

Razvoj edukacione 3-osne CNC mašine alatke za brzu izradu prototipova sa dve translatorne i jednom obrtnom osom

NIKOLA M. VORKAPIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd
SAŠA T. ŽIVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd
ZORAN Ž. DIMIĆ, LOLA Institut, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 621:620.17
DOI: 10.5937/tehnika2006725V

U radu je pokazan razvoj jedne 3-osne CNC mašine alatke za brzu izradu prototipova oduzimanjem materijala, sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, čije je upravljanje zasnovano na LinuxCNC sistemu, sa integrisanom virtuelnom mašinom kao digitalnim dvojnikom. Analizirani su koncepti mašina sa jednom obrtnom osom i usvojen koncept mašine za realizaciju, koji je kompletno konfigurisan u CAD/CAM okruženju. Za uspešnu verifikaciju sistema za programiranje konfigurisana je i virtuelna mašina u CAD/CAM sistemu i u Vericutu. Završna validacija projekta mašine je ostvarena njenim probnim radom na karakterističnim primerima.

Ključne reči: CNC mašina alatka, programiranje, CAD/CAM, virtuelni prototip, LinuxCNC, digitalni dvojnik

1. UVOD

Brza izrada prototipova se pojavila kao jedna od značajnih tehnologija koja ima sposobnost da skрати vreme razvoja proizvoda i njegove realizacije. Koristi se za brzu izradu fizičkih modela, prototipova i malih serija delova na bazi CAD modela [1].

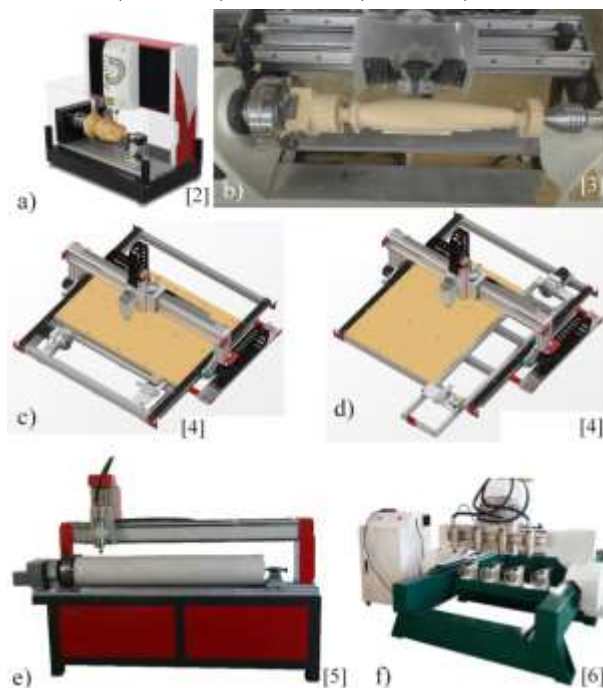
Za programiranje i rukovanje mašina za brzu izradu prototipova potrebna je edukacija, uz upotrebu adekvatnog CAM softvera i virtuelnih tehnologija za verifikaciju i monitoring.

Predmet ovog rada je razvoj jedne edukacione 3-osne mašine za brzu izradu prototipova sa dve translatorne i jednom obrtnom osom. Mašina je namenjena za edukaciju u: konfigurisanju novih mašina alatki, programiranju i upravljanju mašina sa obrtnom osom i konfigurisanju upravljanja otvorene arhitekture na PC platformi.

Primeri CNC ruteri – glodalica za brzu izradu prototipova, pokazani su na slici 1.

Na osnovu analize najčešćih konstrukcionih rešenja ovih mašina može se uočiti sledeće:

- glavno vreteno je najčešće vertikalno (ima izuzetaka, slika 1b, vreteno je horizontalno);
- obrtna osa je horizontalna i može biti integralni deo mašine ili dodatni modul koji se može različito postaviti u radnom prostoru mašine (sa prednje strane, slika 1c, ili sa strane, slika 1d;



Slika 1 - CNC ruteri - glodalice sa obrtnom osom

Adresa autora: Nikola Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
e-mail: nvorkapic@mas.bg.ac.rs

Rad primljen: 28.08.2020.

Rad prihvaćen: 23.10.2020.

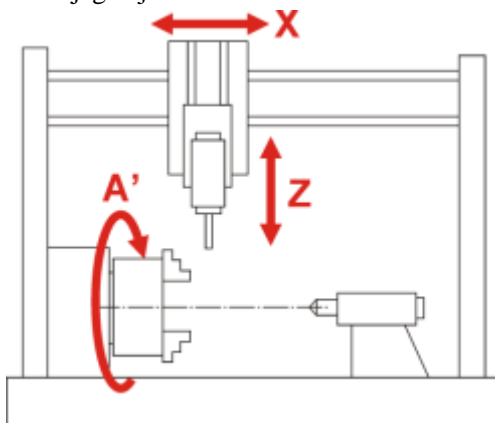
- postoje desktop varijante mašine slika 1a, b, c, d, kao i industrijske varijante mašina, slika 1e, f;
- najčešće postoje mašine sa jednom obrtnom osom i jednim glavnim vretenom, dok u industrijskim varijantama postoje i mašine sa više glavnih vretena i isto toliko obrtnih osa, slika 1 f.

Za mašinu koja je predmet analize i razvoja kao edukacione mašine za brzu izradu prototipova usvojeni su sledeći funkcionalni zahtevi: (i) niskobudžetna edukaciona mašina alatka, (ii) mašina koja obrađuje mekane materijale (stirodur, drvo), (iii) položaj glavnog vretena je vertikalalan, (iv) obrtna osa je horizontalna A' (rotacija oko X ose), (v) koordinatni sistem mašine usvojiti prema standardu za mašine alatke sa numeričkim upravljanjem, (vi) konfigurisati virtuelne mašine u sistemu za programiranje i upravljanje, (vii) da ima PC upravljanje otvorene arhitekture na bazi LinuxCNC sistema [7], (viii) programiranje mašine je na uobičajeni način u G-kôdu, (ix) da je pristupačna i bezbedna za rad.

U radu je u poglavlju 2 pokazan usvojeni koncept 3-osne CNC mašine alatke, dok je konfigurisanje virtuelnog prototipa pokazano u poglavlju 3. Za konfigurisani virtuelni prototip je oformljeno adekvatno okruženje za programiranje sa virtuelnom mašinom za verifikaciju programa. Upravljanje otvorene arhitekture na bazi LinuxCNC sistema je predstavljeno u poglavlju 4. Probni rad i verifikacija realizovanog prototipa i sistema za programiranje i upravljanje je dat u poglavlju 5.

2. KONCEPT 3-OSNE CNC MAŠINE ALATKE

Na osnovu usvojenih funkcionalnih zahteva osnovna koncepcija razmatrane 3-osne mašine je pokazana na slici 2. Mašina ima obrtnu osu A' oko horizontalne X ose i dve translatorne ose X i Z. Obradak se bazira na obrtnu osu A', a alat nose dve translatorne ose. Za potrebe povećanja krutosti dužih obradaka, postoji i nosač zadnjeg šiljka.



Slika 2 - Koncept 3-osne mašine sa dve translatorne i jednom obrtnom osom

Može se uočiti da mašina nema uobičajenu treću translatornu osu duž Y koordinate. Raspoloživim osama, bez Y ose mašine, omogućava se pozicioniranje vrha alata u svakoj tački cilindričnog radnog prostora, koji će biti analiziran u sledećem poglavlju prema usvojenim parametrima mašine.

Koncepcija mašine sa koordinatnim osama X, Z i A' ekvivalent je osama polarno-cilindričnog koordinatnog sistema, koje su takođe prostorne koordinate. Struktura usvojene koncepcije mašine za realizaciju je A'OXZ.

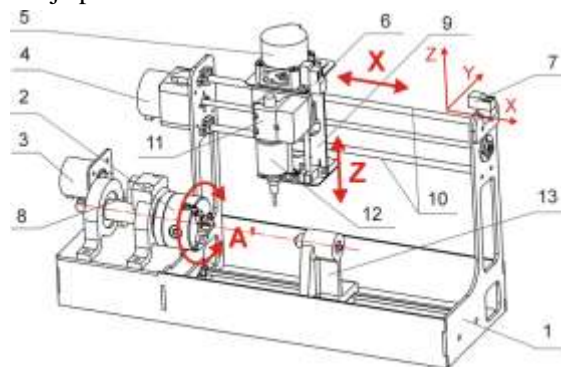
Mašine alatke sa obrtnom osom mogu biti identifikovane i kao četveroosne, što bi predstavljalo tri translatorne i jednu obrtnu horizontalonu osu. Međutim, postoji klasa mašina koja jednu translatornu osu zamenjuje obrtnom i kao takva i dalje predstavlja troosnu mašinu. Jedna takva edukaciona mašina je predmet razvoja u ovom radu.

3. KONFIGURISANJE VIRTUELNOG PROTOTIPA MAŠINE

Na bazi usvojene koncepcije mašine, i raspoloživih komponentata za gradnju, izvršeno je konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine u CAD/CAM okruženju PTC Creo Parametric 2.0 [8].

Obzirom da je za razvoj usvojene koncepcije mašine predviđen nizak budžet, pristupilo se iskorišćenju standardnih elemenata koji se mogu izvaditi iz starih matičnih štampača ili kupiti na tržištu po povoljnoj ceni. Jedna od alternativa za izradu nestandardnih elemenata mašine, jeste primena tehnologije 3D štampe, koja predstavlja jednu od vodećih tehnologija za izradu delova mašina koje su u fazi razvoja i ispitivanja.

CAD model usvojene verzije mehanizma za konfigurisanje 3-osne CNC mašine alatke za brzu izradu prototipova sa dve translatorne i jednom obrtnom osom je prikazan na slici 3.



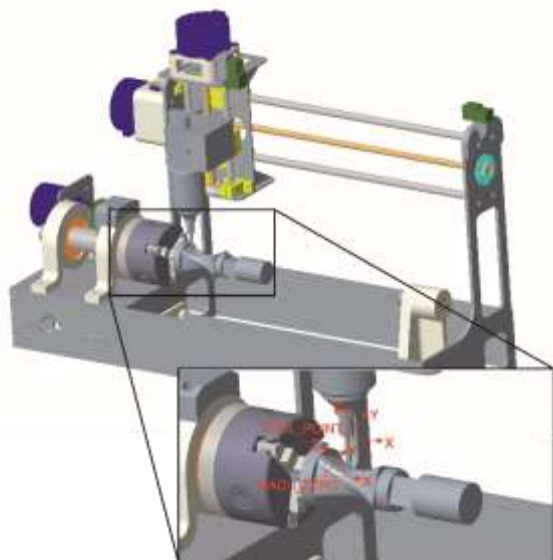
Legenda: 1-noseća struktura, 2-stezna glava, 3-motor za obrtnu osu A', 4-motor za osu X, 5-motor za Z osu, 6,7,8-senzori referentnog položaja Z, X i A' ose respektivno, 9-klizač X ose, 10-vođice X ose, 11-klizač Z ose i nosač glavnog vretena, 12-glavno vreteno, 13-nosač zadnjeg šiljka

Slika 3 - Konfigurisani prototip 3-osne CNC mašine sa dve translatorne i jednom obrtnom osom

Noseća konstrukcija mašine izrađena je od limenih ploča debljine 2, 3 i 5 mm, koje su sečene na laseru prema odgovarajućim konturama, a potom međusobno spojene postupkom zavarivanja. Obrtnu osu A' čini vratilo sa standardnim kugličnim ležajevima i steznom glavom (2). Na noseću konstrukciju se pored obrtne ose A', pričvršćuju vođice X ose (10), kao i motori za pogon X i A' ose (3,4). Na klizaču X ose (9), postavljena je Z osa (11), koja ujedno nosi glavno vreteno mašine (12). Glavno vreteno predstavlja mali elektro motor sa steznim čaurama čiji prihvatilata mogu biti 0,5 do 2,3 mm. Nosač glavnog vretena je izrađen od aluminijuma koji ima mogućnost pomeranja duž Y ose. Ovaj neosnaženi stepen slobode se koristi pri samom podešavanju i pre puštanja mašine u rad, iz razloga što osa obrtanja alata mora da se seče sa osom obrtanja obratka u jednoj tački.

U korišćenom okruženju za konfigurisanje virtuelnog prototipa je moguće pokrenuti i simulaciju rada virtuelnog prototipa [9], radi provere kinematike mašine i eventualnih kolizija projektovanih komponenata.

Generisan je jedan od prvih probnih delova za proveru kinematike rada mašine, u okviru CAD/CAM sistema PTC Creo Parametric 2.0. Na virtuelnom modelu obratka, potrebno je definisati koordinatni sistem MACH_ZERO, tako da X osa bude duž ose obratka. Isti koordinatni sistem potrebno je definisati na onom delu virtuelnog prototipa mašine koji će nositi virtuelni obradak (slika 4).



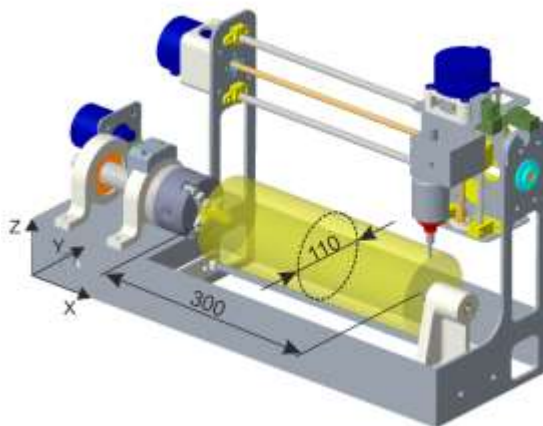
Slika 4 - Simulacija rada virtuelne mašine u Creo okruženju

Na virtuelnom prototipu mašine definiše se i koordinatni sistem alata, koji se označava sa TOOL_POINT i nalazi se na čeonj površini glavnog vretena. Osa Z ovog koordinatnog sistema usmerena je u pravcu ose alata, u onom smeru koji je definisan prema pavilima označavanja osa na mašini.

Kinematika mašine mora da zadovolji oblik površine koja se obrađuje i orijentaciju alata koja je u ovom slučaju fiksna i definisana je u pravcu Z ose. Virtuelnom obradom prvog probnog dela na konfigurisanom prototipu mašine, u okviru CAD/CAM sistema Creo Parametric 2.0 može se potvrditi ispravnost projektovanog prototipa mašine u pogledu simulacije kinematike.

3.1. Radni prostor

Na osnovu proverene kinematike virtuelnog prototipa mašine, hodova osa i geometrije pokretnih elemenata, moguće je odrediti radni prostor mašine. On je oblika valjka prečnika 110 mm i dužine 300 mm, koji je na slici 5 označen transparentno. U slučaju obrade dugačkih delova, koji odgovaraju granicama definisanog radnog prostora mašine, može se koristiti zadnji šiljak kao dodatni oslonac, radi povećanja krutosti projektovanog obradnog sistema.



Slika 5 - Radni prostor mašine

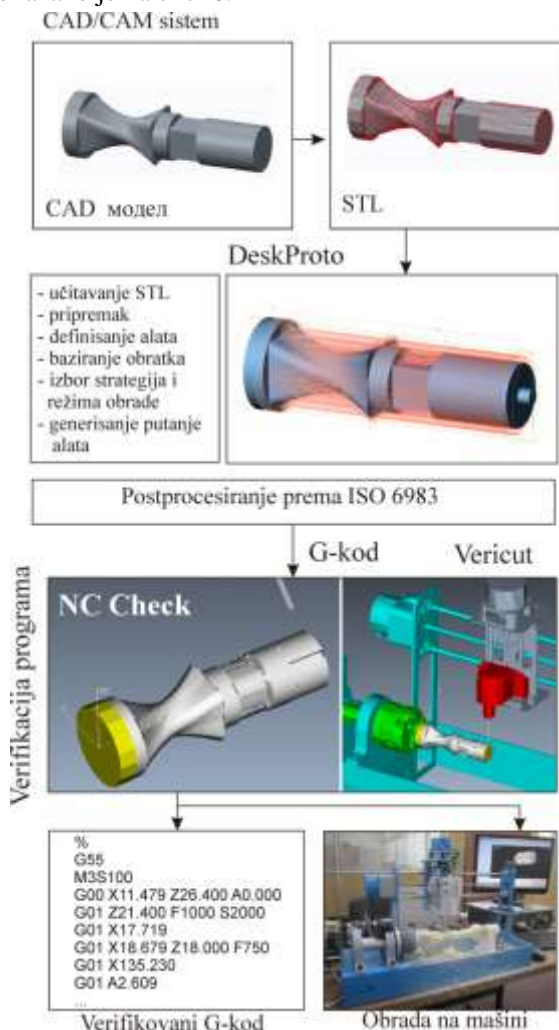
4. PROGRAMIRANJE I VERIFIKACIJA PROGRAMA

Kao sistem za programiranje troosne CNC mašine alatke sa dve translatorne i jednom obrtnom osom mogu se koristiti raspoloživi standardni CAD/CAM sistemi, kao i specijalizovani CAM softveri. S obzirom da je mašina planirana za brzu izradu prototipova od lako obradljivih materijala, model je uglavnom u STL formatu što preporučuje specijalizovane CAM softvere, koji imaju mogućnost programiranja obrade sa obrtnom osom (Rotary Machining). Izabran je softver DeskProto [10], koji se može koristiti za programiranje mašina sa obrtnom osom, a kao ulaz koristi modele u STL formatu.

Prototipovi koji se izrađuju mogu biti modelirani i programirani u bilo kom CAD/CAM sistemu, koji imaju mogućnost programiranja obrade sa obrtnom osom. Za programiranje se mogu koristiti i gotovi STL modeli.

DeskProto je softver za programiranje brze izrade prototipova na bazi STL fajla, sa mogućnošću programiranja obrade sa obrtnom osom, koja može biti sa kontinualanom rotacijom ili sa indeksnom rotacijom, uz primenu različitih strategija obrade.

Oformljeno okruženje za programiranje mašine predstavlja kombinaciju CAD/CAM sistema (PTC Creo Parametric 2.0), DeskProto i Vericut-a [11] (za verifikaciju programa). Okruženje za programiranje pokazano je na slici 6.



Slika 6 - Sistem za programiranje

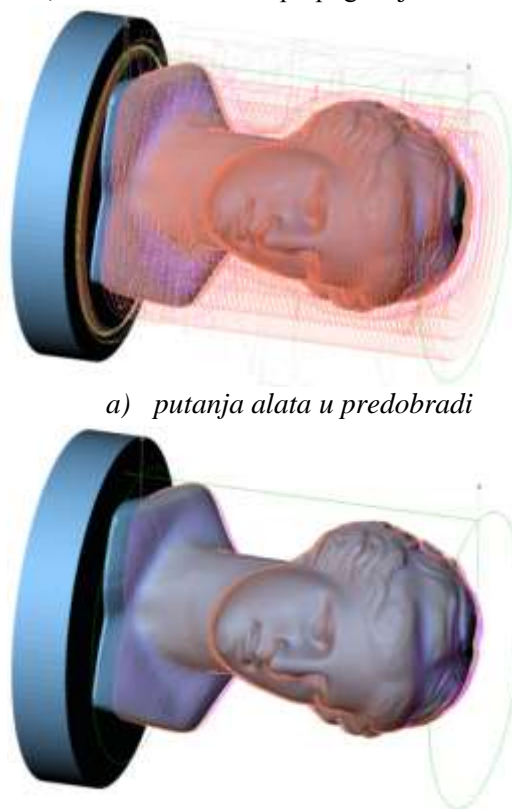
DeskProto nema mogućnost za realizaciju simulacije putanje alata i uklanjanja materijala, radi verifikacije programa za obradu pre same obrade. U tom cilju je u okruženje za programiranje mašine uključena i verifikacija dobijenih programa u Vericutu, na bazi generisanog G kôda.

Programiranje u DeskProto okruženju je vrlo intuitivno i omogućava brzo i efikasno dobijanje G kôda za obradu. Opis procedure programiranja se može opisati u nekoliko etapa: (e1) izbor mašine i tipa glodanja (ovde mašina sa obrtnom osom i obrada sa obrtnom osom – Rotary machining); (e2) učitavanje modela za

obradu u STL formatu sa izborom ose rotacije; (e3) izbor alata, režima obrade i strategije, dubine po prolazu za predobradu i dodatka za završnu obradu; (e4) generisanje i prikaz putanje alata i (e5) generisanje G kôda za mašinu.

Tokom probnog rada su planirana dva primera za obradu. Prvi je pokazan na slici 6, za deo koji je modeliran u CAD/CAM sistemu PTC Creo Parametric 2.0, a onda je model sačuvan u STL formatu. Programiranje ovog modela je realizovano u DeskProto okruženju. Na cilindričnom delu sa desne strane obratka je isprobano i ručno programiranje indeksne obrade četiri žleba i rupa na po 90° .

Kao drugi primer tokom probnog rada mašine je izabrana skulptura Afrodite [10], koja je već bila u STL formatu. Generisane putanje alata za njenu obradu su pokazane na slici 7. Verifikacija putanje alata za oba primera, data su u sledećem potpoglavlju.



a) putanja alata u predobradi

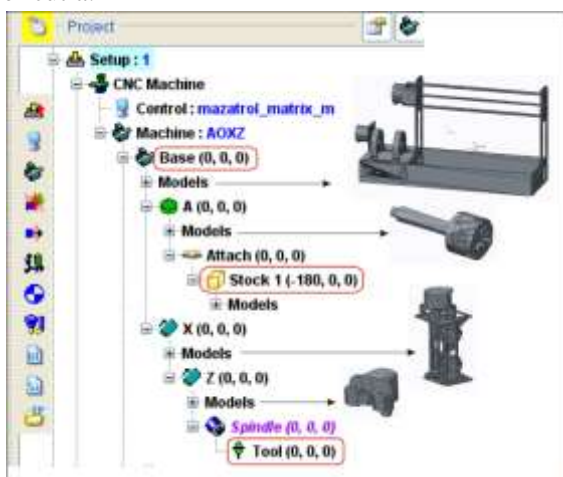
b) putanja alata u završnoj obradi

Slika 7 - Primer generisane putanje alata za predobradu i završnu obradu Afrodite u DeskProto okruženju

4.1 Virtuelna mašina alatka u VERICUT-u

Simulacija rada virtuelne mašine alatke u Vericut okruženju prema zadatom programu, omogućava simulaciju rada mašine na bazi G kôda, uz simulaciju uklanjanja materijala i uz mogućnost da se dobije virtuelni obradak u STL formatu [11, 12]. Za potrebe verifikacije sistema programiranja i virtuelnog prototipa

razmatrane edukacione 3-osne CNC mašine alatke sa jednom obrtnom i dve translatorne ose, konfigurisana je i njena virtuelna mašina u Vericut okruženju, koja ima kinematičku strukturu (A'OXZ). Osnovnu strukturu mašine u Vericutu čine *BASE*, *TOOL* i *STOCK*. Na ovakvoj strukturi treba definisati i tip i redosled povezivanja osa mašine prema strukturalnoj formuli. Konfigurisanje virtuelne mašine polazi od baze (O), kao nepokretne komponente. Na bazu se povezuje obrtna osa A', kao deo grane obratka. Na ovoj osi se nalazi i stezna glava u koju se postavlja i bazira (Attach) pripremak (Stock) i obradak. Nepokretna baza je na grani alata povezana sa preostale dve ose X i Z. Na bazu je po redosledu prvo dodata horizontalna translatorna osa X (X Linear), na kojoj je dodata i vertikalna translatorna osa Z (Z Linear). Na osu Z je povezano glavno vreteno (Spindle) i alat (Tool), čime je kompletirana kinematička struktura mašine. Hijerarhijsko stablo strukture mašine A'OXZ je pokazano na slici 8. Mašina je nakon konfigurisanja sačuvana pod imenom AOXZ i dodata u bazu virtuelnih mašina Vericut-a.



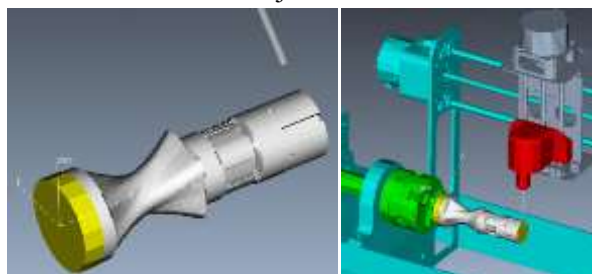
Slika 8 - Hijerarhijsko stablo konfigurisane strukture mašine alatke

Nakon definisanja kinematičke strukture mašine, moguće je dodati modele komponenata mašine u STL formatu. Za to je iskorišćen model virtuelnog prototipa odakle su sačuvani modeli komponenata u STL formatu i učitani u okruženje Vericut-a. Na taj način je realizovana virtuelna mašina za verifikaciju programa obrade, koja uključuje i simulaciju uklanjanja materijala na bazi G kôda.

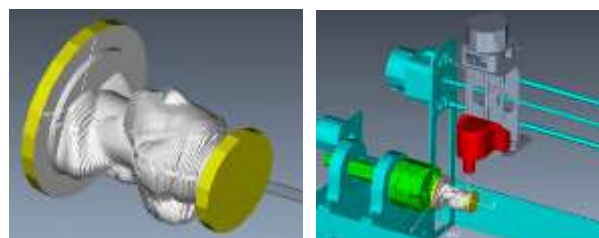
Za realizaciju projekta simulacije obrade potrebno je definisati [12,13]: (i) pripremak (Stock), (ii) radni predmet, koordinatni sistem (Nultu tačku programa), (iii) podešavanje položaja nulte tačke na virtuelnoj mašini (G code Offsets), (iv) alate koji se koriste u obradi i (v) NC programe i eventualno i potprograme.

Primeri verifikacije programa za dva razmatrana primera su pokazana na slikama 9 a i b. Pokazane

simulacije uklanjanja materijala na bazi učitanoG kôda, prikazane su u dva prozora, od kojih je prvi sa obratkom, a drugi sa virtuelnom mašinom. Na ovaj način je izvršena verifikacija postprocesora i tako dobijenog G kôda, za specifičnu strukturu mašine sa dve translatorne X i Z i jednom obrtnom osom A'.



a) Simulacija obrade jednog probnog dela



b) Simulacija rada obrade skulpture Afrodite

Slika 9 - Simulacija rada virtuelne mašine u Vericut okruženju

4. LINUXCNC SISTEM UPRAVLJANJA

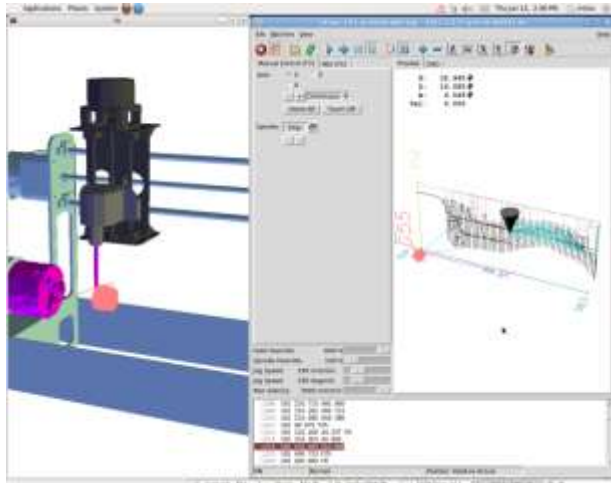
Kao sistem upravljanja izabran je softver otvorene arhitekture LinuxCNC [7,14], koji predstavlja real-time softver za upravljanje mašinama alatkama i robotima, čiji se kod može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License). LinuxCNC omogućava programiranje mašina pomoću programa u G kôdu prema standardu RS274, odnosno ISO 6983. U konfigurisanju upravljanja na bazi linuxCNC (EMC2), primenjena su iskustva iz prethodnih radova [9, 13].

Interna softverska struktura LinuxCNC je detaljno opisana u radovima [9, 13, 14, 15] i obuhvata četiri osnovna programska modula: kontroler kretanja (EMCMOT), kontroler diskretnih U/I (ulazno/izlaznih) signala (EMCIO), kontroler procesa koji ih koordiniše (EMCTASK) i kolekciju tekstualnih, ili grafičkih korisničkih interfejsa (GUI).

Kao grafički korisnički interfejsi, od više raspoloživih izabran je Axis GUI, koji ima okruženje vrlo intuitivno za rad, sa prepoznatljivim ikonicama, čime je olakšan rad rukovaoca. Pored toga, pogodnost Axis GUI okruženja je i mogućnost integracije sa virtuelnom mašinom, radi verifikacije programa pre obrade na stvarnoj mašini [8]. Ovom integracijom upravljanja i virtuelne mašine se ostvaruje paradigma digitalnog

dvojnika mašine (Digital Twin) koji pored verifikacije programa obrade i monitoringa može biti značajan i za takozvano virtuelno puštanje mašine u rad, radi verifikacije upravljanja pre nego što bude završena stvarna mašina (Virtual commissioning) [16].

Modul LinuxCNC koji omogućava konfigurisanje virtuelnih mašina se naziva Vismach [17]. Digitalni dvojnici mašine prima upravljačke signale preko HAL interfejsa u realnom vremenu. Digitalna i stvarna mašina se pokreću identičnim upravljačkim signalima, i mogu ostvarivati istovremeni rad u skladu sa zadatim programom za obradu. Takva virtuelna mašina se može rotirati, zumirati i pomerati prema želji korisnika. Detaljna procedura za konfigurisanje virtuelnih mašina u modulu Vismach je data u radu [9]. Na slici 11 je pokazan digitalni dvojnici mašine koja je razmatrana u ovom radu integrisana sa okruženjem Axis.



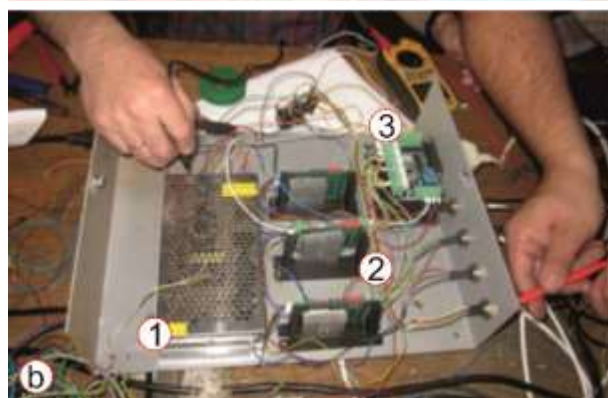
Slika 10 - Digitalni bliznac mašine integrisan sa sistemom upravljanja LinuxCNC

Upravljanje za razmatranu mašinu je bilo razvijeno i pre završetka stvarne mašine. Tako da je virtuelna mašina, odnosno njen digitalni dvojnici prvobitno iskorisćen za verifikaciju realizovanog upravljanja. Prilikom realizacije upravljanja u modulu za kinematiku zadržana je serijska trivijalna kinematika.

Hardverski deo posla oko realizacije upravljanja, koji podrazumeva povezivanje pogonskih elemenata mašine i senzora sa napajanjem i drajverima, pokazan je na slici 11.

Deo označen sa 1 predstavlja napajanje sistema za upravljanje. Sa brojem 2 označeni su drajveri pogonskih motora A', X i Z ose, dok je sa 3 pokazana interfejs kartica. Ona omogućuje komunikaciju između softvera otvorene arhitekture upravljanja i kontrolera pogonskih motora mašine. Veza se ostvaruje preko RS232 paralelnog porta, a napajanje interfejs kartice je zasebno i ostvaruje se preko USB porta računara. Signali sa graničnih prekidača i motora su do upravljačke jedinice dovedeni preko četvorožilnog kabela, a sama

veza je ostvarena preko četvoropinskih konektora. Veza konektorima omogućuje laku demontažu upravljačkih signala između mašine i upravljačke jedinice zbog lakše prenosivosti.



Slika 11 - Integracija hardvera mašine sa LinuxCNC sistemom upravljanja

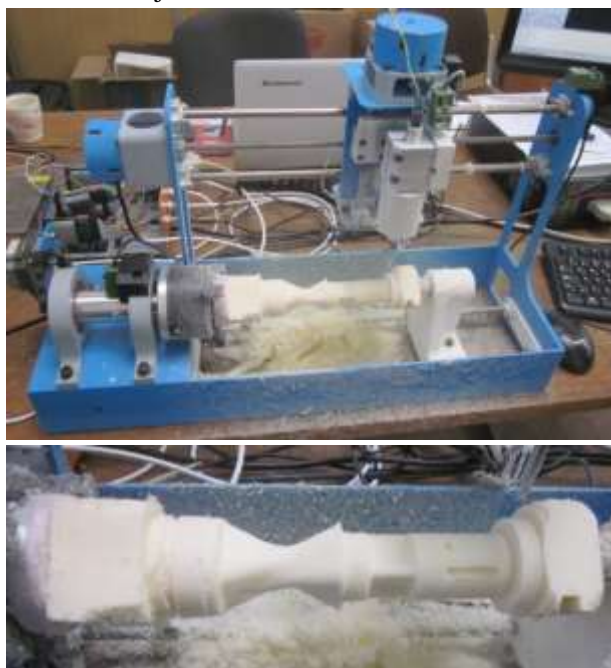
5. PROBNI RAD MAŠINE

Probnim radom realizovane mašine izvršena je eksperimentalna verifikacija koncepta 3-osne mašine sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, kao i sistem za upravljanje i programiranje. S obzirom da je sistem za upravljanje i programiranje, konfigurisan uporedo sa razvojem hardvera mašine, postoje male razlike između konfigurisanih virtuelnih mašina i stvarne mašine. Ova mala razlika se odnosi na konstrukciono rešenje glavnog vretena.

Deo kojim je realizovan prvi probni rad mašine identičan je virtuelnom prototipu obratka sa slike 4. Programiranje predobrade i završne obrade dela izvršeno je u okviru paketa DeskProto. U predobradi je korišćena strategija u kojoj obrtna osa ima inkrementalni pomeraj, dok u završnoj obradi obrtna osa ima kontinualni rezim rada, a translatorna osa duž obratka ima inkrementalno kretanje. Obrada je izvršena u stiroduru fine granulacije, kako bi detalji na željenom izratku došli do izražaja. Obzirom na snagu i dimenzije glavnog vretena, nije moguće na ovakvoj mašini vršiti obradu tvrdih materijala. Kako je pripremak kvadratnog poprečnog preseka i ne može se stegnuti u steznu

glavu sa tri stezne čeljusti, napravljen je cilindričan trn od aluminijuma za koji se prethodno zalepi pripremak lepkom za drvo, ili nekim drugim lepkom koji neće nagrizati materijal priprema.

Predobrada i završna obrada su izvršene vretenastim ravnim glodalom prečnika 4 mm, sa cilindričnom drškom koja je redukovana tako da se glodalo može stegnuti u glavno vreteno. S obzirom da prvi probni deo nema kompleksnu geometriju, već se sastoji od pravilnih geometrijskih tela, opravdana je obrada jednim alatom u predobradi i završnoj obradi. Na slici 12 prikazan je prvi probni deo realizovan na mašini sa dve translatorne i jednom obrtnom osom.



Slika 12 - Obrada jednog probnog dela

Za proveru tačnosti pozicioniranja po cilindru, ručno je isprogramiran deo kôda, kojim su obrađene četiri rupe i četiri uzdužna žleba. Rupe i žlebovi su međusobno pomereni za 45°. Drugi deo koji je izabran za probni rad mašine ima složeniju geometriju i predstavlja skulpturu Afrodite (slika 13), grčke boginje ljubavi. Na osnovu gotovog STL modela, izvršeno je programiranje u okviru programskog paketa DeskProto [10] i generisan je G kôd za mašinu, za predobradu i završnu obradu. Dobijeni programi su prethodno verifikovani u Vericut okruženju (slika 9 b), čime je potvrđena ispravnost programa i na vreme sprečena mogućnost kolizije između alata i drugih pokretnih delova mašine. Drugi probi deo sadrži asimetričnu geometriju u odnosu na osu obrtanja. Ovakvi delovi se mogu nazvati i delovi sa reljefnom geometrijom. Postupak programiranja delova sa reljefnom geometrijom nije tipičan za komercijalne CAM softvere, pogotovu ako su u STL formatu, već se u te svrhe koriste specijalizovani softveri kao što je DeskProto.



Slika 13 - Obrada skulpture Afrodite a) predobrada b) završna obrada

6. ZAKLJUČAK

Rezultati predstavljeni u ovom radu, obuhvataju konfigurisanje jedne CNC edukacione mašine alatke sa ciljem da se stvori okruženje za laboratorijska vežbanja i istraživanja u oblasti kompleksnih mašina alatki. Programiranje i upravljanje, konfigurisanje novih mašina alatki, razvoj sistema za upravljanja otvorene arhitekture i obuka za programiranje CNC mašina alatki, samo su neki od motiva koji su podstakli razvoj jednog ovakvog obradnog sistema.

Realizovane su sledeće aktivnosti: (i) konfigurisanje virtuelne mašine i simulacija njenog rada po zadatom programu (ii) konfigurisanje upravljanja mašine alatke, (iii) verifikacija upravljanja i probni rad mašine alatke.

Prikazana mašina za brzu izradu prototipova je samo prva faza ovih istraživanja koja se planiraju proširiti i na procese laserskog graviranja i sečenja i na procese dodavanja materijala i sve to u jednoj mašini.

7. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva“ i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i

tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105, od 24.01.2020. godine.

LITERATURA

- [1] Zivanovic S., Popovic, M., Vorkapic, N., Pjevic, M., Slavkovic N., An Overview of Rapid Prototyping Technologies using Subtractive, Additive and Formative Processes, *FME Transactions*, Vol. 48, No. 1, pp. 246-253, 2020.
- [2] Cylinder mini CNC engraver machine, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na: <https://www.taiwantrade.com/product/cylinder-mini-cnc-engraver-machine-786397.html>
- [3] 2D Vectors on 3D Profile, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=e9xkut4bm90>
- [4] Avid CNC Rotary Axis, webpage, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na: <https://www.cncrouterparts.com/avid-cnc-rotary-axis-p-724.html>
- [5] Cylinder Engraving Machine, 3D Rotary CNC Router, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na <https://guanjiiahong.en.made-in-china.com/product/deDni-UquCORP/China-Cylinder-Engraving-Machine-3D-Rotary-CNC-Router.html>
- [6] 4 Axis CNC Engraving Multi Heads Cylinder Rotary 3D CNC Wood Carving Machine, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na: <https://chaodacnc.en.made-in-china.com/product/IOFnzZMEhQcx/China-4-Axis-CNC-Engraving-Multi-Heads-Cylinder-Rotary-3D-CNC-Wood-Carving-Machine-Price.html>
- [7] Linux CNC, Enhanced Machine Control - EMC2, webpage, [citirano 19.9.2019]. Dostupno na: <http://www.linuxcnc.org/>
- [8] PTC Creo, [citirano 10.10.2019]. Dostupno na: <https://www.ptc.com/>
- [9] Živanović S, Dimić Z, Virtuelna petoosna mašina alatka integrisana sa sistemom programiranja i upravljanja, *TEHNIKA*, 68, Broj 3, str 397-404, 2019.
- [10] DeskProto, [citirano 2.8.2020]. Dostupno na: <https://www.deskproto.com/>
- [11] CGTech Vericut, [citirano 10.10.2019]. Dostupno na: <https://www.cgtech.com/>
- [12] Zeljković M, Tabaković S, Živković A, Živanović S., Mladenović C, Knežev M, *Osnove CAD/CAE/CAM Tehnologija*, udžbenik, ISBN 978-86-6022-120-1, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka, 2018.
- [13] Živanović S, Vorkapić N, Dimić Z, Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osnemi CNC mašine alatke na Raspberry Pi platformi, *TEHNIKA* 68, Broj 6, str. 823-831, 2019.
- [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] Dimic Z, Zivanovic S, Vasic M, Cvijanovic V, Krosnjar A, Virtual Simulator for five axis vertical Turning Center in Python graphical Environment Integrated with Open Architecture Control System, in *Proc.10th International Scientific Conference on Flexible Technologies - mma 2009*, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Production Engineering, Novi Sad, Serbia, pp. 94-97, october 2009.
- [16] Hoffmann P, Maksoud T. M. A, Virtual commissioning of manufacturing systems: a review and new approaches for simplification, in *Proc.24th European Conference on Modelling and Simulation*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.
- [17] Vismach, webpage, [citirano 19.9.2019]. Dostupno na: (http://linuxcnc.org/docs/html/gui/vismach.html#_start_the_script)

SUMMARY

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL 3-AXIS CNC MACHINE TOOL FOR RAPID PROTOTYPING WITH TWO TRANSLATIONAL AND ONE ROTARY AXIS

The paper shows the development of a 3-axis CNC machine tool for rapid prototyping by subtracting materials, with two translational and one rotating axis, whose control is based on the LinuxCNC system, with an integrated virtual machine as a digital twin. The concepts of machines with one rotary axis were analyzed and the concept of a machine for realization was adopted, which is completely configured in a CAD/CAM environment. For successful verification of the programming system, a virtual machine has been configured in the CAD/CAM system, as well as in Vericut. The final validation of the machine design was achieved by its trial work on characteristic examples.

Key words: CNC machine tool, programming, CAD/CAM, virtual prototype, LinuxCNC, digital twin