni mod (Strong drive mod).

Korak 4. Pošto instrument primi komandu koja ga prebacuje u stanje govornika, on počinje da šalje podatke u formi bajtova. Zadnji karakter, koji će poslati, je LF (Line Feed). U prenosu podataka, koji sadrže više od jednog bajta, zadnji bajt uvek mora biti LF.

Korak 5. Ukratko, funkcija Listen obavlja sledeće korake: Linije NDAC i NRFD se postavljaju u stanje logičke nule i logičke jedinice, respektivno. Ovo je stanje koje je neophodno za početak ciklusa prihvatanja podataka od instrumenta. Zatim se ulazi u prvu while petlju, slika 7, u kojoj se čeka da instrument postavi liniju DAV na nivo logičke jedinice, što znači da je bajt podataka na linijama DIO1-8 spreman za

preuzimanje. U postupku preuzimanja bajta linija NRFD je postavljena na nivo logičke jedinice, što označava da kontroler nije završio proces prihvatanja trenutnog bajta podatka. Sledi provera da li je primljeni bajt jednak LF, slika 7 (prva *if* naredba) i, ako jeste, ova situacija označava kraj prenosa. U suprotnom, bajt se putem UART korisničkog modula prenosi ka računaru. Pošto je bajt prihvaćen, linije NRFD i NDAC se postavljaju na nivo logičke nule, čime kontroler označava da je završio sve operacije nad trenutnim bajtom. Instrument treba da razume ovo stanje i da vrati vrednost DAV linije na logičku nulu, čime i on potvrđuje da je prenos trenutnog bajta završen i podaci na DIO linijama nisu više važeći, slika 7, druga *while* petlja. Zadnji korak je postavljanje NDAC linije na nivo logičke jedinice, kako bi naredni ciklus mogao pravilno otpočeti i cela procedura se ponavlja.

```

void Listen(void)
{
int i=0;
char value=0;

PRT1DR |= 0x20;

for(i=0;i<8000;i++)
{
//NDAC LOW
PRT1DR &= ~0x10;
//Wait for DAV to became low.
while((PRT1DR & 0x08) != 0) {};
PRT1DR &= ~0x20; //NRFD LOW

value = ~PRT3DR;
if(value != 0x0A)
{
UART_PutChar(value);
}
else
{
//NDAC HIGH
PRT1DR |= 0x10;
//NRFD HIOGH
PRT1DR |= 0x20;
break;
}
PRT1DR |= 0x10;
PRT1DR |= 0x20;
//Wait for DAV to became High.

while((PRT1DR & 0x08) == 0) {};
}
//Wait for DAV to became High.
while((PRT1DR & 0x08) == 0) {};
PRT1DR &= ~0x10;

return;
} //Listen end.

Slika 7. Funkcija koja prihvata podatke
poslate od strane instrumenta

void Talking(char *data, BYTE mode, BYTE bytes)
{
BYTE i=0;
char *str;
str=data;
for(i=0;i<bytes;i++)
{
/*****Attention*****/
if (mode)
{
PRT1DR &= ~0x04; //ATN
}
/*****Attention*****/

/*****Data*****/
PRT3DR = ~(*(str+i));
//kasnjenje 496us
Delay_Nx(1); Delay_5uS(); Delay_5uS(); Delay_2uS();

/*****Data*****/

/*****NRFD*****/
while( (PRT1DR & 0x20) == 0) {}
/*****NRFD*****/

/*****Datavalid*****/

PRT1DR &= ~0x08; //DAV
/*****Datavalid*****/
//NDAC HIGH?
while ((PRT1DR & 0x10) == 0) {};
PRT1DR |= 0x08; //DAV
/*****Datavalid*****/

/*****AttentionOFF*****/
if (mode)
{
PRT1DR |= 0x04; //ATN
--mode;
}
} //for end.
} //Talking end.

Slika 8. Funkcija koja šalje podatke ka instrumentu

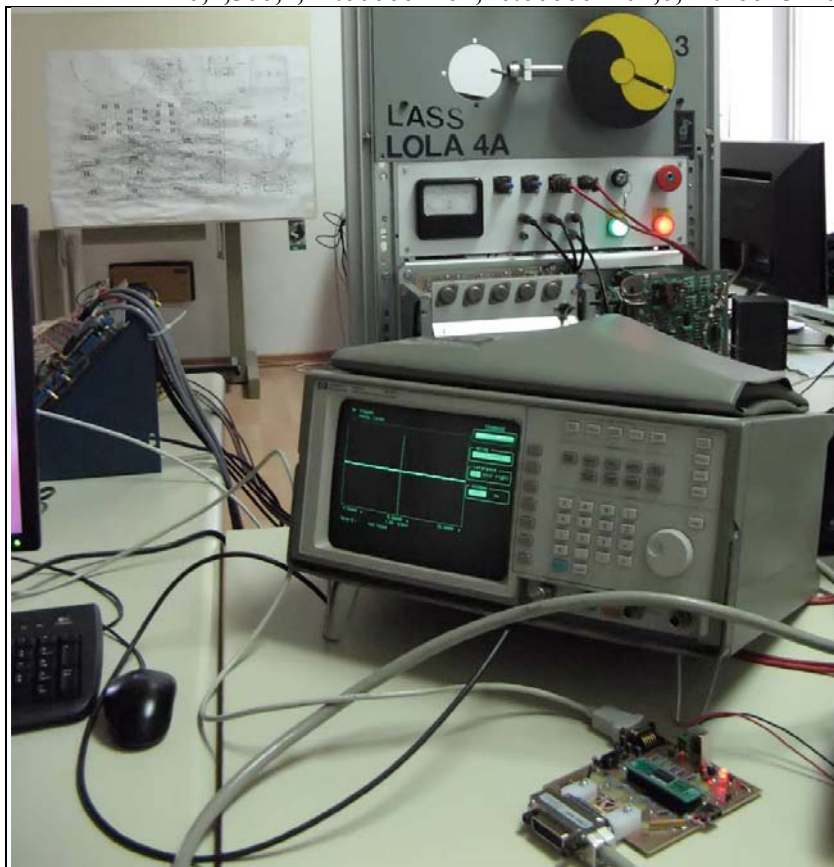
```

4. PRIMER PRIMENE GPIB AKVIZICIONOG INTERFEJSA

Za verifikaciju rada GPIB interfejsa odabrana je Laboratorijska analogna servo stanica (LASS). LASS je analogana četvoroosna servo stanica, koja je razvijena u LOLA institutu, za potrebe testiranja i razvoja upravljačkih jedinica mašina alatki i industrijskih robota. Verifikacija rada realizovanog GPIB interfejsa izvedena je snimanjem signala sa jednog tahogeneratora. Taj signal predstavlja realizaciju programiranog

trapezoidnog profila brzine kretanja motora na koji je taj tahogenerator postavljen. Korišćenjem digitalnog osciloskopa HP 54501A [6,7] i razvijene GPIB akvizicione kartice, praćena je promena stanja napona na tahogeneratoru postavljenom na motor na jednoj od osa servo stanice LASS, slika 9. Talasni oblici, koji su praćeni na osciloskopu, slika 10, posredstvom GPIB interfejsa poslani su na računar. Na slici 10 se vidi primer oblika signala izmerenog na tahogeneratoru motora prve ose stanice LASS. Korišćenjem MATLAB softvera [8] verifikovana je tačnost primljenih podataka iscrtavanjem talasnih oblika preuzetih signala u vremenskom domenu, na osnovu preuzetih podataka. Takođe, vršene su i digitalne obrade preuzetih signala primenom digitalne Furijeve transformacije. Primeri rezultata su pokazani na slikama 11 i 12. Na slici 11 je nacrtan oblik preuzetog signala u Matlabu, korišćenjem podataka preuzetih posredstvom GPIB akvizicione kartice, slika 6. Za dekodiranje signala koristi se preambula sa slike 6:

0,1,500,1,+2.00000E-02,+0.00000E-01,0,+2.46078E-05,+0.00000E-01,16384



Slika 9. Snimanje parametara na LASS-u, upotrebom GPIB interfejsa

Značenja podataka u preambuli su sledeći, po njihovom redosledu:

- 0, ASCII format, 1, Byte format,
- 1, Tip formata,
- 500, broj prenetih podataka,
- 1, prirast rednog broja podatka,
- +2.00000E-02, Xincrement,
- +0.00000E-01, Xorigin,
- 0, Xreference,
- +2.46078E-05, Yincrement,
- +0.00000E-01, Yorigin i
- 16384, Yreference.

Preuzetih N odmeraka signala ($s(i)$) i vremenske baze ($t(i)$), $i = 1, \dots, N$, dekodiraju se na sledeći način [6]:

$$s(i) = (o(i) - Yreference) * Yincrement + Yorigin$$

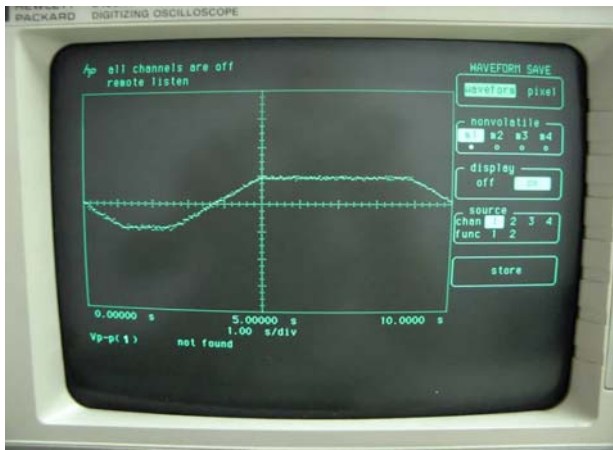
$$t(i) = (i - Xreference) * Xincrement + Xorigin$$

U primeru sa slike 6 bilo je ukupno $N=500$ odmeraka i oni su pokazani na slici 11. To je jedna sekvenca kretanja prvog motora na stanici LASS i to prvo u negativnom, pa u pozitivnom smeru. Prepoznatljivi su periodi u kojima motor ostvaruje trapezni profil brzine.

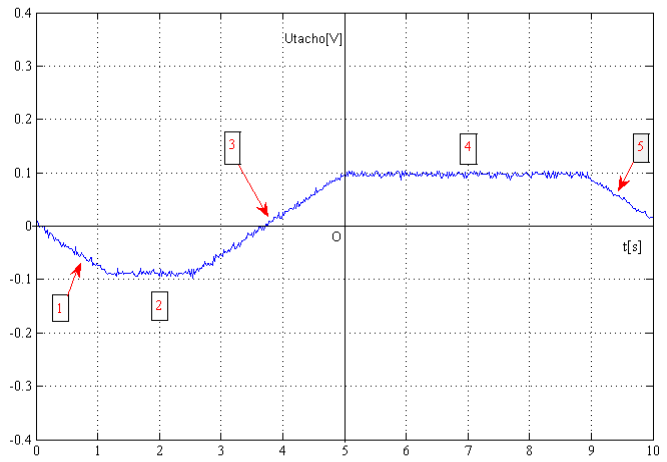
Na slici 11 prikazane su sledeće etape:

Etapa 1. Ubrzavanje motora u negativnom smeru; *Etapa 2.* Održavanje konstantne brzine u negativnom smeru; *Etapa 3.* Promena smera i ubrzavanje u pozitivnom smeru; *Etapa 4.* Konstantna brzina u pozitivnom smeru i *Etapa 5.* Promena smera i ubrzavanje u negativnom smeru.

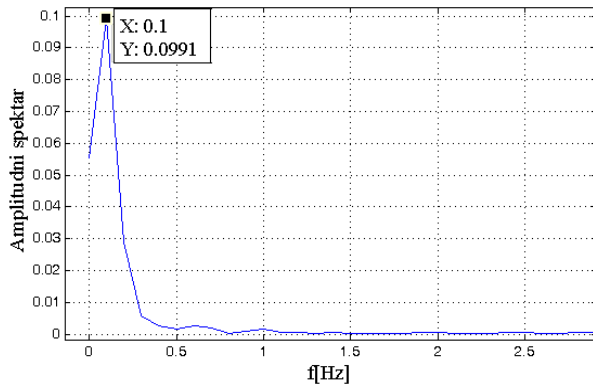
Vidi se da je period ovog signala oko 10s. Taj signal je transformisan algoritmom FFT u frekventni domen, da bi se procenio šum koji je preuzet sa tahogeneratora. Najzad, na slici 12 su dati počeci prvih polovina amplitudnog i spektra snage ovog signala. Za izdvajanje uzorka u vremenskom zapisu za obradu u frekventnom domenu korišćen je pravougaoni prozor, jer je ceo signal skoro periodičan i potpuno obuhvaćen tim prozorom. Ni u vremenskom ni u frekventnom domenu nisu korišćeni niskopropusni filtri, da bi se u prve probne obrade uveo originalni preuzeti signal. Originalnih odmeraka je bilo 500. Za primenu algoritma FFT ovaj uzorak je dopunjen nulama do 512 odmeraka (2^9 , kako je to uobičajeno za primenu algoritma FFT [8]). Vidi se da je osnovni harmonik na 0.1 Hz i da analizirani signal u frekventnom domenu nema izraženih viših harmonika, što znači da je preuzeti šum male snage (nema rezonantnih pojava).



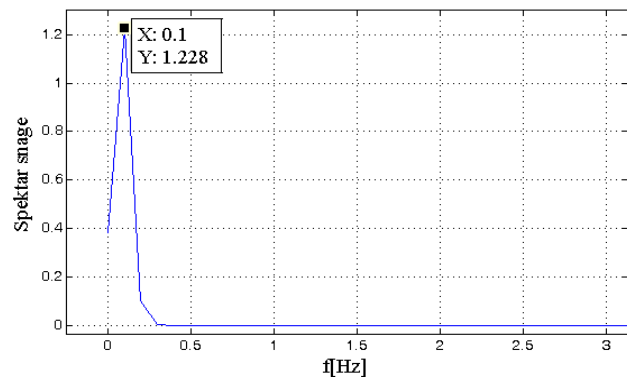
Slika 10. Oblik signala na tahogeneratoru snimljen osciloskopom HP54501A



Slika 11. Preuzeti signal sa osciloskopa



a) Amplitudni spektar



b) Spektar snage

Slika 12. Osnovna obrada preuzetog signala u Matlabu

5. ZAKLJUČAK

Može se smatrati da je projekat realizacije GPIB akvizicionog interfejsa uspešno realizovan, pogotovu kada se u obzir uzmu njegova pouzdanost rada i mogućnosti eventualne primene. Lola institut u svojoj Laboratoriji za elektroniku i u laboratoriji Centra za robotiku poseduje dosta kvalitetnih mernih instrumenata sa GPIB interfejsom. Imajući ovo u vidu, bilo bi veoma korisno umrežiti sve ove instrumente posredstvom GPIB magistrale, a primenom GPIB akvizicione kartice centralizovati upravljanje ovim instrumentima i na taj način stvoriti jedan veoma moćni akvizicioni laboratorijski sistem. Takođe, postoje i dalji mogući pravci usavršavanja postojećeg rešenja. Mogao bi se implementirati USB 2.0 kontroler za komunikaciju sa računarom, umesto RS232 interfejsa, čime bi rad sa ovakvim akvizicionim sistemom postao komforniji.

Takođe, CPC program je moguće dalje usavršavati. Na primer, dodavati mu kontrole koje bi automatski obavljale neke operacije koje se često koriste, dodati mu modul za iscrtavanje preuzetog signala, ali i direktno vršiti neku digitalnu obradu signala bez upotrebe Matlab softvera. Umesto korišćenog CPC programa, postoji mogućnost implementacije i drugih programa za obradu preuzetih podataka upotrebom softvera kao što su NI LabView i NI LabWindows/CVI. Primenom ovih softvera bilo bi moguće veoma efikasno implementirati i veoma komplikovane algoritme digitalne obrade signala.

6. LITERATURA

- [1] HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus), <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE-488>.
- [2] **IEEE-488**, *Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation* (now IEEE-488.1); **IEEE-488.2** *Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands*.
- [3] N.N, PSoC Programmable System-on-Chip, Technical Reference Manual (TRM), PSoC TRM, Document No. 001-14463 Rev. *D, Cypress Semiconductors Corporation, San Jose, 2009, USA.
- [4] N.N, DipTrace, Novarm Ltd. <http://www.diptrace.com/>.
- [5] N.N, Microsoft Visual C++, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms123401.aspx>.

- [6] N.N, 54501A Digitizing Oscilloscope Programming Reference, Manual Part Number: 54501-90907, Hewlett-Packard, May 1989.
- [7] S. Ajkalo, O. Bjelica, Jedna implementacija IEEE 488 USB kontrolera, INFOTEH-JAHORINA, VOL. 9, Ref. E-V-18, p.777-781, March 2010.
- [8] N.N, Matlab, MathWorks, <http://www.mathworks.com/>.

D. Glavonjić, Z. Dimić, V. Cvijanović

**DEVELOPMENT OF GPIB ACQUISITION INTERFACE
AND IT'S USAGE IN TESTIG LASS SYSTEM**

Abstract:

In this paper, one example of realization of GPIB acquisition interface is shown. This realization includes software and hardware solution. Connecting this interface to digital oscilloscope HP54501A, and using it to acquire data from Laboratory analog servo station or LASS, a practical usefulness of this interface is shown. LASS station was developed in Lola Institute, in order to test CNC units of industrial robots, and Machine tools that are being developed.

Key words: GPIB interface, IEEE-488.2 Standard, PSoC, LASS, data acquisition.



D. Pršić, V. Djordjević¹

OPTIMIZACIJA PARAMETARA PID REGULATORA ZA UPRAVLJANJE INVERZNYM KLATNOM

Rezime:

U radu se razmatra podešavanje parametara PID regulatora primenom optimizacione metode roja čestica. Kao objekat upravljanja pri optimizaciji i testiranju koristimo inverzno klatno opisano nelinearnim matematičkim modelom. Korišćena metoda ima stohastički karakter pa se na osnovu ponovljenih simulacija daju statistički parametri dobijenih rezultata. Cilj je da se utvrdi uticaj rasipanja rezultata kriterijuma optimizacije na vrednosti parametara regulatora, odnosno na kvalitet prelaznog procesa i tačnost pozicioniranja u stacionarnom režimu.

UVOD

Razvoj računarske tehnike omogućio je primenu različitih, naprednih algoritama upravljanja u industriji. Tako na primer, sreće se adaptivno, optimalno, upravljanje bazirano na neuronskim mrežama i fazi logici, itd. Ipak više od 90% upravljačkih sistema u industriji bazira se na PID algoritmima upravljanja koji su se pojavili još početkom XX veka. Razlog se nalazi u njihovoj jednostavnosti, lakoći upotrebe, robusnim performansama u širokom spektru radnih uslova. Osnovni problem kod primene je izbor parametara regulatora (K_P , K_I , K_D) koji će obezbediti željeni kvalitet ponašanja u prelaznom i stacionarnom režimu rada. U literaturi se mogu sresti različite, konvencionalne i nekonvencionalne, metode podešavanja PID regulatora [1,2]. U praksi se često koristi Zigler-Nikolsova metoda, u osnovnoj ili u nekoj od modifikovanih verzija, pomoću koje se parametri mogu odrediti eksperimentalnim putem. Osnovno ograničenje je da metoda daje dobre rezultate kod sporih linearnih (linearizovanih), monotonih objekata upravljanja.

U radu se razmatra primena meta-heuristične metode optimizacije poznate pod imenom metoda roja čestica (Particle Swarm Optimization - PSO) u podešavanju parametara PID regulatora za upravljanje inverznim klatnom. Optimizacija se realizuje tako što slučajno generisane čestice pretražuju višedimenzionalni prostor rešenja koristeći pri tome vlastito iskustvo i iskustvo cele populacije. Prednosti PSO metode su brza konvergencija ka optimalnom rešenju i za razliku od genetskog algoritma, jednostavna implementacija. Sem toga, metoda se pokazala podesna kod nelinearnih, nediferencijabilnih funkcija sa višestrukim optimumima [3]. Pošto metoda ima stohastički karakter u radu se razmatraju statistički pokazatelji dobivenih parametara.

OPTIMIZACIONA METODA ROJA ČESTICA

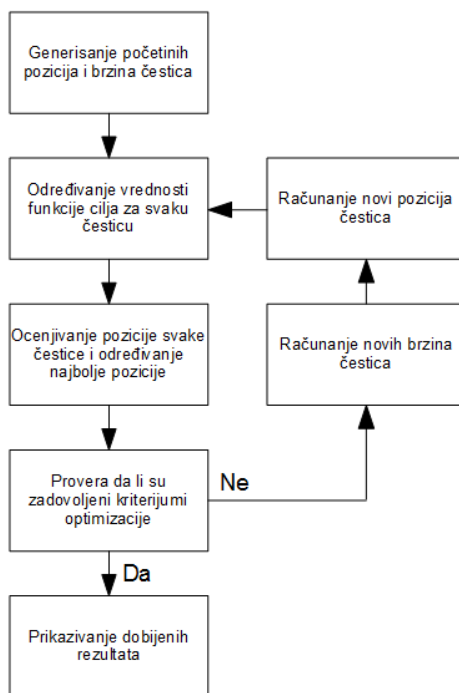
Metoda roja čestica je stohastička optimizaciona tehnika koja se bazira na simulaciji kretanja i kooperacije čestica u roju. Razvili su je James Kennedy i Russell Eberhart tokom 1995. godine istražujući ponašanje jata ptica [4]. Ideja je da se, pomoću roja čestica, na slučajan način pretražuje prostor rešenja tražeći ono rešenje koje na najbolji način ispunjava unapred definisani kriterijum optimizacije. Svaka čestica (ptica) u roju se ponaša kao tačka u N-dimenzionalnom prostoru koja svoje kretanje (let) prilagođava na osnovu svog vlastitog iskustva kao i na osnovu iskustva ostalih čestica u roju. Algoritam realizacije ove metode prikazan je na slici Sl.1[5].

Optimalno rešenje se traži unutar unapred definisanog intervala. Početni interval se bira na osnovu iskustva,

¹ Dragan Pršić, Vladimir Djordjević Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet Kraljevo, prsic.d@mfkv.kg.ac.rs, vladadj@bluenet.rs

preporuka ili vrednosti dobivenih nekom drugom metodom. Definiše se ponaosob za svaki parametar čija se optimalna vrednost određuje.

Optimalna vrednost parametra koju tražimo određena je pozicijom jedne od čestica unutar intervala. Na početku se definiše populacija čestica sa inicijalnim vrednostima za poziciju i brzinu koje su slučajno izabrane unutar datog intervala. Pomoću brzine određujemo način promene pozicije. Za svaku česticu na datoj poziciji određuje se vrednost funkcije cilja i upoređuje sa prethodnom istorijom pozicija za datu česticu. Ukoliko je vrednost funkcije cilja u datoj poziciji manja, data pozicija se označava kao *pbest* (*personal best*) a tekuća vrednost funkcije se pamti kao *best_value*.



Slika Sl.1 Algoritam optimizacione metode roja čestica

Osim lokalnog minimuma date čestice određuje se i globalni minimum *gbest* (*global best*) svih čestica u roju za datu iteraciju. Pozicija čestice u narednoj iteraciji određuje se na sledeći način:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (1)$$

gde je x_i^{k+1} pozicija, a v_i^{k+1} brzina i -te čestice u $k+1$ iteraciji.

Osnovna ideja PSO metode sadržana je u načinu usmeravanja čestice ka njenim *pbest* i *gbest* pozicijama odnosno u načinu određivanja nove brzine čestice. Analitički nova brzina se može izraziti:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1rand_1(pbest_i - x_i^k) + c_2rand_2(gbest_i - x_i^k) \quad (2)$$

gde je w težinski faktor tekuće brzine, c_1 i c_2 su korekcionni faktori, $rand_1$ i $rand_2$ su slučajni brojevi iz intervala $[0,1]$ sa uniformnom raspodelom. U cilju podešavanja rezolucije pretraživanja obično se uvodi ograničenje $|v_i^{k+1}| \leq v_{max}$ pri čemu je v_{max} obično 10% do 25% regiona pretraživanja. Težinski faktor se obično usvaja u obliku [6]:

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) * iter}{max\ iter} \quad (3)$$

gde su: w_{max} i w_{min} - početna i krajnja težina, $max\ iter$ - maksimalni broj iteracija, $iter$ - broj tekuće

iteracije.

Postoje različiti kriterijumi za izlazak iz ciklusa iterativnog određivanja optimalnih vrednosti parametara. U ovom radu to je broj ostvarenih iteracija.

OPTIMIZACIJA PID REGULATORA

U radu se posmatra paralelna forma PID kontrolera čija prenosna funkcija ima oblik:

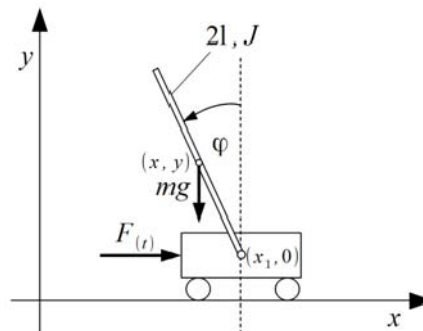
$$W(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4)$$

PSO metoda se koristi za podešavanje parametara K_P , K_I i K_D tako da funkcija cilja ima minimalnu vrednost. Koriste se četiri funkcije cilja: IAE, ISE, ITAE i ITSE [4].

Svaki od kriterijuma ima prednosti i mane. IAE daje odziv sa relativno malim preskokom ali sa većim vremenom smirenja. ISE vrlo brzo smanjuje grešku ali dovodi do oscilacija. Modifikovani kriterijumi ITAE i ITSE smanjuju preskok i vreme smirenja.

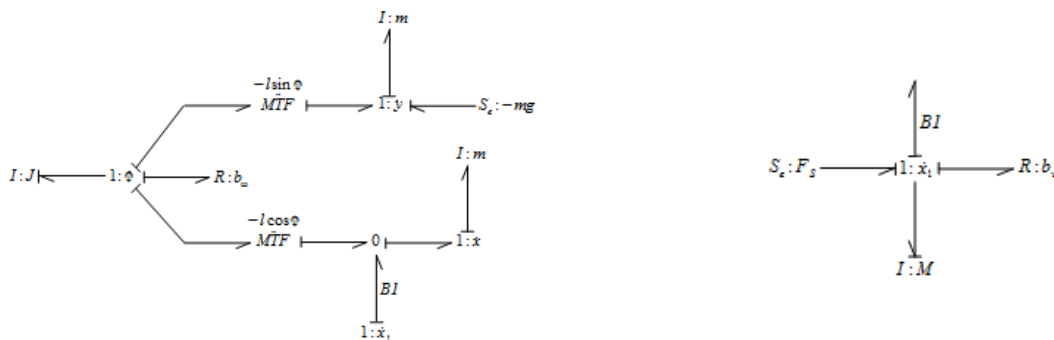
MODEL INVERZNOG KLATNA

Inverzno klatno se često koristi u laboratorijama kao primer nelinearnog sistema sa nestabilnim ravnotežnim stanjem na kome se testiraju i analiziraju različiti algoritmi upravljanja. Na slici Sl.3 šematski je prikazano inverzno klatno sa parametrima. Klatno je poluga sa ravnomerno raspoređenom masom m , momentom inercije J , i dužinom $2l$. Poluga je vezana za kolica mase M koja se kreću pod dejstvom sile $F(t)$ duž ravne površi.



Sl.3 Šematski prikaz inverznog klatna

Za modelovanje klatna koristimo bond graf tehniku [7]. Sistem se opisuje pomoću mreže domenski nezavisnih energetske primitiva od kojih svaka predstavlja idealan energetske proces. Na najnižem nivou čvorovi predstavljaju glavne energetske procese a linije između njih putanje duž kojih se razmenjuje energija. Na slici Sl.4 prikazan je bond graf model inverznog klatna [4].



a) model klatna

b) model kolica

Sl.4 Bond graf model inverznog klatna

Modeli klatna i kolica su povezani preko bonda B1. Kao što se vidi nelinearnost sistema potiče od moduliranih transformatora čiji se parametri menjaju zavisno od ugla klatna. U modelu postoje dva akumulatora sa integralnom kauzalnošću (procedura SCAP) tako da je sistem drugog reda.

REZULTATI SIMULACIJE

Za simulaciju se koristi Matlab-Simulink softverski paket. Numeričke vrednosti parametara modela klatna su: $M=0.5$ [kg], $m=0.2$ [kg], $l=0.3$ [m], $b_v=0.1$ [N/m/s], $b_\omega=0.05$ [Nm/rad/s], $g=9.81$ [m/s²].

Parametri PSO algoritma su:

Broj čestica	30	Korekcionni faktor c_2	2
Broj iteracija	200	Maksimalna brzina v_{max}	2 000, 200, 200
Težinski faktor w_{max}	0.9	Oblast pretraživanja za K_p	0-10 000
Težinski faktor w_{min}	0.2	Oblast pretraživanja za K_I	0-1 000
Korekcionni faktor c_1	2	Oblast pretraživanja za K_D	0-1 000

Statistički pokazatelji funkcija cilja dobiveni za 20 nezavisnih simulacija prikazani su u tabeli T3.

Tabela T3 - Statistički pokazatelji funkcija cilja

Kriterijum	Funkcija cilja			Tc [sec]	
	minV	SV	STDev	SV	STDev
IAE	408.99	409.07	0.070	396	6.81
ISE	1,338.31	1,345.04	5.948	409	6.01
ITAE	11.34	16.02	13.86	399	13.08
ITSE	21.99	21.99	0.001	405	6.03

minV - minimalna vrednost ; SV - srednja vrednost; STDev - standardno odstupanje;

Rezultati pokazuju da postoji malo rasipanje rezultata sem u slučaju ITAE kriterijuma. Dakle, iako se u optimizaciji koriste slučajni brojevi to se malo odražava na uniformnost kriterijuma optimizacije. Što se tiče vremena potrebnog za izračunavanje minimalne vrednosti funkcija cilja ono je praktično isto kod svih kriterijuma. Vrednosti ukazuju da se PSO optimizacija u realnom vremenu može koristiti kod relativno sporih procesa.

Da bi se stekla predstava o tome kako se početno rešenje približava optimalnom na slici Sl.5 su prikazane konvergencije funkcija cilja u zavisnosti od rednog broja iteracije. Vidi se da sva rešenja vrlo brzo konvergiraju ka optimalnom i da, osim kod ISE kriterijuma, broj iteracija može biti blizu broja 50. To ukazuje na mogućnost izbora i nekog drugog zaustavnog kriterijuma u iterativnoj petlji traženja rešenja. Na primer, može se postaviti uslov da razlika dve uzastopne vrednosti funkcije cilja po apsolutnoj vrednosti nije veća od neke proizvoljno male vrednosti ε [6].

Rasipanje vrednosti funkcija cilja dovodi i do rasipanja vrednosti parametara regulatora. U tabeli T4 dati su statistički pokazatelji ovih vrednosti.

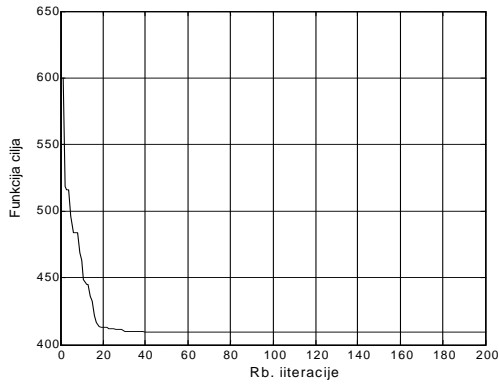
Tabela T4 - Statistički pokazatelji parametara PID regulatora

Kriterijum	K_p			K_I			K_D		
	optV	SV	STDev	optV	SV	STDev	optV	SV	STDev
IAE	2601	2642	54	0	0.001	0.005	150	153	4.14
ISE	3926	3857	112	0	63.262	117.345	330	318	25.22
ITAE	2317	2523	436	2.22	61.126	181.600	133	174	112.35
ITSE	3506	3496	8	0	0.000	0.000	246	245	0.64

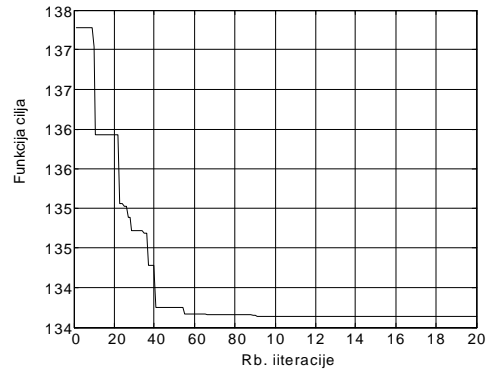
optV - optimalna vrednost ; SV - srednja vrednost; STDev - standardno odstupanje;

Na slici Sl.6 prikazane su konvergencije vrednosti pojačanja PID regulatora zavisno od rednog broja iteracije.

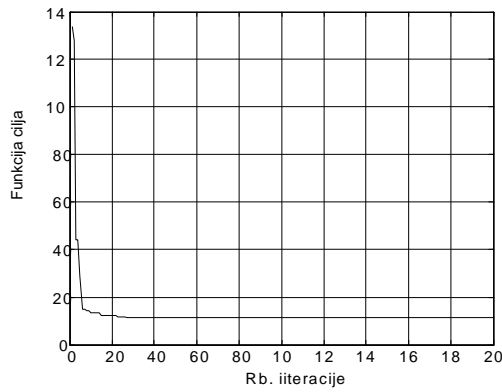
Dijagrami sa slike Sl.6 pokazuju da, kao i kod funkcije cilja, sva tri parametra nakon odredjenog broja iteracija konvergiraju ka konstantnim vrednostima. Najveće rasipanje vrednosti parametara je kod ITAE a najmanje kod ITSE kriterijuma. Može se primetiti da optimalna vrednost pojačanja K_I teži nuli i da je rasipanje rezultata za ovaj parametar najveće i to kod svih kriterijuma. Praktično, za upravljanje inverznim klatnom može se koristiti PD regulator.



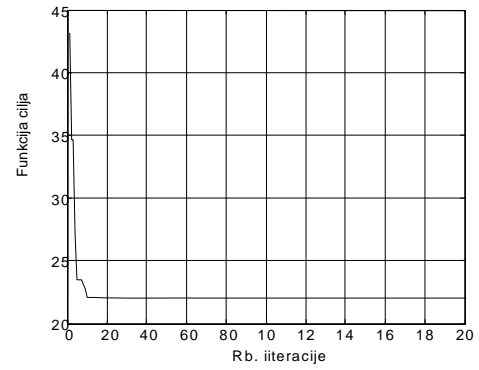
a) Kriterijum IAE



b) Kriterijum ISE

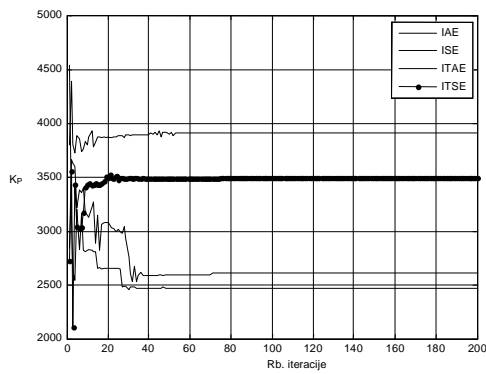


c) Kriterijum ITAE

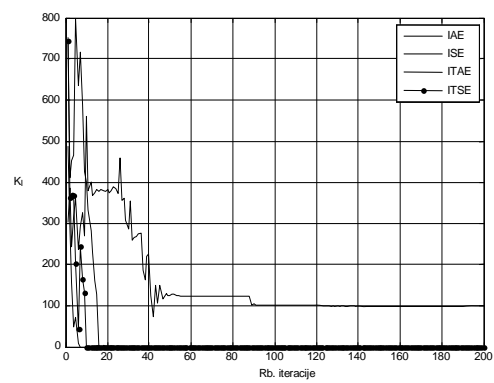


d) Kriterijum ITSE

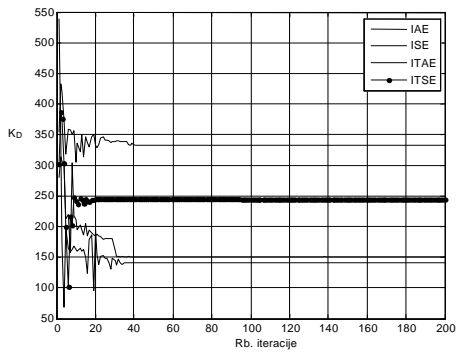
Sl.5 Konvergencija funkcija cilja zaviso od rednog broja iteracije



a) Pojacanje K_p



b) Pojacanje K_i



c) Pojacanje K_d

Sl.6 Konvergencija parametara PID regulatora zaviso od rednog broja iteracije

Rezultati simulacije ugla zakretanja klatna pokazuju sličnost prelaznih procesa u sva četiri slučaja. Klatno prvo počinje da se okreće u jednu stranu a onda se okreće u drugu stranu aperiodično se približavajući gornjem ravnotežnom položaju. Vrednosti maksimalnog otklona, vremena kašnjenja i vremena smirenja kod sva četiri kriterijuma imaju približno iste vrednosti. Praktično, kvalitet prelaznog procesa zavisi od odnosa K_D/K_P .

ZAKLJUČAK

PSO metoda optimizacije rešava problem izbora parametara PID regulatora koji obezbeđuju stabilnost i kvalitet prelaznog procesa jednog izrazito nelinearnog sistema kao što je inverzno klatno. Pošto se metoda bazira na slučajnom pretraživanju prostora rešenja traženi parametri takodje imaju slučajan karakter. Medjutim, rezultati simulacije pokazuju da rasipanje rezultata praktično nema uticaj na kvalitet prelaznog procesa i tačnost pozicioniranja u stacionarnom režimu. Drugim rečima, inverzno klatno pokazuje određenu tolerantnost u izboru parametara PID regulatora. Integralno dejstvo se praktično može isključiti dok je potrebno zadržati određeni odnos proporcionalnog i diferencijalnog dejstva. Ipak, problem koji ostaje otvoren kod primene PID regulatora u upravljanju inverznim klatnom je veliko translatorno pomeranje kolica klatna.

Abstract: Optimum PID controller design using Particle Swarm Optimization technique is analyzed in this paper. During optimization and testing inverted pendulum, described by nonlinear mathematical model, is used. Because of random nature of PSO method, stochastic performance of obtained results are reported on the basis of repeated simulations. The aim is establish influence of the performance index deviation on the controller parameters, in other words on the transient and steady state behavior.

LITERATURA

- [1] V. Filipović; N. Nedić, PID Regulatori, Mašinski fakultet Kraljevo, (2008).
- [2] Astrom K.J., Hagglund T, *PID Controllers: Theory, design, and tuning*, Instrument society of America, 2nd Edition, (1995).
- [3] Xueming Y., Jinsha Y., Jiangye Y., Huina M., *A modified particle swarm optimizer with dynamic adaptation*, Applied Mathematics and Computation, 189 (2007) pp. 1205-1213.
- [4] J. Kennedy;R. Eberhart, *Particle swarm optimization*, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV pp. 1942-1948, (1995).
- [5] V. Đorđević, D. Pršić, R. Bulatović, *Optimization of the parameters of PID controller on the model of inverted pendulum by using algorithm of particle swarm optimization*, Heavy Machinery 2011, pp.19-26, V. Banja 2011. ISBN 978-86-82631-58-3
- [6] Iruthayarajan M. W., Baskar S., *Optimization of PID parameters using genetic algorithm and particle swarm optimization*, IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), Dr. M.G.R. University, Chennai, Tamil Nadu, India, Dec. 20-22, 2007. pp. 81-86.
- [7] D.C. Kamopp, D.R. Margolis, R.C. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*, Second Edition, Wiley Interscience, 1990

Ž. Murar.¹**GEOMETRIJA PRESEKA DVA CILINDRA PRIMENJENA U MAŠINAMA ZA AUTOMATSKO ZAVARIVANJE SPOJA DVE CEVI***Rezime*

U ovom radu je prikazan jedan način za rešavanje problema vođenja glave za zavarivanje u robotskim aplikacijama u procesu zavaranja spoja dve cevi. Korišćenjem osnovnih znanja iz trigonometrije, parametarskih jednačina i rotacije u 3D prostoru dobija se jedan moćan algoritam koji tradicionalnu pripremu postupka zavarivanja ovog tipa ostavlja po strani. Osim matematičke prezentacije krive spoja dve cevi u 3D u radu se razmatra i problem ugla koji glava za zavarivanje zauzima prema preseku spoja.

Uvod: Problem zavarivanja

Većina problema koja se pojavljuju u proizvodnji i fizici imaju matematičke algoritme koji su previše komplikovani za nekoga koji poseduje osnovno znanje matematike. Često je moguće izvesti takve aproksimacije koje pojednostavljaju matematički aparat kao što se to mora uvesti u kompjuterskoj grafici [3] U ovom radu je predstavljen slučaj kada se zadatak rešava egzaktno. Osnovni problem koji rešava ovaj rad je precizno upravljanje glavom za zavarivanje po preseku dve cevi u takozvanom T spoju.

Matematička formulacija

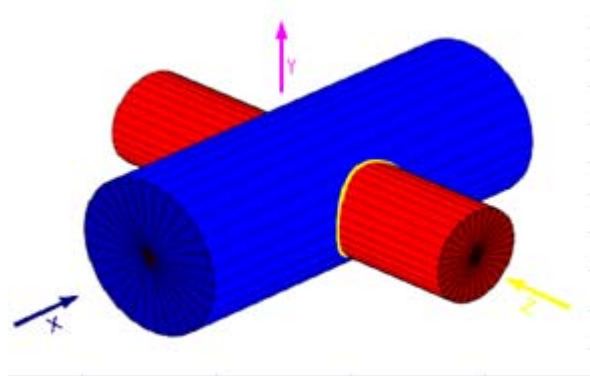
Kao što je navedeno u [2] prvi korak u rešavanju inženjerskog problema je definisanje geometrije, relevantne fizičke parametre i tačna identifikacija šta sve čini rešenje problema.

Pretpostavimo da računarski softver koji kontroliše zavarivačku glavu može da koristi parametarsku reprezentaciju krive koja definiše presek. Zbog cilindrične simetrije cevi, prirodno se nameće da je kriva zavera kriva koja se predstavlja u polarnim koordinatama (r, θ) , kao:

$$(x(r, \theta), y(r, \theta), z(r, \theta)) \quad (1)$$

Da bi pojednostavili stvari pretpostavićemo da jedan cilindar sa poluprečnikom R_1 ima osu koja se poklapa sa Z osom. Tada je parametarska jednačina prvog cilindra data sa:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \cos \theta_1 \\ R_1 \sin \theta_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$



Slika 1: Prikaz spoja dva cilindra

¹ mr Živko Murar, dipl.inž.el., LOLA Institut, tel.:011 2541 303 zivko.murar@li.rs

dok se jednačina drugog cilindra može dobiti iz prve korišćenjem matrice rotacije:

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

tako da za drugi cilindar važi:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_2 \cos\theta_2 \cos\varphi - z_2 \sin\varphi \\ R_2 \sin\theta_2 \\ R_2 \cos\theta_2 \sin\varphi + z_2 \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

U ovom sistemu jednačina imamo dakle po dva slobodna para parametara koji definišu željenu krivulju.

Rešavanje parametarskih jednačina krive zavara

Parametarske jednačine krive ali za specijalni slučaj kada se cevi spajaju pod uglom od 90 stepeni se mogu napisati kao:

$$\begin{aligned} x(t) &= K1 \\ y(t) &= R_1 \sin\theta_1 \\ z(t) &= R_1 \cos\theta_1 \end{aligned} \quad (5)$$

A za drugi cilindar

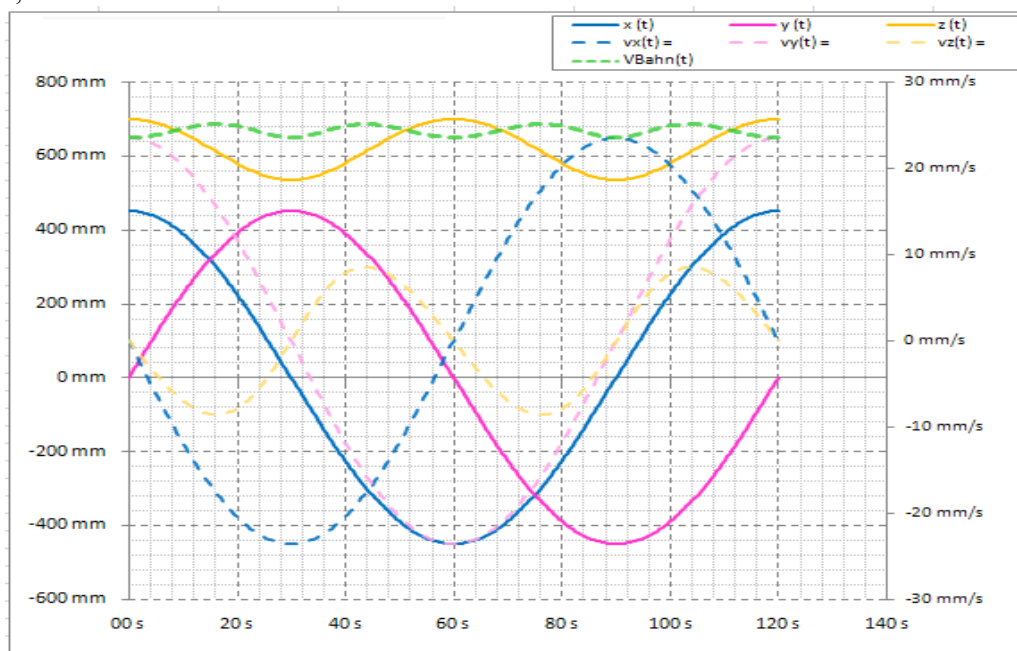
$$\begin{aligned} x(t) &= R_2 \cos\theta_2 \\ y(t) &= R_2 \sin\theta_2 \\ z(t) &= K2 \end{aligned} \quad (6)$$

Ako sada uvedemo pretpostavku da je $\theta_2 = 2\pi ft$ dolazimo do konačnog rešenja ove jednačine u parametarskom obliku sa promenljivim parametrima R , R_2 i f .

$$\begin{aligned} x(t) &= R_2 \cos(2\pi ft) \\ y(t) &= R_2 \sin(2\pi ft) \\ z(t) &= \sqrt{R_1^2 - R_2^2 \sin^2(2\pi ft)} \end{aligned} \quad (7)$$

Konačno dobili smo jedan veoma jednostavan algoritam koji nam služi za vođenje glave za zavarivanje.

Na slici 2 su prikazani profili pozicija i brzina koje se dobijaju primenom ove jednačine za $R_1=700$ i $R_2=450$ mm;



Slika2: Profilli pozicija i brzina dobijene trajektorije T spoja dve cevi.

Primena u mašinama za zavarivanje

Primena u mašinama za zavarivanje je direktna. Naime, dovoljno je da T spoj cevi zarotiramo oko ose cevi sa manjim poluprečnikom a ostala kretanja povežemo na neki robot ili manipulator koji će pratiti pomeraje po Z osi. Na ovaj način smo prilično složena kretanja u 3D sveli na jedno rotaciono i jedno linearno kretanje po Z osi. U praksi se pokazalo da je ovaj algoritam idealan za cevi sa tankozidnim zavarivanjem, dok je u slučaju debelozidnih cevi gde se vrši posebna priprema potrebno je uključiti još najmanje jednu linearnu i jednu kružnu osu.

Zaključak

U radu je predstavljen jedan geometrijski problem koji se javlja u procesu automatskog zavarivanja cevi u T spoj i gde smo pokazali da se u ovom slučaju trajektorija kretanja robotizovane glave za zavarivanje može na jednostavan način izvesti poznavajući praktično samo osnovne matematičke formule. Takođe dobijene su jednostavne jednačine koje su jako pogodne za realizaciju kretanja na tim mašinama. U zavisnosti od tipa zavarivanja i načina pripreme zavara kod debelozidnih cevi (kada se vari iz više prolaza) moguće je definisati mašinu koja će koristeći ove jednačine kretanja za svoje upravljane ose rešiti ove probleme. Dalja istraživanja u ovoj oblasti se odnosi na popunjavanje žleba kod cevi čija je debljina 30-ak i više mm u slučajevima kada su poluprečnici cevi bliski.

Reference

- [1] M. Abramowitz and I.A. Stegun (eds): Handbook of mathematical function with formulas, graphs, and mathematical tables, National Bureau of Standards, Washington, (1964)
- [2] M. R. Cullen: Cylinder and Cone Cutting: College Math. J., 28(2), pp. 122-123, (1997)
- [3] J.Z. Levin: Mathematical Models for Determining the Intersection of Quadric Surfaces: Comp. Graph. Imag. Proc., 11, pp. 73-87, (1979)

mr Živko Murar

THE GEOMETRY OF INTERSECTING TUBES APPLIED IN AUTOMATIC WELDING MACHINES

Content

This paper presents a method for solving the problem of keeping the head in robotic welding applications in the process of welding the two pipe joints. Using basic knowledge of trigonometry, parametric equations and rotations in 3D space is given a powerful algorithm that traditional preparation procedure of this type of digestion aside. In addition to the presentation of mathematical curve-circuit the two tubes in 3D, the paper considers the problem of the angle head for welding to the cross section takes up the joint



B. Knežević¹, B. Blanuša²

ONE SOLUTION FOR EFFICIENCY OPTIMIZED CONTROL OF ELEVATOR DRIVE

Abstract:

One algorithm for efficiency optimization of electric elevator drive is presented in this paper. Search control technique is used in a steady state when the speed of elevator car have nominal value. During transient processes, acceleration and deceleration period, there is no efficiency control. As a result, power and energy losses are reduced, especially when load torque is significant less related to its rated value with nominal torque in transient periods. This method is implemented in the control of real gear-less electric elevator drive with vector-controlled induction motor. Position trajectory is determined by the need that jerk is changed by the predefined function. Model of the drive is presented, and it is tested through computer simulations.

Keywords: Electric elevator; Induction motor; Efficiency optimization; Search control

1. INTRODUCTION

Modern passenger elevators request high transport speed, low jerk, precise positioning, simple and efficient control and small number of sensors [1]–[2].

Particularly interesting in modern elevators is the energy efficiency [3]. The evolution of the power digital microcontrollers and development of power electronics enables applying not only methods for induction motor drives (IMD) control, like vector control or direct torque control, but also development of different functions which make drives more robust and more efficient. One of the most interesting algorithm which can be applied in a drive controller is algorithm for efficiency optimization. Three strategies are usually used in efficiency optimization of IMD: Simple state control (SSC), Loss model control (LMC) and Search control (SC).

Search strategy methods have an important advantage compared to other strategies [4]–[7]. They are completely insensitive to parameter changes while effects of the parameter variations are very expressed in two other strategies. Algorithm is applicable universally to any motor. But for many applications flux convergence to its optimal value is too slowly.

Organization of paper is as follows:

Model with search controller algorithm is presented in second section. Description of the entire system configuration, elevator with drives and drive sheave is presented in third section. Qualitative analyses of this method with simulation results are given in fourth section. Obtain results are summarized in conclusions.

2. POWER LOSS MODELLING

The overall power losses in electrical drive consists of converter losses and motor losses, while motor power losses can be divided in copper and iron losses:

¹Bojan Knežević, *University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, B&H*, e-mail address : bojan.knez@unibl.rs

²Branko Blanuša *University of Banja Luka, Faculty of Electrical Engineering, B&H*, e-mail address : bbranko@etfbl.net

$$\begin{aligned} P_{tot} &= P_{mot} + P_{inv} \\ P_{mot} &= P_{Cu} + P_{Fe} \end{aligned} \quad (1)$$

Main constituents of converter losses are the rectifier, DC link and inverter conductive and inverter commutation losses. Overall flux-dependent losses are usually given by [8]:

$$P_{inv} = R_{inv} \cdot i_s^2 = R_{inv} \cdot (i_d^2 + i_q^2), \quad (2)$$

where i_d, i_q are components of the stator current i_s in d, q rotational system and R_{inv} is inverter loss coefficient. T_{em} is electromagnetic torque in rotor flux oriented reference frame witch is expressed as:

$$T_{em} = \frac{3}{2} P \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd} i_{sq} = \frac{3}{2} P L_m' i_{sd} i_{sq} = k_{ekv} i_{sd} i_{sq}, \quad (4)$$

where $k_{ekv} = 3/2 Z_p L_m'$.

Search algorithm is used in steady state when the speed of elevator car have nominal value, which is detected in the steady state control block (Fig. 1). The applied algorithm is simple. Since the current i_{sd} is very close to the value which gives minimal losses small step of magnetization current $\Delta i_{sd} = 0.01 i_{sdn}$ is chosen, where i_{sdn} is nominal value of i_{sd} current. For two successive values of the i_{sd} current, power losses are determined. Sign of Δi_{sd} is maintained if power losses are reduced. Otherwise, the sign of Δi_{sd} is opposite in the next step:

$$i_{sd}(n) = i_{sd}(n-1) - \text{sgn}(\Delta P_{tot}(n-1)) \Delta i_{sd}. \quad (5)$$

When the two values of magnetization current i_{sd1} and i_{sd2} were found so the sign of power loss is changed between these values new reference of i_{sd} current is specified as:

$$i_{sdSC}^* = \frac{i_{sd1} + i_{sd2}}{2}. \quad (6)$$

In this way, there are no oscillations of i_{sd} current, air gap flux and electromagnetic torque, which are characteristic of the search algorithm.

3. SYSTEM CONFIGURATION

The analyzed elevator considers electrical drive and drive sheave that is mounted directly to the motor shaft without gear. Block diagram of the system is shown in Fig. 1. Elevator motor is three-phase asynchronous motor with squirrel cage induction motor (AM). Drive converter is current regulated PWM voltage source inverter (CRPWM VSI) direct current power supply. Indirect vector control algorithm (or Indirect Field Oriented Control, IFOC) where d, q rotational system is oriented toward rotor flux Ψ_r^* is used for a control of drive.

Rotational movement of the motor shaft turns into linear movement over drive sheave directly mounted to motor shaft without gear box. The drive torque is transferred from the drive sheave by friction to the hoisting ropes that are connected to the car as counterweight. Weight of counterweight is m_{cw} [kg] (Fig. 1).

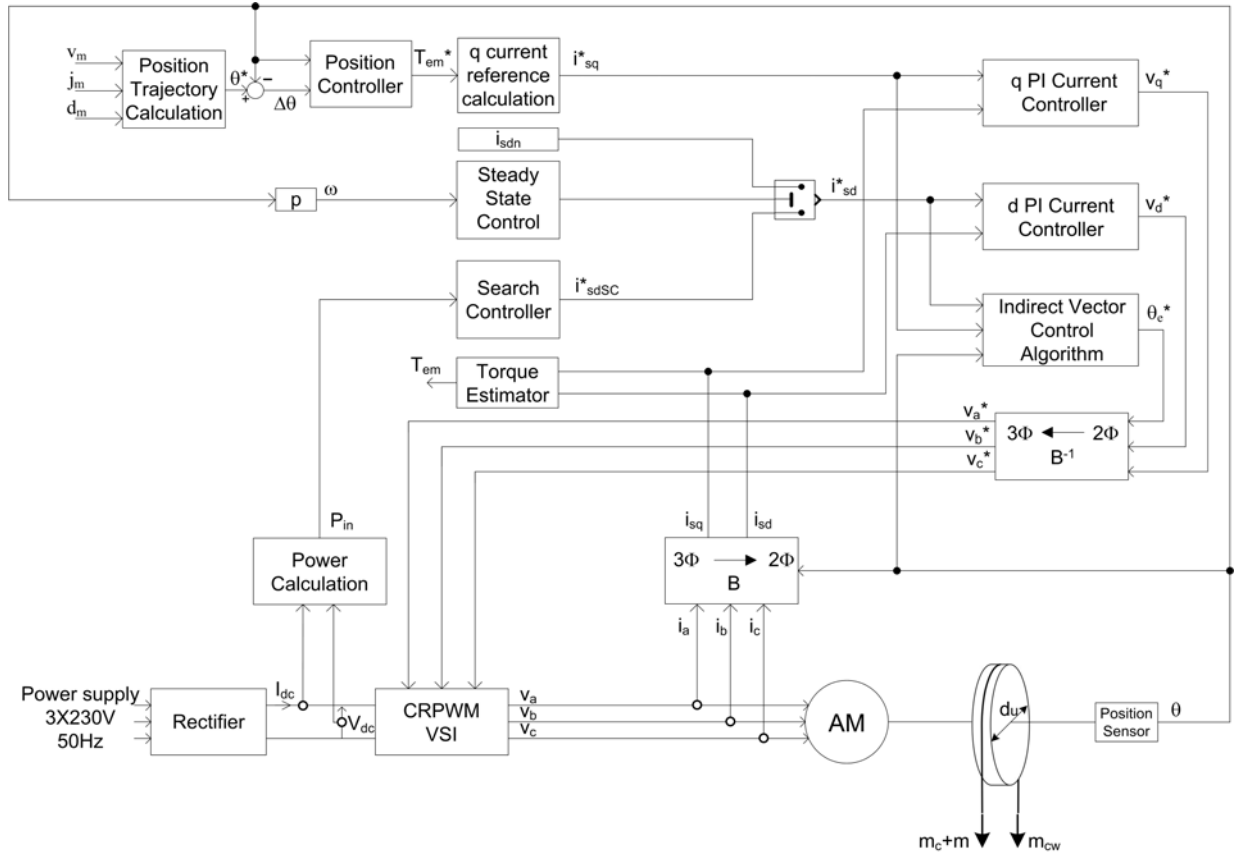


Figure 1. Block diagram of the efficiency optimized control of elevator drive with vector controlled induction motor and drive sheave that is mounted directly to the motor shaft without gear.

Drive sheave rotational speed is the same as rotational speed of motor shaft. Rotational and linear speed of car are related over radius of drive sheave. Load torque in the function of weight in the car can be calculated following the next expression:

$$T_L = \frac{d_u}{2} g \left(m - \frac{m_m}{2} \right), \quad (7)$$

where d_u [m] is diameter of sheave, m [kg] is a weight in car and m_m [kg] is elevator capacity. The total inertia is calculated as:

$$J_m = J_r + \left(2m_c + m + \frac{m_m}{2} \right) \left(\frac{d_u}{2} \right)^2, \quad (8)$$

where J_r is inertia of rotating masses (rotor, brake, sheave, etc.) and m_c [kg] is a weight of car. Elevator is the positioning system and position controller is used for the task to provide position reference tracking and zero error in steady state. Constant load is usual for one elevator ride. So, a position controller with proportional, derivative and integral action (PID) is used [9].

Model for efficiency optimization (Fig. 1) consists Search Control and Steady state control block. Nominal value of i_{sdn} is used during transient states caused of external speed or torque demand [5]. Search controller is used in a steady state, during constant speed of elevator.

4. SIMULATION RESULTS

Model of the system (Fig. 1) is verified through the computer simulations using the software package MATLAB/Simulink.

The reference position whose mathematical model is described in [9,10] is generated by S-function. Components of elevator drive and its control are described in section III. The results are shown in Figs. 2., 3., 4. and 5. Input parameters for the dynamic of the elevator are:

- Final position of car: 20 [m],
- Nominal speed of car: 2 [m/s],
- Jerk amplitude: 4 [m/s³],
- Elevator capacity: 900 [kg],
- Weight of the car: 400 [kg].

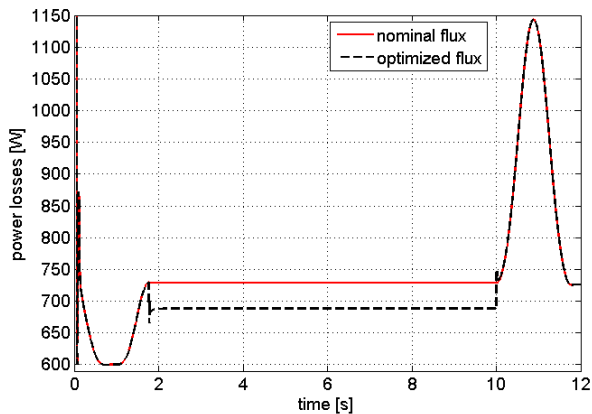


Figure 2. Power losses with efficiency optimized control and with nominal flux for 0% load.

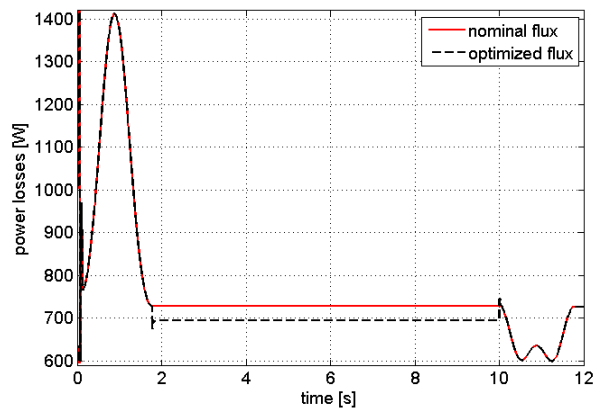


Figure 3. Power losses with efficiency optimized control and with nominal flux for 100% load.

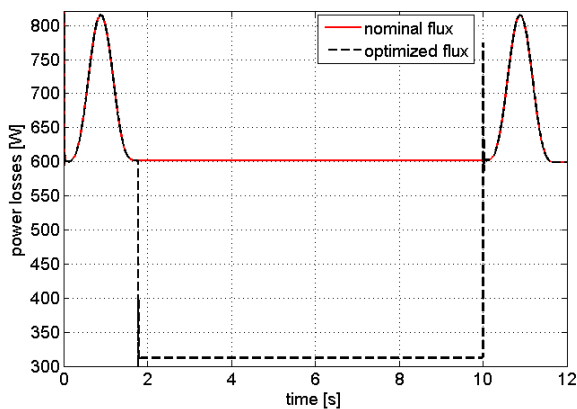


Figure 4. Power losses with efficiency optimized control and with nominal flux for 50% load.

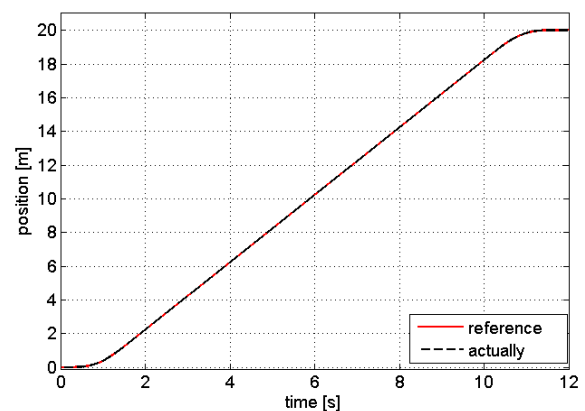


Figure 5. Actually and reference position of the car

5. CONCLUSION

The paper describes efficiency optimization algorithm for electric elevator drive. Parameters of real elevator with induction motor drive were included in the model of elevator. Simulation of the entire system with designed efficiency optimization algorithm is made in the Matlab/Simulink.

According to the theoretical analysis and performed simulations at the following conclusions can be expressed. Presented method is valid in power loss reduction (Fig. 2, 3 and 4). For a light load method gives significant power loss reduction (Fig. 4). Also, it shows good dynamic performances without loss of accuracy in position of the elevator car (Fig. 5).

Similar algorithm for efficiency optimization can be applied for other control technique in IMD, like Direct Torque Control (DTC). For vector control of IMD on the basis of flux and torque

command, new values of control variables i_{ds}^* and i_{qs}^* , while in Space Vector Modulation (SVM) DTC new stator voltage vector is determined so that the desired change in flux and torque is achieved.

REFERENCES

- [1] Zhang Yajun, Chen Long, Fan Lingyan, "A Design of Elevator Positioning Control System Model," IEEE Int. Conference Neural Networks & Signal Processing, Zhenjiang, China, June 8-10. 2008, pp 535-538.
- [2] Kukarni, A.B., Nguyen, H., Gaudet, E.W., "A comparative evaluation of fine regenerative and nonregenerative vector controlled drives for AC gearless elevators," IEEE Industry Applications Conference, 2002, pp 535-538.
- [3] B. Blanuša, B. Knežević: "Efficiency Optimized Control of Elevator Drive", INFOTEH, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, March 2012.
- [4] B. Blanus, P. Matić, Z. Ivanovic and S.N. Vukosavic: An Improved Loss Model Based Algorithm for Efficiency Optimization of the Induction Motor Drive, Electronics, Vol.10, No.1, pp. 49-52, 2006.
- [5] E. S. Sergaki, G.S. Stavrakakis, "Online Search Based Fuzzy Optimum Efficiency Operation in Steady and Transient States for Dc and Ac Vector Controlled Motors", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machine, Paper ID 1190, 2008.
- [6] D.A. Sousa, Wilson C.P. de Aragao and G.C.D. Sousa: "Adaptive Fuzzy Controller for Efficiency Optimization of Induction Motors", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, No.4, pp. 2157-2164, 2007.
- [7] S. Ghozzy, K. Jelassi, X. Roboam: "Energy optimization of induction motor drive", International Conference on Industrial Technology, Conference Record of the 2004 IEEE, pp. 1662 -1669, 2004.
- [8] S. N. Vukosavic, E Levi: "Robust DSP-based efficiency optimization of variable speed induction motor drive", IEEE Transaction of Ind. Electronics, Vol.50, No.3, pp. 560-570, 2003.
- [9] B. Knežević, B. Blanuša, D. Marčetić: "Model of Elevator Drive With Jerk Control", XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies IEEE, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, October 27-29, 2011, pp. 1-5.
- [10] B. Knežević, B. Blanuša, D. Marčetić: "Design of Elevator Drive With Jerk Control", 16th International Symposium on Power Electronics - Ee 2011, Novi Sad, Republic of Serbia, October 26th-28th, 2011, T2-1.8, pp. 1-4.

Једно рјешење енергетски ефикасног управљања погоном лифта

Резиме:

У раду је презентована једна врста алгоритма за повећање ефикасности погона електричног лифта. У стационарном режиму, када је брзина кабине лифта једнака номиналној, као алгоритам за оптимизацију користи се техника тражења. За вријеме прелазних процеса, периоди убрзавања и успоравања кабине лифта, не користи се алгоритам за повећање енергетске ефикасности. Примјењена техника резултира смањењем губитака снаге и енергије, а посебно у случају када је момент оптерећења значајно мањи од номиналног уз задржавање номиналног покретачког момента у прелазним процесима. Метод је примјењен на реалном безредукторском погону електричног лифта векторски контролисаним индукционим мотором. Трајекторија положаја одређена је трајем који је описан унапријед дефинисаном функцијом. Модел погона је детаљно презентован и тестиран рачунарским симулацијама.

Кључне ријечи: Електрични лифт; Индукциони мотор; Повећање ефикасности; Метода тражења



M. Pilipović¹

SEKVENCIJALNO UPRAVLJANJE PRIMENOM PROGRAMABILNIH KONTROLERA

Rezime

Programabilni kontroleri su široko primenjeni u velikom broju industrija za realizaciju kompleksnih zadataka upravljanja proizvodnim sistemima. Posebno je značajna primena za logičko i sekvencijalno upravljanje. Projektovanju sekvencijalnog kontrolera zahteva sistematski pristup i primenu različitih teoretskih metoda. Za impementaciju sekvencijalnog kontrolera primenom programabilnog kontrolera neophodan je razvoj programa u nekom od raspoloživih progamskih jezika. U radu su prikazani sistematski metodi za projektovanje sekvencijalnog kontrolera sa primerima razvoja programa za programabilni kontroler u različitim programskim jezicima.

1. UVOD

Programabilni kontroleri (PC) ili programabilni logički kontroleri (PLC) uvode se krajem šezdesetih godina kao zamena za ožičene prekidačke i relejne mreže i realizaciju tzv. logičkog upravljanja. Početne funkcije upravljanja (osnovne logičke funkcije, vremenske i brojačke funkcije) bitno su poboljšane i proširene tako da danas programabilni kontroleri raspolažu sa nizom instrukcija karakterističnih za opštu automatsku obradu podataka i komunikacije (aritmetičke instrukcije, instrukcije za kontrolu toka programa, instrukcije za transfer podataka, itd.). Od 2000-te godine, na bazi sve veće primene personalnih računara u oblasti sistema upravljanja imamo i novi proizvod na tržištu – kontroler programabilne automatizacije (*Programmable Automation Controllers - PAC*). Skraćenica "PAC" iskorišćena je da opiše novu generaciju industrijskih sistema upravljanja koji kombinuju funkcionalne mogućnosti programabilnih logičkih kontrolera (*Programmable Logic Controller - PLC*) i personalnih računara (*Personal Computer - PC*) [1]. Ovo je obezbedilo primenu programabilnih kontrolera i u najsloženijim sistemima upravljanja gde se zahteva i izuzetno složena obrada informacija karakteristična za današnju primenu kompjuterskih tehnologija uz funkcionalne mogućnosti upravljanja programabilnih kontrolera.

Od same pojave programabilnih kontrolera, primenjivani su za upravljanje u automatizaciji složenih sistema kao što su transfer linije, fleksibilni proizvodni sistemi, automatske montažne linije i drugi složeni sistemi u brojnim industrijama a posebno u industriji motornih vozila. Današnji automatski sistemi su još kompleksniji i u njihovom upravljanju sekvencijalno upravljanje ima važnu ulogu. Za realizaciju sekvencijalnog upravljanja primenom programabilnog kontrolera potrebno je teoretske, matematičke i druge modele primenjene u sintezi sekvencijanog sistema upravljanja prevesti u odgovarajući programski jezik za šta će se u radu dati odgovarajući primeri.

2. PROGRAMIRANJE PROGRAMABILNIH KONTROLERA

U početnoj fazi razvoja programabilnih kontrolera, sistemi za programiranje i programski jezici razvijani su od strane proizvođača programabilnih kontrolera. Karakteristike tih sistema i programskih jezika bile su različite, zavisno od koncepta proizvođača, i između ostalog mogli su se koristiti za programiranje samo određenih tipova programabilnih kontrolera. Usvajanjem standarda IEC 61131-3 - Programabilni kontroleri - programski jezici [2] definisani su standardni programski jezici za programiranje programabilnih kontrolera i njihova detaljna struktura. Standard je obezbedio uslove za prenosivost programa i između

¹ Prof. dr Miroslav Pilipović,
Mašinski fakultet Beograd, Kraljice Marije 16, e-mail:mpilipovic@mas.bg.ac.rs

ostalog doprineo pojavi većeg broja nezavisnih proizvođača softvera za programiranje programabilnih kontrolera.

Teksualni i grafički jezici za programiranje programabilnih kontrolera prema standardu IEC 61131-3 (IL, ST, LD i FBD) izvorno su razvijeni na bazi konvencionalnih metoda sinteze kombinacionih prekidačkih mreža i teorijskim osnovama prekidačke algebre. Ovi jezici su pogodan alat za programiranje logičkog upravljanja izraženog sistemom logičkih funkcija. Sinteza sekvencijalnih prekidačkih mreža za osnovu ima apstraktni i strukturnu teoriju sekvencijalnih konačnih automata. Programski jezik koji se povezuje sa navedenim teorijama je grafički programski jezik sekvencijalnih funkcionalnih dijagrama – SFC. U isto vreme sekvencijalni konačni automati imaju značajnu ulogu i u konceptu sistema distribuiranog upravljanja prema standardu IEC 61499 [3], za funkciju upravljanje izvršenjem funkcijskog bloka (*ECC - Execution Control Chart*). Istraživanja vezana za zadatak programiranja sekvencijalnih prekidačkih mreža dovela su do primene teorije Petri mreža u izradi programa za programabilni kontroler u nekom od navedenih jezika.

3. SEKVENCIJALNO UPRAVLJANJE

Jedan od zajedničkih zadataka u industrijskoj automatizaciji je aktiviranje različitih izvršnih organa – aktuatora (pneumatski i hidraulički cilindri, pumpe, motori, tajmeri, grejači i drugi) u definisanom redosledu – sekvenci. Najčešće se aktiviranje izvršnog organa može izvršiti samo ako je prethodni takt kompletiran. Sistemi upravljanja za napred opisan način rada nazivaju se **Sekvencijalni sistemi upravljanja** ili **Sekvencijalno-logički sistemi upravljanja**.

U početnoj fazi primene sekvencijalnih sistema upravljanja, projektovanje je uglavnom bazirano na intuiciji i prvi sistemi su realizovani primenom relejnih prekidačkih mreža ili sa pneumatskim logičkim i memoriskim komponentama.

Sistematski metod projektovanja sekvencijalnih sistema upravljanja bazira na primeni prekidačke algebre i teorije sekvencijalnih konačnih automata. Jedan od prvih metoda je Hafmanov (*Huffman*) postupak sinteze asinhronih sekvencijalnih konačnih automata detaljno prikazan u [5]. Nedostatak navedenog metoda je što bazira na matričnom postupku i za kompleksne sisteme sa velikim brojem promenljivih postaje nepraktičan.

Pored navedenog metoda, posebno za oblast primene pneumatskih komponenti i sistema, razvijane su tzv. «inženjerske metode» projektovanja sistema upravljanja sekvencijalnim sistemima. Inženjerske metode razvijane su na osnovu intuicije i iskustva, pre svega proizvođača pneumatskih i drugih komponenti za sekvencijalno upravljanje (*Festo, Telemecanique* i drugi). Na bazi tih metoda razvijeni su i komercijalni sistemi programera sekvencijalnih sistema upravljanja u pneumatici (primer *Quickstepper – Festo*). Najpoznatije inženjerske metode za projektovanje sekvencijalnih sistema upravljanja su kaskadne metode i među njima se ističe metoda «Korak po korak» ili «Takt po takt» [5].

U projektovanju sekvencijalnih sistema upravljanja posebno je pogodan pristup preko grafičkog prikaza zadatka upravljanja primenom **Grafcet**² metoda. Grafcet je promovisan od strane francuskih istraživača kao metod za grafičko funkcionalno definisanje upravljanja sekvencijalnim procesima nezavisno od izabranog načina fizičke realizacije (pneumatske komponente, relejno-prekidačke mreže, elektronske komponente, programabilni kontroler, kompjuter ili mikroprocesor). Novi pristup je imao za cilj da uprosti sintezu sistema upravljanja sekvencijalnim procesima uvodeći koncept takta sa pridruženom akcijom i prelaza sa pridruženim uslovom prelaza (receptivnošću). Definisan je međunarodnim standardom IEC 60848 [6] sa uvodjenjem termina sekvencijalni funkcionalni dijagrami (*SFC*³). Nešto kasnije razvijen je standard IEC 61131-3 u kome je između ostalih definisan i programski jezik sekvencijalnih funkcionalnih dijagrama za programiranje programabilnih kontrolera – istog osnovnog naziva SFC i za koji se uz manje izmene može primeniti ista formalna definicija kao i za GRAFCET SFC. Ovim standardom definisan je metod realizacije sekvencijalnog upravljanja primenom programabilnih kontrolera sa svim specifičnostima koje ukupan skup programskih jezika zahteva.

U [5, 7] i nizu drugih referenci pokazano je da se sekvencijalni konačni automat (Milijeva i Murova mašina) mogu transformisati u GRAFCET odnosno SFC program i uz određena ograničenja u signalom interpretirane Petri mreže. Ovo je otvorilo put da se u sintezi sekvencijalnih konačnih automata koristi konvencionalni pristup apstraktno i strukturne teorije automata, metod projektovanja sekvencijalnog sistema upravljanja primenom GRAFCET metode i preslikavanje projektnog rešenja: u grafički programski jezik za

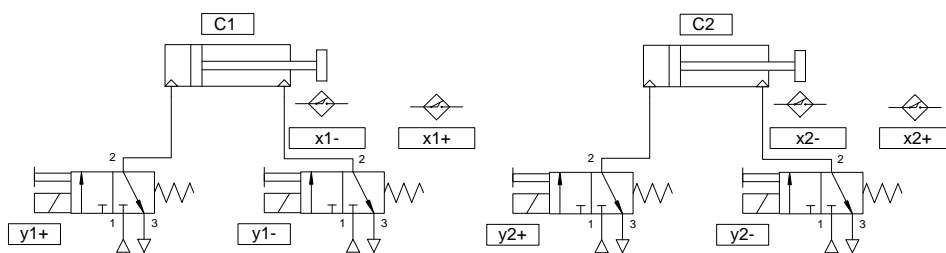
² GRAaphe Fonctionnel de Commande Etape Transitions – GRAFCET

³ Sequential Function Chart - SFC

programabilne kontrolere SFC ili u Petri mreže sa automatskom konverzijom u neki od programskih jezika za programiranje programabilnih kontrolera kao što su dati primeri u [7, 8, 9 i 10]. S obzirom da i danas neki proizvođači programabilnih kontrolera ne pružaju mogućnost korisniku da programira u SFC programskom jeziku, u ovom radu daće se primer kako SFC programsko rešenje prevesti u programski jezik lestvičastih dijagram (LD – najčešći programski jezik) i kako primenom konvencionalne metode “korak po korak” prevesti projektno rešenje u LD program.

3. PRIMER PROJEKTOVANJA SEKVENCIJALNOG UPRAVLJANJA I PROGRAMIRANJA PROGRAMABILNOG KONTROLERA U PROGRAMSKIM JEZICIMA SFC I LD

Za primer primene navedenih teorija u programiranju programabilnih kontrolera izabran je zadatak upravljanja radom prese. Pesa raspolaze pneumatskim cilindrima dvosmernog dejstva C1 i C2, koji se napajaju monostabilnim razvodnicima 3/2, i čije klipnjače u krajnjim položajima aktiviraju granične davače x1-, x1+, x2- i x2+ (slika 1). Presovanje se izvodi istovremenim aktiviranjem oba cilindra (radni hod – izvlačenje klipnjači), pauza 3 s, istovremeno aktiviranje oba cilindra (povratni hod – uvlačenje klipnjači). Naredni takt ne može započeti dok klipnjače oba cilindra nisu završile svoj hod. Rad je automatski sa pojedinačnim ciklusima aktiviranim kratkim pritiskom na START prekidač. Novi ciklus presovanja ne može se aktivirati ukoliko START prekidač nije prethodno otpušten. Ciklus rada cilindara je: $START, \begin{pmatrix} C1+ \\ C2+ \end{pmatrix}, PAUZA, \begin{pmatrix} C1- \\ C2- \end{pmatrix}$.



Slika 1. Primer – pneumatski cilindri, razvodnici i granični davači prese

Za definisane uslove rada sistema definiše se sledeći ciklus - redosled taktova:

1. Mirovanje – početno stanje (čeka uključivanje START prekidača);
2. Start i istovremeno izvlačenje klipnjača oba cilindra;
3. Pauza (po završetku izvlačenja obe klipnjače);
4. Istovremeno uvlačenje klipnjača oba cilindra;
5. Kraj ciklusa (po završetku uvlačenja obe klipnjače) – čeka isključivanje START prekidača (ako nije isključen u prethodnim taktovima).

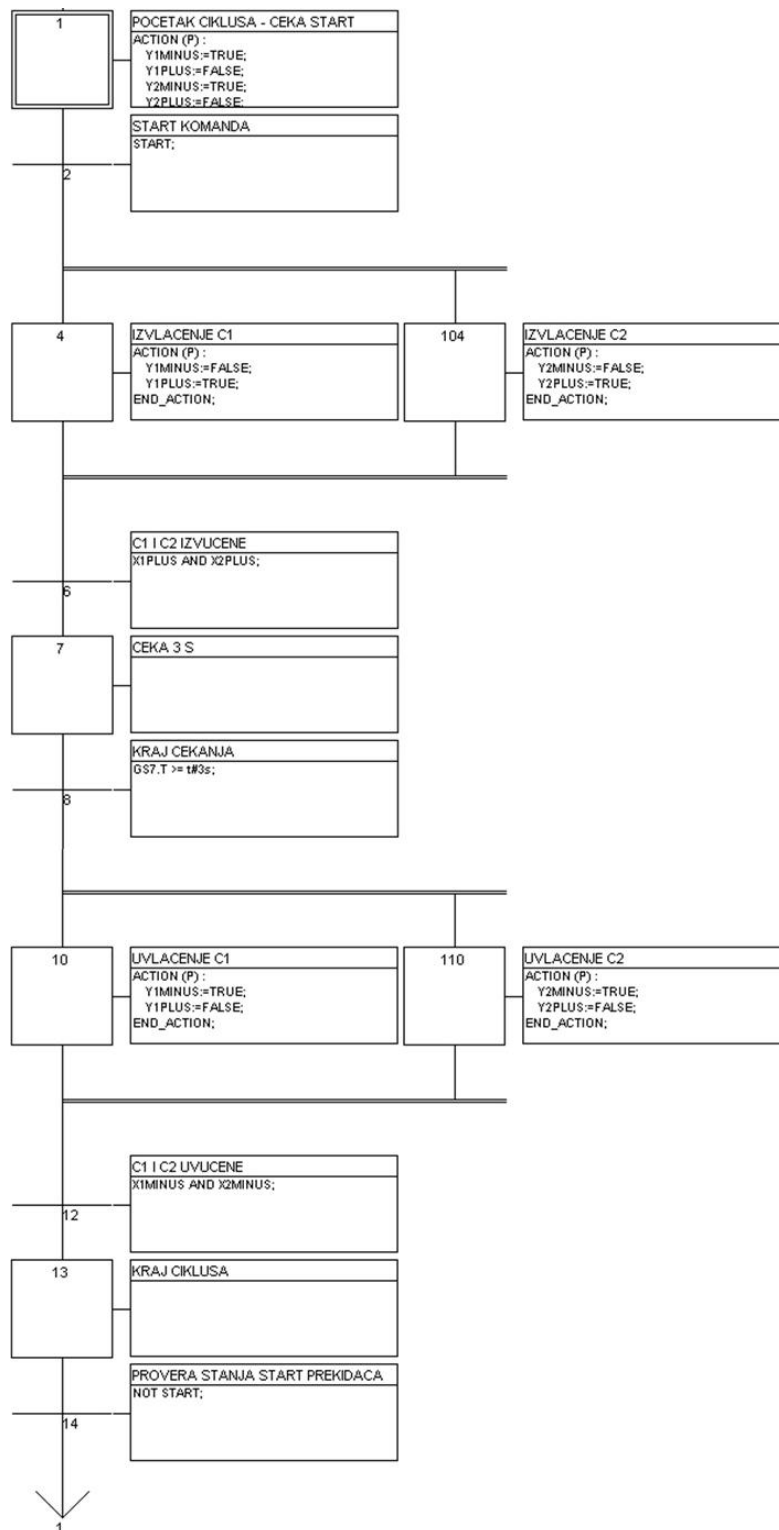
Na slici 2. dat je dijagram stanja koji odgovara projektovanom ciklusu rada sistema i na slici 3. program u SFC programskom jeziku koristeći IsaGraf demo programsko okruženje [11] gde je, za istovremeno izvlačenje i uvlačenje obe klipnjače – paralelne procese, primenjena dvostruka divergencija i konvergencija.

Koristeći pristup dat u [10] i modifikujući ga prema karakteristikama SFC programa mogu se definisati pravila za prevodjenje SFC programa za dati primer u LD program:

- svaki takt preslikava se u RS memorijski element kome se pridružuje odgovarajuća interna promenljiva,
- svakom prelazu pridružuje se uslov prelaza i grupa instrukcija za postavljanje (SET) RS memorijskog elementa narednog takta odnosno poništavanja (RESET) RS memorijskog elementa narednog takta (u prvom delu programa),

TAKT	1	2	3	4	5	6=1
C1	1	1	0	0	1	1
C2	1	1	0	0	1	1
START	1	0	0	1	0	0
x1minus	1	0	0	1	0	0
x1plus	1	0	1	0	0	0
x2minus	1	0	0	1	0	0
x2plus	1	0	1	0	0	0
y1minus	1	0	0	1	0	0
y1plus	1	0	1	0	0	0
y2minus	1	0	0	1	0	0
y2plus	1	0	1	0	0	0

Slika 2. Dijagram stanja za primer.



Slika 3. SFC program za primer.

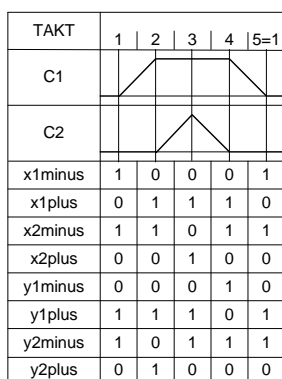
- RS memorijski element početnog takta postavlja se (SET) pri prvom ciklusu (*Scan*) programa,
- funkcija izlaza takta dodeljuje se svakoj RS promenljivoj (ako je postavljena) u drugom delu programa
- za takt pauze dodeljuje se funkcija uključivanja tajmera odgovarajućoj RS memorijskoj promenljivoj.

Koristeći navedena pravila na slici 4. dat je primer programa u LD programskom jeziku napisan u softveru PLCWORKS za programabilni kontroler INFO 73. Za postavljanje i poništavanje RS memorijskih elemenata korišćene su programske instrukcije L (*Latch* za SET) i U (*Unlatch* za RESET).

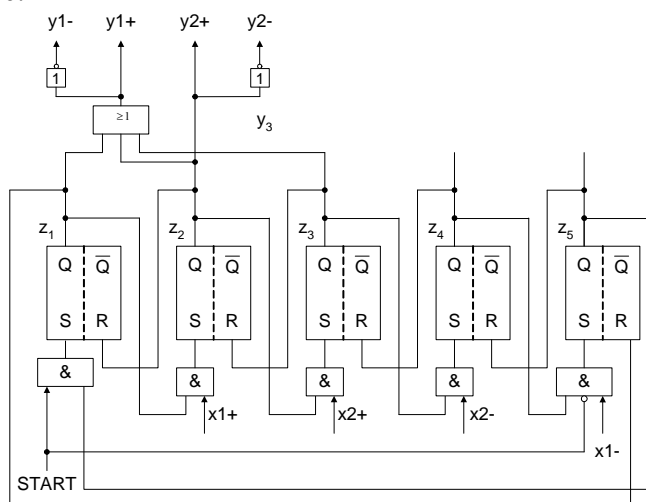
4. PRIMER PROJEKTOVANJA SEKVENCIJALNOG UPRAVLJANJA METODOM KORAK PO KORAK SA PRESTENASTIM BROJAČEM 1/N

Osnova metode «Korak po korak» je redosledno uključivanje narednog takta radnog ciklusa po sistematskom postupku – definisanim pravilima. Teoretska osnova metode «Korak po korak» je primena «programera sa prstenastim brojačima». Koncept je da se projektuje programabilni sekvencijalni upravljač na bazi standardnih komercijalno raspoloživih komponenti (pneumatskih, elektronskih ili relejnih) i posebno je značajan za pneumatske sisteme. Sistematizovana procedura projektovanja omogućava primenu za sekvencijalne sisteme proizvoljne dužine i stepena složenosti i naravno, programsku realizaciju primenom mikroprocesorskog digitalnog upravljanja ili programabilnih logičkih kontrolera. U primeni je više tipova prstenastih brojača⁴ (sa prirodnim binarnim kodom, potpuni prstenasti brojač sa kodom 1/n ili 2/n, akumuliranim kodom, itd) detaljno opisanih u [12]. Postupak metode «korak po korak» za projektovanje konvencionalnih sistema sekvencijalnog upravljanja dat je u [5 i 12] i drugoj literaturi i neće se ulaziti u njegove detalje. Kroz osnovni primer pokazaće se mogućnost prevodjenja projektnog rešenja u LD program za programabilni kontroler.

Primer se daje za pneumatski cilindre dvosmernog dejstva C1 i C2 sa slike 1. koji rade u ciklusu: *START, C1+, C2+, C2-, C1-*. Projektovati sekvencijalni kontroler sa brojačem 1/n sa realizacijom upravljanja pomoću programabilnog kontrolera i programom pisanim u jeziku lestvičastih dijagrama. Uslov rada sistema je pojedinačni ciklus koji se aktivira kratkim pritiskom na *START* prekidač. Takt dijagram za definisane uslove rada ne uzimajući u obzir *START* prekidač dat je na slici 5. Sekvencijalni programer sa brojačem 1/n i dopunskim RS elementom za realizaciju pojedinačnih ciklusa koji sa aktiviraju kratkim pritiskom na *START* prekidač dat je na slici 6.



Slika 5. Takt dijagram

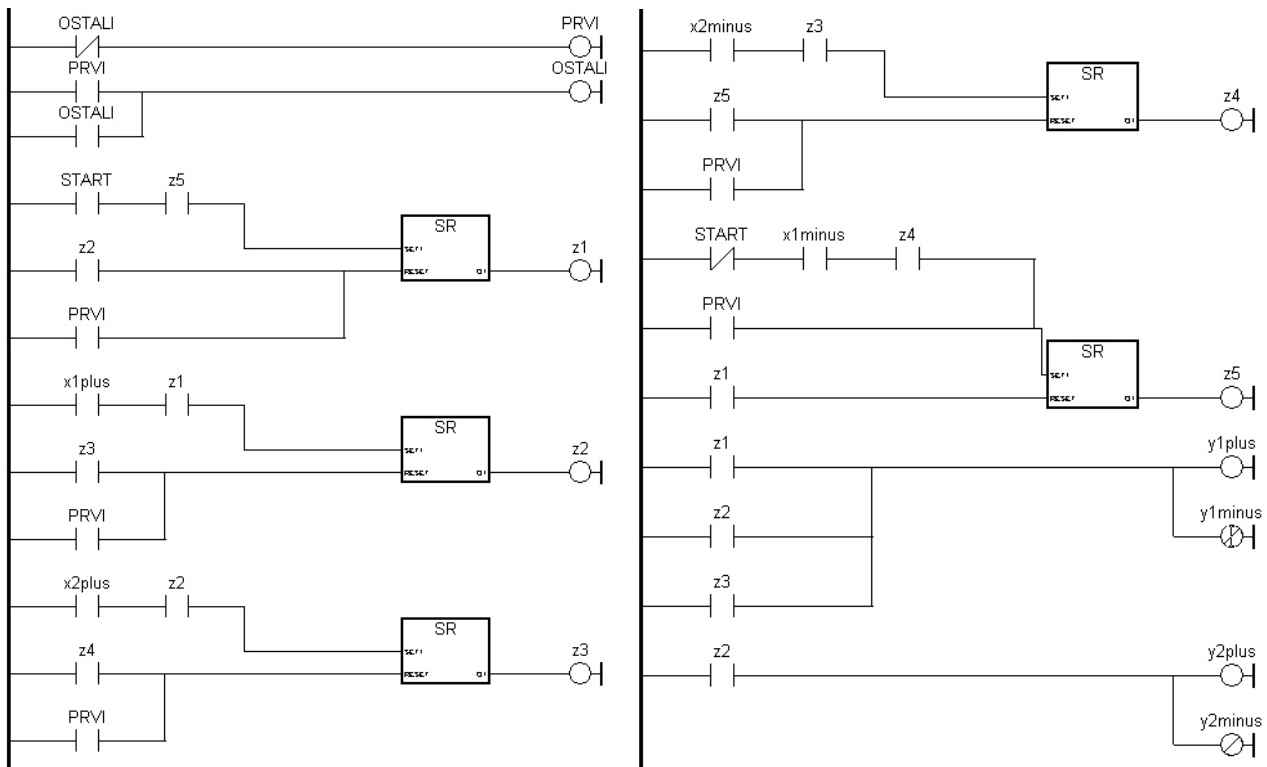


Slika 6. Sekvencijalni programer 1/n

LD program za prikazani primer sekvencijalnog programera dat je na slici 7. Za ispravan rad sekvencijalnog programera uzet je u obzir način rada programabilnog kontrolera (obrada programa odozgo na dole po redosledu programskih mreža) što je uslovalo da se u prvom delu programa nalaze RS memorijski elementi a u drugom delu programa funkcije izlaza. Pri programiranju funkcije izlaza uzeta je u obzir karakteristika monostabinih razvodnika 3/2 koji napajaju cilindar i u istoj mreži je definisana vrednost yplus i inverzna vrednost yminus. Signal za izvučeni položaj klipnjače postavljen je u taktovima u kojima se ona izvlači ili zadržava u izvučenom položaju, što automatski obezbeđuje u ostalim taktovima uvlačenje ili uvučeni položaj klipnjače.

Postavljanje sekvencijalnog programera u početni položaj je procedura postavljanja RS memorijskih elemenata u odgovarajuće početno stanje koje omogućava da pri aktiviranju programera započne novi ciklus od početnog – prvog takta. Za sekvencijalni programer sa 1/n prstenastim brojačem potrebno je postaviti RS memorijske elemente 1, 2, ... , n-1 u stanje RESET i zadnji RS element – n, u stanje SET. Ovo je realizovano indikatorom prvog ciklusa rada programabilnog kontrolera (PRVI).

⁴ Ring Counter - Prstenasti brojač



Slika 7. LD program za sekvencijalni programer 1/n

7. ZAKLJUČAK

U radu je dat prikaz sistema programiranja programabilnih kontrolera sa posebnim akcentom na međunarodne standarde i programiranje sekvencijalnog upravljanja. Date su osnovne teorija i sistema primenjenih u sintezi sekvencijalnog upravljanja (teorija sekvencijalnih konačnih automata, GRAFCET, Petri mreže, «korak po korak» odnosno prstenasti brojači). Kroz primere u ovom radu i u referenci [4] pokazano je kao se u nova softverska okruženja i sisteme programiranja programabilnih kontrolera mogu preslikati odnosno prevesti konvencionalni modeli sistema sekvencijalnog upravljanja. Pravila data u paragrafu 3. su samo osnovna koja su dovoljna za prikazani primer. U svakom slučaju za primenu svih funkcionalnih mogućnosti *GRAFCET* i *SFC* sistema ta pravila je potrebno detaljisati i dopuniti. Dalja istraživanja idu u pravcu automatskog generisanja programa za programabilni kontroler za različite metode i modele projektovanja sekvencijalnog upravljanja, kao što su dati primeri u referencama [4, 7, 8, 9 i 10].

Napomena: Rezultati prikazani u ovom radu deo su istraživanja na projektu PR-35007, koji finansira Ministarstvo za prosvetu i nauku Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Bell, I., *The future of Control*, IEE Manufacturing Engineer, August/September 2005.
- [2] IEC 61131-3, *Programmable Controllers - Part 3: Programming Languages*, - IEC, Geneva 2003.
- [3] IEC 61499: *Function Blocks - Part 1: Architecture; Part 2: Software Tools Requirements; Part 3: Tutorial Information, Part 4: Rules for Compliance Profiles*, IEC, Geneva 2004-2005.
- [4] Pilipović, M., *Sekvencijalno upravljanje i programiranje programabilnih kontrolera*, 36. Jupiter konferencija, 38. simpozijum «Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala», Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2010.
- [5] Zarić, S., *Automatizacija proizvodnje*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd 1984.
- [6] IEC 60848, *Grafcet Specification Language for Sequential Function Chart*, Second Edition, IEC, Geneva 2002.
- [7] Johnsson, C., *A Graphical Language for Batch Control*, PhD Thesis, Institute of Technology, Lund, 1999.

- [8] Aspern, J., *SPS-Softwareentwicklung mit Petrinetzen*, VDI VERLAG GMBH, Berlin 2003, ISBN 3-8007-2728-5.
- [9] Lee, G., Zandong, H., Lee, J., *Automatic Generation of Ladder Diagram with Control Petri Net*, Journal of Intelligent manufacturing, Vol. 15, pp. 245-252, 2004.
- [10] Lee, J., Hsu, P., *A Systematic Approach for the Sequence Controller Design in Manufacturing Systems*, Int. Jou. Adva. Manuf. Technology, Vol. 25, pp. 754-760, 2005.
- [11] ICS Triplex, *ISaGRAF 5.12, Demo Software*, ICS Triplex Isagraf Inc. 2008.
- [12] Pessen, D., Hubl, W., *Design and Application of programmable Sequence Controllers for Automation Systems*, Longman Group Limited, New York, 1979.

Miroslav Pilipović

SEQUENTIAL CONTROL USING PROGRAMMABLE CONTROLLERS

R e s u m e

Programmable controllers are widely applied in many industries for the realization of complex tasks of manufacturing systems control. Especially important is the application of logic and sequential control. Designing a sequential controller requires a systematic approach and application of various theoretical methods. To implement the sequential controller using programmable controllers is necessary to develop the program in one of the available programming language. This paper presents a systematic method for designing a sequential controller with examples of development programs for the programmable controller in different programming languages.

38. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

38th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



18. simpozijum

MENADŽMENT KVALITETOM

Beograd, maj 2012.

MENADŽMENT KVALITETOM QUALITY

Majstorović, V. ДИГИТАЛНА ФАБРИКА И ДИГИТАЛНА ПРОИЗВОДЊА	5.1
Avakumović, J., Avakumović, J., Vujačić, N. КОНТРОЛА ТРОШКОВА МАЛИХ И СРЕДЊИХ ПОСЛОВНО ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА	5.6
Bulatović, M. LOGISTIKA I KVALITET	5.11
Marković, S., Kajević, A., Stojanović, D., Črпajak, D. UTICAJ STANDARDIZACIJE, ТРИZACIJE I UNIFIKACIJE NA OBLIK MAŠINSKIH PROIZVODA	5.16
Papić, S., Ibrović, T. UTICAJ INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA NA BRZINU STALNOG POBOLJŠANJA GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE	5.21
Stojadinović, S., Majstorović, V. ОДРЕЂИВАЊЕ РЕДОСЛЕДА ИНСПЕКЦИЈЕ ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ПРИМИТИВА НА НУММ	5.25

← NAZAD



Видосав Д. МАЈСТОРОВИЋ¹

ДИГИТАЛНА ФАБРИКА И ДИГИТАЛНА ПРОИЗВОДЊА²

Апстракт: Овај рад представља анализу и синтезу истраживања која се врше у области развоја дигиталних фабрика и дигиталне производње. Циљ је да се изложе различите приступи и концепти, дигиталне производње и дигиталне фабрике, од а ради успостављања заједничких истраживачких прилаза. Овај модел инжењерске производње базиран на дигиталним моделима производа, процеса и ресурса је будућност производног инжењерства у овој области, па су због тога изложене анализе у овом раду посебно значајне. На крају су посебно изложени будући истраживачки правци у области дигиталних фабрика и дигиталне производње.

Кључне речи: Дигитална фабрика, дигитални производња, производња, моделирање.

1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

Пословна структура данас је много сложенија и динамичнија но икада раније. Тржиште захтева од индустрије брзе промене у новим производима, што се директно одражава на рад фабрике. Такође дигитализација и информационе технологије (ИТ) дају нове, неслућене могућности, инжењерима у области пројектовања и планирања. Ови прилази су довели до успостављања два концепта, који су се у међувремену појавили: *дигитална фабрика* и *дигитална производња*. Посебно важно је истаћи да су они омогућили да се унапреди инжењерски развој производа и створи нова ера у пословању и производњи, где је одрживост производње један од најважнијих фактора пословања [1]. Зато, циљеви који се постављају пред дигиталне фабрике су: *да се унапреди технологија производња, смање трошкови планирања, побољша квалитета производње/производа, као и повећа прилагодљивост новим захтевима, купаца и тржишта* [2]. У области производње, речи дигитална фабрика, дигитална производња, моделирање производа, итд, су данас у широкој употреби. Шта ти концепата у ствари значи? Одговор није једноставан, јер значење ових појмова зависи од погледа корисника, његове перцепције, примене, знања и још много тога. Због тога је потребно врло пажљиво користити ове термине.

Постоје неки концепти и акроними, који се односе на дигиталне фабрике и дигиталну производњу, који су неопходни да се истакну. Ово посебно укључује дефинисање концепта виртуелне фабрике и виртуелне производње [3], врсте истог проблема који се јављају и у дигиталној фабрици и дигиталној производњи. Дефиниције ових концепата варира у зависности од времена истраживања и истраживача који их је поставио. Дефиниција виртуелне фабрике би требало да буде синоним за дигиталну фабрику, а виртуелна производња би требало да буде синоним за дигиталну производњу. Наша истраживања показују да не треба да се прави разлика, између концепта виртуелне и дигиталне фабрике / производње у овој области. Према [4] постоје неке заједничке карактеристике у истраживачким областима дигиталне / виртуелне производње, фабрике и предузећа. То су, на пример: (а) интегрисани приступ за побољшање производа, процеса и технологије (интегрисани дигитални модел), (б) примена рачунарских алата, као што су моделирање и симулације, за планирање и анализу реалних технолошких процеса, и (ц) оквир за примену нових технологија, укључујући развој нових метода и система.

¹ Проф. Др Видосав Д. МАЈСТОРОВИЋ, Универзитет у Београду, Машински факултет, Лабораторија за производну метрологију и квалитет. vidosav.majstorovic@sbb.rs

² Овај рад је део истраживања која се врше у оквиру Пројекта ТР 35022, а који подржава Министарство просвете и науке.

2. БАЗНИ ПОСТУЛАТИ ДИГИТАЛНЕ ФАБРИКЕ И ДИГИТАЛНЕ ПРОИЗВОДЊЕ

2.1 Основне дигиталне фабрике

Данас са сигурношћу мођемо тврдити да још нема универзално прихваћене дефиниције за дигиталну фабрику, али се дају неке од њих: *(а) основу дигиталне фабрике чине анимирана визуелизација и симулација*, која обухвата: напредне методе и процесе у планирању, интеграцији софтверских алата и компетентног особља, *(б) дигитална фабрика је статички модел који обухвата геометријске, техничке и логистичке податке*, дате као слика објеката. Дигитална фабрика садржи дигиталне информације о фабрици и њеним ресурсима: локација, медији, логистика, алати за симулацију, итд., [5] *(ц) дигитална фабрика је генерички дигитализовани модел фабрике*, са њеним технолошким системом као кључним моделом из кога произилазе остали модели, као огледало реалног система производње. У дигиталној фабрици информације о пројектовању (и њихово представљање), еволуирају од иницијалног стања пројектовања, до коначног стања, пролазећи кроз различите фазе реконфигурације. Информације о производној опреми и њеним карактеристикама, алатима, стезним приборима, уређајима за руковање материјалом, итд, су такође дефинисане у дигиталном моделу. Због тога, може се рећи да је дигитална фабрика информациона платформа технолошког система у његовом животном веку, *(д) дигитална фабрика је генерички термин за широку мрежу дигиталних модела*, метода и алата, обухватајући симулацију и 3Д визуелизацију, [6].

Ако се сада пође од напред наведених дефиниција, могу се извући заједничке карактеристике за дигиталне фабрике/производњу, [7] као: *интероперабилност, база података / знања, информациони обухват и архитектура дигиталне фабрике*.

Интероперабилност података, заједно са преношивошћу, могућности проширења и скалабилности је најважнија карактеристика информационих модела [10]. Да би се ово остварило, модели треба да буду у неутралном формату, чиме се постиже да су модели и информације за њих експлицитни, односно систем је независан. Један од начина да се ово оствари је да се користе већ постојећи стандарди за информационо моделирање [8].

База података / знања служи за генерисање различитих модела дигиталне фабрике, који се повезују ИТ алатима, ради моделирања и извођења различитих процеса у њој. Најчешћи прилаз је развој заједничке / јединствене базе податка за дигиталну фабрику, која се развија после дефинисања информационе архитектуре дигиталне фабрике. Најчешћа опција је развој ових модела у неутралном формату, јер информациони модел представља срж дигиталне фабрике. При развоју информационих модела такође се мора узети у обзир животни циклус информација, њихов домен, ресурси и процеси који се односе на њих. Међутим истине ради, овде треба рећи да јединствена база података није једино решење, а друга солуција је дистрибуирана база података, где се смањују проблеми који се појављују појавом грешака у њој. Но без обзира које се решење користи, неопходно је имати добру информациону архитектуру и ИТ алате за њену подршку.

Информациони обухват и архитектура дигиталне фабрике – говорећи у општем случају, дигитална фабрика није само дигитално планирање, већ би требало да буде и база података за њен животни век. Због тога је главно питање, како на њену структуру и организацију утиче огромна количина информација која се генерише и стално користи. Као што је већ речено, дигитална фабрика се пре свега користи за дигитално планирање производа, процеса и ресурса за производњу, па је самим тим за сваки од наведених елемената неопходна информација. Међутим овде се мора напоменути да све ове информације не морају да буду у дигиталном облку. Од чега то зависи. Одговор је, да то зависи од тога шта ми подразумевамо под дефиницијом пословног система, фабрике, технолошког система и погона [9]. Тек када ове ствари имамо јасно дефинисане, онда можемо дефинисати и информациони обухват за нашу дефиницију дигиталне фабрике. Ако дигиталну фабрику посматрамо као технолошки систем, онда је производ њена материјализација а не пројектовање. То значи да дигитални модел производа не треба да буде укључен у дигитални модел фабрике. Међутим са друге стране, он (дигитални модел производа) мора бити компатибилан са дигиталним моделом фабрике, како би била могућа симулација производње. Као последица овога, дигитална фабрика би требало да буде конфигурирана од ресурсних и процесних информација. Процес представља скуп једне или више активности које се односе на процес рада или ток процеса рада, при производњи производа у контексту фабрике. Овом производном процесу је потребна и одговарајућа подршка: алати, прибори,

транспорт, одржавање, итд., јер фабрика не може да функционише без њих. Модели подршке процеса пружају боље знање о њима и смањују обим неодређеног знања у фабрици. Ресурси у дигиталној фабрици обухватају: људске ресурсе (запослени и њихова знања), физичке ресурсе као што су машине и опрема (сви оперативни подаци о њима) и информациони ресурси (менаџмент и управљање фабриком). Процеси и ресурси овако дефинисани представљају начин да се организује информациони модел, али то није довољно, када фабрика функционише на бази модела производних активности. Због овога процесни и модел ресурса морају бити представљени тако да се њихов информациони домен може моделирати као активност.

2.1 Основне дигиталне производње

Данас већ постоје реални индустријски погони, засновани на концепту дигиталне фабрике. Такође се овим истраживањима баве и научно-истраживачке институције, тако да ће концепт дигиталне производње бити разматран из оба угла. *Из угла индустријске примене* [10], дигитална производња обухвата рачунарску подршку за процесе планирања, инжењерства и 3Д компјутерску визуелизацију. Са друге стране у [12], се *дигитална производња дефинише као методологија која користи продубљена знања и ИТ технологије*. Продубљено знање се у овом моделу користи у дигиталном облику. CIRP речник, *производњу дефинише на следећи начин: "целине међусобно повезаних економских, технолошких и организационих мера, у директној вези са обрадом материјала, тј. све функције и активности које директно доприносе стварању добара. Она обухвата све активности и операције које се односе на производ, као и његово одржавање после производње, односно све између"* [11]. У овом случају, дигитална производња је део дигиталне фабрике. Ову дефиницију користе сви истраживачи, чланови CIRP-а. Тако на пример, модел производње заснован на веб-мулти агент систему, дефинисан је као дигитална производња [5]. Овај концепт пропагира сарадњу између развоја производа и производње, али различитих фабрика, користећи при томе дигитални модел производа. Други пример [14] предлаже модел STEP-NC производње, коришћењем дигиталног концепта, који обухвата: (а) стандардизо-ване податке за размену и коришћење, (б) веб комуникацију и доношење одлука, и (ц) интеграцију читавог ланца производног процеса. Из претходне анализе можемо да закључимо да обим дигиталне производње може да буде различит, у зависности од дефиниције коју примењујемо. Генерално говорећи, постаје три најважнија елемента која одлучују шта је то дигитална производња: ИТ систем, односно његова примена, теоријски концепт дигиталне производње – обим продубљеног знања које се користи као методологија дигиталне производње, и коришћење специфичних техника и метода, као што су на пример веб засновани мулти агент системи и слично [4,5]. Када говоримо о потребним основним карактеристикама информације у дигиталној производњи, можемо рећи да је то: њен дигитални облик, вишекратност коришћења и њена независност од растојања, времена и места коришћења.

Следећи аспект дигиталне производње је њен оквир и принципи које она користи. Ако пођемо од принципа, прво дефинишући модел, наводећи два прилаза који се за ове намене могу користити. *Први је* - Заједнички именитељ за поједностављење или апстракцију нечега што не може бити реално [10]. *Други је* – Ако посматрамо објекат Б, који је модел објекта А, и можемо му поставити питање о објекту А и од њега (објекта Б) добити одговор о објекту А [13]. Ако ове дефиниције пренесемо на дигиталну производњу, она је виртуелна акција производње, а ове акције се изводе на моделима производног система или фабрике. Дакле, дигитална производња би требало да буде огледало стварне производње са неколико ограничених детаља.

Дигитална производња на пример користи дигиталне информације о производу, које се у дигиталној производњи верификују кроз различите аспекте планирања процеса. Зато кажемо да информације о производу су изузетно важне у контексту различитих активности које се изводе у фабрици а оне никада не бих могле бити изведене без њих. Сваки производ треба да има свој дигитални модел који се може користити за симулацију погодности за производњу у дигиталној фабрици или пак за верификацију различитих сценарија планирања. Све ово значи да је од суштинског значаја компатибилност између дигиталних модела производа и фабрике. Сврха дигиталне производње је: (а) верификација кроз симулацију погодности за производњу планова процеса, путање алата и сензора за инспекцију, (б) верификација и анализа перформанси дигиталне производње са симулацијом тока, геометрије или перформанси машине алатке. Напред изнесене чињенице јасно дефинишу обим дигиталне производње, које се односе на све производне активности од почетка до краја израде једног производа, при чему је ИТ систем само алат за подршку дигиталне производње [14, 16].

Дигитална производња врши и изводи анализу и симулацију дигиталне фабрике, стварајући њен модел, користећи део или све моделе производа, тако да дигитална производња обухвата ресурсе и процесе фабрике. Ово значи да је дигитална производња начин да се верификују производне могућности за одговарајућу врсту производа. Извршена анализа нам показује да се данас још увек изводе посебна истраживања у области дигиталне производње / фабрике, при чему нема једнозначне дефиниције за ове области. Из тих разлога сва истраживања која се у овој области раде, треба да пођу од дефиниција за дигиталну производњу / фабрику која се у том истраживању користи.

3. УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

Полазећи од чињеница наведених у овом тексту, наводе се неки правци истраживања за област дигиталне фабрике, као: (а) успостављање јединствене дефиниције, обима и структуре дигиталне фабрике, (б) декомпозиција информационе структуре дигиталне фабрике и коришћење стандарда ИСО 10303, (ц) истраживање погодне ИТ архитектуре која ће се користити за развој, трансфер и коришћење различитих дигиталних модела производа, процеса и ресурса, и (д) развој онтолошког концепта за повезивање модела и њихове структуре у дигиталној фабрици. Наша истраживања се данас односе на последњи аспект системских прилаза развоја дигиталне производње и дигиталне фабрике [17-20].

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Westkämper, E., *Manufuture and Sustainable Manufacturing*, Proceedings of CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 20-28, 2008.
- [2] Mattucci, M., *Factories of the Future*, COMAU, EFFRA, Milano, 2010.
- [3] Zülch, G., Stowasser, S., *The Digital Factory: An instrument of the present and future*, Computer in industry, 56:323-324, 2005.
- [4] Nylund, H., Salminen, K., Andersson, P., *Digital Virtual Holons – An Approach to Digital Manufacturing Systems*, Proceedings of CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 64-68, 2008.
- [5] Mahesh, M., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., Fuh, J.Y.H., Zhang, Y.F., *Towards a generic distributed and collaborative digital manufacturing*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23:267–275, 2007.
- [6] Westkämper, E., *Strategic Development of Factories under the Influence of Emergent Technologies*, Annals of the CIRP, 56/1:419-422, 2007.
- [7] Kjellberg, T., Katz, Z., Larsson, M., *The Digital Factory supporting Changeability of Manufacturing Systems*, Proceedings of CIRP ISMS, pp. 102-106, 2005.
- [8] Wenzel, S., Jessen, U., Bernhard, J., *Classifications and conventions structure the handling of models within the Digital Factory*, Computers in Industry, 56:334-346, 2005.
- [9] Bley, H., Franke, C., *Integration of Product Design and Assembly Planning in Digital Factory*, Annals of the CIRP, 53/1:25-30, 2004.
- [10] Rogstrand, V., Nielsen, J., Kjellberg, T., *Integrated Information as an Enabler for Change Impact Evaluation in Manufacturing Life-cycle Management*, Proceedings of CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 162-166, 2008.
- [11] CIRP, *Dictionary of Production Engineering Vol.3, Manufacturing Systems 1st Edition*, ISBN –540-20555-1
- [12] Yang, W., Xu, X., *Modelling machine tool data in support of STEP-NC based manufacturing*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21/7:745–763, 2008.
- [13] Minsky, M. L., *Matter, minds and models*, Proc. International Federation of Information Processing Congress, 1:45-49, 1965.
- [14]. Lee, J., *E-manufacturing - fundamental, tools, and transformation*, IJ Robotics and Computer Integrated Manufacturing 19 (2008) 501–507.
- [15]. Brogren, C., *Implementation of a Sustainable European Manufacturing Industry*, Proceedings of Manufuture Conference, Nancy, 2009.
- [16]. Jovane, F., *Global experiences: sustainable manufacturing*, Politecnico di Milano, 2010, Milano.

- [17]. Majstorovic, V., Šibaliija, T., *ManuFuture & Factories of the Future - Contribution from ManuFuture Cluster Serbia*, Second Serbian's Manufuture Conference, Belgrade, 2011.
- [18]. Majstorovic, V., Šibaliija, T., *EU / Serbia Manufuture Excellence*, Introduction paper, Proceedings of Manufuture Conference, pp. 28/34, Tampere, 2007.
- [19]. Majstorovic, V., *Center of Excellence for Manufacturing Engineering and Management (CEMEM) , Facts – Objectives – Goals - Researches Framework*, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade, 2008.
- [20]. Majstorovic, V., *Manufuture Serbia – Strategic Research Agenda 2008-2015*, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade, 2008.



мр. Јелена Авакумовић¹, др. Јулија Авакумовић², мр. Никола Вујачић³

КОНТРОЛА ТРОШКОВА МАЛИХ И СРЕДЊИХ ПОСЛОВНО ПРОИЗВОДНИХ СИСТЕМА

Резиме:

У процесу преструктурирања привреде, повећава се број малих и средњих ППС-а. Да би пословање тих ППС-ова било што успешније потребно је да менаџери планирају и контролишу трошкове. Како планирање и реализовање трошкова контролисати, биће тема овог рада.

Кључне речи: трошак, контрола, профит, губитак, стандард костинг и систем ПЕРТ/cost.

УВОД

За разлику од индустријске производње, мали и средњи ППС-ови се баве претежно реализацијом појединачних производа мањих серија или услуга по поруџбини са свим карактеристикама специфичне појединачне производње. Ово ствара менаџменту велике тешкоће у организацији ефикасног система контроле.

Систем контроле трошкова треба да омогући менаџеру стално праћење нивоа трошкова, њихово упоређивање са стандардом-планом или нормама и предузимање корективних мера ради одржања трошкова у прихватљивим границама. Систем треба да покаже где су корективне активности неопходне и да обезбеди показатеље за мере које треба предузети. У систему контроле трошкова важна су два полазишта и то:

- Сви трошкови морају бити алоцирани, распоређени на одговарајуће радове, активности и
- Увек мора постојати стандард са којим се упоређују стварни трошкови.

1. ТРОШКОВИ И ВРСТЕ ТРОШКОВА

Трошкови представљају физичке (натуралне) утрошке елемената производње умножене њиховим ценама. Поред трошкова у току производње производа или извршења услуге неопходни су и разни издаци. Издаци су новчане исплате за разне пословне сврхе. Целина трошкова и издатака чини расходе. У њих улазе сва плаћања и обавезе које предузеће остварује у свом пословању. Имамо редовне расходе и ванредне расходе (квар, штете, лом, и др.).

Обрачун заједно са књиговодственом евиденцијом сматра се најбитнијим извором информација који служи за разне сврхе одлучивања. Постоји непрекидна потреба усавршавања и дотеривања метода обрачуна, које су у великој мери разгранате и чине значајан предмет научног проучавања. Методе обрачуна својим усавршавањем потпомажу искоришћавање техничко-технолошка достигнућа.

Обрачун у смислу утврђивања трошкова који настају извршавањем производног задатка или услуге неког ППС-а, као и цена коштања производа или услуге, је од великог значаја. Тај значај расте са растом ППС-а, развојем привреде уопште, поделом рада, порастом конкуренције и др.

У погледу врсте трошкова и њихових подела имамо више начина и прилаза. По нашем мишљењу било која подела и прихватање које врсте трошкова је добра. Битно је да се утврде сви трошкови и при разматрању и анализирању уврсте у ту поделу. Те поделе могу бити:[2]

¹ Факултет за пословно индустријски менаџмент, jelenalav@yahoo.com

² Висока текстилна струковна школа за дизајн, технологију и менаџмент, julija09@yahoo.com

³ ЈКП, nikolavujacic11@gmail.com

- Према улагањима у процес производње: трошкови материјала, трошкови услуга, трошкови средстава за рад и трошкови рада.
- Према функцији: трошкови по месту настајања, трошкови по носиоцима трошкова, производни, општи.
- Према могућностима обрачуна: појединачни и заједнички.
- Према начину утврђивања: стварни, плански и стандардни.
- Према сложености: једноставни и сложени.
- Према степену коришћења капацитета: фиксни и варијабилни.
- Према обухватности: укупни, просечни и др.

2. ПОСТОЈЕЋИ СИСТЕМ КОНТРОЛЕ ТРОШКОВА

Данас се код малих и средњих ППС-а користи неколико система и њихових варијанти за контролу трошкова. Избор система зависи од:

- Величине и сложености посла (производа/услуге),
- Од ставова и нивоа познавања проблематике од стране руководства ППС-а

Постојећи системи трошкова који се могу користити су:

- Укупни профит или губитак за дати посао. О овом систему ППС чека на завршетак производа или услуге и тек тада упоређује приходе-наплате са трошковима, да би се видело колики је профит или губитак за тај посао у целини. Подаци се узимају из финансијског књиговодства. Информације које се добијају овим системом могу се користити само за избегавање понављања великих грешака у будућим пословима ППС-а.
- Профит или губитак за послове у одређеним временским тачкама. Укупни трошкови за дати посао до одређеног датума упоређују се са вредношћу извршених радова до тог датума. У овом систему мора се пазити да се у трошкове укључе уграђени материјали који, из било којег разлога, нису још фактурисани од стране испоручиоца и да се укључе материјали који су фактурисани и приспели у магацин ППС-а, али нису још уграђени.
- Трошкови за јединицу рада. У овом систему трошкови за различите врсте радова посебно се евидентирају. Овде се добијају подаци о стварним трошковима које треба по одређеном кључу распоредити по врстама радова, онако како су укључени у јединичне цене.
- Системи засновани на принципима Стандард костинга. Систем стандард костинг успешно се користи у производњи где се производи ограничени број производа или основних компоненти. За производњу сваке компоненте или склопа одређени су детаљни трошкови. Разлике се израчунавају упоређењем стандардних са стварним трошковима за дати производ/услугу. На основу одговарајућих евиденција могућа је анализа-рашчлањивање укупног неслагања-разлике по елементима, односно по изворима као што су: цене материјала, коришћење материјала, цене радне снаге, учинак, фиксни или варијабилни, обим производње и сл.[1]
- Систем PERT /COST. Овај систем захтева да се реализација сваког посла планира на мрежном дијаграму. Трошкови радова, који су на мрежном дијаграму представљени као активности унапред се планирају-процењују. Тако планирани трошкови су основице-стандард са којим се касније упоређују стварни трошкови за одговарајуће активности. На основу утврђених разлика узмеђу стварних и планираних трошкова предузимају се одговарајуће мере када се појаве негативне разлике .

3. ПРИМЕРИ СИСТЕМА КОНТРОЛЕ ТРОШКОВА

Примена система контроле трошкова илустрована је на примеру инсталације централног грејања у једној стамбеној згради. Пример је скраћен, уопштени приказ стварне ситуације, јер би њен детаљан опис заузео сувише простора.

3.1. Контрола трошкова радне снаге, опреме и режије градилишта

Да би се смањиле грешке у књижењу, ППС је, нпр. одлучила да користи ограничени број кодова-шифара за планирање и евиденцију-праћење трошкова, односно исказивање одступања стварних од планираних трошкова. То су следећи кодови-шифре трошкова :

- Код 10 – трошкови сечења, припреме фитинга, – радна снага и опрема
- Код 20 - трошкови припреме и монтаже цевовода – радна снага и опрема
- Код 30 – трошкови монтаже грејних тела - радна снага и опрема
- Код 40 – трошкови испитивања инсталације - радна снага и опрема
- Код 50 – трошкови фарбања - радна снага и опрема
- Код 60 – режијски трошкови градилишта – градње

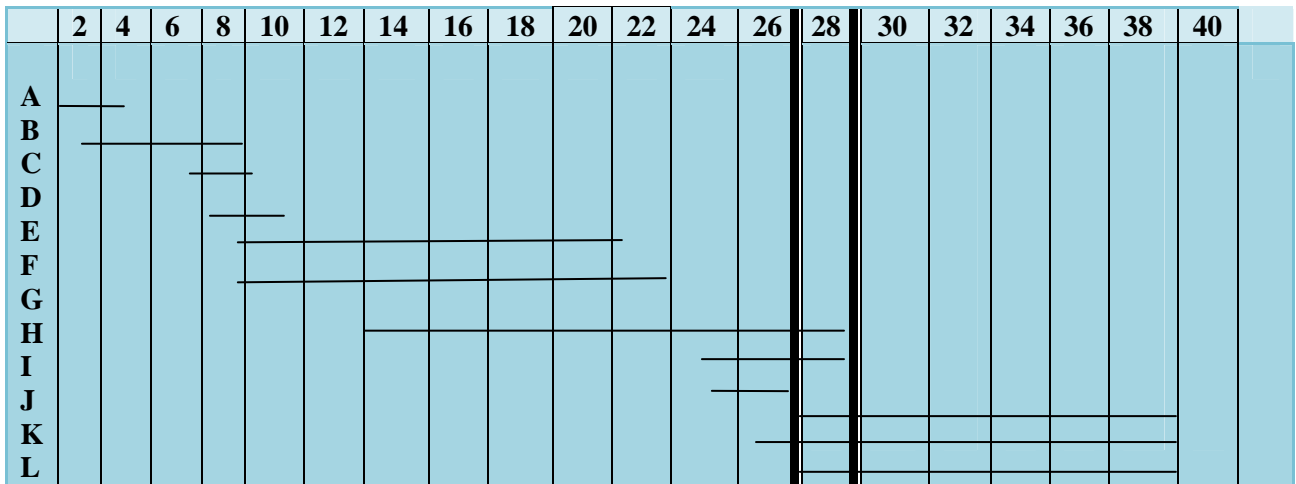
Радови на инсталацији су планирани и наведени трошкови су везани за одговарајуће активности у програму. Да би се могло вршити реалистичко упоређење стварних са планираним трошковима - плански трошкови се морају добити на основу тачних количина радова из радних – детаљних нацрта и мора се унети свака промена.

У табели 1 дати су планирани трошкови по горе наведеним кодовима за одговарајуће врсте радова. Временски распоред радова из табеле 1 дат је на линијском дијаграму слике 1.

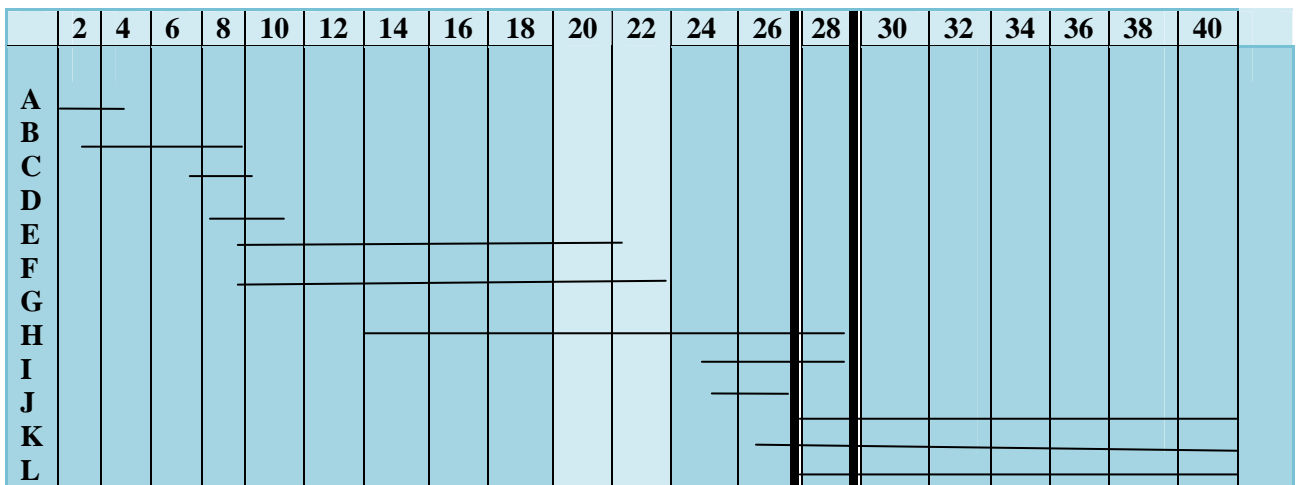
Напредовање радова прати се на дијаграму на уобичајен начин, што се користи и за праћење трошкова. Трошкови се групишу –евидентирају по датим кодовима . Нпр. степен завршености сваке активности на крају 26-те недеље може се израчунати на основу извештаја о напредовању радова датом на ревидованом програму показаном на линијском дијаграму слика 2 . Ови подаци- проценти такође су дати у последњој колони табеле 2. Друге колоне табеле 2 садрже планске трошкове, помножене са процентом завршености да те активности на крају 26 недеља. Сабирањем колона добијају се укупни плански трошкови за одговарајући код, који се односе на до тада извршене радове . У последњем делу табеле 2 , наспрам планских уписани су стварни трошкови и показане су разлике међу њима . Како се види на крају 26 недеље стварни трошкови су већи од планских за 1000 НЈ.Разлике су показане –рашчлањене по кодовима , односно врстама трошкова . На пример негативна разлика за трошак – код 30 је 1100Н:Ј, што указује да овој врсти трошкова треба поклонити посебну пажњу , односно да треба испитати узроке негативне разлике и по могућности их отклонити.

Активности	Код трошкова						СВЕГА
	10	20	30	40	50	60	
А						50	50
В	2500	3000	3500			1000	8000
С	500	500	1250			250	2500
Д	100	150	150			100	500
Е	7500	8500	9000		5000	10000	30000
Ф	1000	1500	2000			500	5000
Г				6500		1500	8000
Н				1000		500	2000
И	500	500	500		500	25	2025
Ј				500	500	1500	2500
К				250	500	2000	2750
Л						100	100
Укупно	12100	14150	16400	8250	7000	18025	75925

Табела 1. Планирани трошкови радне снаге, опреме и режије градилишта



Слика 1. Програм радова (у недељама). Планиран је завршетак радова за 38 недеља.



Слика 2. Ажурирани програм на крају 26 недеље. Због кашњења неких радова програм-завршетак објекта је продужен од 38 недеља на 40 недеља.

Активности	Кодови						Укупно	Процент завршетка
	10	20	30	40	50	60		
A						50	50	100%
B	2500	3000	3500			1000	10000	100%
C	500	500	1250			250	2500	100%
D	100	150	150			100	500	100%
E	7500	8500	9000		6000	10000	41000	100%
F	1000	1500	2000			500	5000	100%
G				5000		1400	6400	80%
H				500	250	250	1000	50%
I	500	500	500		500	500	2500	100%
J								/
K						275	275	100%
L								/
Планирани трошкови	12100	14150	16400	5500	7000	15025	70175	/
Стварни трошкови	12000	14500	17500	5000	6750	14325	71175	/
Разлика	+100	-450	-1100	-500	+250	+700	-1000	/

Табела 2. Упоредни-плански и стварни трошкови на крају 26 недеље.

3.2. Контрола трошкова материјала

Фактори који доводе до одступања стварних од планских трошкова материјала могу се сврстати у 2 групе: То су ценовни и количински фактори. Цена коштања по плану је 200 000 Н.Ј. од чега су трошкови радне снаге, опрема и режије 75 925 и трошкови материјала и др. 124 075 Н.Ј.

Ценовни фактори су : инфлација и промене , односно неслагање стварних са планираним набавним ценама материјала из различитих разлога.

Да би се остварила аналитичка контрола одступање стварних од планских трошкова материјала по свим кодовима , односно врстама радова, потребна је тачна и обимна евиденција , што захтева релативно велики утрошак времена и средстава.

Трошкови такве евиденције често надмашују уштеде које могу пружити , па зато треба наћи меру у контроли трошкова материјала . У пракси је довољно утврдити одступање стварних од планираних трошкова материјала за дати рад –активност у одређеној временској тачки , у Н.Ј. на следећи начин :[3]

- Плански трошкови материјала за извршени и измерени рад на крају последњег периода
- Плански трошкови материјала у посматраном периоду
- Укупни план трошкови материјала (збир прве 2 тачке)
- Збир стварних трошкова материјала до краја последњег периода и трошкови материјала у посматраном периоду
- На основу предњих података добија се разлика у трошковима материјала

Ако негативне разлике-одступања трошкова материјала достигну неприхватљив ниво менаџер треба да предузме адекватне мере.

ЗАКЉУЧАК

Благовремено сагледавање , контролисање и анализирање насталих трошкова и цене коштања и њено упоређивање са продајном ценом , представља данас и представљаће у будућности мериторан услов за успешност у привређивању малих и средњих ППС-а.

За добар успех у пословању ППС-а потребно је стално и благовремено пратити трошкови и цену коштања како би се правовремено предузеле мере за њихово одговарајуће смањивање и довођење у сагласност са продајним ценама.

Обрачун трошкова у ППС-у у доброј мери остварује се не само конвенционалним него и савременим методама обрачуна трошкова пословања.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Sizer, J.: „An Insight into Management Accounting“, Penguin books, 2001

[2] Авакумовић Ч., Јањић Д., Авакумовић Ј., „Преговарање као процес повећања ефикасности ППС-а“, часопис ИМК-14, Истраживање и развој, год XV, бр(30-31), 1-2/2009, 151-155

[3]Новковић В., „Менаџмент у савременом грађевинарству“, часопис Изградња, Београд, 2003.

3. Ferry, D.J. and Brandon, P.S. „Cost planning of buildings“, Collins, London, 1997.

4. Harris, F. and Mc Caffer, R. „Modern construction management“, Granada, London, 1998

5. Авакумовић Ч., Авакумовић Ј., Вујачић Н., Милинковић М.“Управљање организационим променама у ППС-у, часопис ИМК 14 октобар, број 39 2/2011Крушевац.

6.Авакумовић Ч., Авакумовић Ј.:“Економика бизниса“, ВТШ, Нови Београд, 2008.

COST CONTROL FOR BUSINESS PRODUCTION SYSTEM

Abstract:

In the process of restructuring the economy, increase the number of small and medium-and BPS's. To make the business of BPS's been more successful you need to managers planning and control costs. As planned and implemented cost control, will be the subject of this paper.

Key words: cost, control, profit, loss, and the system of standard costing Perth / cost.



Bulatović M.¹

LOGISTIKA I KVALITET

Abstrakt:

Ako je logistika procesa sve osim čistog tehnološkog procesa nastanka proizvoda, onda je sistem menadžmenta kvalitetom poslovnog sistema prvenstveno usmjeren upravo na logistiku sistema.

Logistika je upravljanje procesima podrške u poslovnom sistemu kao što je: upravljanje narudžbinama, upravljanje zalihama, upravljanja skladištenjem, upravljanje distribucijom, upravljanje nabavkom materijala, upravljanje transportom, organizacija i dr.

Logistika upućuje na organizacione metode podrške poslovnom sistemu a sistem menadžmenta kvalitetom je podrška opštoj organizaciji poslovnog sistema koji, prvo omogućava a zatim i nameće funkcionisanje logistike.

Ključne riječi: logistika, menadžment kvalitetom, organizacija, poslovni sistem.

1. UVOD

Modeli upravljanja i odlučivanja u menadžmentu sistemom kvaliteta i logistici su slični, ali se razlikuju po načinu i vremenu nastanka.

Elementi logistike u organizaciji su strukturalni procesi kao dio poslovnog sistema, od čijeg kvaliteta realizacije zavisi osnovna djelatnost preduzeća i njegov tržišni uspjeh.

Upravljanje sistemom kvaliteta je nadgradnja logističkih elemenata sa karakteristikom neprekidnosti i napredovanja korak po korak.

Menadžment sistemom kvaliteta u logistici bazira se na naučnim metodama i tehnikama upravljanja i unapređenja kvaliteta kao i na odgovarajućim podlogama i podacima – definisanim performansama pojedinih logističkih procesa.

Analizom performansi logističkih procesa utvrđuju se neusaglašenosti i definišu pravci unapređenja kvaliteta.

Logističke performanse predstavljaju veličine kojima se izražavaju ne samo pojedinačne osobine logističkih elemenata već i odnos više funkcija ili aktivnosti, što je za integrisano upravljanje kvalitetom u logistici od posebnog značaja.

2. LOGISTIKA

Poslovna logistika proučava veoma relevantno područje ekonomije koje se odnosi na tok roba u svim oblicima i promjenama na relaciji dobavljač materijala i dijelova – kupac(potrošač gotovih proizvoda).

Osnovna koncepcija poslovne logistike sastoji se u integracijskom pristupu transporta, skladištenja, zaliha, optimalne manipulacije robom, informacijsko-komunikacijskog sistema i faktora čovjek u cijelom procesu. Takav pristup treba da omogući sniženje troškova uz kontinualan i ravnomjeran tok robe u procesu reprodukcije, kako na nivou preduzeća tako i šire, do nivoa međunarodne robne razmjene [1].

Koncept poslovne logistike predstavlja najširi pristup integraciji sistema zato što uključuje i povezuje sve aktivnosti toka robe u procesu reprodukcije od dobavljača materijala (sirovina) do korisnika gotovog proizvoda.

Poslovna logistika preduzeća obuhvata:

- Projektovanje logističke mreže.
- Upravljanje lancem snabdijevanja.
- Upravljanje tražnjom i customer service.
- Upravljanje nabavkom.
- Upravljanje zalihama.
- Skladištenje.

¹ Prof. dr Miodrag Bulatović, akademik IACG i IAS, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora, bulatovm@yahoo.com

- Rukovanje materijalom.
- Upravljanje transportom.
- Outsourcing logističkih operacija.
- Logistički informacijski sistemi.
- Finansije.
- Mjerenje logističkih performansi.
- Faktor čovjek
- Globalna logistika.

Logistički sistem je skup elemenata tehničke, tehnološke, organizacijske, ekonomske i pravne prirode s ciljem optimizacije tokova materijala, roba, informacija, energije i ljudi u preduzeću i na određenom geografskom području radi ostvarenja najvećih ekonomskih efekata.

3. LOGISTIČKE PERFORMANSE

Zahtjevi korisnika na savremenom tržištu logističkih usluga stalno generišu zahtjeve za promjenom u nivou kvaliteta realizacije usluga.

Po pravilu, poboljšanje nivoa kvaliteta realizacije usluga u oblasti logistike vezane za tokove materijala i odnosi se na: povećanje brzine transporta, skraćivanje vremena isporuke, povećanje tačnosti isporuke, povećanja sigurnosti robe, i dr.

Ovakve tržišne tendencije i konfliktnost ciljeva dovele su do krupnih strukturnih promjena u konceptu realizacije logističkih aktivnosti. Osnovne oblasti ovih promjena su:

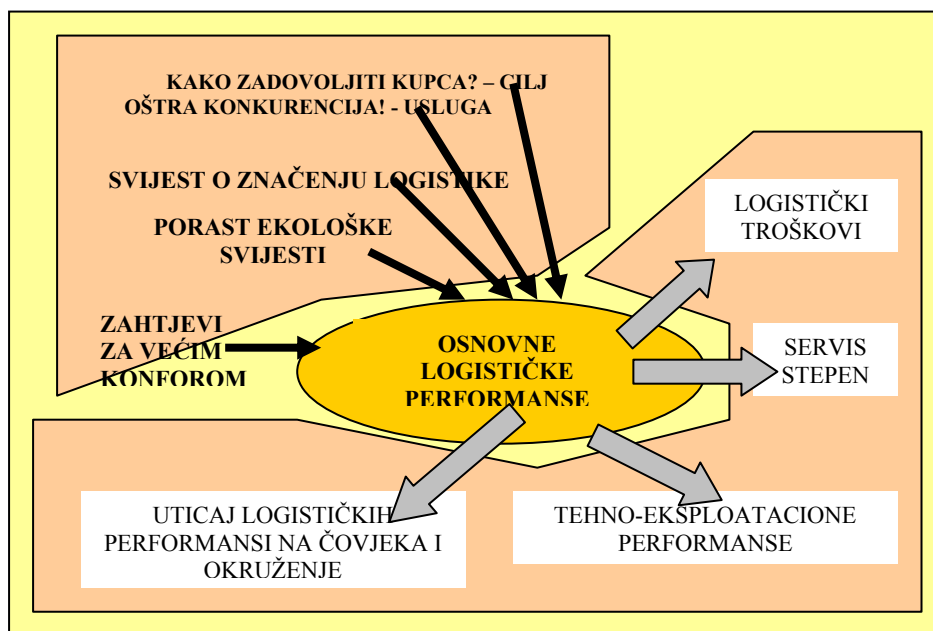
- lociranje, koncept, način organizacije, kategorizacija i funkcije logističkih centara.
- tehnologije realizacije osnovnih logističkih procesa (transportnih, pretovarnih i skladišnih).
- informacione tehnologije koje obezbjeđuju funkcionisanje logističkih sistema.
- metode i postupci strateškog, taktičkog i operativnog planiranja i upravljanja logističkih procesa.
- metode i postupci praćenja, mjerenja i analize performansi logističkih sistema.

Ove promjene nametnule su u oblasti logistike određene zahtjeve svakom od sistema koji učestvuju u realizaciji robnih tokova. Ti zahtjevi se najčešće iskazuju skupom vrijedosti odgovarajućih pokazatelja nazvanih **logističkim performansama**. [1]

Logističke performanse su različiti parametri, koeficijenti i pokazatelji u logistici:

- *Logistika nabavke* - broj prispjelih i obrađenih pošiljki po čovjek časa, vrijeme prijema robe po prispjeloj pošiljci, stepen iskorišćenja istovarnih sredstava.
- *Transport (i tokovi materijala)* – prosječno vrijeme realizacije transportnog naloga, iskorišćenje transportnih sredstava, pređeni put po vozilu, pređeni put po vozaču, prosječno vrijeme trajanja opravki.
- *Skladištenje (i komisioniranje)* - stepen iskorišćenja skladišne površine, iskorišćenje visine skladišta, iskorišćenje zapremine skladišta, iskorišćenje kapaciteta skladišnih sredstava, prosječno vrijeme komisioniranja narudžbe.
- *Distributivna logistika* – broj otprema po danu, broj obrađenih naloga po radniku, vrijeme isporuke narudžbe itd.

Logističke performanse su rezultat strategije poslovanja, organizacije rada, i primijenjenog nivoa tehnike, tehnologije i informatike u kompaniji (sl.1).



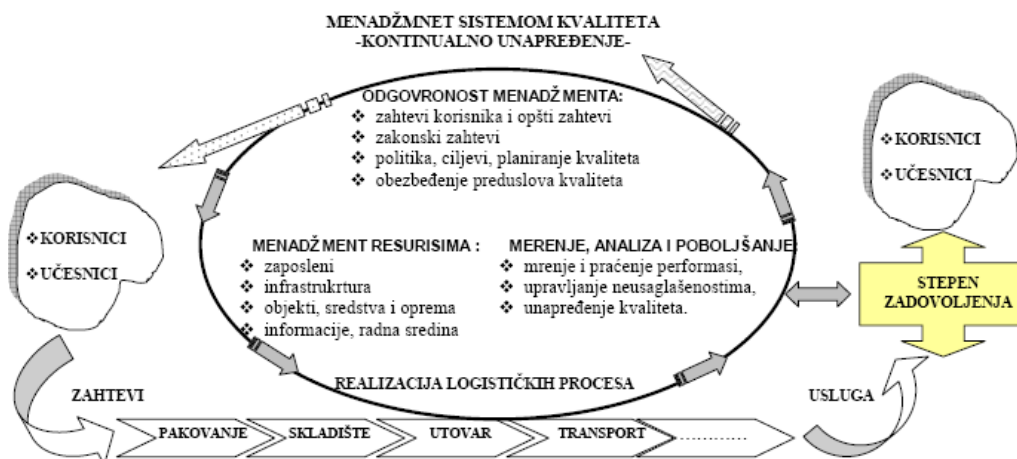
Sl.1. Struktura osnovnih logističkih performansi

Ukoliko izvršimo poređenje *sistema menadžmenta kvalitetom* sa *logistikom* primijetićemo da se podudaraju u većini stavki. Ova podudarnost nije slučajna, zato što *sistem menadžmenta kvaliteta* upravlja *logistikom* a ne obratno [1].

4. KVALITET U LOGISTICI

Logističke performanse su osnov upravljanja sistemom kvaliteta u logistici. Determinisanje performansi u direktnoj je vezi sa vizijom i ciljevima organizacije na čemu se temelji upravljanje sistemom kvaliteta.

Metode i modeli mjerenja logističkih performansi omogućavaju strateško i operativno upravljanje performansama kvaliteta, što predstavlja osnovnu vezu ili čak i znak jednakosti upravljanja logistikom i upravljanja sistemom kvaliteta determinisanih procesnim pristupom (sl.2) .



Sl.2 Procesni pristup logističkim uslugama [3]

Kvalitet logističkih djelatnosti često zaostaje za kvalitetom materijalnih proizvoda i usluga, uglavnom zbog toga što kupac – krajnji korisnik ne vidi performanse logistike, koje su, za njega podjednako važne kao i kvalitet proizvoda koji konzumira.

U vrijeme kada su materijalni proizvodi različitih proizvođača po svom dizajnu i kvalitetu sve sličniji, kvalitet logističkih elemenata postaje ključni faktor tržišne konkuretnosti različitih proizvođača, što je direktan zadatak upravljanja sistemom kvaliteta – integrisanim sistemom kvaliteta u organizaciji.

Navedeni trendovi posebno utiču na kvalitet u logistici. Globalizacija svjetske privrede, gdje se proizvodi u jednom a troši u sasvim drugim dijelovima i regionim svijeta, u velikoj mjeri se zasniva na kvalitetu logističkih usluga.

Stav o očekivanom i ostvarenom kvalitetu, kao i stepenu zadovoljenja zahtjeva korisnik uglavnom se formira na osnovu: kvaliteta logističke usluge, odnosno skupa performansi kao što su: pouzdanost, vrijeme isporuke, tačnost vremena isporuke, fleksibilnost, učestalost, informisanost i dr.

Kvaliteta logističkog sistema, odnosno elemenata kao što su: imidž i reference, sertifikat sistema kvaliteta, primijenjene logističke strategije i tehnologije, odgovornost, kompetentnost i stručnost zaposlenih, lokacija, izgled i oprema objekata i prostora, povezanost i stanje infrastrukture, pokrivenost logističke mreže, tehničko stanje sredstava i opreme.

Upravljanje sistemom kvaliteta u logistici predstavlja uspostavljanje efikasnog sistema protoka roba, usluga i informacija u integrisanom logističkom lancu .

Sistem upravljanja kvalitetom u logistici prije svega podrazumijeva: ljudske resurse, transportno saobraćajnu infrastrukturu u logističkim mrežama, logističke centre, distributivne centre, terminale, skladišne objekte i prostore, transportna i pretovarna sredstva, manipulativnu i skladišnu opremu, informatičku podršku, poslovne objekte, prostor i radnu sredinu, organizacionu strukturu, finansijska sredstva i dr.

Kroz odgovarajuće dokumente kvaliteta (procedure, uputstva i zapise) definišu se zahtjevi u skladu sa strukturom i obimom logističkih zahtjeva.

5. LOGISTIKA U FUNKCIJI POSLOVNE IZVRNOSTI

Logističke usluge imaju višestruko značenje, od kojih se izdvajaju sljedeći postulati:

1. logističke usluge kao aktivnost preduzeća za povezivanje svih poslovnih činilaca u funkciji realizacije proizvoda,
2. logističke funkcije kao mjera prostorne i vremenske transformacije proizvoda
3. logističke usluge kao aktivnosti preduzeća vezane za isporuku proizvoda i opsluživanje tržišta
4. kvalitet logistike kao sveobuhvatne filozofije preduzeća.

Cilj preduzeća mora biti da logistički sistem stavi u funkciju očekivanja tržišta i tada je neophodno da taj sistem direktno orjentiše na kupca, da definiše njegove zahtjeve i identifikuje njegova očekivanja.

Neophodno je promijeniti pristup planiranja i upravljanja logističkim procesima i sistemom u cjelini i preći sa internih potreba na zadovoljenje eksternih potreba tj. potreba tržišta [2].

U sistemu logistike izdvajaju se sljedeći bitni procesi: opsluživanje kupca, servisiranje proizvoda, skladištenje i transport čime se pokriva osnovni tok kretanja robe – proizvoda od porudžbine do isporuke kupcu, uz neophodnu informatičku podršku primjenom savremenih informacionih sistema.

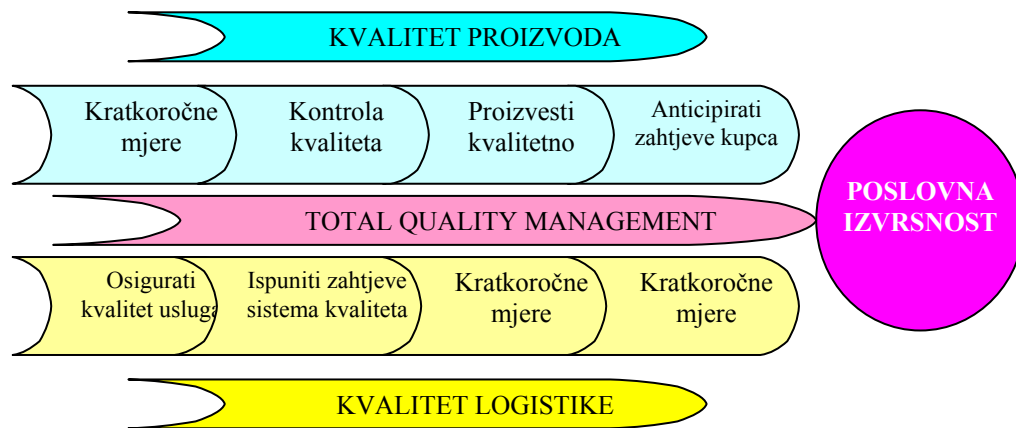
Da bi se ostvarilo upravljanje logistikom potrebno je definisati područja koja čine osnovu za vrednovanje produktivnosti logistike a s tim i vrednovanje logističkih usluga. Na sl.3 prikazano je osam karakterističnih područja kao osnovnih faktora uspjeha logističkih usluga [2].



Sl.3 Karakteristična područja kao faktori uspjeha logističkih usluga

U oštroj konkurenciji na tržištu, prednost a s tim i veće mogućnosti za opstanak imaće organizacije koje, pored stavljanja akcenta na kvalitet proizvoda, istu pažnju poklanjaju logistici kako internog tako i eksternog karaktera u cilju prestiža u konkurenciji gdje se uslovi za kvalitet proizvoda poistovjećuju sa uslovima za kvalitet logističkih procesa [2].

Rezultat takve jednakosti je poslovna izvrsnost preduzeća (sl.4)



Sl.4 Uslovi ostvarivanja poslovne izvrsnosti

Stepen zadovoljstva kupac formira se na logističkim performansama kao što su: pouzdanost proizvoda, vrijeme isporuke, tačnost vremena isporuke, informisanost o proizvodu, kvalitet servisnih usluga i dr., sa kojima je u neposrednom kontaktu. Ova grupa performansi predstavlja direktnu mjeru kvaliteta logističkih procesa preduzeća u odnosu na kupca.

Svoje zadovoljstvo na širem planu kupac formira na elementima logistike kao što su: imidž i reference organizacije, sertifikat po osnovu primijenjenih standarda, prije svega sistema kvaliteta, primijenjenih logističkih strategija i tehnologija, kompetentnost i stručnost zaposlenih, izgled i oprema prostora i objekata, pokrivenost logističke mreže, tehničko stanje sredstava i opreme, primijenjene logističke strategije i dr. Ova grupa logističkih procesa omogućava kupcu da ocijeni u kojoj mjeri proizvođač i davalac usluge može da ispuni i zadovolji njegove zahtjeve.

ZAKLJUČCI

Zadatak logistike jeste da prati, proučava, analizira i ispituje sve pojave na tržištu traženih proizvoda, u tehnološkom procesu proizvodnje, u kvalitetu usluga, u transportu, u skladištenju, u pakovanju i rukovanju proizvodima, u snabdijevanju proizvodnje i dr.

Logističke performanse su osnov upravljanja sistemom kvaliteta u logistici. Determinisanje performansi u direktnoj je vezi sa vizijom i ciljevima organizacije na čemu se temelji upravljanje sistemom kvaliteta.

Sistem upravljanja kvalitetom u logistici obuhvata: ljudske resurse, transportno saobraćajnu infrastrukturu u logističkim mrežama, logističke centre, distributivne centre, terminale, skladišne objekte i prostore, transportna i pretovarna sredstva, manipulativnu i skladišnu opremu, informatičku podršku, poslovne objekte, prostor i radnu sredinu, organizacionu strukturu, finansijska sredstva i dr.

Cilj preduzeća mora biti da logistički sistem stavi u funkciju očekivanja tržišta i tada je neophodno da se taj sistem direktno orijentiše na kupca, da definiše njegove zahtjeve i identifikuje njegova očekivanja.

LOGISTICS AND QUALITY

Abstract: *If the logistics of the process all but the technological process of creating a product, then the system of quality management systems business is primarily focused precisely on the logistics system.*

Logistics is the process management support in the business system, such as: managing orders, inventory management, warehousing, distribution management, procurement of materials management, transportation management, organizations and others.

Logistics refers to the organizational methods of the business support system and a quality management system is to support the general organization of the business system which allows first and then imposes a functioning logistics.

Key words: logistika, quality management, organization, business system.

LITERATURA

- [1] Bulatović, M., **Logistika**, Mašinski fakultet, Podgorica, 2007.
- [2] Gajić, V., Kojić, Đ., Nikolčić, S., **Kvalitet logističkih usluga i poslovna izvrsnost**, Festival kvaliteta, Kragujevac, 2006.
- [3] Kilibarda, M., Zečević, S., Tadić, S., **Procesni pristup upravljanju kvalitetom u logistici**, Festival kvaliteta, Kragujevac, 2006.
- [4] Busi, M., **A management Framework for Performance management of Integrated Logistics Operations**, Animal Conference of POMS, Chicago, 2005.



Svetislav Lj. Marković¹, Armin Kajević², Dragan Stojanović³, Darko Čpajak⁴

UTICAJ STANDARDIZACIJE, TIPIZACIJE I UNIFIKACIJE NA OBLIK MAŠINSKIH PROIZVODA

Rezime:

Pojava velikog broja proizvoda iste ili slične namene za posledicu je imala razvoj novih oblika. Razvoju oblika doprinose i ograničeni resursi sirovina, od kojih se izrađuju mašinski proizvodi, i energije, koju troše. Najveći doprinos u razvoju oblika i oblikovanja mašinskih proizvoda dali su računari i računarski programi. Njihova primena znatno olakšava i ubrzava mnoge konstruktorske poslove.

Ključne reči: oblik mašinskih proizvoda, oblikovanje, standardizacija, tipizacija, unifikacija

1. UVOD

Kreiranje prihvatljivih i primamljivih oblika proizvoda može da bude presudan faktor za firmu-proizvođača sa stanovišta njene egzistencije na tržištu i preživljavanja u bespoštednoj utakmici protiv velike i jake konkurencije.

Izučavanjem oblika proizvoda sa svih aspekata, kao i značaja uticajnih faktora na oblik proizvoda, može se puno uticati na poboljšanje kvaliteta, smanjenje troškova proizvodnje i, posebno, poboljšanje dizajna proizvoda. S obzirom da se tokom projektovanja i konstruisanja mašinskih elemenata i sklopova vrši stvaranje konstrukcionog rešenja, između ostalog i oblika i dizajna proizvoda, tim aktivnostima je potrebno posvetiti najveću pažnju.

Industrijsko oblikovanje predstavlja stvaralačku aktivnost čiji cilj je da odredi formalne kvalitete industrijskih proizvoda, uzimajući u obzir spoljni oblik, ali i strukturalne i funkcionalne elemente i odnose. Zbog toga vrhunski konstruktor mora posedovati logiku, intuiciju, maštovitost, talenat i iskustvo.

Oblikovanje mašinskih elemenata i sistema predstavlja kreativni proces u kome se definišu oblik i dimenzije proizvoda sa više aspekata: opterećenja (naprezanja), nosivosti (dimenzionisanja), materijala izrade, tehnološkičnosti (načina izrade), estetike, eksploatacije, ekologije, ergonomije, održavanja. Iz toga proizilazi da pravilno oblikovan proizvod mora, pored ekonomskih zahteva, ispuniti i kulturne, sociološke, humanističke, ekološke i ergonomske potrebe korisnika (potrošača).

Pod industrijskim oblikovanjem podrazumeva se ne samo dizajn proizvoda, ili industrijska estetika, već i niz drugih funkcija i zadataka koji se postavljaju pred konstruktora. Oblikovanje je stvaralačka aktivnost pri kojoj se preispituju karakteristike kompletnih proizvoda i njihovih elemenata. Osnovni zadatak oblikovanja je stvaranje kvalitetnih, funkcionalno i estetski prihvatljivih proizvoda, uz obavezno postizanje optimalne ekonomičnosti i produktivnosti u radu. Prema tome, industrijsko oblikovanje je aktivnost čiji primarni cilj je kreativna primena saznanja iz tehničkih nauka, primenjene umetnosti i humanog inženjerstva, uz integraciju svih znanja i veština proizvodnog inženjerstva i marketinga u koncipiranju proizvoda namenjenog zadovoljenju potreba i želja korisnika (kupaca). Istovremeno, konstruktor mora uvek imati na umu da troškovi održavanja direktno utiču na cenu svakog proizvoda.

¹ Dr Svetislav Lj. MARKOVIĆ, profesor, Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, 32000 Čačak, Svetog Save 65, Srbija, E-mail: svetom@open.telekom.rs.

² Armin KAJEVIĆ, maš. ing., Prijepolje.

³ Dragan STOJANOVIĆ, maš. ing., Valjevo.

⁴ Darko ČPAJAK, maš. ing., Stranjani, Prijepolje.

Prilikom oblikovanja industrijskih proizvoda posebno se mora voditi računa o:⁵

- *Funkcionalnosti*. Proizvod mora biti prilagođen potrebama korisnika, uz obezbeđenje pozitivnog iskustva vezanog za njegovu eksploataciju.
- *Ljudskom faktoru*. Vreme potrebno za obuku za rukovanje proizvodom mora biti minimizirano, uz povećanje korisnosti, bezbednosti i pogodnosti održavanja.
- *Održavanju*. Vreme popravke proizvoda mora biti što kraće, ali bez negativnih posledica u estetskom smislu.
- *Produktivnosti*. Dizajnerska rešenja moraju biti produktivna u skladu sa proizvodnim sposobnostima proizvođača.
- *Troškovima vezanim za izradu delova i mašinsku obradu proizvoda*. Proces proizvodnje mora biti ekonomski opravdan, a izrada delova usklađena sa obimom proizvodnje i ispod gornje granice troškova proizvodnje.

2. STANDARDIZACIJA, TIPIZACIJA I UNIFIKACIJA KAO FAKTORI OBLIKA MAŠINSKIH PROIZVODA

Cilj standardizacije i tipizacije je da se uklone raznolikosti između pojedinih delova predviđenih za istu svrhu. Izvode se na taj način što se između određenog broja proizvoda ili delova odabere jedan ili više njih, koji najbolje odgovaraju potrebama, s tim da preostale mogu potpuno zameniti. Ti elementi su u proseku najbolji, ili najprikladniji za postavljene zahteve. Standardizacija se primenjuje u svim ljudskim delatnostima, mada sami standardi nisu strogo definisani prema određenim pravilima. Standardizacija i tipizacija omogućavaju: velikoserijsku i masovnu proizvodnju, smanjenje zaliha materijala i gotovih proizvoda, rezervnih delova i alata, ograničavanje broja tipova i dimenzija proizvoda, povećanje kvaliteta proizvoda, olakšanje i ubrzanje procesa konstruisanja i projektovanja, smanjenje potrošnje energije i troškova kontrole, zaštitu čovekove okoline.

Pod tipizacijom se podrazumeva razvoj familije proizvoda istog tipa. Pri ugradnji više tipiziranih delova u jedan mašinski sistem postoji opasnost da se tipizacija pretvori u svoju suprotnost, jer se povećava potreba za nabavkom više različitih delova (sklopova) u manjem broju komada, odnosno povećava se broj rezervnih delova. To se rešava unifikacijom.

Tipizacija obuhvata razradu i izbor najpovoljnijeg niza istovrsnih proizvoda i ona je bazirana na najuspešnijim i najcelishodnijim rešenjima iz celog opsega postojećih oblika, veličina, kvaliteta i dimenzija.

Kod velikih serija se sprovodi unifikacija, odnosno korekcija oblika sličnih proizvoda u cilju izbegavanja razlike. Minimiziranje broja tipiziranih delova (sklopova) ostvaruje se ugradnjom istih i tamo gde njihove karakteristike neće biti u potpunosti iskorišćene. Time se povećava broj komada istog artikla, smanjuje se cena i pojednostavljuje održavanje. Postupak poistovećivanja tipiziranih delova (sklopova) u jednom mašinskom sistemu naziva se unifikacija. Unifikacijom se mogu postići znatni efekti kod složenih proizvoda, unificiranjem podsklopova i agregata.

Unifikacija obuhvata:

- nalaženje i utvrđivanje jedinstvenih kriterijuma za konstruisanje, izradu i ispitivanje materijala, polufabrikata i proizvoda,
- utvrđivanje zajedničkih konstrukcionih detalja, mašinskih delova i sklopova koji će se koristiti u velikom broju mašina i postrojenja,
- preduzimanje potrebnih mera za ostvarenje principa razmenljivosti delova, sklopova i proizvoda.

Primena unifikacije se sastoji u korišćenju jednoobraznih elemenata u jednoj ili više različitih konstrukcija, čime se postiže smanjenje broja različitih elemenata, pojeftinjuje izrada, uprošćava eksploatacija i održavanje...

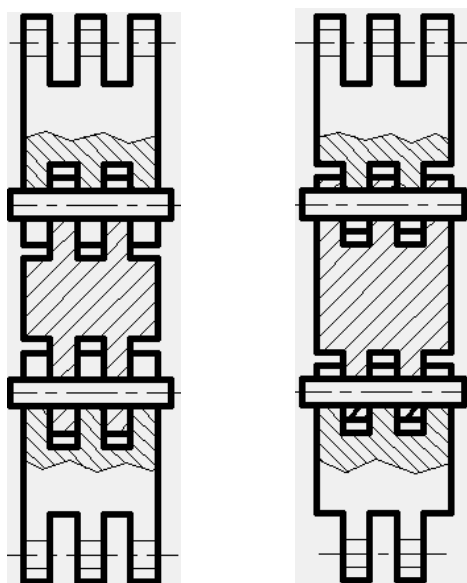
⁵ Eckles W. R.: *Business Marketing Management*.

Unifikacija konstrukcionih detalja odnosi se na stvaranje jednoobraznosti u oblicima i merama različitih konstrukcionih detalja mašinskih proizvoda, kao što su:

- prečnici, konusi, žljebovi i prelazi kod osovina i vratila,
- prečnici, tipovi navoja, naleganja i klase tačnosti zavrtnejeva i navrtki,
- moduli, tipovi zubaca i klase tačnosti kod zupčanika...

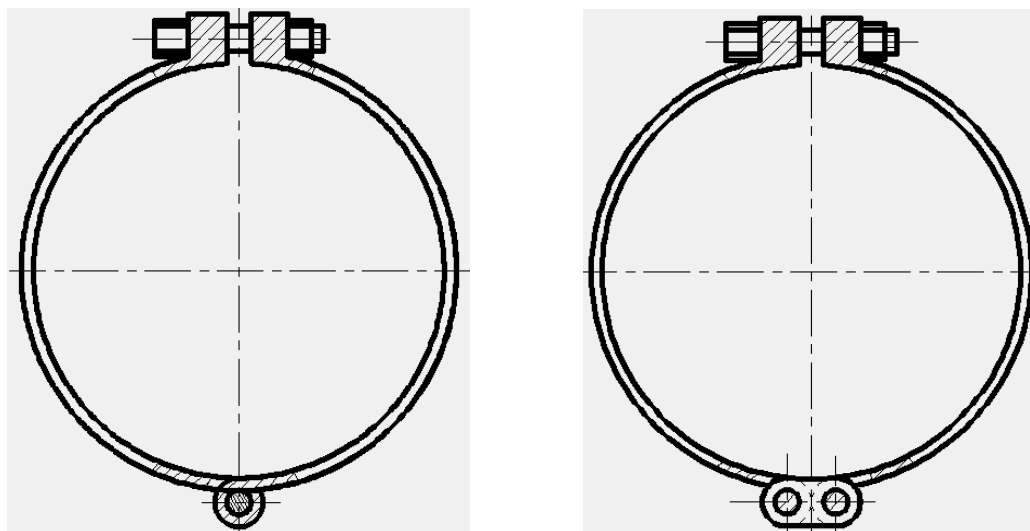
Ovakva unifikacija omogućava da se smanji broj vrsta obradnih, mernih i montažnih alata.

Jedan od primarnih zadataka konstruktora je da ostvari maksimalnu unifikaciju oblika i dimenzija mašinskih proizvoda. Od posebnog značaja je unifikacija proizvoda izloženih velikim višestruko ponavljajućim opterećenjima. Transportni lanac (na slici 1-levo) sastavljen je od dva tipa karika. Konstrukcija na slici 1-desno je znatno racionalnija, jer su karike unificirane.



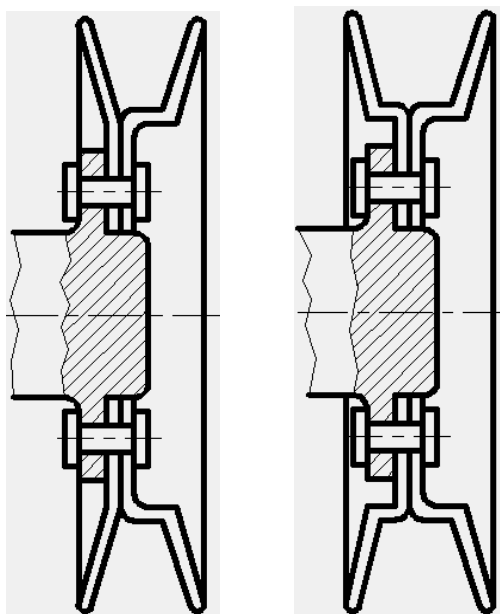
Slika 1. Neracionalna (levo) i racionalna (desno) konstrukcija transportnog lanca

Spoljni obruč (slika 2-levo) sastoji se od dva dela teška za izradu. Spajanje pomoću poluge (slika 2-desno) omogućava unifikaciju oblika, jer su obe polovine obruča istovetne.



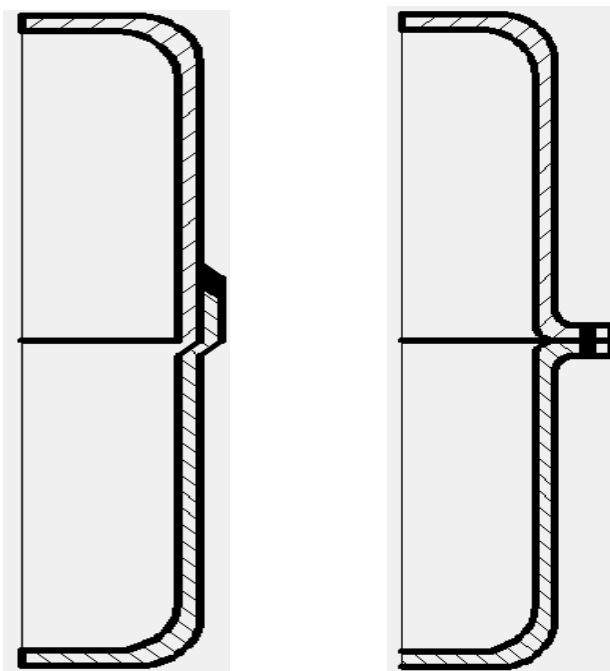
Slika 2. Neracionalna (levo) i racionalna (desno) konstrukcija obruča

Oblik kaišnika izrađenog od dva otpreska može biti pojednostavljen unifikacijom (slika 3). Na desnoj strani slike prikazan je kaišnik sastavljen od dve istovetne polovine.



Slika 3. Neracionalna (levo) i racionalna (desno) konstrukcija kaišnika

Gotovo istovetna situacija je i kada je u pitanju oblikovanje rezervoara izrađenog zavarivanjem od dve polovine dobijene dubokim izvlačenjem. Na desnoj strani (slika 4) je racionalniji oblik rezervoara.



Slika 4. Neracionalna (levo) i racionalna (desno) konstrukcija rezervoara

3. ZAKLJUČAK

Oblik predstavlja karakteristiku proizvoda, koja izaziva čulni osećaj kod čoveka. On se najčešće doživljava čulom vida (vizuelno), ili čulom dodira pri neposrednom kontaktu sa proizvodom. Zbog toga je oblik specifičan doživljaj svakog pojedinca, pa se ne može govoriti o apsolutno dopadljivom obliku, niti o obliku koji se nikome ne sviđa.

Oblikovanje predstavlja proces definisanja oblika proizvoda tokom projektovanja i konstruisanja, sa ciljem da se obezbedi njegova bolja funkcionalnost, jednostavnija izrada, kompaktnija konstrukcija, lakša eksploatacija, privlačniji izgled – veća dopadljivost... Sa druge strane, pod oblikovanjem se može

podrazumevati proces formiranja oblika proizvoda tokom njegove izrade. Prilikom stvaranja dobrog oblika industrijskog proizvoda od presudne važnosti je detaljno sagledati sve zahteve i ograničenja vezana za njegov dizajn, trenutnu modu i stil, dopadljivost, način izrade i eksploatacije, mogućnosti plasmana na tržištu, postojeća rešenja konkurentskih firmi i druge, a zatim ih ispuniti u procesu oblikovanja. Pojedini oblici proizvoda pobuđuju želju za njihovim posedovanjem, dok drugi deluju potpuno indiferentno (neutralno) na kupca, a treći deluju prilično odbojno iako u potpunosti ispunjavaju svoju osnovnu funkciju. Sve su to razlozi zbog kojih se obliku proizvoda pridaje veliki značaj i posvećuje znatna pažnja, kako bi se omogućilo maksimalno iskorišćenje svih raspoloživih materijalnih i tehnoloških resursa, kao i sveukupnog znanja i iskustva koje konstruktorima stoji na raspolaganju.

4. LITERATURA

- [1] Vitas D. J.: *Osnovi mašinskih konstrukcija I i II*, „Naučna knjiga“, Beograd, 1979.
- [2] Eckles W. R.: *Business Marketing Management*, Prentice-Hal, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- [3] Jovičić S.: *Osnovi konstruisanja*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002.
- [4] Kuzmanović S.: *Konstruisanje, oblikovanje i dizajn I i II*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2006.
- [5] Marković S.: *Kvalitetno oblikovanje mašinskog sistema – prvi korak do kvalitetnog proizvoda*, 35. Nacionalna konferencija o kvalitetu „Festival kvaliteta 2008“, Zbornik radova, Kragujevac, 13÷15. maj 2008, str. 5.1÷5.4.
- [6] Marković S.: *Technological suitability of machinery parts*, Proceedings 12th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“ TMT 2008, Istanbul, Turkey, 26÷30. August 2008, p. 377÷380.
- [7] Marković S.: *Razvoj oblika mašinskih proizvoda*, monografija, VŠTSS, Čačak, 2012.
- [8] Murray A. J., O’Driscoll A.: *Strategy and process in marketing*, Prentice-Hal, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [9] Ognjanović M.: *Oblik mašinskog dela*, Prvi skup o konstruisanju, oblikovanju i dizajnu „KOD 2000“, Zbornik radova, Novi Sad, 2000.
- [10] Orlov P. I.: *Osnovi konstruisavanja I i 2*, „Mašinstrojenje“, Moskva, 1988.
- [11] Tanasijević S.: *Dizajn proizvoda*, Prvi skup o konstruisanju, oblikovanju i dizajnu „KOD 2000“, Zbornik radova, Novi Sad, 2000.
- [12] Tanasijević S.: *Tribološki ispravno konstruisanje*, monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2004.
- [13] Charlotte & Peter Fiell: *Design 20th Century*, Taschen, Köln-London-Los Angeles-Madrid-Paris-Tokyo, 2006.

EFFECTS OF STANDARDIZATION, TYPE CLASSIFICATION AND UNIFICATION ONTO THE FORMS OF MECHANICAL PRODUCTS

Abstract:

Emergence of big number of products of the same or similar purpose resulted in the development of new forms. The development of new forms is influenced by limited resources of raw materials which are used to design products in mechanical engineering, as well as by the energy needed for the production. The largest contribution to the development and design of mechanical products provide computers and computer programs. Their use greatly facilitates and speeds up many of the designers' work.

Key words: mechanical products' form, shaping, standardization, type classification, unification

Acknowledgment

This work has been performed within the project TR 35011. This project is supported by the Republic of Serbia, Ministry of Science and Technological Development, which financial help is gratefully acknowledged.



Sejfo Papić¹, Tajma Ibrović²

UTICAJ INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA NA BRZINU STALNOG POBOLJŠANJA GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE

Rezime:

U radu je tretiran uticaj stupnja primjene informatičkih tehnologija na brzinu poboljšanja glavnog procesa proizvodnje. Istraživanje je izvedeno na šest različitih metaloprerađivačkih firmi preko anketnih upitnika. Jedan anketni upitnik se odnosio na stupanj primjene informatičkih tehnologija u praćenju glavnog procesa proizvodnje, dok se drugim upitnikom utvrdio procenat ostvarenih ciljeva u procesu proizvodnje. Procenat ostvarenih ciljeva je praćen za period od tri godine. U ovom radu je data regresiona analiza i diskusija rezultata istraživanja.

1. UVOD

Krajem 20. vijeka došlo je do naglog razvoja nauke i tehnike što je uslovalo eksponencijalni napredak i usavršavanje informatičkih tehnologija, kako njihovog hardverskog dijela, tako i na polju softverske podrške. Imajući u vidu da je proces stvaranja novog proizvoda osnova za egzistenciju i postojanje društva, informatičke tehnologije najveću primjenu nalaze upravo za upravljanje proizvodnim procesima.

Samo upravljanje procesima zahtijeva donošenje pravovremenih odluka. Kako je odvijanje procesa uslovljeno obimnim skupom faktora koji podrazumijevaju memorisanje i obradu velikog broja informacija i podataka, računarske tehnologije su postale neminovnost svake organizacije i svakog procesa u toj organizaciji. Ono čemu treba da teži svaki proces su neprekidna poboljšanja, koja su moguća samo ako se pravovremeno otkriju nedostaci. Da bi otkrili mane i nedostatke pojedinih aktivnosti u procesu neophodna je komparacija podataka o stvarnom toku procesa i podataka o ciljnim vrijednostima određenih aktivnosti procesa.

Također, treba napomenuti da podaci o stvarnom odvijanju procesa moraju biti raspoloživi istovremeno na više mjesta unutar organizacije, što je bez primjene informatičkih tehnologija, bilo nemoguće. Samim tim odluke o korigovanju aktivnosti u procesu, primjenom računarske tehnike, postaju pravovremenije, sigurnije, preciznije itd. jer u njihovom donošenju učestvuje veći broj uže specijaliziranih ljudi.

2. MJERLJIVOST PERFORMANSI INTRANETA I PERFORMANSI GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE

Pri izboru pitanja vodilo se računa da su direktno ili indirektno vezana za performanse glavnog procesa proizvodnje. Upitnik je prilagođen proizvodnim procesima odabranih uzoraka, a baziran je na pitanjima iz podkriterijuma: 4.3. (Informacioni resursi) i pitanjima glavnog kriterijuma: 5.(Menadžment procesima) TQM VM modela za ocjenjivanje poslovne izvrsnosti organizacije. Pitanja su modifikovana i prilagođena cilju istraživanja.

Da bi dodali određene vrijednosti odgovorima na pitanja koristi se Likertova skala ocjene, kod koje se pomoću vrijednosne tablice unaprijed dodjeljuju vrijednosti, tabela 1.

¹ Sejfo Papić, dipl.ing, „DALLAS BH“ - Sarajevo, BiH, tel. +387 61 862816, e-mail: papicsejfo@bih.net.ba

² Tajma Ibrović, dipl.ing, „DALLAS BH“ - Sarajevo, BiH, tel. +38763304770, e-mail: tajmaibrovic@gmail.com

Tabela 1. Vrijednostna tablica za ocjenu stupnja primjene IT

Pitanje:	Ponudeni odgovor		Dodijeljena vrijednost
Redni broj pitanja	a	Ne koriste se informatičke tehnologije	1
	b	Koristi se samo standardni programi (npr. MS Office)	2
	c	Koriste se specijalni programi na svakom računaru ponaosob	3
	d	Koriste se specijalni programi i umreženost računara	4
	e	Koriste se informatičke tehnologije u sklopu IIS	5

Kvalitet procesa je složen pojam, a obuhvata bazne i funkcionalne osobine kvaliteta.

U bazne osobine kvaliteta procesa spadaju

- Nivo definisanosti procesa (određenost procesa).
- Nivo specijaliziranosti, strukturne i sadržajne određenosti procesa.
- Nivo primjene principa, pravila i metoda inženjeringa procesa.

Dok funkcionalne osobine kvaliteta procesa obuhvataju:

- Uspješnost procesa
- Stabilnost procesa i
- Pouzdanost procesa

O stalnim poboljšanjima glavnog procesa proizvodnje, najbolju sliku će dati promjene, odnosno poboljšanje indikatora kvaliteta glavnog procesa.

Za posmatranje promjene indikatora kvaliteta glavnog procesa uzima se perd od tri godine. Zato je dio upitnika koji se odnosi na promjenu indikatora glavnog procesa, sačinjen tako da se određeni pokazatelji unosa za svaku godinu ponaosob

Takođe, treba napomenuti, da odgovori na dio pitanja daju direktno stanje pojedinih indikatora kvaliteta, dok se vrijednosti za ostale grupe indikatora dobivaju proračunavanjem podataka. Pitanja su sastavljena tako da sadrže sve grupe indikatora kvaliteta glavnog procesa. Međutim, ni jedno preduzeće nema pisanog traga o praćenju svih indikatora kvaliteta, već samo određene. Zato se uzima procenat ostvarenih ciljeva u navedenom periodu kao reprezent poboljšanja glavnog procesa. U tabeli 2, dati su rezultati mjerenja procenta ostvarenih ciljeva.

Tabela 2: Procenat ostvarenih ciljeva po glavnim procesima

	GP-1	GP-2	GP-3	GP-4	GP-5	GP-6
I godina	89,9	88,6	93,8	95,0	95,0	99,2
II godina	92,3	88,8	90,4	95,5	96,7	99,6
III godina	96,57	92,8	92,3	95,8	98,5	99,6

3. REGRESIONA ANALIZA UTICAJA STUPNJA PRIMJENE INFORMATIČKIH TEHNOLOGIJA NA BRZINU POBOLJŠANJA GLAVNOG PROCESA PROIZVODNJE

Da bi smo odredili regresionu jednačinu, koja ujedno predstavlja i matematički model poboljšanja performansi kvaliteta glavnog procesa, potrebno je sastaviti tabelu eksperimentalnih mjerenja.

Tabela 3: Rezultati eksperimentalnih mjerenja

Broj glavnog procesa	X	Y [%]
GP-1	2,5	3,335
GP-2	2,61	2,1
GP-3	1,5	-0,75
GP-4	2,1	0,4
GP-5	1,6	1,75
GP-6	1,3	0,2
Ukupno	11,61	7,035

Veličina X predstavlja ocjenu stupnja primjene IT za praćenje glavnog procesa dok Y predstavlja prosječnu promjenu realizacije ciljeva glavnog procesa za period praćenja procesa.

Prema podacima iz tabele definišu se matrice:

$$Y = \begin{pmatrix} 3,335 \\ 2,1 \\ -0,75 \\ 0,4 \\ 1,75 \\ 0,2 \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & 2,5 \\ 1 & 2,61 \\ 1 & 1,5 \\ 1 & 2,1 \\ 1 & 1,6 \\ 1 & 1,3 \end{pmatrix} \text{ i } X' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2,5 & 2,61 & 1,5 & 2,1 & 1,6 & 1,3 \end{pmatrix}$$

Ako nađemo proizvode $X'X$ i $X'Y$, i sređivanjem matričnih jednačina, pa onda prelaskom na sistem normalnih jednačina, dobija se sistem od dvije jednačine sa dvije nepoznate.

$$\begin{aligned} 6\hat{b}_0 + 11,61\hat{b}_1 &= 7,035 \\ 11,61\hat{b}_0 + 23,97\hat{b}_1 &= 16,5935 \end{aligned}$$

Rješenja datog sistema su:

$$\hat{b}_0 = -2,66 \text{ i } \hat{b}_1 = 1,98.$$

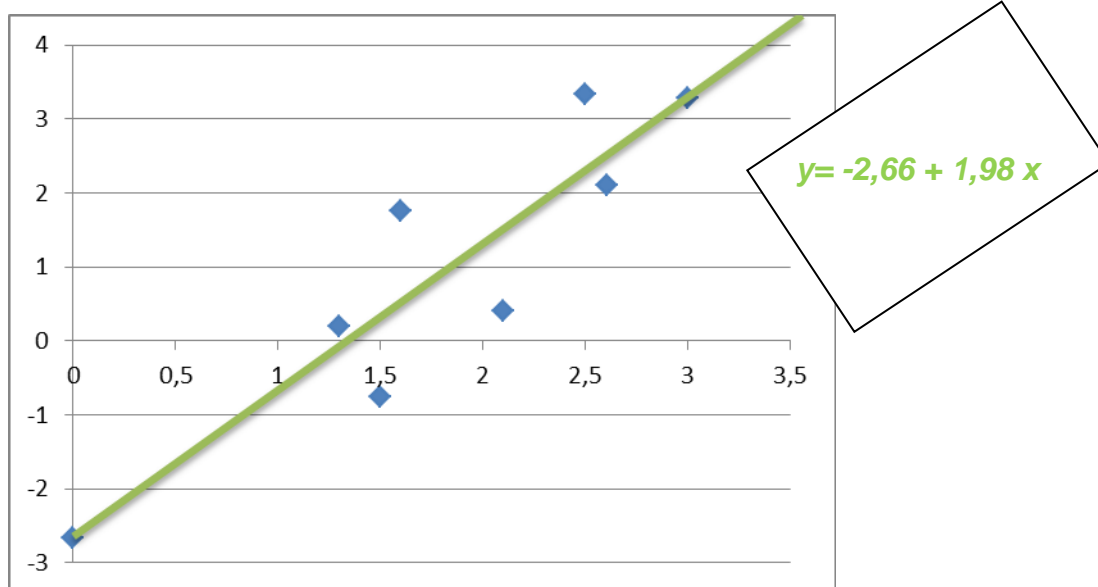
Pa je jednačina regresione prave:

$$y = -2,66 + 1,98x$$

a to je ujedno i regresioni model koji zapisujemo:

$$\hat{y} = -2,66 + 1,98x$$

Apromksimacija podataka datih u tabeli može se grafički prezentovati kao na slici br 1.



Slika 1: Grafičko predstavljanje podataka eksperimentalnog mjerenja i regresionog modela

Nakon određivanja matematičkog modela, da bi se isti mogao koristiti u svrhu predviđanja, potrebno je testirati hipotezu $H_0 : \hat{b}_1=0$. To testiranje se izvodi pomoću F-testa. U tu svrhu formirana je tabela 4 u koju su unijete vrijednosti izračunate regresione, rezidualne i ukupne sume kvadrata.

Na osnovu računom dobijenih rezultata, i za odabrani nivo značajnosti koji iznosi $\alpha=0,05$, te na osnovu stepeni slobode 1 i 4 očitava se $F_{(1,4)}=7,71$ [1].

Pošto je $F_0 > F_\alpha$, hipotezu $H_0 : \hat{b}_1=0$ treba odbaciti u korist alternativne hipoteze

$H_1 : \hat{b}_1 \neq 0$, što znači da postoji funkcionalna zavisnost između promjenljivih X i Y.

4. ZAKLJUČAK

Posmatrajući i analizirajući rezultate regresione analize, da se primijetiti da primjena informatičkih tehnologija direktno utiče na brzinu stalnog poboljšanja glavnog procesa proizvodnje. Čak je uspostavljena i funkcija zavisnosti. Međutim, pri primjeni ovog matematičkog modela, treba uzeti u obzir niz činjenica, koje bi vjerovatno dale nesto drugaciju zavisnost. Treba napomenuti da je istraživanje izvođeno u periodu globalne ekonomske recesije, što je i te kako, uticalo na rezultate mjerenja. Ispitivani uzorak je veoma mali, i kao relevantan pokazatelj poboljšanja glavnog procesa uzeo se samo procenat ostvarenja ciljeva, time se dobio najprostiji matematički model. No, i pored navedenog, da se primijetiti da stupanj primjene informatičkih tehnologija utiče na brzinu poboljšanja glavnog procesa.

LITERATURA

[1] Seferović, E., Bašić, H.: Osnovi metrologije i obrada rezultata mjerenja, Mašinski fakultet Sarajevo, 2005.

[2] Zukić, O., 2009, „Razvoj indikatora kvaliteta u malim i srednjim preduzećima, posmatranim kao sistem kvaliteta“, -Magistarski rad, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica.

[3]Vulanović, V., Stanivuković, D., Kamberović, B., Radaković, N., Maksimović, R., Radlovački, V., Šilobad, M.,2003, „Metode i tehnike unapređenja procesa rada“, IIS –Istraživački i tehnološki centar, Novi sad.

Summary:

The paper deals with the influence of the degree of application of information technology to boost the capital process production. The study was performed on six different metal processing companies through questionnaires. A questionnaire was related to the degree of application of information technology in monitoring the main production process, while the second questionnaire determined the percentage of goals achieved in the production process. The percentage of actual targets is monitored for a period of three years. This paper presents regression analysis and discussion of research results.

С. Стојадиновић¹, В. Мајсторовић²

ОДРЕЂИВАЊЕ РЕДОСЛЕДА ИНСПЕКЦИЈЕ ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ПРИМИТИВА НА НУММ

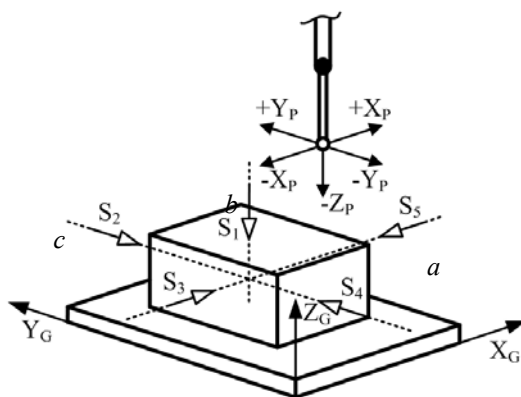
Резиме:

У раду је представљен метод одређивања редоследа инспекције основних геометријских примитива код кутијастих машинских делова у циљу развоја глобалног плана инспекције, једног од саставних чинилаца интелигентног планирања инспекције на НУММ. Метод је заснован на три међусобно управна правца (пет смерова) приступа мерног пипка и правилима која дефинишу редослед инспекције примитива. Резултат је одређена секвенца инспекције за основне геометријске примитиве као што су равна, цилиндар, купа, торуус и свера, на примеру једног мерног предмета.

Кључне речи: НУММ, основни геометријски примитиви, планирање инспекције.

1. УВОД

Иако потиснуте са развојем ласерске мерне технологије НУММ су још увек незаобилазан фактор у индустрији, нарочито за мерење кутијастих и ротационих машинских делова [1]. У последњих десет година се чини велики напор да се смањи укупно време мерења дела на НУММ кроз развој технологија и софтвера за НУММ. С једне стране то је учињено развојем и имплементирањем нових технологија у мерне главе, као што је VAST (Variable Accurate Scanning Technology) мерна технологија, и с друге стране се чини перманентним развојем софтвера за НУММ кроз смањење интероперабилности и развој у области планирања инспекције. Чини се и напор да се развију интелигентне НУММ [2], међутим критична ствар у овим истраживањима је одређивање позиције и оријентације мерног дела на столу НУММ, јер се анализом слике добијене са CCD камере прави грешка, чија вредност за сада превазилази тачност НУММ. Група истраживача [3,4,5] чини напор да посредно, кроз развој интелигентног система за планирање инспекције за делове који се састоје из основних геометријских примитива (ОГП), допринесе развоју интелигентних НУММ. Уопштени развој заснован на примитивним облицима из којих се састоји машински део се разматра у [6].



Слика 1. Правци приступа мерног пипка

Један од битних сегмената у спроведеним истраживањима је и одређивање редоследа инспекције ОГП. Одређивање редоследа инспекције представља карику између локалног плана инспекције и САД модела дела, који је носилац свих потребних метролошких информација о ОГП, а уз помоћ којих је дефинисан метролошки облик мерног предмета. Локални план инспекције према [7], обухвата декомпоновање метролошких примитива, одређивање броја мерних тачака, локализацију мерних тачака и одређивање оптималне путање мерног пипка. Локализацију мерних тачака се детаљно разматра у [8].

Ако се изузму апликациони протоколи дефинисани СТЕР стандардом, у метролошком смислу, мост између САД модела дела и глобалног плана инспекције је издвајање ОГП или њихова екстракција. У

¹ Славенко М. Стојадиновић, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-438, sstojadinovic@mas.bg.ac.rs,

² Проф. др Видосав Д. Мајсторовић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство, 011/3302-407, vmaistorovic@mas.bg.ac.rs

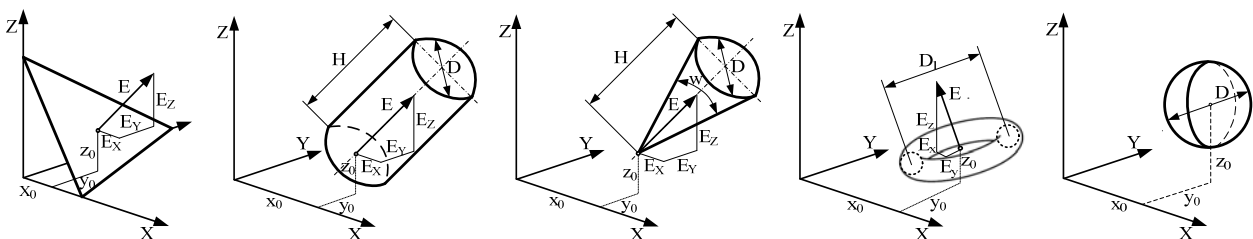
[3,9] дат је онтолошки опис ОГП на бази кога се у објектно оријентисаном окружењу може развити парсер који ће из неког од излазних CAD фајлова узети све потребне метролошке информације и премостити јаз између CAD модела дела и глобалног плана инспекције.

Као што се може закључити из горе наведеног, стратегија плана инспекције на НУММ се састоји из развоја локалног и глобалног плана инспекције. Њиховом развоју предходи развој одговарајуће онтологије за мапирање података датих у неком од излазних CAD фајлова, у циљу њиховог даљег коришћења тј. увођења у глобални и локални план инспекције. Ако се све посматра са становишта скупа делова, при чему се сваки од део може описати са ОГП и захтева да се аутоматски генерише план инспекције, може се говорити о интелигентном плану инспекције.

Планирање инспекције кутијастих делова на НУММ у зависности од броја, позиције и оријентације мерних пипака постављених у мерну главу се углавном врши из три међусобно ортогонална правца a , b и c који су дати на слици 1. Ова претпоставка служи као основа за развој метода одређивања редоследа инспекције ОГП код мерења кутијастих делова на НУММ представљеног у овом раду. Из наведена три правца могу се извести шест могућих смерова приступа мерног пипка (МП). С обзиром да је мерни део неопходно поставити на сто машине један смер приступа мерног пипка (СПМП) се изоставља тако да преостаје пет СПМП: S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 . Сваки од ових смерова има смер који одговара неком од смерова координатног систем МП: $-Z_p, -Y_p, X_p, Y_p, -X_p$.

2. МЕТОД ОДРЕЂИВАЊА РЕДОСЛЕДА ИНСПЕКЦИЈЕ ОСНОВИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ПРИМИТИВА

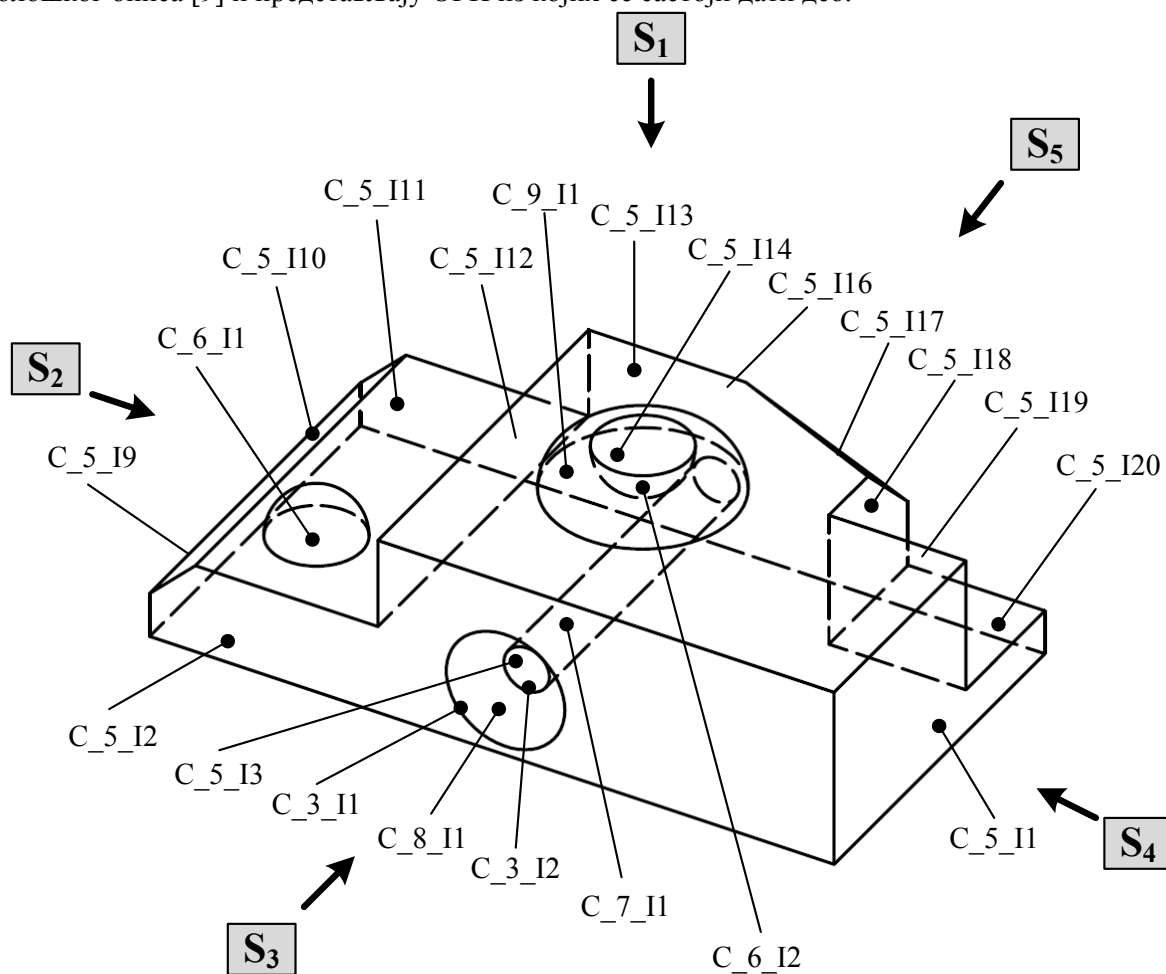
Метод одређивања редоследа инспекције ОГП, у овом раду, базира се на анализи геометријских релација примитива у три међусобно управна правца (пет смерова). Слична истраживања су спроведана у [7,10], с тим што је разлика у разматраним примитивима. У [7], реч је о облику описаном са седам промеливих параметара, који могу узети вредности из унапред датог скупа вредности. Такође, дефинисан је и СПМП и то двојачко: по висини и по ширини примитива. Предложени метод у овом раду се односи на неке од ОГП (слика 2.) са њиховим параметрима, који их једнозначно одређују, а који се често сусрећу у пракси. За спроведену анализу у овом раду интересантан је правац и СПМП, кога представља јединични вектор датог ОГП. Због поједностављења, не узима се у обзир могућност ротације мерног пипка у мерној глави. Дакле, полазна претпоставка у овом раду је да се правци a, b и c поклапају са правцем вектора E .



Слика 2. Основни геометријски примитиви са параметрима [11].

Појам геометријских примитива познат је из математике. Према [12] у CAD/CAM технологијама примитиви могу бити: примитиви форме или облика, толеранцијски примитиви и монтажни примитиви. Према [4], дефинише се примитив инспекције који се састоји из једног или више предмета инспекције у зависности од карактеристике квалитета чија инспекција се врши. Стога се може рећи да је један метролошки примитив више специфичан геометријски примитив. Не улазећи у дубљу анализу метролошких примитива, у овом раду се разматрају само неки од ОГП у циљу дефинисања њиховог редоследа инспекције. Наиме, о метролошким примитивима има смисла говорити и тачно дефинисати их тек када буде речи о локалном плану инспекције где се разматра генерисање мерних тачака и чворова, оптималне путање МП итд.

Могући приступи мерног пипка за инспекцију, на примеру једног машинског дела су на слици 3. S_1, S_2, \dots, S_5 , су стране радног предмета или СПМП, а остале ознаке на слици 3. су у складу са методом онтолошког описа [9] и представљају ОГП из којих се састоји дати део.

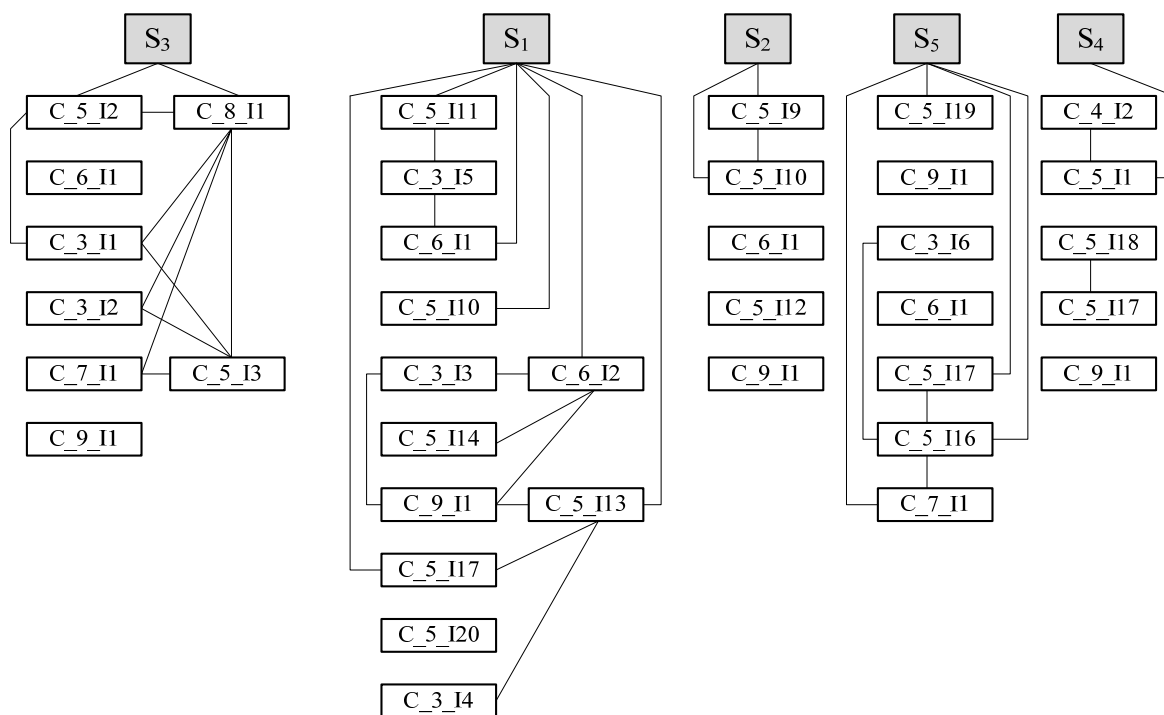


Слика 3. Пример мерног дела и његових ОГП

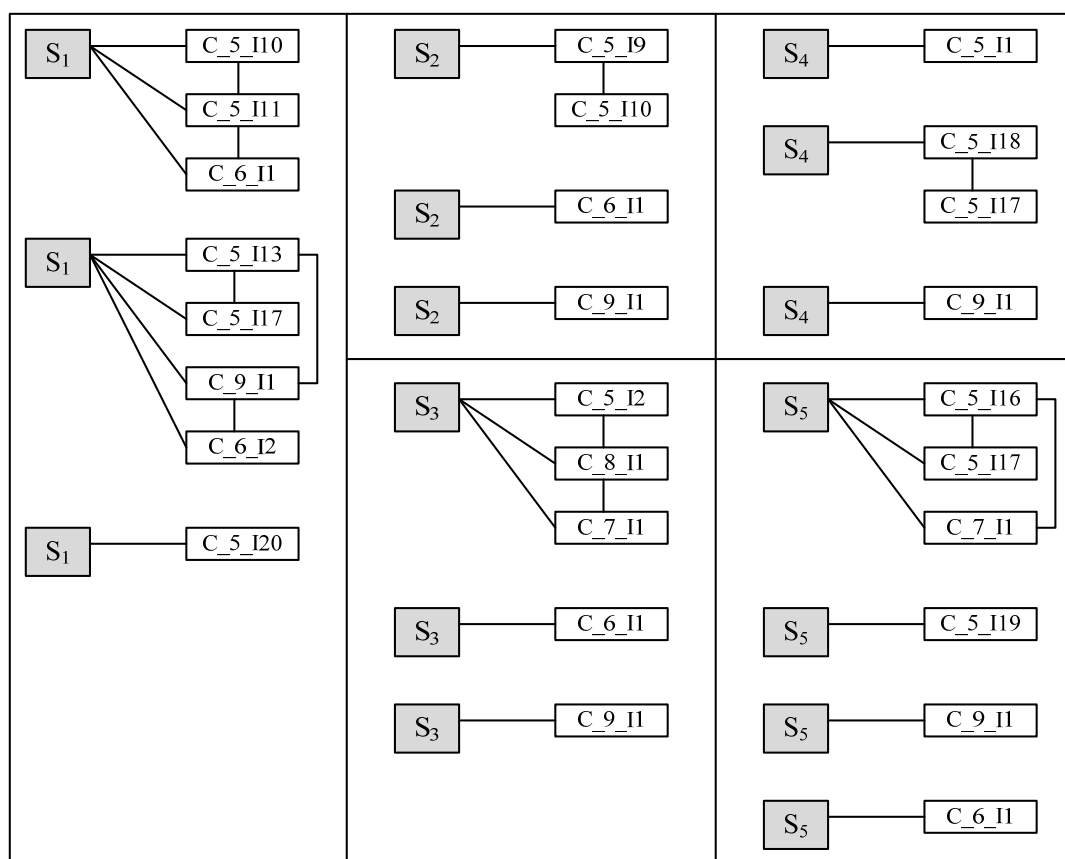
Препознавање ОГП није спроведено у овим истраживањима. Геометријске релације између ОГП су кључни фактор за одређивање редоследа инспекције ОГП. Универзални критеријум за његово дефинисање не постоји, јер је превише утицајних фактора као што су број МП који се могу поставити у мерну главу, могућност њиховог произвољног оријентисања итд. Проблематику инспекције кутијастих делова на НУММ значајно упрошћава суперпозиција на могуће правце приступа мерног пипка.

Правило 1. *Ако два ОГП имају исти СПМП и ако између њих постоји геометријска суседност, тада кежемо да постоји релација између њих (слика 4.).* СПМП је дефинисан смером јединичног вектора примитива E . Геометријска суседност два или више примитива чији СПМП се поклапају, упућује на то да се њихове инспекција може извршити у тачно одређеном редоследу. У случају да се смер јединичног вектора примитива не поклапа са СПМП неопходно је пројектовати јединични вектор таквог примитива. Као последица пројекције вектора јавља се могућност инспекције ОГП из више смерова. Такав случај се јавља са примитивом C_{5_I10} .

Правило 2. *Група геометријски повезаних ОГП чија се инспекција може извршити из истог СПМП, представља групу примитива чија се инспекција врши у једној секвенци (слика 5.).* У оквиру сваког СПМП постоје групе примитива чија се инспекција може извршити уз мимално пређено растојање МП. С једне стране, ово омогућава геометријска повезаност ОГП и с друг СПМП.

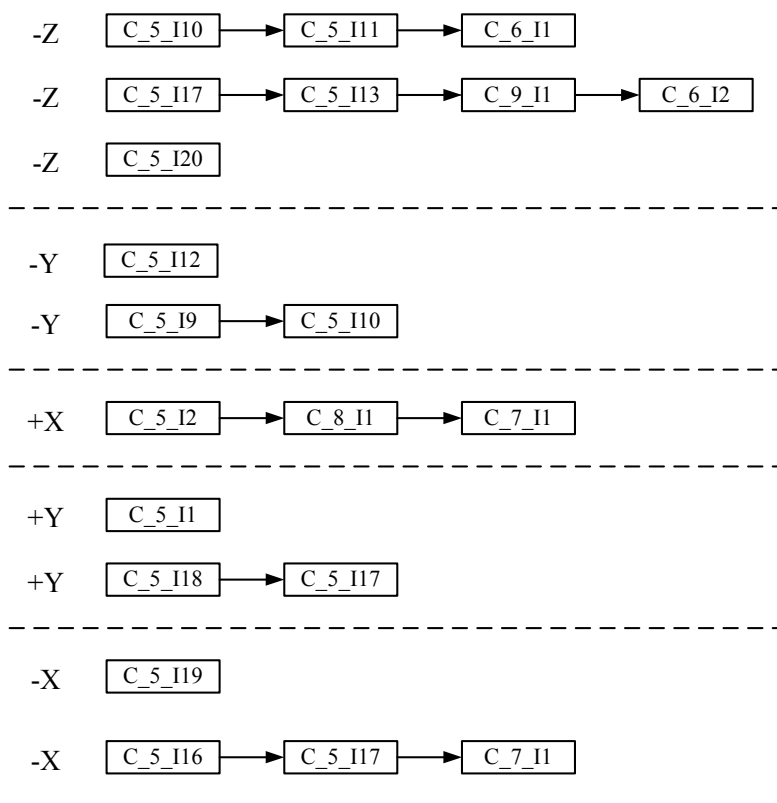


Слика 4. Графичка илустрација правила 1.



Слика 5. Графичка илустрација правила 2.

Правило 3. Првенство инспекције ОГП се одређује на основу груписаних ОГП (правило 2) и СММП. Редослед инспекције ОГП након примене овог правила је дат на слици 6. Лако се уочава да ово правило представља усклађивање основног принципа предложеног метода и групе примитива дефинисаних правилом 2.



Слика 6. Редослед инспекције ОГП

3. ЗАКЉУЧАК

У раду је представљен метод одређивања редоследа инспекције основних геометријских примитива код кутијастих машинских делова у циљу развоја глобалног плана инспекције, једног од саставних чинилаца интелигентног планирања инспекције на НУММ. Добијени резултати указују да се јасним дефинисањем правила може добити иницијални редослед инспекције ОГП, који је потом неопходно оптимизовати. Принцип планирања инспекције кутијастих делова на НУММ заснован на три међусобно управна правца, изложен у овом раду, представља основу за развој оптималног редоследа инспекције ОГП и глобалног плана инспекције на НУММ. Начин описа разматраних ОГП је прилагођен подацима који се налазе у неком од излазних САД фајлова, тако да се њихови параметри могу преузети из поменутих фајлова.

ЗАХВАЛНОСТ

Истраживања изнета у овом раду првенствено се односе на пројекте које подржава Министарство просвете и науке Републике Србије, што се овде посебно наглашава и изражава захвалност на указаној подршци.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Weckenmann A., Kraemer P., Hoffmann J., *MANUFACTURING METROLOGY – STATE OF THE ART AND PROSPECTS*, 9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEASUREMENT AND QUALITY CONTROL (9th ISMQC) November 21 – 24, 2007, IIT Madras.
- [2] G. X. Zhang (I), S. G. Liu, X. H. Ma, J. L. Wang, Y. Q. Wu, Z. Li, Towards the Intelligent CMM, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, Iss. 1, 2002, pp. 437–442
- [3] STOJADINOVIC, S., MAJSTOROVIC, V., (2012) *TOWARDS THE DEVELOPMENT OF FEATURE – BASED ONTOLOGY FOR INSPECTION PLANING SYSTEM ON CMM*, JOURNAL OF MACHINE ENGINEERING – Manufacturing Precision Processes, Vol.12, No.1, Editorial Institution of the Wroclaw Board, pp. 89-98, ISSN 1895-7595

- [4] C.-Y. Hwang, C.-Y. Tsai, C. A. Chang, *Efficient inspection planning for coordinate measuring machines*, Int J Adv Manuf Technol (2004) 23: 732–742, DOI 10.1007/s00170-003-1642-x
- [5] J. Beg and M. S. Shunmugam, An Object Oriented Planner for Inspection of Prismatic Parts, Int J Adv Manuf Technol (2002) 19:905–916
- [6] Dušan N Šormaz, *Distributed Agent-based Integrative Model for Mass Customization Product Development*, XV International Scientific Conference on Industrial Systems (IS'11), Novi Sad, Serbia, September 14. – 16. 2011.
- [7] CHO, -W. M., LEE, H., YOUN, G.-S., CHOI, J., (2005) *A feature-based inspection planning system for coordinate measuring machines*, International Journal of Advance Manufacturing Technology 26, pp. 1078–1087, DOI 10.1007/s00170-004-2077-8
- [8] G. LEE, J. MOU and Y. SHEN, *SAMPLING STRATEGY DESIGN FOR DIMENSIONAL MEASUREMENT OF GEOMETRIC FEATURES USING COORDINATE MEASURING MACHINE*, Int. J. Mach. Tools ManufacL Vol. 37, No. 7, pp. 917-9M. 1997, Elsevier Science, PII: S0924-6460(96)00096-X, pp. 917-934
- [9] STOJADINOVIC, S., MAJSTOROVIC, V., (2011) *Metrological primitives in production metrology – ontological approach*, 34th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 29.-30. September, Nis, Serbia, pp. 167-170, ISBN 978-86-6055-019-6
- [10] Kuang-Chao Fan and Ming C. Leut, *Intelligent planning of CAD-directed inspection for coordinate measuring machines*, *Computer Integrated Manufacturing System*, Vol. 11, No. 1-2, pp.43-51, 1998, PII: S0951-5240(98)00008-1, Elsevier Science
- [11] MAJSTOROVIĆ, V., HODOLIČ, J. (1998) *Numerički upravljane merne mašine*, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo – Novi Sad, ISBN 86-499-0091-7
- [12] Jami J. Shah, Martti Mäntylä, *Parametric and Feature-Based Cad/Cam: Concepts, Techniques, and Applications*, Google books, ISBN 0-471-00214-3, Canada

S. Stojadinovic, V. Majstorovic

DETERMINING THE SEQUENCE OF INSPECTIONS OF BASIC GEOMETRIC PRIMITIVES ON CMM

Summary:

This paper presents a method of determining the sequence of inspections of basic geometric primitives to the boxy machine parts in order to develop a global plan of inspection, as one of the constituent factors of intelligent planning inspection on CMM. The method is based on three (five courses) each other normally directions approach of the measuring probe and rules that define the sequence of inspections primitives. The result is a certain sequence inspections for basic geometric primitives such as plane, cylinder, cone, torus and sphere, an example of a measuring part.

Keywords: CMM, basic geometric primitives, inspection planning

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

658.5:004.384(082)(0.034.2)
004.896(082)(0.034.2)
621.7/.9-52(082)(0.034.2)
007.52:658.5(082)(0.034.2)
005.6(082)(0.034.2)

ZBORNIK radova = Proceedings [Elektronski izvor] / [31. simpozijum CIM u strategiji tehnološkog razvoja industrije prerade metala [i] 25. simpozijum CAD/CAM [i] 34. simpozijum NU - ROBOTI - FTS [i] 40. simpozijum Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala [i] 18. simpozijum Menadžment kvalitetom [sve ovo u okviru]] 38. Jupiter konferencija sa međunarodnim učešćem = 38th Jupiter Conference with Foreign Participants, Beograd, maj 2012. ; [organizator] Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet = University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering. - Beograd : Mašinski fakultet, 2012 (Beograd : Planeta print). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tekst ćir. i lat. - Tiraž 150. - Napomene i bibliografske reference uz tekst. - Bibliografija uz većinu radova. - Abstracts.

ISBN 978-86-7083-757-7

1. Уп. ств. насл. 2. Јупитер конференција (38 ; 2012 ; Београд) 3. Симпозијум СИМ у стратегији технолошког развоја индустрије прераде метала (31 ; 2012 ; Београд) 4. Симпозијум CAD/CAM (25 ; 2012 ; Београд) 5. Симпозијум NU - ROBOTI - FTS (34 ; 2012 ; Београд) 6. Симпозијум Управљање производњом у индустрији прераде метала (40 ; 2012 ; Београд) 7. Симпозијум Менаџмент квалитетом (18 ; 2012 ; Београд) 8. Машински факултет (Београд)
а) СИМ системи - Зборници б) CAD/CAM системи - Зборници с) Машине алатке - Нумеричко управљање - Зборници д) Роботи - Зборници е) Флексибилни технолошки системи - Зборници ф) Металопраерађивачка индустрија - Управљање - Зборници г) Управљање квалитетом - Зборници
COBISS.SR-ID 190686732

ISBN 978-86-7083-757-7



9 788670 837577 >