

Konfigurisanje nove edukacione mašine alatke na bazi mehanizma sa hibridnom kinematikom

SLOBODAN N. TABAKOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

SAŠA T. ŽIVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet, Beograd

MILAN V. ZELJKOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

ZORAN Ž. DIMIĆ, LOLA Institut, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.9:004.388

DOI: 10.5937/tehnika2105603T

U radu je pokazano konfigurisanje nove edukacione mašine na bazi mehanizma sa hibridnom kinematikom. Dat je opis koncepcije troosnog O-X hibridnog mehanizma koji se sastoji od jedne serijske translatorne ose i dvoosnog paralelnog mehanizma koji može da radi u dve varijante, sa opruženim O i ukrštenim X štapovima paralelnog mehanizma. Virtuelni prototip mašine je konfigurisan u CAD/CAM okruženju, gde su izvršene i simulacije rada mehanizma. Oformljen je sistem za programiranje mašine koji omogućava i verifikaciju programa. Za potrebe upravljanja konfigurisan je sistem upravljanja otvorene arhitekture na LinuxCNC platformi. Izvršen je probni rad mašine u cilju verifikacije realizovanog prototipa i upravljanja.

Ključne reči: edukaciona mašina alatka, mehanizam sa hibridnom kinematikom, virtuelna mašina, LinuxCNC

1. UVOD

Savremena prerađivačka industrijska proizvodnja je u najvećoj meri zasnovana na numerički upravljanim mašinama alatkama (NUMA) što zahteva adekvatno obučenu radnu snagu. To podrazumeva potrebu za sveobuhvatnom edukacijom na svim nivoima školovanja: na fakultetima, visokim i srednjim školama kao i na specijalizovanim kursevima u fabrikama ili kod zastupnika CAD/CAM softvera [1-3]. Za potrebe edukacije operatera i programera mašina alatki neophodno je obezbediti odgovarajuća iskustva što podrazumeva primenu adekvatnih resursa, pre svega numerički upravljane mašine alatke i pripadajući softver za upravljanje. Problem raspoloživosti adekvatnih mašina alatki za edukaciju se do sada kod nas rešavao nabavkom edukacionih mašina industrijskog tipa i stonog tipa (mini CNC mašine alatke). Određeni broj tehničkih fakulteta, visokih i srednjih škola, ili nemaju

adekvatne edukacione mašine, ili su im mašine zastarele, pa zahtevaju revitalizaciju da bi zadovoljili kriterijume savremenih učila. Najveći broj sistema za edukaciju u Srbiji je nabavljen od firme EMCO Education Ltd. Drugi veliki ponuđači ovakvih sistema su Roland DG Corporation, The Cool Tool, Renishaw i drugi. U našoj zemlji ne postoji proizvođač edukacionih mašina [3].

Edukacioni sistemi koji se poslednjih godina nalaze na tržištu uglavnom koriste mašine sa serijskom kinematikom. S obzirom da je u današnjoj industriji u toku smena generacija, savremenim mašinama alatkama nove generacije, čiju okosnicu čine mašine alatke sa paralelnom i/ili hibridnom kinematikom [1], ovaj rad predstavlja doprinos razvoju nove edukacione mašine alatke na bazi mehanizma sa hibridnom kinematikom. Značaj ovakvog razvoja je višestruk: (i) podizanje nivoa edukacije na kvalitativno viši nivo, razvojem prototipa savremene edukacione mašine sa hibridnom kinematikom; (ii) ovakva nova edukaciona mašina alatka po performansama za obuku je ekvivalentna industrijskim NUMA; (iii) za upravljanje mašinom se koristi otvorena arhitektura na bazi Linux-CNC sistema; (iv) jednostavna integracija virtuelne mašine sa sistemom upravljanja - „digitalni bliznac mašine“

Adresa autora: Slobodan Tabaković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

e-mail: tabak@uns.ac.rs

Rad primljen: 28.06.2021.

Rad prihvaćen: 21.09.2021.

(Digital Twin); (v) postoji mogućnost ostvarivanja multifunkcionalnosti mašine integriranjem različitih tehnologija u jednoj mašini (tehnologija rezanjem, lasersko graviranje i additivne tehnologije).

Jedan od trendova razvoja je i dalji razvoj upravljačkih sistema otvorene arhitekture čiji je zadatak da omogući odgovarajući nivo fleksibilnosti koji zahtevaju nove koncepcije mašina alatki. Osnovne osobine ovakvih, sistema upravljanja otvorene arhitekture su modularnost i korišćenje Linux desktop operativnih sistema u sastavu upravljačkog sistema koji omogućavaju jednostavniju i fleksibilniju komunikaciju korisnika sa mašinom alatkom [4].

U radu je u poglavlju 2 dat opis razmatrane koncepcije mašine sa hibridnom kinematikom. Konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine je dat u poglavlju 3. Poglavlje 4 se bavi sistemom za programiranje i upravljanje mašinom, dok je u poglavlju 5 verifikovano upravljanje mašine alatke kroz njen probni rad.

2. OPIS NOVE KONCEPCIJE MAŠINE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM

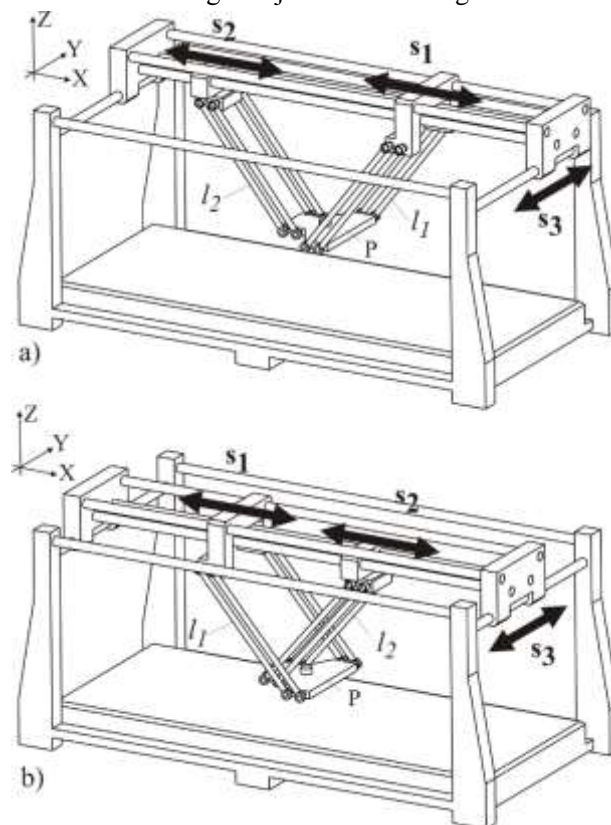
Razvoj mašine alatke sa hibridnom kinematikom, koji je pokazan u ovom radu, je prezentovan naučno-stručnoj javnosti i u radovima [5-11]. Od početka istraživanja do danas, projektna ideja za razvoj mašine je evoluirala do prototipa koji je predstavljen u ovom radu.

Nova edukaciona troosna mašina sa hibridnom kinematikom, bazirana je na hibridnom O-X mehanizmu koji je nastao kombinovanjem ravanskog paralelnog mehanizma i serijske translatorne ose, koja se nalazi na nosećoj strukturi mašine.

Ravanski paralelni mehanizam je koncipiran tako da izvršni organ mašine najveći deo radnog prostora može dosegnuti u dve konfiguracije mehanizma, čime se ponaša dualno kao dva paralelna mehanizma sa različitim karakteristikama u pogledu: dimenzija radnog prostora, krutosti, brzina i sl. Na slici 1 su pokazane polazne idejne koncepcije mašine sa hibridnom kinematikom u položajima sa opruženom (O) i ukrštenu konfiguracijom (X) mehanizma.

Ravanski paralelni mehanizam čine pokretna platforma, koja je preko obrtnih zglobova vezana za štapove konstantne dužine. Štapovi su na drugom kraju takođe obrtnim zglobovima vezani za odgovarajuće klizače s_1 i s_2 , od kojih se svaki kreće po sopstvenoj vodiči, odnosno pogonskoj osi. U cilju povećanja autonomije kretanja klizača oni su pozicionirani na različitim rastojanjima, u pravcu vertikalne ose, što omogućava njihovo mimoilaženje, radi mogućnosti jednostavnog rekonfigurisanja mehanizma iz jedne u drugu konfiguraciju mehanizma, odnosno, prelazak iz opruženog (O) u ukrštenu (X) mehanizam i obrnuto.

Dualnost mehanizma pruža dodatne mogućnosti prilikom obrade radnih predmeta, ali istovremeno nameće potrebu za kompleksnijim upravljačkim algoritmima, koji treba da budu razvijeni za obe konfiguracije mašine. To takođe nameće i potrebu analize osnovnih parametara mašine, koji ne moraju biti identični za obe konfiguracije O-X hibridnog mehanizma.



Slika 1 - Inicijalna koncepcija edukacione mašine na bazi O-X mehanizma a) opružena O konfiguracija b) ukrštena X konfiguracija

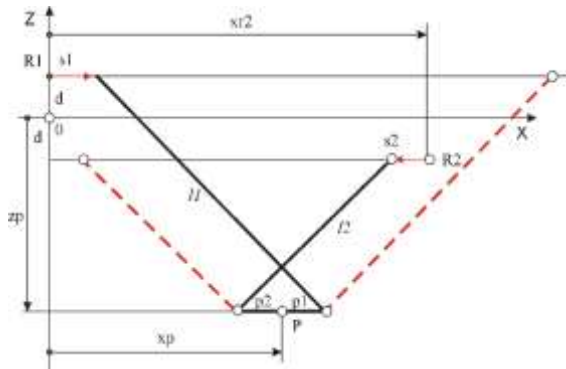
3. KONFIGURISANJE VIRTUELNOG PROTOTIPA NOVE EDUKACIONE MAŠINE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM

Virtuelni prototip troosne edukacione mašine sa hibridnom kinematikom je konfigurisan po modularnom principu, tako da omogućava lako rekonfigurisanje u obe konfiguracije paralelnog mehanizma opruženu O ili ukrštenu X. Tako konfigurisan virtuelni prototip mašine je iskorišćen za simulacije probne obrade koji obuhvataju analizu mogućnosti obrade geometrijskih oblika prisutnih pri obradi glodanjem i bušenjem. Za potrebe upravljanja mašinom, je rešena inverzna i direktna kinematika. Takođe je izvršena i analiza radnog prostora, radi korektnog pozicioniranja radnih predmeta u zoni obrade.

3.1 Rešenje inverzne i direktne kinematike

Pošto je deo hibridnog mehanizma i dvoosni paralelni mehanizam, neophodno je ostvariti rešavanje in-

verzne i direktne kinematike. Jednostavnost konstrukcije mehanizma omogućava efikasno rešavanje oba kinematička problema u analitičkoj formi. Pristup rešavanju kinematike O-X hibridnog mehanizma je vektorski i detaljno je pokazan u [10] za početne verzije mašine, s tom razlikom da su sada izabrane realne vrednosti parametara mehanizma i pozicije za referentne tačke pogonskih osa, kao što je pokazano na slici 2.



Slika 2 - Geometrijski model paralelnog mehanizma

Osnovni geometrijski parametri O-X hibridnog mehanizma su pokazani u tabeli 1, za prvu verziju prototipa koja je realizovana i ispitivana i to X varijanta mehanizma.

Tabela 1. Osnovni parametri paralelnog mehanizma

Dužine štapova [mm]	Parametri platforme [mm]	Referentni položaji R1 i R2 za X mehanizam [mm]	Rastojanje vođica klizača [mm]
l1=391	p1=33.5	xr1=0	d=65.5
l2=260	p2=26.5	xr2=385	2d= 131
	p=p1+p2=60		

U radu su date dobijene jednačine za rešenje inverznog kinematičkog problema (IKP) za obe varijante mehanizma, pripremljene za implementaciju kinematike u sistem upravljanja:

- IKP za opruženu O- konfiguraciju mehanizma

$$\begin{aligned} s_1 &= x_p - x_{r1} + p_1 + \sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} \\ s_2 &= -(x_p - x_{r2} - p_2 - \sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}) \\ s_3 &= y_p \end{aligned} \quad (1)$$

- IKP za ukrštenu X- konfiguraciju mehanizma

$$\begin{aligned} s_1 &= x_p - x_{r1} + p_1 - \sqrt{l_1^2 - (z_p - d)^2} \\ s_2 &= -(x_p - x_{r2} - p_2 + \sqrt{l_2^2 - (z_p + d)^2}) \\ s_3 &= y_p \end{aligned} \quad (2)$$

Na osnovu dobijenih jednačina IKP, može se zaključiti da je rešenje za obe konfiguracije mehanizma zajedničko i da je razlika samo u predznaku ispred korena, što ukazuje na prirodu postojanja dvostrukih rešenja, od kojih jedno odgovara opruženoj, a drugo ukrštenoj konfiguraciji mehanizma, slika 2.

Opšti izraz za određivanje direktnog kinematičkog problema (DKP) se može napisati kao:

$$P(x_p, y_p, z_p) = f(s_1, s_2, s_3) \quad (3)$$

Detaljno rešavanje DKP je pokazano u [10] i ovde će biti pokazane smene kao i konačno analitičko rešenje.

Zbog lakšeg zapisivanja uvedene su sledeće smene:

$$\begin{aligned} m_1 &= x_{r1} - p_1 + s_1, & m_2 &= x_{r2} + p_2 - s_2, \\ m_3 &= 2m_2 - 2m_1, & m_4 &= -4d, \\ m_5 &= m_1^2 - m_2^2 - l_1^2 + l_2^2, & m_6 &= -(m_5/m_3), \\ m_7 &= -(m_4/m_3), & m_8 &= 1 + m_7^2, \\ m_9 &= 2(m_6 - m_1) \cdot m_7 - 2d, \\ m_{10} &= (m_6 - m_1)^2 + d^2 - l_1^2. \end{aligned} \quad (4)$$

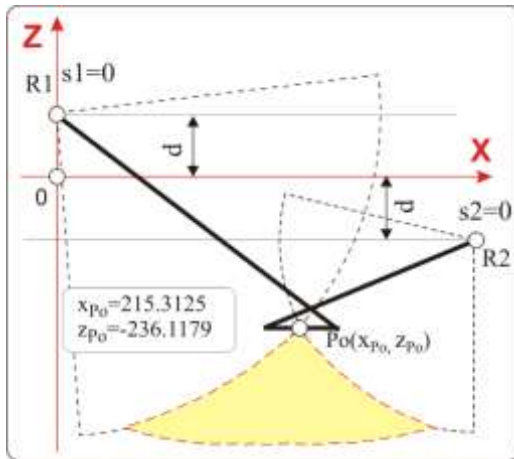
Konačno rešenje DKP u analitičkoj formi se može napisati kao:

$$\begin{aligned} z_p &= \frac{-m_9 - \sqrt{m_9^2 - 4m_8m_{10}}}{2m_8} \\ x_p &= m_6 + m_7 \cdot z_p \end{aligned} \quad (5)$$

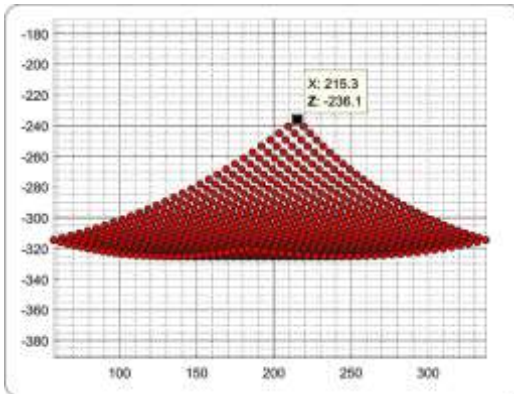
Jednačine rešenja DKP-a su u nastavku iskorišćene za dobijanje i analizu radnog prostora prvo paralelnog mehanizma, a zatim i hibridnog mehanizma mašine u celini.

3.2 Radni prostor

Radni prostor O-X hibridnog mehanizma predstavlja zapreminu određenu svim mogućim položajima pokretne platforme. Za analizu radnog prostora dovoljno je odrediti radni prostor paralelnog mehanizma budući da ukupan dostizivi radni prostor hibridnog mehanizma nastaje transliranjem radnog prostora ravanskog paralelnog mehanizma duž uzdužnih vođica po osi Y. Radni prostor ravanskog paralelnog mehanizma može se odrediti na tri načina: geometrijski, primenom jednačina IKP i primenom jednačina DKP. Primer geometrijski određenog radnog prostora za ukrštenu X konfiguraciju mehanizma, pokazan je na slici 3, dok je rezultat primene DKP za određivanje radnog prostora pokazan na slici 4.



Slika 3 – Paralelni mehanizam u referentnoj poziciji sa konturama radnog prostora X varijante mehanizma

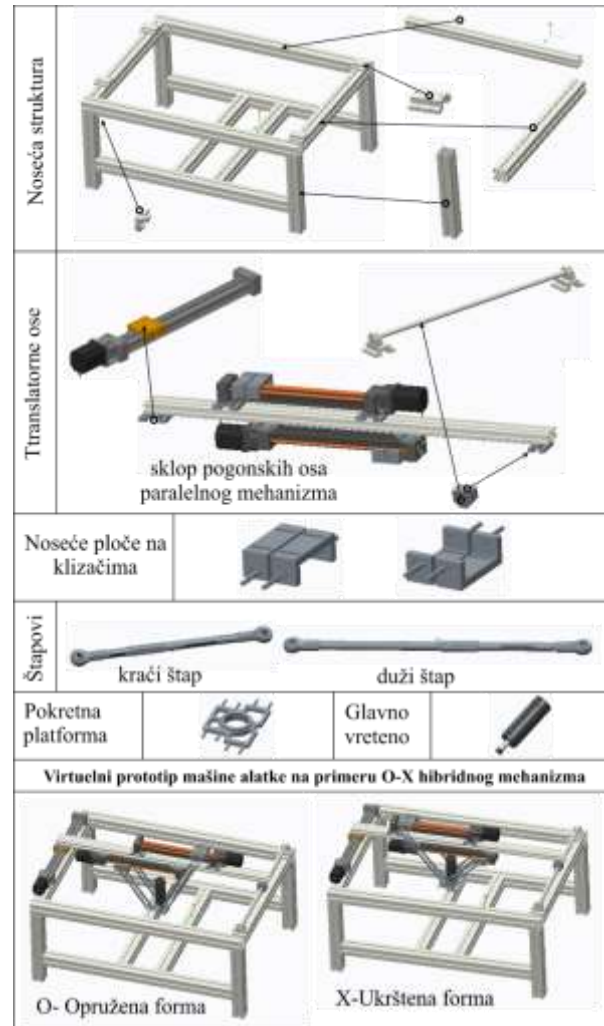


Slika 4 – Radni prostor paralelnog mehanizma za polazne projektne parametre X varijante mehanizma

Na slici 3 pored radnog prostora, pokazan je i skeletan model mehanizma sa osrednjenim spojkama ukrštene X konfiguracije u referentnom položaju, kada su oba klizača $s_1=0$ i $s_2=0$. U toj poziciji na osnovu rešenja DKP određena je i pozicija platforme u referentnom položaju mašine $Po(x=215.3125 \text{ mm}, z=-236.1179 \text{ mm})$, koja je neophodna za definisanje referentne tačke mašine aktivne po njenom uključenju (G54). S obzirom da je kinematika mašine rešiva analitički, u ovom slučaju je iskorišćena procedura određivanja radnog prostora primenom jednačina DKP [12] uz poštovanje usvojenih ograničenja, što je omogućilo dobijanje ostvarivih pozicija pokretne platforme (tačke Po) u granicama raspoloživog radnog prostora slika 4, za inicijalno usvojene parametre za ukrštenu X konfiguraciju mehanizma.

3.3 Virtuelni prototip

Analiza moguće koncepcije razmatranog O-X hibridnog mehanizma omogućava uspostavljanje modularnog sistema (sistema sastavnih elemenata), za projektno kompletiranje koncepcije obe varijante mašine, slika 5, u vidu jedne morfološke matrice [5, 10].



Slika 5 – Konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine

Na slici 5 su pokazane realizacije modularnog sistema za noseću strukturu, translatorne ose, sklop pogonskih osa paralelnog mehanizma, noseće ploče na klizačima za vezu sa obrtnim zglobovima, štapova, platforme i glavnog vretena. Prolaskom kroz morfološku matricu sa slike 5 i izborom odgovarajućih modula za osnovne funkcije mašine, dobijaju se dve moguće razmatrane varijante mašine i to opružene O i ukrštene X.

4. SISTEM ZA PROGRAMIRANJE I UPRAVLJANJE

Kao sistem za programiranje planirano je korišćenje raspoloživih CAD/CAM okruženja, dok je u pogledu realizacije sistema upravljanja izabran sistem otvorene arhitekture baziran na LinuxCNC sistemu koji je od ranije poznat i kao Enhanced Machine Control [13, 14]. U ovom poglavlju su date osnovne informacije o uspostavljenom okruženju za programiranje, koje uključuje i virtuelnu mašinu za verifikaciju putanje alata, kao i informacije o konfigurisanju upravljanja otvorene arhitekture na bazi LinuxCNC sistema.

4.1 Sistem za programiranje

Kao sistem za programiranje edukacione troosne mašine na bazi O-X hibridnog mehanizma može se koristiti raspoloživo CAD/CAM okruženje. Za potrebe ovog rada korišćen je PTC Creo [15], u kome je konfigurisan i virtuelni prototip, čijom simulacijom rada je omogućena i verifikacija putanje alata na virtuelnoj mašini. Na slici 6 je prikazana osnovna struktura sistema za programiranje. Verifikacija programa je moguća simulacijom putanje alata, simulacijom rada virtuelne mašine koja radi po zadanom programu u CLF formatu i simulacijom uklanjanja materijala. Postprocesiranje se vrši kao za troosnu glodalicu, gde se dobija G kôd prema standardu ISO6983, koji je u ovom slučaju po formatu sličan programima za Fanuc CNC sisteme.



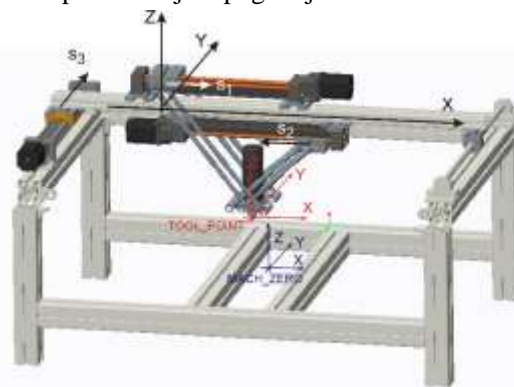
Slika 6 - Osnovna struktura sistema za programiranje

4.2 Simulacija rada mašine u CAD/CAM okruženju

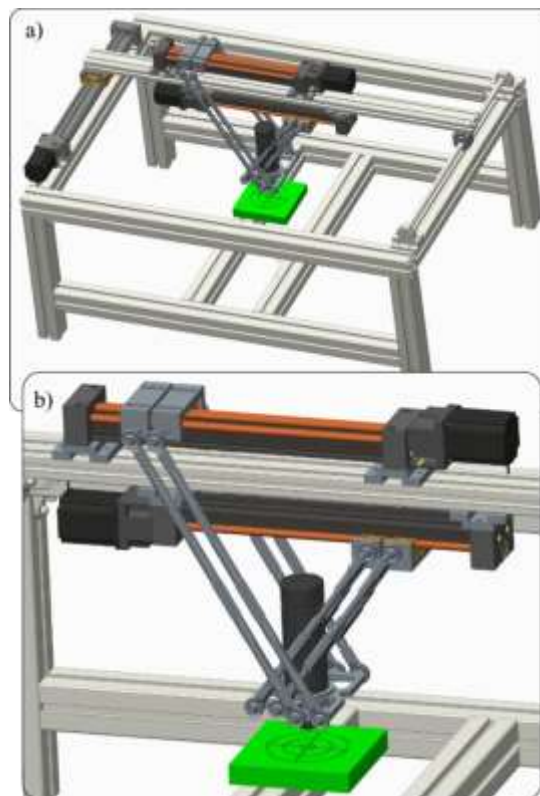
Da bi simulacija rada virtuelne mašine u sistemu za programiranje bila moguća, neophodno je mašinu konfigurisati prema odgovarajućoj kinematičkoj strukturi i sa odgovarajućim kinematičkim vezama. Potrebne kinematičke veze za razmatranu troosnu mašinu sa hibridnom kinematikom su tri translacije (s_1 , s_2 i s_3) koje koriste vezu tipa klizača (Slider), i 16 rotacija, koje koriste obrtne veze (Pin), na mestima veze štapova paralelnog mehanizma sa pokretnom platformom i sa klizačima, slika 8.

Nakon definisanja kinematičkih veza pokretnih delova mašine, potrebno je napraviti vezu između koordinatnih sistema na obratku i alatu sa jedne strane i virtuelne mašine sa druge strane u okviru korišćenog CAD/CAM sistema (PTC Creo). Na virtuelnoj mašini alatki se definišu koordinatni sistem MACH_ZERO, na radnom stolu i TOOL_POINT na čelu glavnog vretena, slika 7. Koordinatne sisteme sa istim nazivima imaju i obradak i alat.

Poklapanjem odgovarajućih koordinatnih sistema alata i obratka ostvaruje se postavljanje virtuelnog alata na virtuelnu mašinu, odnosno virtuelnog obratka sa pripremkom, na radni sto virtuelne mašine. Posle uspešnog virtuelnog baziranja obratka i postavljanja alata, moguće je pokrenuti simulaciju rada virtuelne mašine alatke po zadanom programu, opcijom Machine Play. Na slici 8 je pokazana simulacija obrade kontura izabranog radnog predmeta za obe konfiguracije mašine. Probni deo sadrži koncentrične krugove i krst u pravcu X i Y ose nalik graviranoj meti sa končanicom. Obrada ovog primera je eksperimentalno potvrđena tokom probnog rada mašine, u realizovanoj X konfiguraciji mašine i pokazana je u poglavlju 5.



Slika 7 - Virtuelna mašina alatka sa definisanim kinematičkim vezama i koordinatnim sistemima



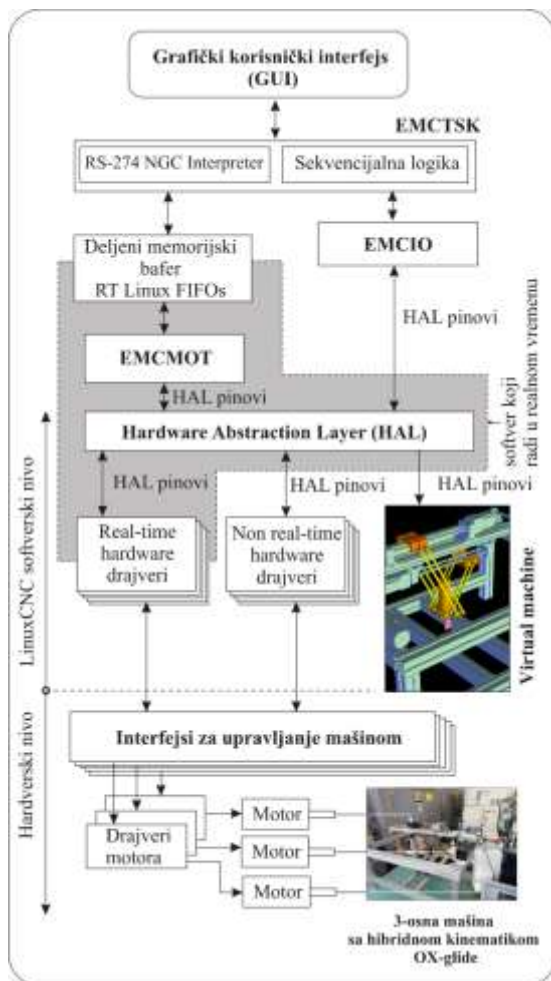
Slika 8 - Simulacija rada mašine po zadanom programu u CAD/CAM okruženju

4.3 Sistem za upravljanje otvorene arhitekture

Za upravljanje mašina alatki koje nemaju trivijalnu kinematiku pogodno je izabrati softver otvorene arhitekture upravljanja, koji omogućava slobodno konfigurisanje upravljanja, prema željenoj kinematici mašine. U tom pogledu postoje povoljne varijante CNC upravljanja zasnovane na softverskim sistemima otvorene arhitekture, kakav je LinuxCNC [13, 14].

Za mašinu sa hibridnom kinematikom, čije se konfigurisanje razmatra u ovom radu, neophodno je u upravljanje implementirati rešenja inverzne i direktne kinematike, što je upravo uticalo i na izbor softvera za upravljanje. LinuxCNC predstavlja real-time softver za upravljanje mašinama alatkama i robotima, čiji se kod može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License).

Koristeći dosadašnja iskustva u konfigurisanju edukacionih mašina alatki i upravljanja za njih [1, 3, 4, 16, 17], ovaj rad razmatra i problem edukacije i problem konfigurisanja sistema za programiranje i upravljanje na primeru razvijene nove edukacione troosne mašine sa hibridnom kinematikom.

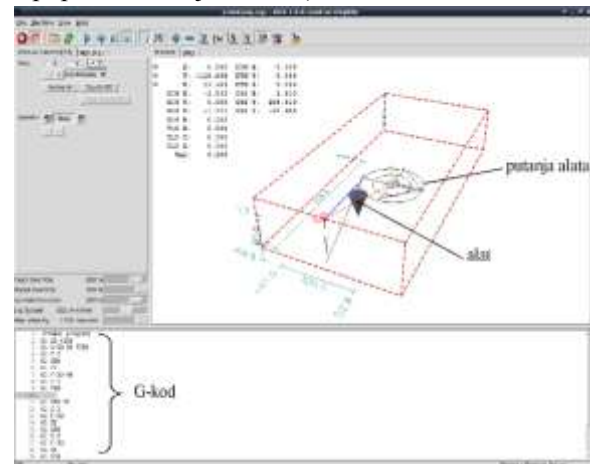


Slika 9 - Sistem upravljanja otvorene arhitekture na bazi Linux CNC sistema

Na slici 9 je prikazana interna softverska struktura sistema upravljanja otvorene arhitekture na bazi Linux CNC sistema, koja sadrži četiri osnovna programska modula i to: kontroler kretanja (EMCMOT), kontroler diskretnih U/I (ulazno/izlaznih) signala (EMCIO), kontroler procesa koji ih koordiniše (EMCTASK) i kolekciju tekstualnih, ili grafičkih korisničkih inerfejsa (GUI).

Mogu se koristiti različiti grafički korisnički interfejsi (GUI), ali je najčešće u upotrebi Axis, koji je i korišćen pri konfigurisanju upravljanja razmatrane mašine, slika 10. Axis GUI je vrlo intuitivan za rad, sa prepoznatljivim ikonicama koje olakšavaju rad operatera. Pored toga, pogodnost Axis okruženja je i mogućnost integracije sa virtuelnom mašinom, što predstavlja aktuelnu paradigmu „digitalni bliznac mašine“ (Digital Twin), što je plan za realizaciju u narednom periodu.

Kontroler diskretnih ulaznih/izlaznih signala (EMCIO) (slika 10) je napisan na jeziku C++, korišćenjem NIST-ove RCS (Real-time Control Systems) biblioteke. Diskretni U/I kontroler je implementiran kao hijerarhija kontrolera glavnog kretanja, kontrolera hlađenja i kontrolera pomoćnih uređaja (na primer: sve-stop, podmazivanje i slično).



Slika 10 - Grafički korisnički interfejs Axis GUI

Kontroler procesa (EMCTASK) je projektovan slično diskretnom U/I kontroleru. Odgovoran je za interpretiranje instrukcija G i M kôda. Kontroler procesa koordinira aktivnosti kontrolera kretanja i diskretnog U/I kontrolera. Ove aktivnosti su sadržane u NC programu, odnosno nizu instrukcija G i M kôda, koje kontroler procesa interpretira i prosleđuje ih kontroleru kretanja, ili diskretnom U/I kontroleru, u odgovarajućim vremenskim trenucima.

Kontroler kretanja (EMCMOT), je napisan na jeziku C, da bi se omogućilo lakše portovanje na operativne sisteme koji rade u realnom vremenu. Upravljanje kretanja uključuje kontrolu uzorkovanja pozicija osa, proračun sledeće tačke na trajektoriji, inter-

polaciju između uzorkovanih tačaka i proračun izlaznih vrednosti za motore.

Kompleksna kinematika za mašine sa paralelnom i/ili hibridnom kinematikom realizuje se na jeziku C i povezuje se sa postojećim sistemom kako bi se zamenile postojeće funkcije takozvane trivijalne, odnosno ortogonalne kinematike. Kontroler kretanja je program koji se ciklično izvršava. Kada se upravlja stvarnom mašinom, kontroler kretanja zahteva realtime operativni sistem. HAL (Hardware Abstraction Layer) komponenta, omogućava jednostavnu integraciju funkcija inverzne i direktne kinematike u sistem za upravljanje, i predstavlja uniformni interfejs za povezivanje sa dodatnim hardverskim komponentama.

Pod pojmom konfigurisanja LinuxCNC sistema upravljanja podrazumeva se: (i) generisanje HAL modula sa integrisanim funkcijama direktne i inverzne kinematike; (ii) formiranje konfiguracionog direktorijuma za konkretnu mašinu; (iii) definisanje *.ini datoteke, koja sadrži parametre mašine, kao što su dužine radnih osa, maksimalne i radne brzine i ubrzanja za pojedine ose, izbor sekvence inicijalizacije, parametri pozicionog PID regulatora, parametri vezani za rad sistema u realnom vremenu itd; (iv) definisanje *.hal datoteke, koja sadrži elemente vezane za generisanje pozicionih servo petlji, parametre HAL interfejsa ka mašini, realnoj ili virtuelnoj, elemente neophodne za inicijalizaciju virtuelne mašine itd.

Eksterni programi komuniciraju sa LinuxCNC sistemom slanjem poruka kao što su uključanje mašine, prelazak na automatski režim, start programa, isključenje. Korisnički interfejsi mogu slati manuelne poruke, inicirane od operatera, kao što su pomeranje osa mašine u ručnom režimu, ili slanje svih osa u referentnu poziciju.

Za upravljanje troosnom edukacionom mašinom alatkom sa hibridnom kinematikom alatkom izvršena je izmena jezgra LinuxCNC softverskog sistema. Ostvarene su izmene koje se odnose na zamenu uobičajenih standardnih trivijalnih funkcija inverzne i direktne kinematike odgovarajućim funkcijama inverzne i direktne kinematike (iz pogavlja 3.1), za razmatranu edukacionu mašinu. Ovo podrazumeva programiranje funkcija inverzne i direktne kinematike u C programskom jeziku u odgovarajućoj korisničkoj datoteci i uključanje ove datoteke u LinuxCNC. Prilikom integrisanja modela upravljanja, definišu se i parametri mašine, kao i referentni položaji svih osa, sekvenca inicijalizacije mašine i na kraju se realizuje prevođenje i povezivanje softvera.

5. PROBNI RAD MAŠINE

Završna verzija realizovanog prototipa se u malo meri razlikuje od virtuelnog prototipa što je uzroko-

vano raspoloživim komponentama za gradnju. Na slici 11 su prikazane realizovane obe koncepcije mašine u opruženoj O (slika 11a) i ukrštenoj X varijanti (slika 11b).

Tokom probnog rada planirana je obrada izabranog radnog predmeta sa test konturama slično kao kod ispitivanje radne tačnosti NUMA. Na ovaj način se postavlja prvo i najvažnije ispitivanje: provera da li sistem za upravljanje korektno planira putanju alata i da li alat zaista vodi po toj putanji. Elementi geometrije su planirani tako da se mogu obraditi u raspoloživom radnom prostoru.



a) opružena O konfiguracija



b) ukrštena X konfiguracija

Slika 11 - Konfigurisani fizički prototip edukacione mašine sa O-X hibridnom kinematikom

Na slici 12a je prikazana realizovana prva koncepcija mašine u ukrštenoj X konfiguraciji, spremna za probni rad i ispitivanje. Prva ispitivanja su vršena na ukrštenoj X konfiguraciji mašine obradom test kontura sa koncentričnim krugovima i končanicom u pravcu X i Y ose. Dobijeni probni deo nalik graviranoj meti, imao je za cilj proveru linearne interpolacije

graviranjem pravih upravnih duži u pravcima X i Y ose i proveru rada kružne interpolacije mašine, graviranjem tri kružna žljeba, slika 12b. Krajnji rezultati obrade izabranog radnog predmeta dela sa tri koncentrična kružna žljeba i končanicom i primer tekstualnog graviranja reči „O-X GLIDE“ su pokazani na slici 12c.



a) edukaciona mašina alatka sa hibridnom kinematikom u ukrštenoj X konfiguraciji



b) primer prve probne obrade



c) primeri prvih obrađenih test kontura

Slika 12 - Prototip edukacione mašine sa hibridnom kinematikom tokom probnog rada

Neki od detalja prilikom probnog rada mašine su sledeći: (i) izgled obrađene programirane konture potvrđuje ostvareni koncept upravljanja i programiranja, (ii) pozicioniranje u granicama radnog prostora je bilo dobro, (iii) ostvarivanje poklapanja pozicije vrha alata sa nultom tačkom pokazalo je dobro pozicioniranje i određivanje nulte tačke, (iv) izgled obrađenih elemenata geometrije programiranih pravolinijskih i kružnih kontura, potvrđuje ispravnost postavki referentnih ta-

čaka na pogonskim osama i uspešan rad realizovane 3-osne edukacione mašine alatke na bazi O-X hibridnog mehanizma.

6. ZAKLJUČAK

Osnovni ciljevi, ostvareni u ovom radu, mogu se svesti na razvoj nove edukacione mašine alatke sa hibridnom kinematikom laboratorijskog tipa sa konceptom CNC upravljanja otvorene arhitekture, za mašine alatke specifične konfiguracije. Razvoj virtuelnih okruženja, za programiranje i simulaciju rada mašina alatki su značajni za potrebe verifikacije programa, ali su pogodni i za aspekt virtuelizacije i digitalizacije prilikom edukacije, što predstavlja drugi značajan aspekt primene.

Nova edukaciona mašina sa O-X hibridnom kinematikom prati aktuelne trendove u razvoju savremenih mašina alatki kao što su: (i) osavremenjavanje mehaničke strukture u smislu uvođenja novih koncepcija mašina alatki baziranih na paralelnoj i hibridnoj kinematici; (ii) prilagođavanje specifičnim potrebama pojedinih grana industrije, uvođenjem rekonfigurabilnih i prilagodivih mašina alatki; (iii) multifunkcionalnost mašine, koja omogućava primenu različitih tehnologija u jednoj mašini (rezanja, obrada laserom i additivna). (iv) usvajanje pristupa digitalizacije u skladu sa, u svetu usvojenim, strategijama unapređenja industrijske proizvodnje (Industry Internet of Things i Industry 4.0).

Pravci daljeg razvoja nove edukacione mašine podrazumevaju njeno detaljno ispitivanje, optimizacija parametara mašine za obe razmatrane konfiguracije mehanizma, i analiza primene mašine pored obrade rezanjem, za tehnologije laserskog graviranja i sečenja i za brzu izradu prototipova dodavanjem materijala.

7. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN“ i na projektu „Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva“ i podprojekta TR35022 „Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije (ugovor br. 451-03-9/2021-14/-200105 od 05.02.2021. godine).

LITERATURA

- [1] Živanović, S, *Razvoj edukacione mašine sa paralelnom kinematikom*, monografija, Zadužbina Andrejević, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
- [2] Tabaković S, Zeljković, M, Živanović S, *Savremene mašine alatke – trendovi u edukaciji*, *Konferencija sa*

- međunarodnim učešćem - Primena novih tehnologija i ideja u školskom inženjerskom obrazovanju*, Zbornik radova, Rad po pozivu, Tehnička škola Požega, str. 9-17, 2017.
- [3] Živanović S, Glavonjić M, Milutinović D, Slavković N, Dimić Z, Kvirgić V, Edukacioni sistem EduMAT za programiranje CNC mašina alatki, *Nacionalna konferencija sa međunarodnim učešćem Reinženjering poslovnih procesa u obrazovanju RPP013*, Zbornik radova, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Srbija, str. 298-305, 2013.
- [4] Živanović S, Vorkapić N, Dimić Z, Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osne mini CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi, *Tehnika* časopis Saveza inženjera i tehničara Srbije, 68, vol. 6, pp. 823-831, 2019.
- [5] Tabaković S, Živanović S, Zeljković M, Tabaković, N, Verifikacija kinematskih karakteristika mašine alatke bazirane na hibridnoj kinematici primenom virtuelnog prototipa, *XVI međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, Zbornik radova, Jahorina, Republika Srpska, BiH, str. 402-407, 2016.
- [6] Tabaković S, Živanović S, Zeljković M, The application of virtual prototype in design of a hybrid mechanism based machine tools, *Journal of Production Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 77-80, 2015.
- [7] Tabaković S, Živanović S, Zeljković M, The application of virtual prototype in design of a hybrid mechanism based machine tools, in Proc. *12th International Scientific Conference MMA 2015 – Advanced Production Technologies*, Novi Sad, Srbija, pp. 59-62, 2015.
- [8] Tabaković S, Živanović S, Simulation of kinematic of virtual prototype of a machine tool based on hybrid O-X mechanism, in Proc. *3rd International Scientific Conference Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2016*, Jahorina, Republic of Srpska, B&H, pp. 999-206, 2016.
- [9] Mladenović C, Tabaković S, Zeljković M, Kinematic analysis of machine tool based on O-X glide hybrid mechanism using a symbolic virtual model, *Journal of Production Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 37-40, 2012.
- [10] Živanović S, Tabaković S, Zeljković M, Milojević Z, Configuring a machine tool based on hybrid O-X glide mechanism, *Machine Design*, vol.8, no.4, pp. 141-148, 2016.
- [11] Tabaković S, Zeljković M, Gatalo R, Mladenović C, 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, 2012.
- [12] Vasilčić G, Živanović S, Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA, *40. JUPITER konferencija, 36. simpozijum NU-Roboti-FTS*, Zbornik radova, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, str. 3.47-3.54, 2016.
- [13] LinuxCNC, [citirano 25.5.2021]. Dostupno na: <http://linuxcnc.org/>
- [14] Staroveški, T, Brezak, D., Udiljak, T., LINUXCNC – the Enhanced Machine Controller: application and an overview, *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, vol. 20, no.6, pp.1103-1110, 2013.
- [15] PTC Creo, [citirano 25.5.2021]. Dostupno na: <https://www.ptc.com>
- [16] Živanović S, Dimić, Z, Vorkapić N, Mitrović S, Configuring of 3 axis mini CNC machine tool with control system based on LINUXCNC, in Proc. *14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019*, Ba-njaluka, B&H, Republic of Srpska, pp. 15-28, 2019.
- [17] Živanović S, Glavonjić M, Dimić Z, Konfigurisanje virtuelne mašine troosne glodalice sa paralelnom kinematikom za simulaciju i verifikaciju upravljanja i programiranja, *XI međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2012*, Zbornik radova, Jahorina, Republika Srpska, BiH, str. 464-469, 2012.

SUMMARY

CONFIGURING A NEW EDUCATIONAL MACHINE TOOL BASED ON HYBRID KINEMATIC MECHANISM

The paper shows the configuration of a new educational machine based on hybrid kinematics mechanism. The concept of a three-axis O-X hybrid mechanism is described, consisting of a single serial translational axis and a two-axis parallel mechanism that can operate in two variants, with extended form O and crossed form X-joints of the parallel mechanism. The virtual prototype of the machine was configured in a CAD/CAM environment, where simulations of the mechanism's operation were performed. A programming system for machine has been prepared that also enables program verification. An open architecture control system based on the LinuxCNC platform has been configured for control of the machine. The trial work of the machine was performed in order to verify the realized prototype and control.

Key words: educational machine tool, hybrid kinematic mechanism, virtual machine, LinuxCNC