

# Verifikacija kinematskih mogućnosti mašine alatke bazirane na hibridnoj kinematici primenom virtuelnog prototipa

Tabaković Slobodan,  
Zeljковић Milan  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet  
tehničkih nauka, Departman za  
proizvodno mašinstvo, Novi Sad,  
Republika Srbija  
tabak@uns.ac.rs; milanz@uns.ac.rs;

Živanović Saša  
Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet Beograd,  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Beograd, Republika Srbija  
szivanovic@mas.bg.ac.rs;

Tabaković Natalija,  
Srednja mašinska škola Novi Sad  
Novi Sad, Republika Srbija  
natalija.tabakovic@gmail.com

**Sažetak**—Primena virtuelnih prototipova u savremenim uslovima projektovanja proizvoda predstavlja znatno efikasnije brže i jeftinije sredstvo za izbor elemenata strukture, optimizaciju konstrukcije kao i verifikaciju kinematskih i dinamičkih mogućnosti mašina alatki. U radu je prezentovana primena virtuelnog prototipa koji je korišćen u procesu projektovanja mašine alatke čija je kinematska struktura bazirana na O-X hibridnom mehanizmu

**Ključne reči:** Virtuelni prototip, hibridni mehanizam, CNC

## I. UVOD

Razvoj proizvoda složene strukture, koji sadrže veći broj pokretnih mehaničkih elemenata, u avremenim uslovima, podrazumeva ispitivanje ponašanja u eksploatacionim uslovima u cilju verifikacije i na osnovu toga korigovanje idejnog rešenja, do dobijanja proizvoda zadovoljavajućih karakteristika.

Mašine alatke koje su karakteristične po velikom broju pokretnih elemenata i radu u različitim eksploatacionim uslovima predstavljaju tipičnog predstavnika ovakve grupe proizvoda. Zadovoljavajuće rešenje u njihovom slučaju zahteva analizu više desetina položaja izvršnog organa mašine i određivanje stanja mehanizma u svakom od njih.

Savremeni tržišni uslovi nameću sve kraći period razvoja mašina alatki i sve univerzalniju primenu (za različite materijale i režime obrade) koji obuhvataju sve kompleksnija mehanička opterećenja mašina. Zbog toga se kao zamena fizičkom prototipu u procesu projektovanja sve češće koriste virtuelni prototipovi razvijeni primenom DMU (Digital Mock Up) koncepta koji omogućuju kombinovanje CAD/CAM/CAE tehnologije pri optimizaciji proizvoda [1], [2].

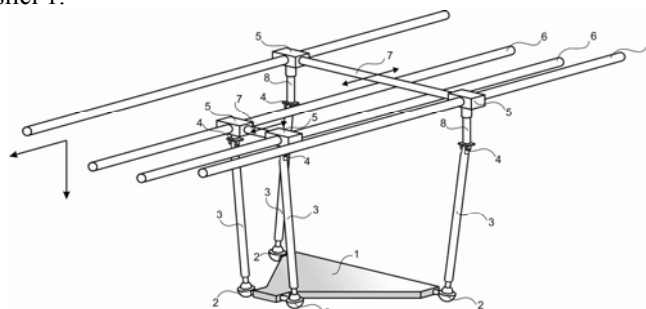
Primena DMU tehnologije omogućuje analizu kinematskih parametara kroz određivanje kolizionih tačaka (Check collision) i singulariteta prilikom funkcionisanja mehanizma kao i analizu mogućnosti graničnih oblasti obrade radnog predmeta pre izrade fizičkog prototipa.

Rad opisuje deo istraživanja sprovedenih pri projektovanju mašine alatke bazirane na patentiranom O-X mehanizmu kroz

analizu mogućnosti obrade karakterističnih oblika na radnom predmetu primenom DMU tehnologije.

## II. OPIS HIBRIDNE MAŠINE NA BAZI O-X MECHANIZMA

O-X mehanizam koji je osnova virtuelnog prototipa spada u grupu hibridnih mehanizama sastavljenih od ravanskog paralelnog mehanizma i noseće strukture koja omogućava njegovo translatorno kretanje [3]- [5], kao što je pokazano na slici 1.



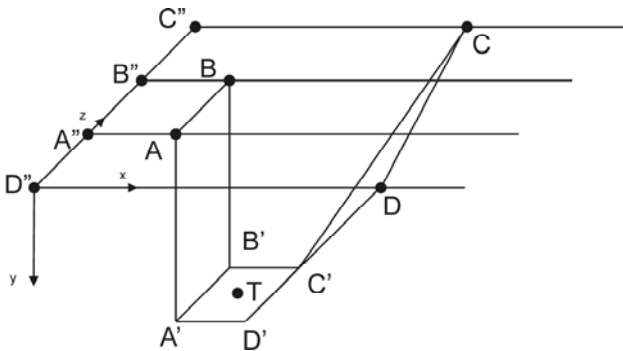
Slika 1. Šema ravanskog paralelnog mehanizma

Na slici 1 je pokazan ravanski paralelni mehanizam čiju osnovu čine pokretna platforma, koja je preko sfernih zglobova vezana za štapove konstantne dužine. Štapovi su na drugom kraju zglobovima sa jednim, stepenom slobode kretanja vezani za klizače, od kojih se svaki kreće po sopstvenoj vodiči. Klizači su grupisani u parove koji su spojeni krutom vezom čime se obezbeđuju njihova ista brzina i ubrzanje. U cilju povećanja autonomije kretanja grupa klizača oni su pozicionirani na različitim rastojanjima, u pravcu vertikalne ose, od pokretne platforme, što omogućava njihovo mimoilaženje u ravni, kao i kretanje mehanizma, u opruženom (O) i ukrštenom (X) položaju. Kompenzacija tako nastale razlike u rastojanjima između klizača i pokretne platforme vrši se uvođenjem vertikalnih kompenzacionih elemenata (8), na višim klizačima.

Dimenzije radnog prostora su, zbog hibridnosti strukture, veće nego kod sličnih paralelnih mehanizama što se može smatrati jednom od osnovnih prednosti ovog mehanizma.

Radni prostor hibridnog mehanizma je pokazan u poglavlju V ovog rada.

Geometrijski model paralelnog mehanizma (slika 2), koji predstavlja osnovu hibridnog O-X glide mehanizma, može biti prikazan u jednostavnijoj formi koja se sastoji od paralelograma  $A'B'C'D'$  sa težištem u tački T, koji je povezan sa štapovima konstantne dužine ( $AA'$ ,  $BB'$ ,  $CC'$ ,  $DD'$ ). Na drugom kraju štapovi su povezani sa klizačima AB i CD, koji se kreću po horizontalnim vodionicama ( $D''D$ ,  $A''A$ ,  $B''B$ ,  $C''C$ ).



Slika 2. Pojednostavljeni geometrijski model paralelnog mehanizma

Uzimajući u obzir prethodno, mogu se napisati vektorske jednačine paralelnog mehanizma:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OD} + \overrightarrow{DD'} &= \overrightarrow{TD'} + \overrightarrow{OT} \\ \overrightarrow{OA'} + \overrightarrow{A'A} + \overrightarrow{AA'} &= \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TA'} \\ \overrightarrow{OB''} + \overrightarrow{B''B} + \overrightarrow{BB'} &= \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TB'} \\ \overrightarrow{OC''} + \overrightarrow{C''C} + \overrightarrow{CC'} &= \overrightarrow{OT} + \overrightarrow{TC'} \end{aligned} \quad (1)$$

Uz pretpostavku da je:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OD''} &= \vec{0}; \quad \overrightarrow{OA''} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{pmatrix}; \\ \overrightarrow{OB''} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2a \end{pmatrix}; \quad \overrightarrow{OC''} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3a \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

gde je  $a$  – rastojanje između horizontalnih vodica.

Pored toga, konstrukcija ravanskog mehanizma nameće određena ograničenja iz kojih proizilazi:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{A''A} &= \overrightarrow{B''B} \\ \overrightarrow{C''C} &= \overrightarrow{D''D} \end{aligned} \quad (3)$$

### III. KINEMATICKA ANALIZA

U opštem slučaju inverzna kinematika paralelnih mehanizama je prilično jednostavna, dok je direktna kinematika često vrlo kompleksna. Međutim, zbog svoje jednostavne konstrukcije i inverzna i direktna kinematika O-X glide mehanizma su vrlo jednostavne i jasne. U ovom poglavlju se daju rešenja inverzne i direktne kinematike za obe forme mehanizma opruženi (O) i ukršteni (X).

#### A. Inverzna kinematika

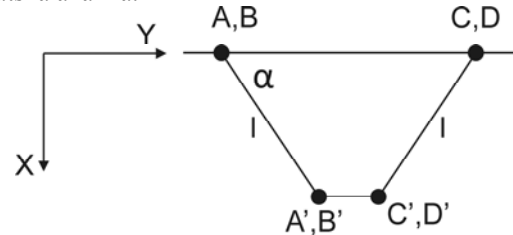
Opšti izraz za inverzni kinematski lanac može se zapisati i na sledeći način:

$$P_{A,B,C,D} = f(x_T, y_T, z_T) \quad (4)$$

Pošto se O-X glide mehanizam može posmatrati u dve konfiguracijske forme za njih je i sprovedena kinematska analiza.

##### • Opružen oblik

Na slici 3 prikazana je ravanska šema opružene forme O-X glide mehanizma za koju je u nastavku sprovedena inverzna kinematska analiza.



Slika 3. Ravanska šema opruženog oblika O-X glide mehanizma

Položaj tačaka A i B na osnovu položaja težišta pokretne platforme, može se izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned} x_{A,B} &= x_T - \frac{s}{2} - l \cos \alpha = x_T - \frac{s}{2} - l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}, \\ x_{A,B} &= x_T - \frac{s}{2} - \sqrt{l^2 - y_T^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

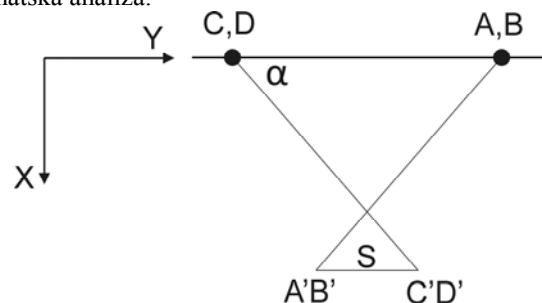
Dok se položaj tačaka C i D na isti način može izraziti kao:

$$\begin{aligned} x_{C,D} &= l \cos \alpha + \frac{s}{2} + x_T = l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2} + \frac{s}{2} + x_T, \\ x_{C,D} &= \sqrt{l^2 - y_T^2} + \frac{s}{2} + x_T. \end{aligned} \quad (6)$$

gde su:  $l$  – dužina štapova,  
 $s$  – širina pokretne platforme,  
 $a$  – rastojanje između horizontalnih vodica,  
 $\alpha$  – ugao između štapova i horizontalnih vodica.

##### • Ukršteni oblik

Na slici 4 prikazana je ravanska šema ukrštenog oblika O-X glide mehanizma, a u nastavku je data njegova inverzna kinematska analiza.



Slika 4. Ravanska šema ukrštenog oblika O-X glide mehanizma

Položaj tačaka A, B, C i D na osnovu položaja težišta pokretne platforme, može se izraziti na sledeći način:

$$\begin{aligned} x_{A,B} &= x_T - \frac{s}{2} + l \cos \alpha = x_T - \frac{s}{2} + l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}, \\ x_{A,B} &= x_T - \frac{s}{2} + \sqrt{l^2 - y_T^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{C,D} &= \frac{s}{2} + x_T - l \cos \alpha = \frac{s}{2} + x_T - l \sqrt{1 - \left(\frac{y_T}{l}\right)^2}, \\ x_{C,D} &= \frac{s}{2} + x_T - \sqrt{l^2 - y_T^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

#### B. Direktna kinematika

Nasuprot prethodnom, direktni kinematski lanac može biti izražen na sledeći način:

$$\mathbf{P}_T = f(x_A, x_B, x_C, x_D) \quad (9)$$

- *Opružen oblik*

Direktna kinematska analiza opruženog oblika O-X glide mehanizma (slika 3), odnosno određivanje položaja tačke T u zavisnosti od položaja tačaka A, B, C i D, može biti predstavljena na sledeći način:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TA'_x \\ TA'_y \\ TA'_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{pmatrix}. \quad (10)$$

- *Ukrštena forma*

Na isti način kao i u prethodnom slučaju položaj težišta pokretne platforme (T) za ukršten oblik O-X glide mehanizma (slika 4), može biti predstavljen na sledeći način:

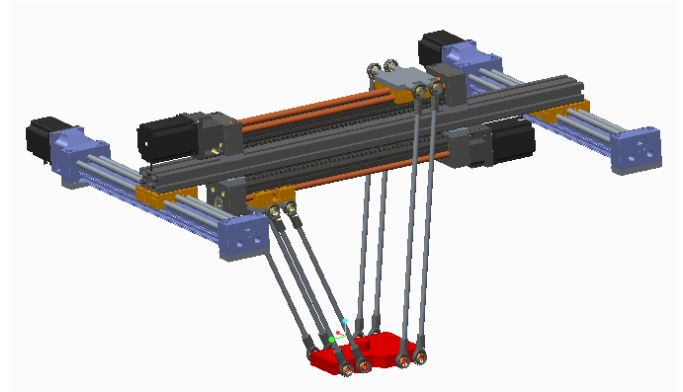
$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l \cos \alpha \\ l \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TA'_x \\ TA'_y \\ TA'_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{pmatrix}. \quad (11)$$

#### IV. STRUKTURA I DEFINISANJE VIRTUELNOG PROTOTIPA

Završna verzija virtuelnog prototipa se u određenoj meri razlikuje od idejnog što je uzrokovano fizičkim dimenzijama elemenata prototipa. Uvedene su izmene u elementima kao što su pozicije klizača, dužine štapova i sl., a elementi koji se nabavljaju od poznatih dobavljača su definisani modelima koji su prema dimenzijama i obliku identični realnim. Na slici 5 je prikazano usvojeno rešenje geometrije za virtuelni prototip hibridnog mehanizma.

Virtuelni prototip hibridnog mehanizma definisan na ovaj način se lako rekonfiguriše na obe forme mehanizma opruženu ili ukrštenu i kao takav se koristi pri sklapanju sa nosećom strukturom mašine. Tako sklopljen kompletan virtuelni prototip mašine je iskorišćen za simulacije i testove obrade koji obuhvataju analizu mogućnosti obrade geometrijskih oblika prisutnih pri obradi glodanjem. Prethodno je izvršena i analiza

geometrijskog oblika radnog prostora, radi korektnog pozicioniranja radnih predmeta u zoni obrade.



Slika 5. Virtuelni prototip hibridnog mehanizma

#### V. RADNI PROSTOR

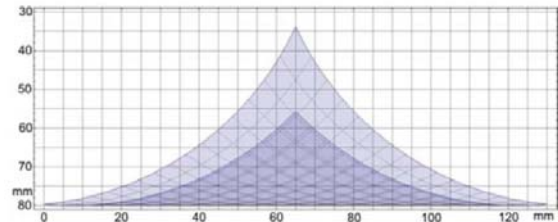
Radni prostor hibridnog "O-X glide" mehanizma predstavlja zapreminu određenu svim mogućim položajima pokretne platforme. Za analizu radnog prostora "O-X glide" mehanizma dovoljno je analizirati radni prostor paralelnog segmenta budući da ukupan teoretski radni prostor hibridnog mehanizma nastaje transliranjem radnog prostora ravanskog paralelnog mehanizma duž uzdužnih vođica.

Radni prostor ravanskog paralelnog mehanizma može se definisati na osnovu direktne kinematike za koju postoje rešivi analitički izrazi za opružen (12) i ukršten (13) oblik mehanizma:

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} - s)^2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{AB} + x_{CD}}{2} \\ \frac{1}{2} \sqrt{4l^2 - (x_{CD} - x_{AB} + s)^2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

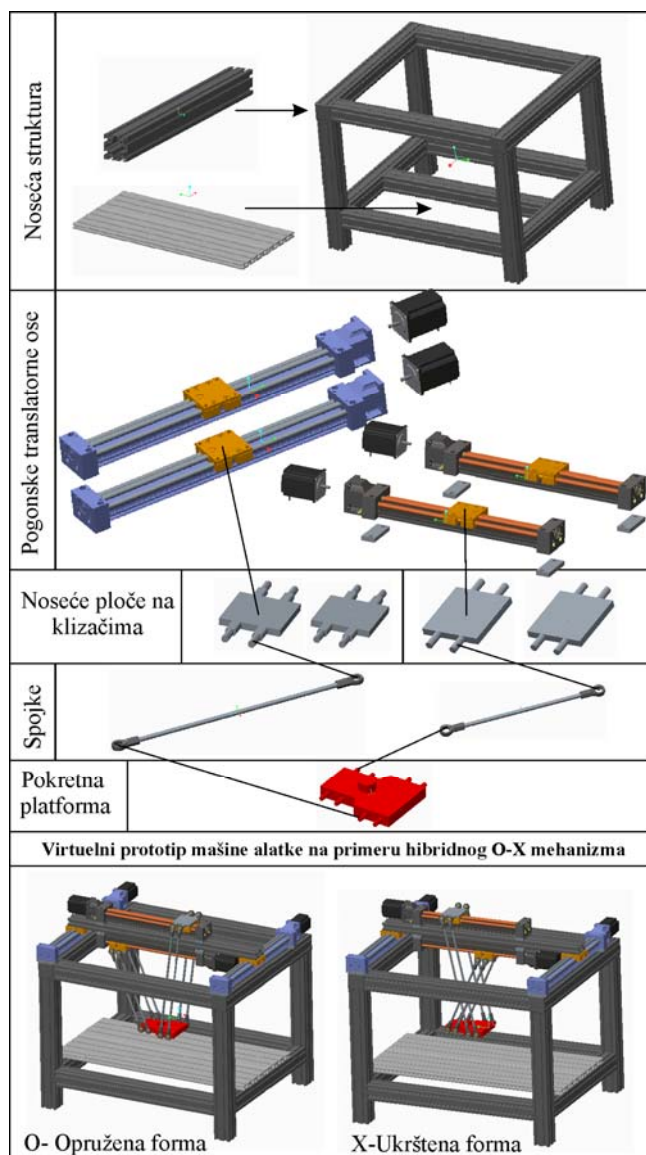
Analizom funkcija uz poštovanje usvojenih ograničenja dobijene su površine radnog prostora ravanskog paralelnog mehanizma. Na slici 6 prikazan je radni prostor paralelnog mehanizma u ravni, pri čemu je tamnijom bojom označena površina koja se ostvaruje u opruženom obliku mehanizma a svetlijom bojom površina dobijena kretanjem mehanizma u ukrštenom obliku.



Slika 6. Radni prostor hibridnog mehanizma

## VI. KONFIGURISANJE VIRTUELNOG PROTOTIPA

Analizom koncepcije razmatranog "O-X glide" hibridnog mehanizma omogućeno je uspostavljanje sistema sastavnih elemenata (modularnog sistema), za kompletiranje obe koncepcije mašine u vidu jedne morfološke matrice. Na slici 7 su pokazane realizacije sistema sastavnih elemenata za noseću strukturu, pogonske translatorne ose, noseće ploče na klizačima za vezu sa obrtnim zglobovima, spojke i platformu. Prolaskom kroz morfološku matricu sa slike 7 i sklapanjem odgovarajućih modula za osnovne funkcije mašine, dobijaju se dve moguće razmatrane koncepcije hibridne mašine alatke na bazi "O-X glide" mehanizma i to opružene i ukrštene forme.



Slika 7. Konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine alatke na primeru hibridnog "O-X glide" mehanizma

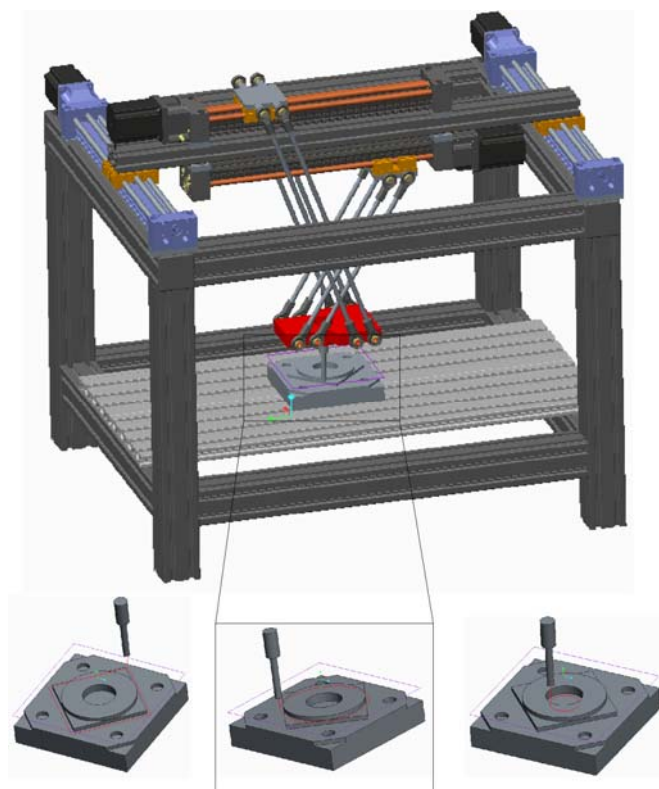
Ovako uspostavljeno konfigurisanje virtuelnih prototipova je značajno kako zbog kompletiranja obe koncepcije mašina na modularnom principu, tako i za formiranje i verifikaciju okruženja za programiranje ovakve mašine i pre nego što je ona napravljena. U uspostavljenom okruženju za programiranje

moguće je ostvariti simulaciju obrade koja uključuje i kompletan model virtuelnog prototipa mašine.

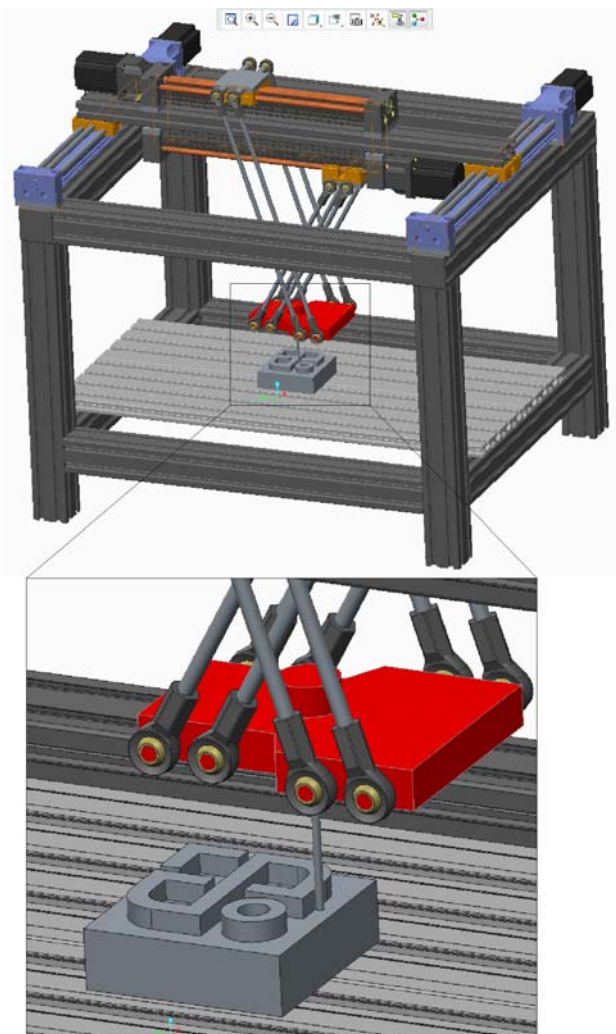
## VII. SIMULACIJA OBRADU U CAD/CAM OKRUŽENJU KADA MAŠINA RADI PO ZADATOM PROGRAMU

U ovoj fazi projekta verifikacija razmatranih koncepcija hibridne mašine alatke na bazi "O-X glide" mehanizma je prikazana simulacijom obrade na virtuelnom prototipu u CAD/CAM okruženju. Izabrano okruženje za programiranje i simulaciju obrade je PTC Creo 2.0 [6] i VeriCUT [7]. Simulacija kinematike virtuelnog prototipa omogućava kretanje modeliranih segmenata, sa alatom na kraju, koji na ekranu iscertava putanju alata, koja je nastala kao rezultat izvršenja zadatog programa. Da bi ovakva simulacija bila moguća, neophodno je virtuelni prototip sklopiti uključujući i odgovarajuće kinematičke veze, kao u radovima [5], [8], i [9]. U ovom slučaju se koriste kinematičke veze za translatorne ose tipa *Slider*, i kinematičke veze za vezu nosećih ploča na klizačima sa platformom pomoću 4 para spojki pomoću obrtnih zglobova (*Pin*). Zahvaljujući kinematičkim vezama, pri simulaciji obrade moguće je uključiti i kompletan virtuelni prototip mašine, opcijom *Machine play*.

Za potrebe verifikacije okruženja za programiranje koja uključuje i simulaciju obrade na virtuelnom prototipu izvršenjem zadatog programa za obradu, urađeno je nekoliko primera. Za ovaj rad su izabrana dva i to: primer simulacije obrade jednog probnog dela po uzoru na ISO test probni deo (slika 8) i drugi koji predstavlja primer obrade jednog logotipa (slika 9).

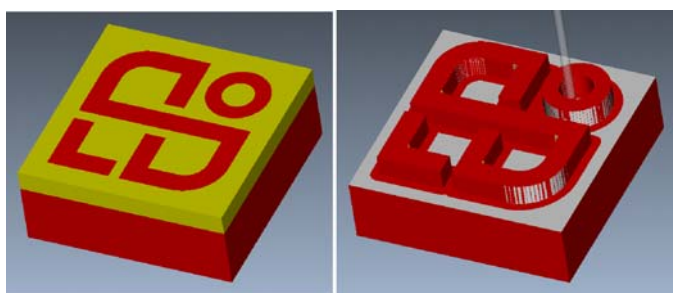


Slika 8. Primer simulacije obrade probnog dela na virtuelnom prototipu mašine alatke sa hibridnom kinematikom



Slika 9. Primer simulacije obrade logotipa na virtuelnom prototipu mašine alatke sa hibridnom kinematikom

Pored simulacije rada mašine po zadanom programu, urađena je i simulacija uklanjanja materijala u VeriCUT okruženju za drugi primer obrade logotipa, koja je pokazana na slici 10.



Slika 10. Primer simulacije uklanjanja materijala za primer obrade logotipa u VeriCUT-u

Korišene simulacije u ovom radu uključuju: (i) simulaciju putanje alata, (ii) simulaciju rada mašine po zadanom programu i (iii) simulaciju uklanjanja materijala. Na ovaj način je oformljeno okruženje za programiranje koje uključuje i verifikaciju programa obrade na tri pomenuta načina. Posebno

je značajna verifikacija koja uključuje u rad virtuelni prototip mašine, jer se na taj način mogu uočiti i kolizije u toku obrade, kao i proveriti postavljanje i baziranje radnog predmeta u granicama radnog prostora mašine, s obzirom da je reč o mašini sa hibridnom kinematikom, koja nema pravilan oblik radnog prostora kao što je to slučaj kod mašina sa serijskom kinematikom.

## VIII. ZAKLJUČAK

Projektovanje mašina alatki kao jednog od najsloženijih proizvoda koji se koriste u mašinstvu spada u dugotrajan i kompleksan posao koji pored neposrednog iskustva inženjera zahteva i poznavanje karakteristika komponenata buduće mašine. Ipak zbog velikog broja uticajnih faktora do informacija o ponašanju mašine alatke u eksploataciji je moguće doći samo analizom prototipa. Primena virtuelnih prototipova pri razvoju novih mašina alatki omogućava smanjenje perioda razvoja koji je uporediv sa rezultatima ostvarenim u autoindustriji gde je period razvoja novih automobila sa 8 smanjen na 3 godine.

U radu je pokazan sistem sastavnih elemenata za konfigurisanje mašine na bazi "O-X glide" mehanizma uspostavljen na osnovu realnih fizičkih komponenata koje su nabavljene za gradnju fizičkog prototipa mašine.

U modernoj proizvodnji i pripremi programa za obradu radnih predmeta na CNC mašinama alatkama simulacija obrade igra vrlo značajnu ulogu tokom verifikacije programa. Testiranje programa se vrši bez ikakvog stresa, pa i ako dođe do kolizije, sudara alata i obratka u virtuelnom svetu, to nije nikakav problem jer će se uočene greške ispraviti i program će moći bezbedno da se izvrši na stvarnoj mašini. Ali ako se testiranje vrši na stvarnoj mašini, kolizije i sudari mogu biti ravni katastrofi.

Posle detaljnih analiza i simulacija obrade na virtuelnim prototipovima, pripremljenog okruženja za programiranje u toku je i realizacija fizičkog prototipa mašine sa hibridnom kinematikom na bazi "O-X glide" mehanizma u opruženoj i ukrštenoj formi.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektima TR 35025 „Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici“ i TR 35022 "Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema", koji je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Y. Altintas, C. Brecher, M. Week, S. Witt, "Virtual Machine Tool," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 54/2, pp. 651-674, 2005.
- [2] A. Fortunato, A. Ascari, "The virtual design of machining centers for HSM: Towards new integrated tools," Mechatronics, vol. 23/3, pp. 264-278, April 2013.
- [3] C. Mladenović, S. Tabaković, M. Zeljković, "Kinematic analysis of machine tool based on O-X glide hybrid mechanism using a symbolic virtual model," Journal of Production Engineering, vol. 15/1, pp. 37-40, 2012.

- [4] S. Tabaković, M. Zeljković, R. Gatalo, C. Mladenović, "Uređaj za manipulaciju radnim predmetima ili alatima kod mašina alatki i industrijskih manipulatora," Glasnik intelektualne svojine, Br. 2/2012, Zavod za intelektualnu svojinu Republike Srbije, Beograd, Broj: 20111243.
- [5] S. Tabaković, S. Živanović, M. Zeljković, "The application of virtual prototype in design of a hybrid mechanism based machine tools," Journal of Production Engineering, vol.18/2, pp 77-80, 2015.
- [6] PTC Creo webpage, <http://www.ptc.com/cad/creo>, accessed on 2016-02-10.
- [7] VeriCUT webpage, <http://www.cgtech.com/>, accessed on 2016-02-10.
- [8] S. Zivanovic, M. Glavonjic, D. Milutinovic, "Configuring A Mini-Laboratory and Desktop 3-Axis Parallel Kinematic Milling Machine," Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol.61/1, pp. 33-42, 2015.
- [9] M. Glavonjić, S. Živanović, B. Kokotović, "Konceptije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki," XIII međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2014, Zbornik radova vol. 13, ISBN 978-99955-763-3-2, str. 539-544, 19-21. mart 2014.

## ABSTRACT

Using of virtual prototypes in modern conditions of designing of a product is more efficient and cheaper instrument for choosing of elements of structure, optimization of construction such as verification of kinematics and dynamic capabilities of machine tool.

This paper shows application of virtual prototype in process of designing of machine tool with kinematic structures based on O-X hybrid mechanism

## **VERIFICATION OF KINEMATICS CHARACTERISTICS OF A MACHINE TOOLS BASED ON HYBRID KINEMATIC BY USING VIRTUAL PROTOTYPES**

Tabakovic, S., Živanović, S., Zeljković, M., Tabaković, N.