

Jedna stona rekonfigurabilna mašina alatka sa hibridnom kinematikom

SAŠA T. ŽIVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

MILOŠ M. GLAVONJIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

BRANKO M. KOKOTOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.7.06

U ovom radu je predstavljena jedna stona rekonfigurabilna mašina alatka sa hibridnom kinematikom, za četiri tipa mašina alatki, sa opisom primenjenog mehanizma i uspostavljenim modularnim sistemom za njihovo konfigurisanje. U radu je opisan i postprocesor za petoosnu obradu, primenjen na kinematičku strukturu mašine sa obrtno-nagibnim stolom, sa rotacijama (B,C). Takođe je pokazano izračunavanje pozicija aktuatora p_1 i p_2 kada mašina radi sa hibridnom kinematikom. Verifikacija postprocesora je ostvarena na virtuelnom prototipu u CAD/CAM okruženju i eksperimentalno na jednoj raspoloživoj troosnoj mašini, sa dodatim dvoosnim priborom. Eksperimentalni rezultati su potvrdili konfigurisani postprocesor, koji može da se koristi za programiranje mašina.

Ključne reči: konfigurisanje, rekonfigurabilna mašina alatka, postprocesor

1. UVOD

Istraživanja multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki su intenzivna i imaju dosta kompletnih rezultata [1-4]. Predmet ovog rada je razvoj jedne rekonfigurabilne stonice mašine alatke sa serijskom i sa hibridnom kinematikom. Pod koncepcijom rekonfigurabilne mašine alatke ovde se podrazumeva sistem sastavnih elemenata pomoću kojeg se može konfigurisati više mašina. Svaka od tih mašina je sa novom kinematičkom strukturom.

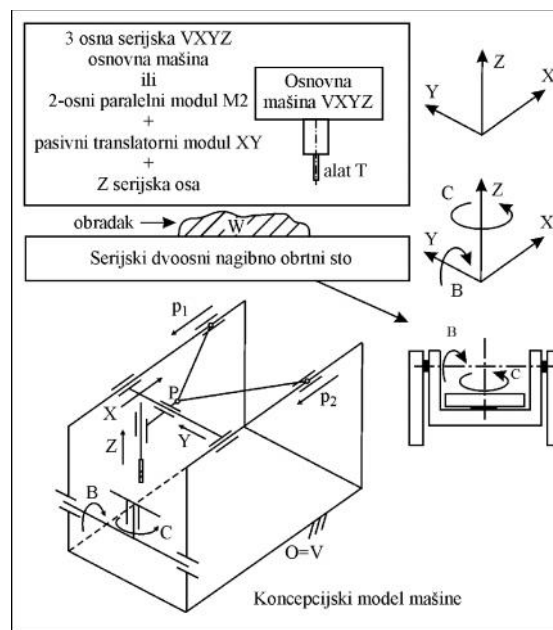
Osnovni funkcionalni zahtevi za razvoj multifunkcionalne rekonfigurabilne stonice petoosne mašine su bili: (i) napraviti niskobudžetnu stonice mašinu alatku, (ii) uspostaviti sistem sastavnih elemenata za konfigurisanje četiri različite mašine, (iii) upravljanje realizovati na PC Linux platformi otvorene arhitekture, (iv) za pogone pomoćnih kretanja koristiti koračne motore, (v) mašinu programirati pomoću G-kôda, (vi) obezbediti pristupačnost i bezbednost u radu, i (vii) mašinu posmatrati kao resurs za istraživanje i edukaciju.

Za ovaj rad je izabrana koncepcija mašine pokazane na slici 1.

Adresa autora: Živanović Saša, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

Rad primljen: 26.05.2014.

Rad prihvaćen: 24.12.2014.



Slika 1 – Koncepcijski model mašine

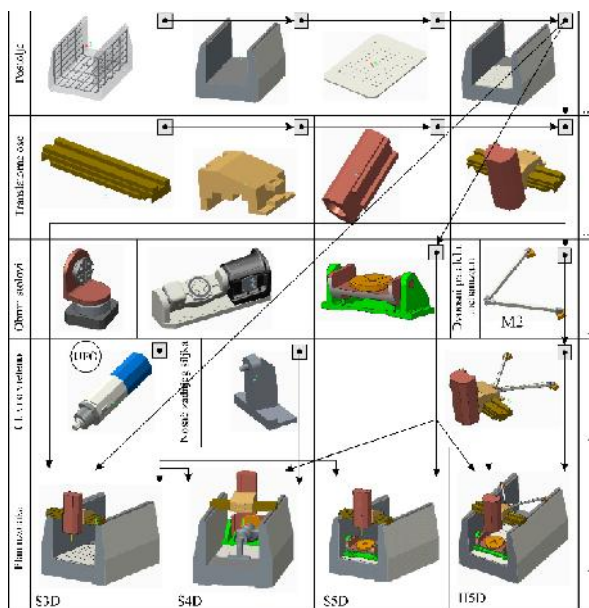
Osnovna mašina je troosna stonice portalna glodalica strukture VXYZ. Dodavanjem dvoosnog nagibno obrtnog stola (B, C) ispred osnovne mašine, ova mašina postaje petoosna, strukture WCBVXYZT [5]. Fiksiranjem ose $B=0^\circ$ ili $B=90^\circ$, uz zadržavanje ose C, mašina postaje četveroosna na kojoj je moguća i obrada struganjem. Četvrta moguća koncepcija podrazumeva osnovnu mašinu sa hibridnom kinematikom i

to: dvoosni paralelni modul M2, koji ostvaruje pomeranje tačke P u ravni (X, Y) preko pasivnog translatornog modula (X, Y), dok je Z osa serijska. Na ovakvoj osnovnoj mašini ostaje i dvoosno obrtni nagibni sto, čime je dobijena i petoosna mašina sa hibridnom kinematikom, koja se detaljno razmatra u ovom radu.

Za mašinu, koja je predmet analize u poglavlju 2, prikazan je uspostavljeni sistem sastavnih elemenata za njeno konfigurisanje. U poglavlju 3 je pokazan postprocesorski račun za kompletnu petoosnu mašinu sa hibridnom kinematikom. Prikazani su i provera postprocesorskog računa i radni prostor. Verifikacija postprocesorskog računa i konfigurisanog postprocesora za mašinu urađeni su na primeru obrade četvorostane piramide na raspoloživoj mašini, što je pokazano u poglavlju 4.

2. KONFIGURATOR JEDNE KLASJE REKONFIGURABILNIH 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 slici 2 u vidu morfološke matrice.

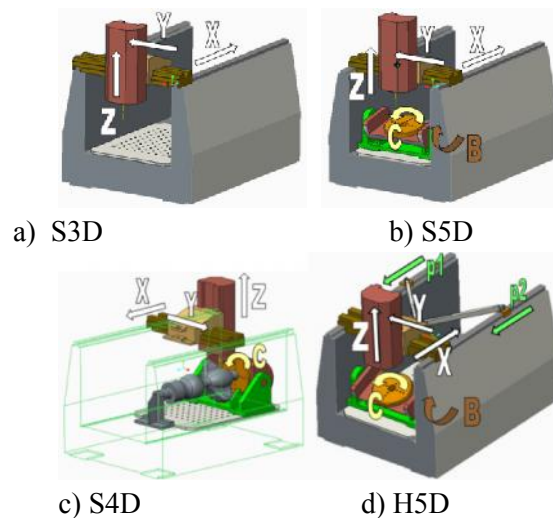


Slika 2 – Konfigurator jedna klase rekonfigurabilnih mašina alatki

Sastavni deo ove matrice su prikazi realizacija sistema sastavnih elemenata za postolje, translatorne ose, obrtni stolove, glavno vreteno, nosač zadnjeg šiljka i dvoosni paralelni mehanizam kao i deo plana uzoraka za mašine tipa S3D, S4D, S5D i H5D. Proslaskom kroz morfološku matricu sa slike 2 i kompletiranjem odgovarajućih potrebnih modula za osnovne funkcije mašine, dobijen je plan uzoraka mogućih

mašina. Na slici 2 su u planu uzoraka pokazana četiri primera konfigurisanih mašina alatki.

Na slici 3 dat je detaljniji prikaz odabranog plana uzorka sa slike 2.



Slika 3 - CAD modeli uzoraka sa slike 2

To su polazne koncepcije četiri mašine: S3D (troosne), kao osnovne portalne, S5D (petoosne), kao klasične portalne petoosne, S4D (četvorooosne) kao tipičan primer portalne četvorooosne i H5D (petoosne hibridne), kao glavne konfiguracije. Oznaka S ukazuje na mašinu sa serijskom kinematikom, a H sa hibridnom, serijskom i paralelnom.

Stone mašine u planu uzoraka sa slike 3 imaju ova svojstva:

- Uzajamno su ekvivalentne, jer se konfigurisu iz iste grupe modula i po istom programu gradnje, odnosno, po zajedničkom konfiguratoru.
- Za slučajevne 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.
- Za četvorooosne obrade je najbolja mašina S4D. Sa dovoljno brzim stolom, ili dodatim vretenom, može da radi kao strug, kada je takvoj obradi prilagođen i nosač alata, koji je blokiran.
- Troosna mašina (S3D) je polazna za ostale tri sa slike 3.

Dvoosni sto je postavljen poprečno zbog uklapanja u koncepciju mašine S3D, pa je za ove mašine osnovna strukturalna formula WCBVXYZT.

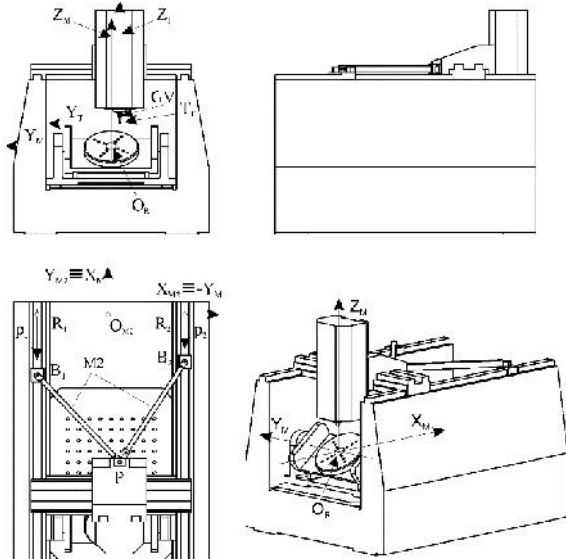
3. POSTPROCESORSKI RAČUN

Programiranje mašina sa serijskom kinematikom tipa WCBVXYZT u nekom CAD/CAM okruženju je

rutinsko, kada se pripremi dobar postprocesor [6]. Međutim, postprocesor za mašine sa paralelnom i hibridnom kinematikom nisu uobičajeni. Zbog toga ovde nije potrebno ponavljati postprocessorski račun, koji se sprovodi u postprocesorima za mašine sa serijskom kinematikom, nego ga treba formalizovati i koristiti za naknadnu formalnu proveru i doradu programa (G kodova), koje treba izvršavati na mašinama sa slike 3. Razlog: ako se koristi mašina H5D, onda se u sistemu za upravljanje sprovodi naknadni postprocessorski račun za njenu hibridnu kinematiku, da bi se interpretirani G kôd, koji je pravljen za mašinu tipa WC-BVXYZT (S5D), mogao izvršavati i na mašini H5D. Zbog toga rekonfigurisanje hardvera sa slike 3 treba da bude praćeno i rekonfigurisanjem softvera (sistema za upravljanje), da bi se imao pravi jedan primerak mašine iz rekonfigurisanja, čiji plan uzoraka ima i mašinu sa hibridnom kinematikom, ilustrovanu na slici 4. Slede prikaz formalizma postprocessorskog računa za petoosne mašine sa slike 3 i opis jedne od provera ispravnosti tog računa.

3.1 Formalizam postprocessorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT

Potrebno je pripremiti model za ovaj račun. Na slici 4 pokazana je osnovna priprema, u kojoj su prikazani osnovni koordinatni sistem mašine (O_R), alata (O_T) i podsistema sa paralelnom kinematikom (O_{M2}).

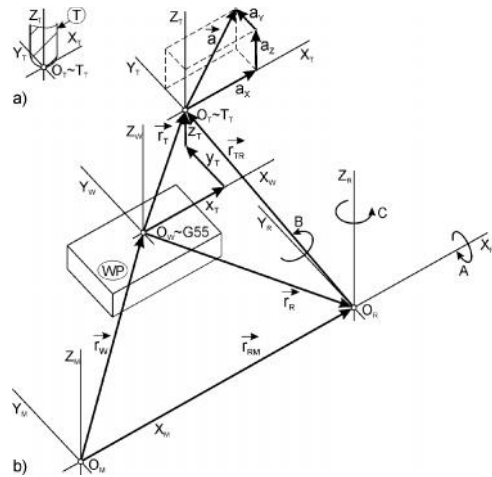


Slika 4 - Konceptija rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D, sa strukturnom formulom WCBVXYZT

U ovom odeljku se opisuje postprocessorski račun za podsistem sa serijskom kinematikom, u osnovnom sistemu O_R . Kinematički model je dat na slici 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 koordinatni sistem obratka, korišćen u programiraju obrade paralelan sa sistemima mašine, pa je za nultu tačku (na primer, G55, slika 5), potrebna samo translacija da bi mašina radila po interpretiranom programu i pripremom sa tako postavljenim priborom i pripremkom 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.



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

Koordinatni sistemi u ovom računu su:

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

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

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

Ostalo: $\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}^T$ je neki dati vektor translacije, 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 translatornim osama navodi vrh alata (T_T) na njegovu zaokrenutu programiranu poziciju, posle 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 φ oko ortu \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 mašini 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 ortu \vec{i} ugao A, oko ortu \vec{j} ugao B i oko ortu \vec{k} ugao C. Ovako opisana obrtanja stolova, pa translacije alata, mogu se formalizovati kao direktna geometrija mašine, pomoću sledeće dve jednačine, respektivno:

$$Tr(\vec{r}_R) \cdot Rot(\vec{k}, -C) \cdot Rot(\vec{j}, -B) \cdot Tr(\vec{p}) \cdot \vec{a}_0 = \vec{a}$$

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

Izgled matrice translacije $Tr(\vec{v})$ za neki vektor \vec{v} je već dat. 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 slike 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:

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

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

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

$$X = x_R + p_x,$$

$$p_x = (x_T - x_R) \cdot cB \cdot cC - (y_T - y_R) \cdot cB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot sB$$

$$Y = y_R + p_y, \quad p_y = (x_T - x_R) \cdot sC + (y_T - y_R) \cdot cC$$

$$Z = z_R + p_z,$$

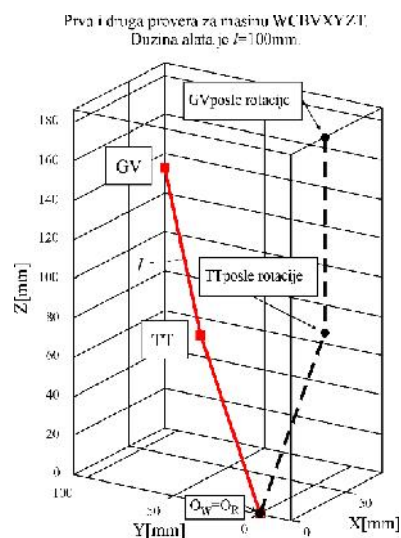
$$p_z = -(x_T - x_R) \cdot sB \cdot cC + (y_T - y_R) \cdot sB \cdot sC + (z_T - z_R) \cdot cB \quad (4)$$

3.2 Provera postprocesorskog računa

Provera postprocesorskog računa je pokazana na slici 6. GV je oznaka za centar nosača alata. Rastojanje od GV do TT je dužina alata, ovde $l = 100$ mm. Sada se razmatra slučaj kada je $\vec{r}_R = 0$, odnosno kada je O_W postavljeno tačno u O_R . Punom linijom je prikazana programirana poza mašine u sistemu $O_R = O_W$, na osnovu podataka iz programa, u sistemu O_W . Isprekidanom linijom je nacrtana poza mašine posle izvršavanja kretanja po rešenjima (2)-(4), za specijalni slučaj: $\vec{r}_R = [0, 0, 0]^T$, $\vec{r}_T = [25, 50, 75, 1]^T$ i

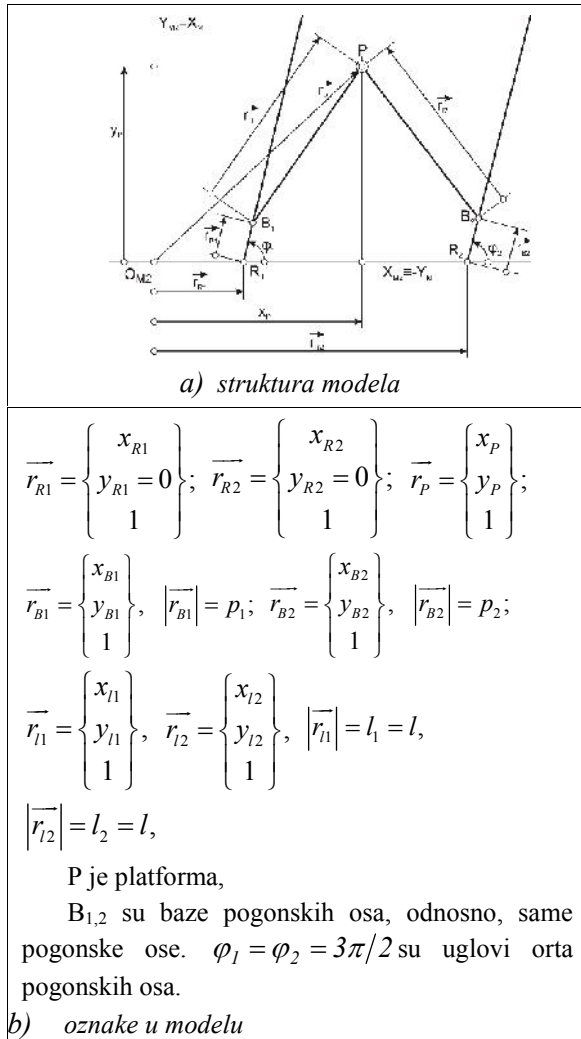
$$\vec{a}_T = [3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 3^{0.5}/3, 1]^T.$$

Rezultati su: $B = 54.736^\circ$, $C = 135.0^\circ$, $X = 30.619$, $Y = -17.678$, $Z = 86.602$, $p_x = 30.619$, $p_y = -17.678$, $p_z = 86.602$. Poklapanje X, Y, Z sa p_x , p_y , p_z , respektivno, posledica je poklopljenih koordinatnih sistema O_W i O_R .



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

Druga vrsta provera je postprocesorski račun u sistemu za upravljanje. Sprovodi se u dva dela. U prvom se vrši provera prikazana na slici 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). U drugom delu se izračunavaju potrebne pozicije pogonskih osa p_1 i p_2 mašine M_2 sa paralelnom kinematikom, slika 7.



Slika 7 - Drugi kinematički model rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D

To je drugi potrebni kinematički model mašine tipa H5D. Po njemu je nađeno rešenje inverzne i direktne geometrije podsistema sa paralelnom kinematikom. To rešenje se implementira u sistem za upravljanje otvorene arhitekture, 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. Model na slici 7 je opšti za dvoosni mehanizam, koji je među modulima za konfigurisanje mašina sa slike 2, naveden kao dvoosni

paralelni mehanizam M_2 . Ovako ugrađen mehanizam svojom platformom P, koja se vidi i na slici 4, služi za pogon jednog pasivnog translatorskog zgloba, kojim se uporedo pokreću ose X i Y serijskog dela mašine. Podaci za drugi postprocesorski račun su potrebne pozicije osa X i Y mašine. Na osnovu tih pozicija se izračunavaju pozicije p_1 i p_2 pogonskih osa B_1 i B_2 respektivno.

Model sa slike 7 ima koordinatni sistem koji je pogodan za (i) rešavanje inverznog i direktnog geometrijskog problema ovog podsistema, ali i za kasnije kompenzacije, koje su svojstvene sistemima za upravljanje mašina sa paralelnom kinematikom, a onda i na mašine sa hibridnom kinematikom (radi se o dve obrtne i dve paralelne pogonske ose) i (ii) za uklapanje podsistema u kompletnu mašinu.

Podsistem M_2 uklapa se u mašinu H5D jednostavnim preslikavanjem, pokazanim i na slici 7: $X_{M2} \equiv -Y_M$ i $Y_{M2} \equiv X_M$, gde su (X_M, Y_M) ose aktivnog koordinatnog sistema mašine (ili sa početkom u O_R , kao centru rotacija stolova, ili sa početkom u O_M , kao opšti slučaj). Sa ose X_M na osu Y_{M2} prelazi se samo translacijom, a sa ose Y_M na osu X_{M2} prelazi se samo promenom predznaka (rotacijom za π). Zbog toga se za modul M_2 model sa slike 7 prevodi u treći i četvrti kvadrant, slika 4. To znači da se opšti model prilagođava modulu M_2 na sledeći način: $x_{R1} = -x_{R2}$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 3\pi/2$, $l_1 = l_2 = l$.

Po oznakama sa slike 7 pravi se sledeći zbirovi:

$$\vec{r}_{R1} + \vec{r}_{B1} + \vec{r}_{I1} = \vec{r}_P, \text{ za pogonsku osu } p_1 \text{ i}$$

$$\vec{r}_{R2} + \vec{r}_{B2} + \vec{r}_{I2} = \vec{r}_P, \text{ za pogonsku osu } p_2. \quad (5)$$

Rešenje inverznog geometrijskog problema modula M_2 jesu pozicije pogonskih osa (p_1, p_2) , koje zadovoljavaju jednačine (5), sve za poziciju platforme P datu vektorom \vec{r}_P . Ta pozicija se izračunava na osnovu postojećeg rešenja inverznog geometrijskog problema datog u (4), dakle, na osnovu dobijenog programa po kojem mašina treba da radi. Pod uslovima, navedenim na slici 7 ($l_1 = l_2 = l$ i $y_{R1} = y_{R2} = 0$), dobija se sledeće rešenje inverznog geometrijskog problema za M_2 :

$$p_1 = (x_P - x_{R1}) \cdot c\varphi_1 + y_P \cdot s\varphi_1 - \sqrt{t_1}$$

$$p_2 = (x_P - x_{R2}) \cdot c\varphi_2 + y_P \cdot s\varphi_2 - \sqrt{t_2} \quad (6)$$

U (6) su korišćene sledeće smene:

$$t_1 = l^2 - ((x_P - x_{R1}) \cdot s\varphi_1)^2 + (x_P - x_{R1}) \cdot y_P \cdot s2\varphi_1 - (y_P \cdot c\varphi_1)^2$$

$$t_2 = l^2 - ((x_P - x_{R2}) \cdot s\varphi_2)^2 + (x_P - x_{R2}) \cdot y_P \cdot s2\varphi_2 - (y_P \cdot c\varphi_2)^2$$

$$c\varphi_1 = \cos(\varphi_1), s\varphi_1 = \sin(\varphi_1), s2\varphi_1 = \sin(2\varphi_1)$$

$$c\varphi_2 = \cos(\varphi_2), s\varphi_2 = \sin(\varphi_2), s2\varphi_2 = \sin(2\varphi_2)$$

Za rešavanje direktnog geometrijskog problema polazi se od sistema jednačina (5), napisanih u algebarskom obliku. Oduzme se druga od prve i tako dobije sledeća jednačina:

$$s_1 \cdot x_p + s_2 \cdot y_p = s_3,$$

gde su

$$s_1 = 2(x_{R2} + p_2 \cdot c\varphi_2 - x_{R1} - p_1 \cdot c\varphi_1),$$

$$s_2 = 2(p_2 \cdot s\varphi_2 - p_1 \cdot s\varphi_1),$$

$$s_3 = x_{R2}^2 - x_{R1}^2 + p_2^2 - p_1^2 - 2x_{R1} \cdot p_1 \cdot c\varphi_1 + 2x_{R2} \cdot p_2 \cdot c\varphi_2.$$

Iz $s_3 = s_1 \cdot x_p + s_2 \cdot y_p$ može da se izvrši eliminacija ili prve nepoznate (x_p), ili druge nepoznate (y_p). Pokazalo se da eliminacija nepoznate y_p postaje neodređena za $x_p = 0$. Zato se vrši eliminacija x_p :

$$x_p = \frac{s_3 - s_2 \cdot y_p}{s_1}.$$

Uvode se nove smene:

$$s_4 = \frac{s_3}{s_1} \quad i \quad s_5 = -\frac{s_2}{s_1}.$$

Tada je

$$x_p = s_4 + s_5 \cdot y_p \quad (7)$$

Novim smenama:

$$s_6 = 1 + s_5^2,$$

$$s_7 = 2(s_4 - x_{R1}) \cdot s_5 - 2s_5 \cdot p_1 \cdot c\varphi_1 - 2p_1 \cdot s\varphi_1 \quad i$$

$$s_8 = (s_4 - x_{R1})^2 - 2(s_4 - x_{R1}) \cdot p_1 \cdot c\varphi_1 + p_1^2 - l^2$$

dobija se drugi deo rešenja direktnog geometrijskog problema u obliku:

$$y_p = \frac{-s_7 \pm \sqrt{s_7^2 - 4s_6s_8}}{2s_6} \quad (8)$$

Rešenja (6), (7) i (8) ugrađuju se u sistem kojim se upravlja ova mašina. Provera je izvršena na primeru sa odabranim obrtnim stolom unutar noseće strukture mašine. Alternativa za ovo je da sto bude ispred noseće strukture, čime i mere mašine mogu biti manje. Provera je urađena za parametre u M_2 : $x_{R2} = -x_{R1} = 340$, $y_{R1} = y_{R2} = 0$, $l = l_1 = l_2 = 550$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 3\pi/2$. Ulazni podaci za proveru kompletnog postprocesorskog računa hibridne mašine, za slučaj kada je $O_W \equiv O_R$, su: $r_R = [0 \ 0 \ 0]$, $r_1 = [50 \ 100 \ 50]$. Potrebno je zauzeti orijentaciju alata prema obrtnom stolovima: $B = 54.736^\circ$ i $C = 135^\circ$, a zatim alat translirati u odnosu na O_R za: $X = p_x = -20.412$, $Y = p_y = -35.355$, $Z = p_z = 115.470$.

Za izračunavanje položaja klizača p_1 i p_2 ulazni podaci su:

$$x_p = -Y = 35.355 \quad i$$

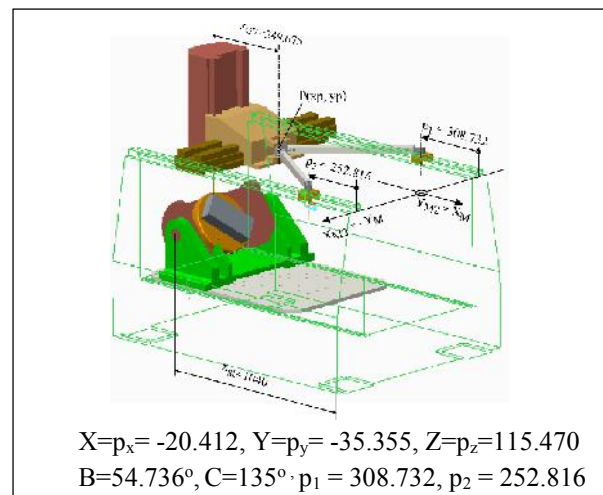
$$y_p = X - x_{st} + x_{GV} = -20.412 - 1040 + 349.675$$

gde su: x_{st} i x_{GV} parametri za potrebne translacije duž koordinatne ose Y_{M2} , preuzeti sa virtuelnog prototipa mašine, slika 8

Dobijeni rezultati za pogonske ose su:

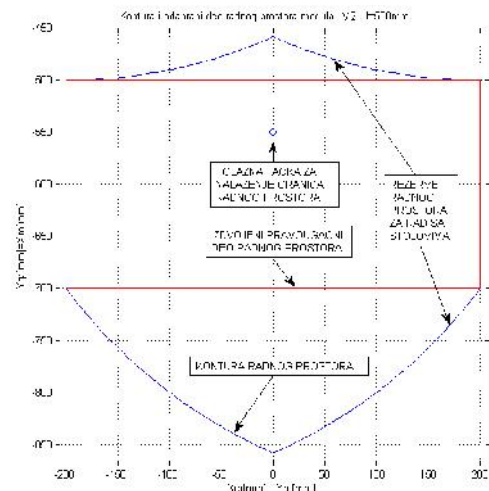
$$p_1 = 308.732 \quad i \quad p_2 = 252.816.$$

Provera je urađena i na virtuelnom prototipu mašine, u CAD/CAM okruženju, zauzimanjem pozicija po izračunatim koordinatama p_1 , p_2 , Z , B , C , pri čemu alat prema obrtnu zauzima korektnu poziciju i orijentaciju, kao što se može videti na slici 8



Slika 8 – Provera postprocesorskog računa na CAD virtuelnom prototipu

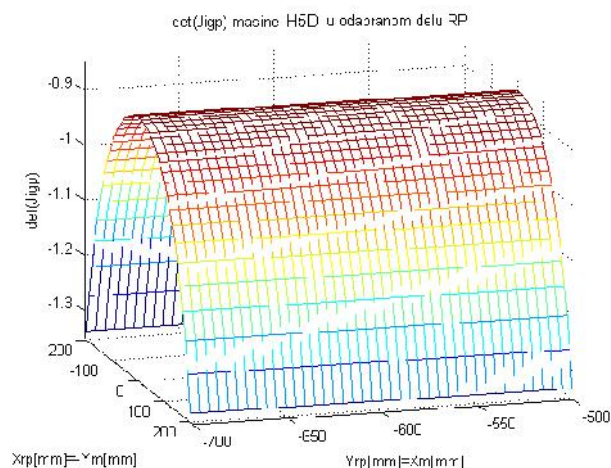
Oblik i mere radnog prostora podsistema M_2 prikazani su na slici 9.



Slika 9 - Radni prostor modula M_2 , po drugom kinematičkom modelu, rekonfigurabilne stonpe toosne mašine alatke tipa H5D

Za rad sa obrtnim stolovima raspoloživ je i deo radnog prostora, označen kao rezerva za rad sa stolovima: pomoću obrtnih stolova obično se obrađuju delovi srazmerni obrtnom stolu, na sredini radnog prostora mašine po osi Y_M .

Nad pravougaonim delom radnog prostora nacrta je promena determinante Jakobijana, slika 10. Vidi se da je determinanta, po apsolutnoj vrednosti, dovoljno blizu vrednosti 1.



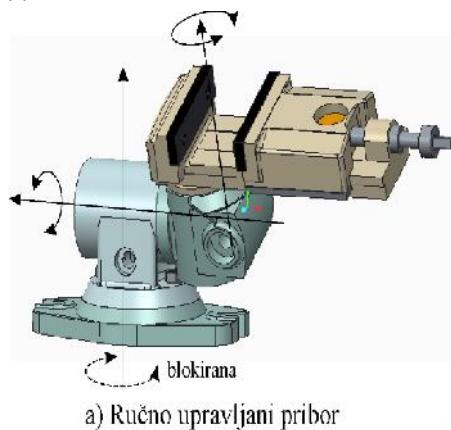
Slika 10 - Determinanta Jakobijana modula M2 po drugom kinematičkom modelu rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke tipa H5D

4. JEDAN PRIMER VERIFIKACIJE POSTPROCESORSKOG RAČUNA

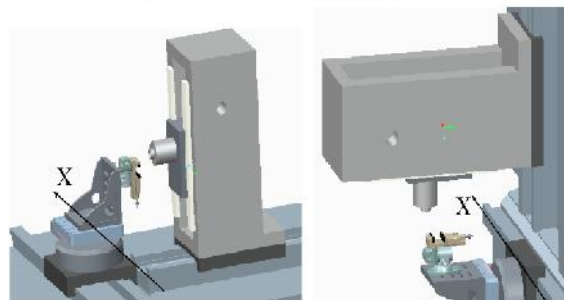
Za verifikaciju je odabrana obrada piramide, u kojoj se duže zadržavaju iste pozicije stolova, radi lakše kontrole. Delovi programa za te pozicije izvršavani su odvojeno, u režimu troosne obrade, na horizontalnom obradnom centru LOLA HMC500, sa dodate dve ručno upravljane obrtne ose, slika 11. Pozicioniranje po dve ručno upravljane obrtne ose ostvaruje se pomoću pribora, na kome je prva osa blokirana (slika 11a), dok su preostale dve iskorišćene da se njima ostvaruju ose orijentacije obratka B i C. Ako se izabrana mašina (slika 11b), posmatra kao da je zarotirana za -90° oko ose X (slika 11c), konceptijski se dobija mašina koja odgovara mašini S5D (slika 11d). To je ovde iskorišćeno za proveru konfigurisanog postprocesora za vertikalnu petoosnu mašinu tipa WXYZBCT.

Program za obradu je pripremljen primenom CAD/CAM sistema i generisanjem G koda pomoću konfigurisanog postprocesora. Pošto je reč o četvorostranoj piramidi, orijentacija alata se ostvaruje pomoću četiri odvojena naginjanja obratka za uglove B i C, koji su dobijeni u G kodu, posle postprocesiranja putanje alata iz CLF. Prvo je pripremljen program za stepenastu troosnu predobradu, kada je orijentacija

stolova $B=0$ i $C=0$. Posle predobrade, sledi obrada svake od četiri strane piramide. Po završenoj predobradi zauzima se orijentacija alata naginjanjem stolova za odgovarajuće uglove B i C za obradu prve strane piramide (C0. B-21.801). Posle završene obrade svake od strana piramide mašina se zaustavlja sa M0 i zauzima nova orijentacija alata u odnosu na obradak naginjanjem pribora za odgovarajuće uglove B i C. Ova naginjanja za pojedine strane iznose: (C0. B-21.801), (C90. B-21.801), (C180. B-21.801) i (C270. B-21.801) i predstavljaju zamrznute 4 poze iz postprocesora, koje su pokazane na slici 12 i koje je trebalo proveriti.

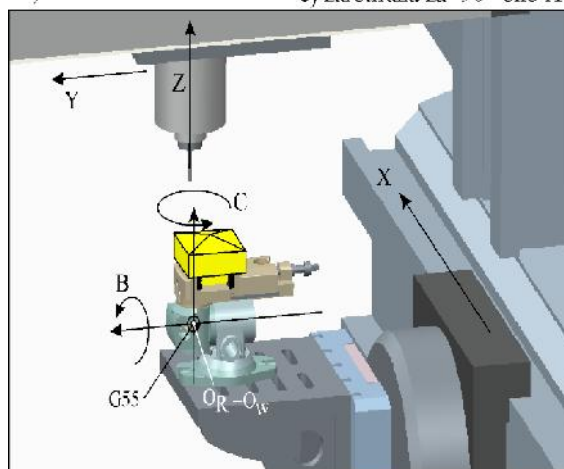


a) Ručno upravljani pribor



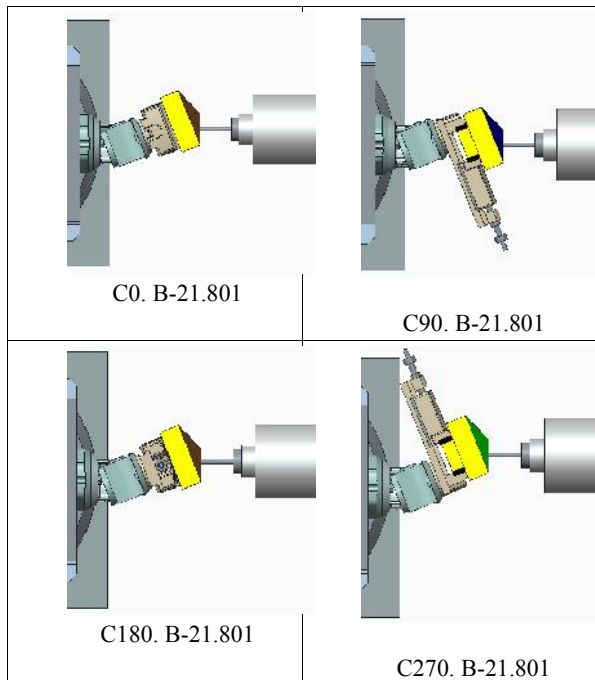
b) LOLA HMC500

c) zarotirana za -90° oko X



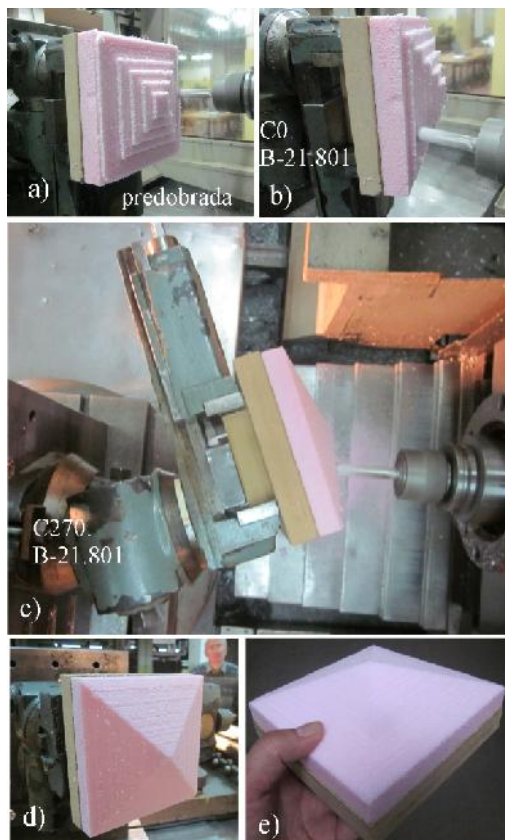
d) Ekvivalent mašine S5D

Slika 11 – LOLA HMC500 sa postavljenim priborom za orijentaciju obratka



Slika 12 – Provera četiri poze iz postprocesorskog računa na primeru obrade četverostrane piramide

Sama obrada piramide na mašini LOLAHMC500 pokazana je na slici 13.



Slika 13 – Obrade četverostrane piramide na mašini LOLA HMC500

Na početku je izvršena troosna stepenasta predobrada pripremljena, sa ostavljanjem dodatka za završnu obradu, slika 13a. Obrada prve strane piramide, sa naginjanjem samo ose za B-21.801, dok je C=0, pokazana je na slici 13b. Obrada poslednje strane piramide, sa zauzetim orijentacijama C=270. B=-21.801, pokazana je na slici 13c. Krajnji rezultat obrade sve četiri strane piramide pokazan je na slici 13d i slika 13e, kojim je verifikovan postprocesorski račun pojedinačnim proverama četiri programirane orijentacije.

5. ZAKLJUČAK

Osnovni ciljevi, postavljeni u ovom radu, odnosili su se na razvoj jedne klase stonih rekonfigurabilnih mašina alatki, na bazi koncepta CNC upravljanja otvorene arhitekture, a za mašine alatke specifične konfiguracije.

Razmatrane su polazne koncepcije za razvoj rekonfigurabilne stonetoosne 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 stonetoosne mašine. Među svim strukturama u planu uzoraka izabrana je jedna klasa rekonfigurabilnih stonih mašina tipova S3D, S4D, S5D i H5D.

U radu je prikazan i formalizam postprocesorskog računa za petoosne mašine tipa WCBVXYZT, sa proverom računa na virtuelnom prototipu i eksperimentom obrade na raspoloživoj troosnoj mašini, sa dodatim dvoosnim priborom za naginjanja obratka.

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

U sklopu daljih istraživanja razmatraće se i realizacija virtuelne petoosne mašine integrisane u sistem upravljanja i u sistem programiranja. Takođe se razmatra 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 [7].

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „TR 35022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema”, koji je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Moriwaki T., Multi-functional machine tool, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, p.736-749, 2008.
- [2] Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Brussel H.V., Reconfigurable Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, Vol. 48/2, p. 527-540. 1999.
- [3] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović B., Konfigurisanje stonih petoosnih mašina alatki, TEHNIKA: časopis Saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika 62, Broj 5, Godina LXVIII, str 857-863, ISSN 0040-2176, 2013.
- [4] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B., Konceptije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki, Infotech 2014, Zbornik radova, str. 857-863, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Jahorina, 2014.
- [5] Apro, K., Secrets of 5-axis machining, Industrial Press Inc., ISBN 978-0-8311-3375-7, Printed by Thomson Press India Limited, 2008.
- [6] Lee, R. S., She C.H., Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 13, No. 9, p. 658–665, 1997.
- [7] M. Glavonjić, S. Živanović, Protokol STEP-NC za programiranje numerički upravljanih mašina alatki, TEHNIKA: časopis Saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika 61, Broj 6, Godina LXVII, str 937-942, 2012.

SUMMARY

DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL RECONFIGURABLE DESKTOP MACHINE TOOL WITH HYBRID KINEMATICS

This paper presents a desktop reconfigurable machine tool with hybrid kinematics for four types machine tools, with a description of the applied mechanism and established a modular system for their configuring. The postprocessor for five-axis machining presented in this paper is applied to the kinematic structures with table-tilting with two rotations (B,C). Also are shown solving the position of actuators p_1 and p_2 when the machine works with hybrid kinematics. Verification of postprocessor is realized on virtual prototype in CAD/CAM environment and experimentally on an available 3-axis machine tool. Experimental results confirmed the configured postprocessor which can be used for programming machine tools.

Key words: *configuring, reconfigurable machine tool, postprocessor*