

# Koncepcije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki

Miloš Glavonjić, Saša Živanović, Branko Kokotović

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet  
Beograd, Srbija

mglavonjic@mas.bg.ac.rs, szivanovic@mas.bg.ac.rs, bkokotovic@mas.bg.ac.rs

*Sadržaj*—U ovom radu su pokazane polazne koncepcije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki, koje su svrstane u klasu kompleksnih mašina alatki. Na primeru konfigurisanja rekonfigurabilne stonice petoosne mašine alatke pokazani su i elementi odabranog konfiguratora multifunkcionalnih mašina alatki. Za odabranu klasu mašina tipa KH1 dati su analiza i detaljniji opis tih konfiguracija. Pokazan je i formalizam postprocesorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT. Verifikacija virtuelnog prototipa jedne koncepcije mašine je izvršena simulacijom obrade na virtuelnoj mašini u CAD/CAM okruženju.

*Ključne riječi*—Multifunkcionalna mašina alatka, rekonfigurabilna stona petoosna mašina, konfigurisanje, programiranje, simulacija obrade

## I. UVOD

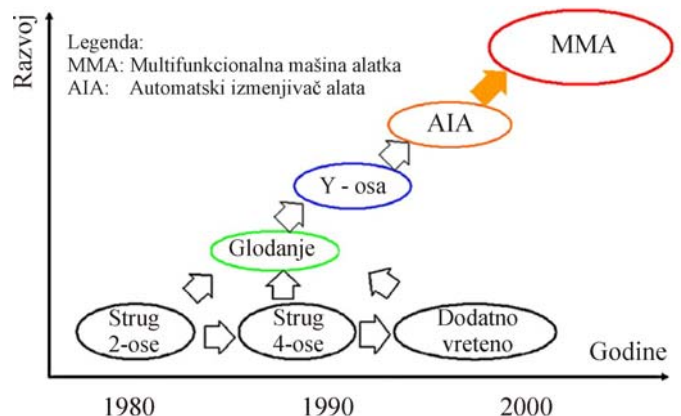
Istraživanja multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki su intenzivna i imaju dosta kompletiranih rezultata [1,2]. Ovde su rekonfigurabilne stonice petoosne mašine svrstane u kompleksne mašine alatke [3]. Kompleksna mašina alatka je jedna od svih, u privremenoj grupi mašina, koje su drugačije od većine ostalih po bar jednom delu svoje strukture, ili po bar jednoj nameni. Sve mašine alatke pokazane su kao grupa mašina, koja postoji i koja se svaki put iznova prebrojava, tražeći neku mašinu bitno drugačiju od ostalih. Takve specifične mašine se grupišu u kompleksne. Osnovni deo strukture mašine alatke čine: noseća struktura, pogoni, prenosnici, aktuatori, upravljanje i programiranje.

Domen ovog rada odnosi se na mašine, koje pripadaju grupi multifunkcionalnih, rekonfigurabilnih, a time i kompleksnih mašina alatki. U tom domenu je i koncepcija multifunkcionalne, rekonfigurabilne stonice petoosne mašine alatke [4]. Razmatraju se mašine tipa strugova sa obradom glodanjem i glodalica sa obradom struganjem. Kriterijumi za njihovu klasifikaciju su: (i) broj vretena (po kojem se ocenjuje stepen slaganja svih mogućih uporednih obrada i stepen kontinualnosti obrada) i (ii) broj procesa (po kojem se ocenjuje stepen kumulacije namena ovakve mašine).

Predmet ovog rada su multifunkcionalne glodalice i strugovi sa visokom kumulacijom namena i sa jednim ili dva vretena. Izmena alata (AIA) nije predmet ovog rada, kao ni drugi elementi opreme ovakve mašine, osim neizostavnog sistema za programiranje, bez kojeg je nemoguće programirati

ovakve mašine. Držanje u prvom planu strugova sa obradom glodanjem opravdava se i statistički češćim osno simetričnim delovima u proizvodnim programima proizvođača raznih mašina. To omogućava da se i obrade glodanjem kompletiraju sa istim baziranjem na istoj mašini, čime se postiže kontinualnost obrade uz dobar kvalitet. Na Sl. 1 je pokazan istorijski razvoj unapređivanja strugarskog obradnog centra, čijom evolucijom se i došlo do multifunkcionalnih mašina alatki. Predmet ovog rada su i glodalice sa obradom struganjem, kako sa serijskom, tako i sa hibridnom kinematikom (ili, paralelno-serijske glodalice).

Mašine alatke se mogu formalno opisivati klasičnim strukturnim formulama, kao u Tabeli I [4]-[6]. Za ovaj rad su izdvojene koncepcije mašine koja može da pokriva razne grupe (GM1,2,3). U radu se posmatraju petoosne glodalice sa serijskom kinematikom i to tako da imaju tri translatorna i dva obrtna pomoćna kretanja. Po standardu su osnovna obrtna pomoćna kretanja označena sa A, B i C. Prvo je oko ose X, drugo oko ose Y, a treće oko ose Z. Petoosna mašina ima dva od takva tri kretanja. Strukturne formule dela skupa ovih glodalica popisane su u Tabeli I. U tim formulama je osnovna mašina deo mehanizma sa translatorskim osama i nepokretnim članom. Obrtne ose pokreću ili samo alat, ili samo obradak, ili i alat i obradak. Po šemi iz Tabele I može se sastaviti mnogo strukturnih formula i to posebno za horizontalne, a posebno za vertikalne mašine alatke.



Slika 1. Istorijski razvoj multifunkcionalnih mašina alatki [1]

TABELA I. ŠEMA STRUKTURNIH FORMULA PETOOSNIH GLODALICA SA SERIJSKOM KINEMATIKOM [7]

W	OM	T
A'B'	<b>GM1:</b> Grupa mašina u kojima obrtne ose pokreću samo obradak. Nepokretni član O i ose X,Y,Z osnovne troosne mašine su u svim uzajamnim redosledima. Mašine su horizontalne ili vertikalne.	-
B'A'		-
A'C'		-
C'A'		-
B'C'		-
C'B'		-
W	OM	T
-	<b>GM2:</b> Grupa mašina u kojima obrtne ose pokreću samo alat. Nepokretni član O i ose X,Y,Z osnovne troosne mašine su u svim uzajamnim redosledima. Mašine su horizontalne ili vertikalne.	AB
-		BA
-		AC
-		CA
-		BC
-		CB
W	OM	T
A'	<b>GM3:</b> Grupa mašina u kojima obrtne ose pokreću i alat i obradak. Nepokretni član O i ose X,Y,Z osnovne troosne mašine su u svim uzajamnim redosledima. Mašine su horizontalne ili vertikalne.	B
B'		A
A'		C
C'		A
B'		C
C'		B

**Oznake:** W je obradak, odnosno član mehanizma-mašine koji drži obradak; OM je osnovni, troosni deo mehanizma-mašine sa postoljem-nepokretnim članom O; T je alat, odnosno član mehanizma-mašine koji drži alat; A,B,C su obrtne ose; X,Y,Z su translatorne ose. Ako je mašina horizontalna, onda se nepokretni član označava sa H, a sa V ako je vertikalna; GM1,2,3 su grupe mašina sa sličnom strukturnom formulom.

Primeri: (i) C'VZXYB je kombinovana mašina tipa struga sa obradom glodanjem, vertikalnim referentnim položajem alata (V), u koordinatnom sistemu struga i sa jednim kretanjem obratka (C') i (ii) C'A'VXYZ je kombinovana mašina tipa vertikalne glodalice (V) sa obradom struganjem, u koordinatnom sistemu vertikalne glodalice i sa oba obrtna kretanja obratka (C' pa A').

Koncepcije rekonfigurabilnih stonih petoosnih glodalica se mogu posmatrati i kao hibridne konfiguracije, koje u osnovi imaju mehanizam koji je baziran na kombinaciji serijskih i paralelnim stepenima slobode. Moguće kombinacije potencijalnih hibridnih konfiguracija petoosnih glodalica su pobrojane u Tabeli II. Više od dve obrtne ose svojstvene su mašinama alatkama sa serijskim kinematičkim lancima.

TABELA II. ŠEMA POTENCIJALNIH HIBRIDNIH KONFIGURACIJA PETOOSNIH GLODALICA [8]

Tip →	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S	5	4	3	2	1	0
P	0	1	2	3	4	5
ΣSS	5	5	5	5	5	5

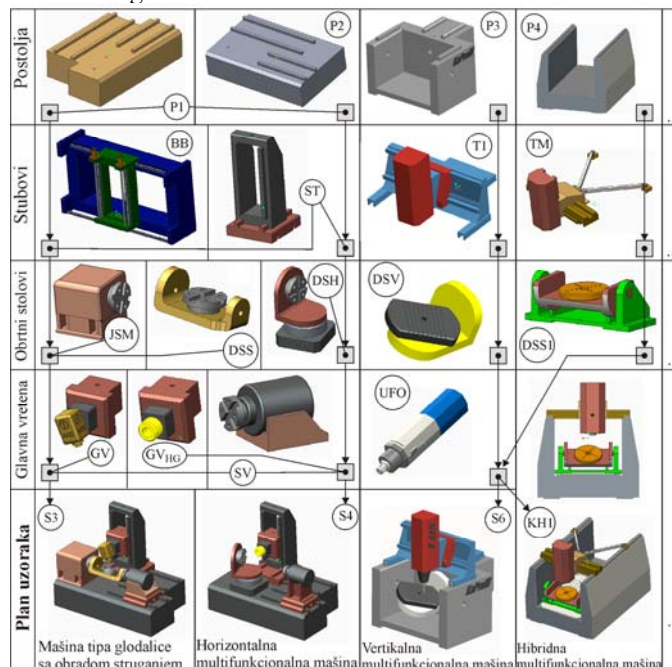
Oznake: S: serijski stepeni slobode; P: paralelni stepeni slobode; ΣSS: ukupan broj stepena slobode

Najčešća kombinacija za hibridnu kinematiku petoosnih glodalica odgovara tipu T4, odnosno 3 stepena slobode se ostvaruju paralelnim mehanizmom, a 2 stepena slobode serijskim mehanizmom, obično dvoosnom serijskom glavom, ili dvoosnim obrtno-nagibnim stolovima. Serijski kinematički lanci su u mašinama tipa robota. U ovom radu će detaljnije biti razmotrena jedna hibridna konfiguracija sa 2 paralelna i 3 serijska stepena slobode, koja bi odgovarala tipu T3.

## II. KONCEPCIJE MULTIFUNKCIONALNIH MAŠINA ALATKI

Analizom osnovnih modula petoosnih mašina alatki omogućeno je uspostavljanje sistema sastavnih elemenata rekonfigurabilnog hardvera, koji čini osnovnu koncepciju mašine. Moduli su pokazani na Sl. 2 u vidu morfološke matrice. Sastavni deo ove matrice su prikazi realizacija sistema sastavnih elemenata za postolja, stubove, obrtne stolove, glavna vretena i deo plana uzoraka za mašine tipa S3, S4, S6 i KH1. Ove mašine su neke od do sada razmatranih polaznih koncepcija za jedan projekat razvoja multifunkcionalne rekonfigurabilne stonje petoosne mašine alatke. Prolaskom kroz morfološku matricu sa Sl. 2 i skupljanjem odgovarajućih realizacija za osnovne funkcije mašine, dobijen je plan uzoraka mogućih mašina. Na Sl. 2 su u planu uzoraka pokazana i četiri primera rekonfigurabilnih petoosnih mašina alatki. Njihove strukturne formule su date u Tabeli III. Uzorak KH1 je primerak mašine konfigurisan kao hibridna petoosna mašina, a može biti i sa čistom serijskom kinematikom.

Oznake na Sl. 2 imaju sledeća značenja: P: postolja (P1 do P4); BB: postolje „Box in Box”, ST: stub; T1: traverza; TM: tehnološki modul sa paralelnim mehanizmom; JSM: jednostruki obrtni sto multifunkcionalne; DSS: dupli sto horizontalne koncepcije 1; DSH: dupli sto horizontalne koncepcije 2; DSV: dupli sto vertikalne koncepcije 2; DSS1: dupli sto vertikalne koncepcije 1; GV glodačko vreteno; GV<sub>HG</sub>: glavno vreteno horizontalne; SV: strugarsko vreteno; UFO: brzohodno glavno vreteno.



Slika 2. Konfigurator za rekonfigurabilne stonje petoosne mašine alatke

U toku projektovanja potrebno je odlučiti koja će alternativa biti realizovana na osnovu očekivane krutosti, pogodnosti za izradu, dostupnih komponenata i sličnog.

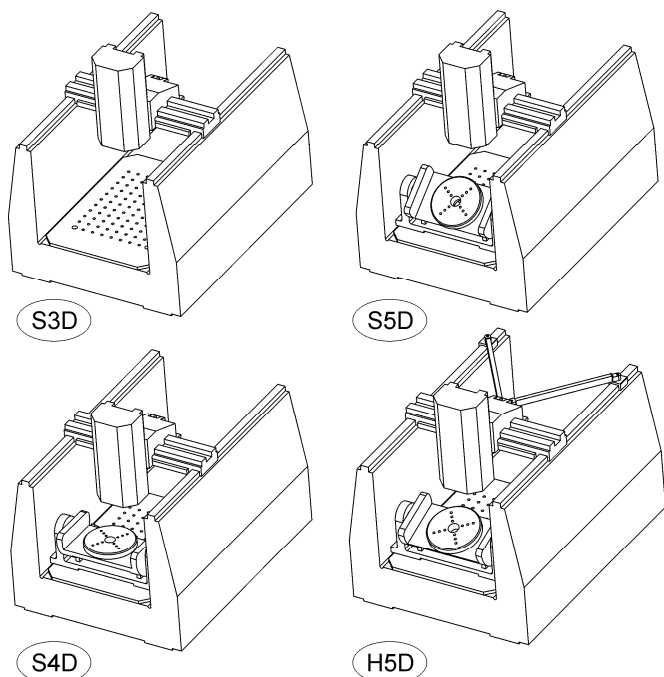
TABELA III. OPIS STRUKTURA MAŠINA ALATKI

Tip mašine	Opis mašine
S3	$S3 = P1 \wedge ST \wedge JSM \wedge DSS \wedge GV \wedge SV$
S4	$S4 = P1 \wedge ST \wedge DSH \wedge GV_{HG} \wedge SV$
S6	$S5 = P3 \wedge B \wedge DSV \wedge UFO$
KH1 (S4D, S5D, H5D)	$KH1 = P4 \wedge TM \wedge DSS1 \wedge UFO$

U Tabeli III je naznačeno da istom uzorku KH1 pripadaju mašine S4D, S5D i H5D. Na Sl. 3 dat je detaljniji prikaz odabranog uzorka KH1. To su polazne koncepcije četiri mašine: S3D(troosne), kao osnovne portalne, S5D(petoosne), kao klasične portalne petoosne, S4D(četvoroosne) kao tipičan primer portalne četvoroosne (na Sl. 3 nije prikazan i opcioni nosač zadnjeg šiljka) i H5D(petoosne hibridne), kao glavne konfiguracije. Oznaka S ukazuje na mašinu sa serijskom kinematikom, a H sa hibridnom, serijskom i paralelnom.

Plan uzoraka stonih petoosnih mašina alatki, sa Sl. 3, ima ova svojstva:

- Uzajamno su ekvivalentne, jer je konfigurisu iz iste grupe modula i po istom programu gradnje, odnosno, po zajedničkom konfiguratoru.
- Za slučajeve obrada kraćih delova i korišćenjem obrtnih stolova dobra je mašina H5D: nisu potrebni dugi hodovi nosača alata, dok brzine pomoćnih kretanja alata treba da budu dovoljne da mogu da prate obrtanja stolova i to u paru i pojedinačno.



Slika 3. Polazne koncepcije multifunkcionalne rekonfigurabilne stone petoosne mašine tipa KH1

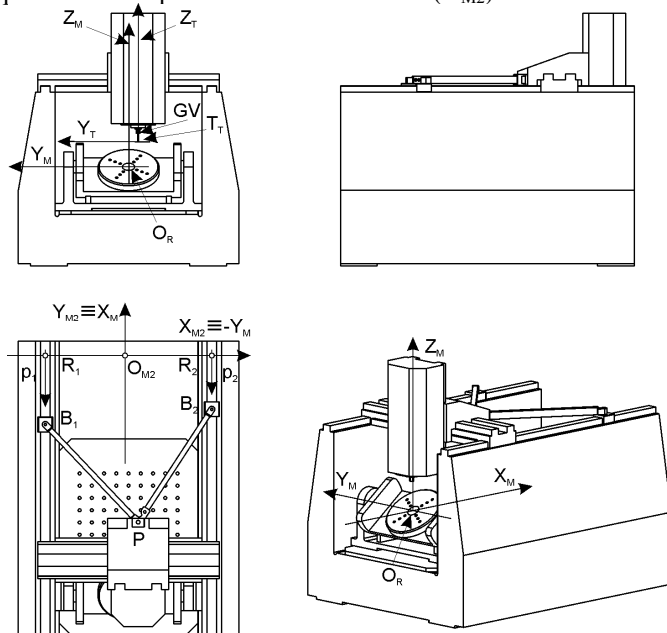
- Za četvoroosne obrade je najbolja mašina S4D. Sa dovoljno brzim stolom, ili dodatim vretenom SV, može da radi kao strug, kada je takvoj obradi prilagođen i nosač alata, koji je blokiran.
- Troosna mašina (S3D) je polazna za sve ostale sa Sl. 3.

Zbog mašine S3D dvoosni sto je postavljen poprečno, pa je za ove mašine osnovna strukturna formula WCBVXYZT.

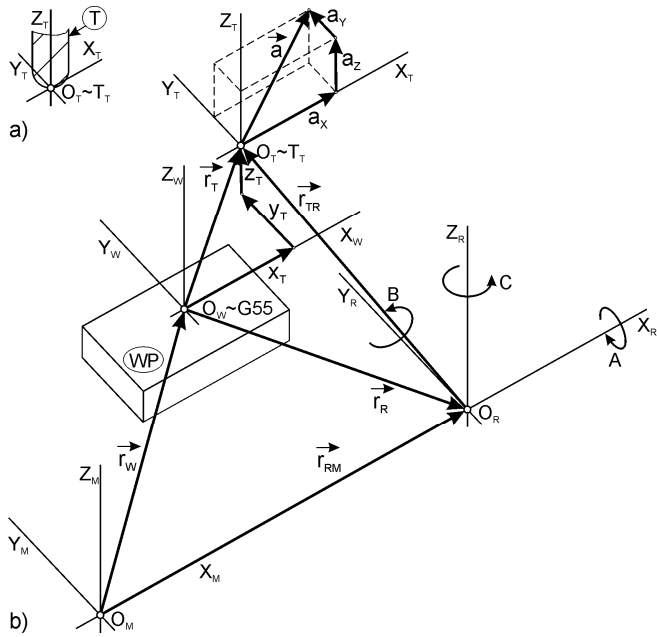
### III. POSTPROCESORSKI RAČUN U CAD/CAM SISTEMU ZA PROGRAMIRANJE I SIMULACIJU OBRADU

Programiranje mašina sa serijskom kinematikom tipa WCBVXYZT u nekom CAD/CAM okruženju je rutinsko, kada se pripremi dobar postprocesor. Zbog toga nije potrebno ponavljati postprocesorski račun, koji se sprovodi u takvim postprocesorima, nego ga treba formalizovati i koristiti za naknadnu formalnu proveru programa (G kodova) koje treba izvršavati na mašinama sa Sl. 3. Razlog: ako se koristi mašina H5D, onda se u sistemu za upravljanje sprovodi naknadni postprocesorski račun za njenu hibridnu kinematiku, da bi se interpretirani G kod, koji je pravljen za mašinu tipa WCBVXYZT, mogao izvršavati i na mašinama S5D i H5D. Zbog toga rekonfigurisanje hardvera sa Sl. 3 treba da bude praćeno i rekonfigurisanjem softvera (sistema za upravljanje), da bi se imao pravi rekonfigurabilni petoosni obradni sistem, ilustrovan na Sl. 3. Slede prikaz formalizma postprocesorskog računa za petoosne mašine sa Sl. 3 i opis jedne od provera ispravnosti tog računa.

Formalizam postprocesorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT. Potrebno je pripremiti model za ovaj račun. Na Sl. 4 pokazana je osnovna priprema, u kojoj su prikazani osnovni koordinatni sistem mašine ( $O_R$ ), alata ( $T_T$ ) i podsistema sa paralelnom kinematikom ( $O_{M2}$ ).



Slika 4. Koncepcija rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D, sa strukturnom formulom WCBVXYZT



Slika 5. Prvi kinematički model rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D

U ovom odeljku se opisuje postprocesorski račun za podsistem sa serijskom kinematikom, u osnovnom sistemu  $O_R$ . Kinematički model je dat na Sl. 5, zajedno sa važnijim oznakama. U ovom modelu je dodat koordinatni sistem mašine ( $O_M$ ), u kojem je osnovni sistem,  $O_R$ , postavljen u centar obrtanja stolova. Koordinatni sistem programa je  $O_W$ , vezan za obradak (WP). Posmatra se slučaj u kojem je sistem programa paralelan sa sistemima mašine, pa je za nultu tačku (na primer, G55, Sl.5), potrebna samo translacija da bi mašina radila po interpretiranom programu i pripremom sa tako postavljenim priborom i pripremom na stolu. Sistem obratka ( $O_W$ ) se ne poklapa sa osnovnim sistemom mašine, što je opisano vektorom  $\vec{r}_R$  i to u sistemu  $O_W$ , u kojem važi i dobijeni program. Sistem alata (T) ima početak u  $O_T$ .

Programiranjem ovakve petoosne mašine u CAD/CAM sistemu formira se putanja alata u odnosu na obradak i upisuje u CLF, kao šestorka podataka: tri za vektor položaja vrha alata u sistemu programa ( $\vec{r}_T$  u  $O_W$ ) i tri za orijentaciju ose alata ( $\vec{a}$  u  $O_W$ ), za svaku pozu mašine na putanji, opisanu kao naredba GOTO/ $\vec{r}_T$ ,  $\vec{a}$ , svojstvena formatu APT.

Koordinatni sistemi u ovom računu su: koordinatni sistemi mašine  $O_M(X_M, Y_M, Z_M)$  i  $O_R(X_R, Y_R, Z_R)$ , koordinatni sistem obratka  $O_W(X_W, Y_W, Z_W)$  i koordinatni sistem alata  $O_T(X_T, Y_T, Z_T)$ . Koordinate korišćenih vektora za orijentaciju alata ( $\vec{a}_0, \vec{a}$ ) i vektora ( $\vec{r}_{T0}, \vec{r}_T, \vec{r}_R, \vec{p}, \vec{x}$ ) i matrica  $[T_r(\vec{v})]$  su:

$$\vec{a}_0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}; \vec{a} = \begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{Bmatrix}; \vec{r}_{T0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}; \vec{r}_T = \begin{Bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{Bmatrix}; \vec{r}_R = \begin{Bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \\ 1 \end{Bmatrix};$$

$$\vec{p} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{Bmatrix}; \vec{x} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{Bmatrix}; [T_r(\vec{v})] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 1 & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ostalo:  $\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}^T$  je neki dati vektor, T je alat, W, ili WP je obradak.

Sledi postprocesorski račun, koji se može ovako opisati za svaku od tih poza posebno: iz svoje referentne pozicije mašina obrtanjem stolova usmerava programirani ort ose alata ( $\vec{a}$ ) na  $\vec{a}_0$ , kakav mašina jedino i ima, a onda translacionim osama navodi vrh alata ( $T_T$ ) na njegovu zaokrenutu programiranu poziciju zbog već sprovedenih obrtanja stolova. Stolovi se obrću za  $-C$ , pa za  $-B$ . Neka je sa  $Tr(\vec{v})$  označena translacija za vektor  $\vec{v}$ , a sa  $Rot(\vec{o}, \varphi)$  obrtanje za ugao  $\varphi$  oko orta  $\vec{o}$ , u pozitivnom smeru, gde je  $\vec{o}$  ort  $\vec{i}$  osa  $X_M \sim X_R$  mašine, ili ort  $\vec{j}$  osa  $Y_M \sim Y_R$ , ili ort  $\vec{k}$  osa  $Z_M \sim Z_R$ . Na H5D su ose obrtanja stolova paralelne sa osama Z i Y u koordinatnim sistemima ove mašine. Ugao obrtanja ima negativni predznak ako se obrće obradak (sa stolom). Po standardu je obrtanje oko orta  $\vec{i}$  ugao A, oko orta  $\vec{j}$  ugao B i oko orta  $\vec{k}$  ugao C. Ovako opisana obrtanja stolova, pa translacije alata, mogu se formalizovati kao direktna geometrija mašine, pomoću sledeće dve jednačine, respektivno:

$$\begin{aligned} Tr(\vec{r}_R) \cdot Rot(\vec{k}, -C) \cdot Rot(\vec{j}, -B) \cdot Tr(\vec{p}) \cdot \vec{a}_0 &= \vec{a} \\ Tr(\vec{r}_R) \cdot Rot(\vec{k}, -C) \cdot Rot(\vec{j}, -B) \cdot Tr(\vec{p}) \cdot \vec{r}_{T0} &= \vec{r}_T \end{aligned} \quad (1)$$

Izgled matrice translacije  $Tr(\vec{v})$  za neki vektor  $\vec{v}$  je već pokazan. I matrice rotacija oko osa koordinatnih sistema mašine imaju uobičajeni oblik, svojstven homogenim koordinatama. U jednačini (1) je  $\vec{p}$  potrebno kretanje alata u odnosu na obradak u sistemu  $O_R$  mašine, dok se stvarna potrebna kretanja osa mašine, koja se unose u program, mogu opisati vektorom  $\vec{g} = \{X \ Y \ Z \ 1\}^T$ . Drugo rešenje je par uglova obrtnih osa. U ovom slučaju su to uglovi C i B. Rešenja jednačina (1) traže se odvojeno. Tako se dobija rešenje za inverzni geometrijski problem, koje se ugrađuje u postprocesor. Međutim, u ovom slučaju se taj formalizam koristi za proveru upravo interpretiranog G koda u sistemu otvorene arhitekture, konfigurisanom za posmatranu mašinu, jednu od onih sa Sl. 3. Sa smenama sC za  $\sin(C)$ , cC za  $\cos(C)$ , sB za  $\sin(B)$ , cB za  $\cos(B)$ , mogu se kompaktno napisati oba ova rešenja inverznog geometrijskog problema. Prvi deo rešenja se može napisati kao:

$$B = \arccos(a_z), B \in (0, \pi), B \neq 0 \quad (2)$$

$$C = \text{atan2}\left(\frac{sB}{a_x}, -\frac{cB}{sB}\right), C \in [-\pi, \pi]. \quad (3)$$

Drugi deo rešenja, za pozicije translatornih osa mašine ( $X, Y, Z$ ), posle uređivanja, obično se piše u sledećem obliku:

$$\begin{aligned}
 X &= x_R + p_x, \\
 p_x &= (x_T - x_R) \cdot cB \cdot cC - (y_T - y_R) \cdot cB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot sB \\
 Y &= y_R + p_y, \quad p_y = (x_T - x_R) \cdot sC + (y_T - y_R) \cdot cC \\
 Z &= z_R + p_z, \\
 p_z &= -(x_T - x_R) \cdot sB \cdot cC + (y_T - y_R) \cdot sB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot cB
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

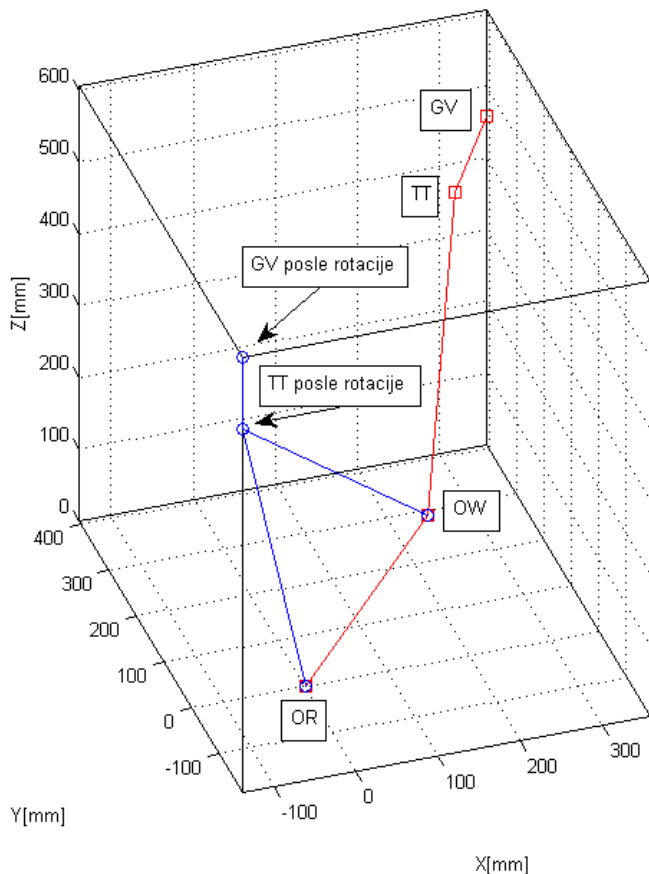
**Provera računa.** Pokazana je na Sl. 6. GV je oznaka za centar nosača alata, ovde dužine 100mm. Crvenom bojom je prikazana programirana poza mašine u sistemu  $O_R$ , na osnovu podataka iz programa, u sistemu  $O_W$ . Plavom bojom je nacrtana poza mašine posle izvršavanja kretanja po rešenjima (2)-(4), za specijalni slučaj:  $\vec{r}_R = [-200, -150, -100]^T$ ,  $\vec{r}_T = [100, 200, 300, 1]^T$  i  $\vec{a}_T = [3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 1]^T$ .

Rezultati su:

$$B = 54.736^\circ, C = 135.0^\circ,$$

$$X = -138.763, Y = -185.355, Z = 506.218, p_x = 61.237 \text{ itd.}$$

Priča i druga provera za masinu WCBVXYZT. Duzina alata je 100mm.

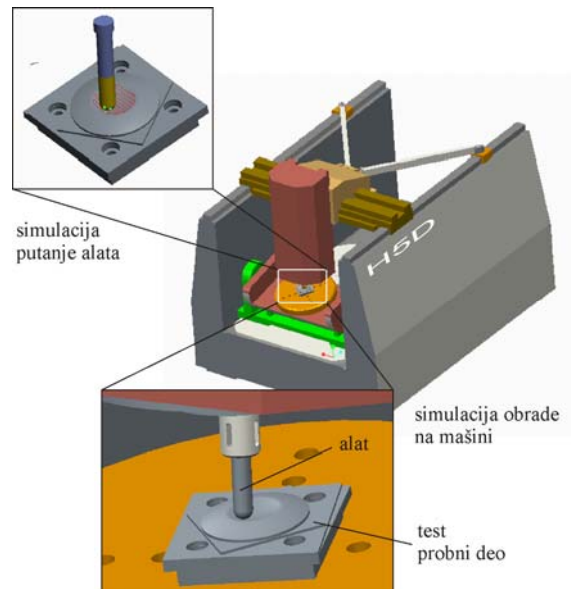


Slika 6. Provera računa po prvom kinematičkom modelu rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D

**Postprocesorski račun u sistemu za upravljanje.** Sprovodi se u dva dela. U prvom se vrši provera prikazana na Sl. 6: da se programirani ort ose alata ( $\vec{a}_T$ ) rotacijama za C, pa za B iz (2) i (3) zaista poklapa sa  $\vec{a}_0$  i da translatorne ose mašine treba da budu u pozicijama  $[X \ Y \ Z \ 1]^T$ , propisanim jednakostima (4). Ta provera se vrši i kinematički pomoću virtuelane mašine. U drugom delu se izračunavaju potrebne pozicije pogonskih osa  $p_1$  i  $p_2$  mašine  $M_2$  sa paralelnom kinematikom, Sl. 4. To je drugi kinematički model mašine tipa H5D. Po njemu je nađeno rešenje inverzne i direktne geometrije podsistema sa paralelnom kinematikom i to rešenje je uspešno implementirano u interpretirani G kod, da bi se u njemu izvršile korekcije, koje su posledica kinematike mašine. Posle toga su već moguća planiranja putanje alata, pa interpolacije u realnom vremenu, itd.

**Simulacija obrade u CAD/CAM sistemu.** U ovoj fazi projekta verifikacija polaznih koncepcija je prikazana simulacijom obrade na virtuelnoj mašini [9]-[11] u CAD/CAM okruženju. Programi za verifikaciju su pripremljeni primenom CAD/CAM sistema. Simulacija kinematike virtuelnog prototipa omogućava kretanje modeliranih segmenata, sa alatom na kraju, koji na ekranu iscrta putanju alata, koja je nastala kao rezultat izvršenja zadatog programa.

Za programiranje su odabrani resursi kojima se programiraju mašine alatke sa serijskom kinematikom. Izabrano okruženje za programiranje je CAD/CAM sistem Creo. Postprocesiranje se vrši kao za petoosnu glodalicu tipa WCBVXYZT, za koju je konfigurisan postprocesor primenom generatora postprocesora u CAD/CAM sistemu Creo. Prilikom simulacije obrade moguće je u simulaciju uključiti i kompletan virtuelni prototip mašine, opcijom *Machine play*. Jedan primer verifikacije virtuelnog prototipa izvršenjem zadatog programa za obradu, simulacijom kinematike virtuelnog prototipa je pokazan na Sl. 7.



Slika 7. Simulacije kinematike multifunkcionalne rekonfigurabilne petoosne mašine za zadati program obrade probnog dela

#### IV. ZAKLJUČAK

Osnovni ciljevi, prikazani u ovom radu, mogu se svesti na razvoj multifunkcionalne rekonfigurabilne stonje petoosne mašine alatke, na bazi koncepta CNC upravljanja otvorene arhitekture, a za mašine alatke specifične konfiguracije. Razmatrane su polazne koncepcije za razvoj rekonfigurabilne stonje petoosne mašine alatke. Ustanovljen je sistem sastavnih elemenata, u vidu konfiguratora, sa pravilima za korišćenje osnovnih modula, prilikom sinteze polaznih struktura mašina u planu uzoraka za planirane multifunkcionalne rekonfigurabilne stonje petoosne mašine. Među svim strukturama u planu uzoraka neka od njih će biti izabrana za konačnu realizaciju.

Rekonfigurabilna stonja petoosna mašina će imati rekonfigurabilni i hardver i softver za sistem upravljanja. Za upravljanje mašinom je izabran već uhodani softver otvorene arhitekture, kao što je EMC (Enhanced Machine Control) [12], [13], čiji se kôd može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License).

U radu je prikazan formalizam postprocesorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT, sa proverom računa. U nastavku se planira završetak i drugog dela izračunavanja koji se odnosi na potrebne pozicije pogonskih osa  $p_1$  i  $p_2$  mašine  $M_2$  sa paralelnom kinematikom, odnosno prikaz rešenja inverzne i direktne geometrije podsistema sa paralelnom kinematikom i implementacija u sistem upravljanja otvorene arhitekture.

Primena ove mašine je značajna za dalja istraživanja u oblasti višeosne obrade i rekonfigurabilnih petoosnih mašina, kao i za obuku i edukaciju za programiranje, što je posebno značajno za obrazovne ustanove, prilikom sticanja znanja o kompleksnim rekonfigurabilnim višeosnim mašinama.

U sklopu daljih istraživanja razmatra se i realizacija virtuelne petoosne mašine integrisane u sistem upravljanja i primena jedne vrste hibridnog objektnog programiranja numerički upravljanih mašina, poznatijeg kao STEP-NC, u meri u kojoj će taj metod programiranja biti primenljiv na budućim jedinicama za numeričko upravljanje [14], [15].

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „TR035022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema”, koji je podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] T. Moriwaki, Multi-functional machine tool, Annals of the CIRP – Manufacturing Technology, 2008, Vol 57, pp.736-749
- [2] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, HV Brussel, Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, 1999, Vol. 48/2, pp. 527-540.
- [3] M. Glavonjić, Kompleksne mašine alatke, Podsetnik za temu AN-7, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, decembar 2012, [http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma\\_bsc/pdf\\_m/ha7\\_m.pdf](http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/pdf_m/ha7_m.pdf)
- [4] M. Glavonjić, Mašine alatke za višeosnu obradu, Podsetnik za temu AN-7, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, april 2011, [http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma\\_bsc/pdf\\_nma/ha7nma.pdf](http://cent.mas.bg.ac.rs/nastava/ma_bsc/pdf_nma/ha7nma.pdf)
- [5] Ю. Д. Брагов, Анализ компоновок металлорежущих станков, Основы компонентики, Машиностроение, Москва, 1978.

- [6] E. Saljé, J. Böckem, H. Depcke, K. Puttkammer, W. Redecker, Eine Systematik für Relativbewegungen bei spanender Bearbeitung in Abhängigkeit von Werkstück und Werkzeug, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 68(1973)8, S. 404-408.
- [7] Glavonjić M., Živanović S., Kokotović B., Konfigurisanje stonih petoosnih mašina alatki, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo 62, Broj 5, Godina LXVIII 2013, str 857-863
- [8] Seungkil Son, Taejung Kim, Sanjay E. Sarma, Alexander Slocum, A hybrid 5-axis CNC milling machine, Precision Engineering, 2009, Vol. 33, pp. 430-446
- [9] S. Živanovic, M. Glavonjic, Z. Dimic, “Methodology for Configuring Desktop 3-axis Parallel Kinematic Machine,” Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions, 2009, vol.37, pp. 107-115
- [10] Z. Dimić, S. Živanović, V. Kvrđić, “Konfigurisanje EMC2 za programiranje i simulaciju višeosnih mašina alatki u Python virtuelnom grafičkom okruženju,” XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova, str.353-356, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [11] S. Živanović, M. Glavonjić, Z. Dimić Z., Konfigurisanje virtuelne mašine troosne glodalice sa paralelnom kinematikom za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja, XI međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2012, Zbornik radova Vol. 11, str. 464-469, mart 2012.
- [12] LinuxCNC, EMC's webpage, <http://www.linuxcnc.org/>
- [13] Real-Time Control Systems Library — Software and Documentation, <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/rcslib/>
- [14] M. Glavonjić, S. Živanović, Novi pristup programiranju numerički upravljanih mašina alatki primenom STEP-NC, 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.112-3.117, Mašinski fakultet, Beograd, maj 2012.
- [15] M. Glavonjić, S. Živanović, Protokol STEP-NC za programiranje numerički upravljanih mašina alatki, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo 61, Broj 6, Godina LXVII 2012, str 937-942

#### ABSTRACT

This paper presents the initial concept of multifunctional and reconfigurable desktop 5 axis machine tools, which are classified in the class of complex machine tools. The elements of the planned configurator of multifunctional machine tools are presented throughout configuration of reconfigurable desktop 5-axis machine tool. For a selected class of machine type KH1, provides an analysis and a more detailed description of the configuration. This paper presents a formalism to develop a postprocessor for 5 axis machine tool types WCBVXYZT. Verification of the concept of virtual prototype is described using simulation on virtual machine in the CAD/CAM environment.

#### CONCEPTIONS OF MULTIFUNCTIONAL AND RECONFIGURABLE DESKTOP 5 AXIS MACHINE TOOLS

Miloš Glavonjić, Saša Živanović, Branko Kokotović

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна и универзитетска библиотека  
Републике Српске, Бања Лука

007:004(082)(0.034.4)  
658.5:007(082)(0.034.4)

МЕЂУНАРОДНИ научно-стручни симпозијум Инфотех-Јахорина  
2014. (13 ; 2014 ; Јахорина)

Zbornik radova [Elektronski izvor] / XIII međunarodni naučno-  
stručni simpozijum Infotech-Jahorina 2014, Jahorina, Hotel Bistrica, 19-  
21. mart 2014. ; [glavni organizator Elektrotehnički fakultet, Istočno  
Sarajevo ; suorganizatori Elektrotehnički fakultet, Banja Luka,  
Elektrotehnički fakultet, Beograd, Elektronski fakultet, Niš, Fakultet  
tehničkih nauka, Novi Sad ; urednik Slobodan Milojković]. - Istočno  
Sarajevo : Elektrotehnički fakultet, 2014. - 1 elektronski optički disk  
(CD-ROM) : tekst, slika ; 12 cm

Dostupno i na: <http://www.infotech.rs.ba/zbornik/2014/index.html>. -  
Nasl. sa nasl. ekrana. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tekst ćir. i lat.. -  
Tiraž 300. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-99955-763-3-2

1. Електротехнички факултет (Источно Сарајево) 2.  
Електротехнички факултет (Бања Лука) 3. Електротехнички  
факултет (Београд) 4. Електронски факултет (Ниш) 5. Факултет  
техничких наука (Нови Сад)

COBISS.RS-ID 4247064