



## KONFIGURISANJE I VERIFIKACIJA REKONFIGURABILNE MAŠINE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM MOMA V3

Saša Živanović<sup>1</sup>, Goran Vasilić<sup>2</sup>, Branko Kokotović<sup>3</sup>, Nikola Vorkapić<sup>4</sup>, Zoran Dimić<sup>5</sup>, Nikola Slavković<sup>6</sup>

*Rezime: U ovom radu je predstavljeno konfigurisanje troosne rekonfigurabilne mašine sa hibridnom kinematikom MOMA V3 koja predstavlja jednu edukacionu stonu glodalicu sa horizontalnim položajem glavnog vretena. U radu se predstavlja prototip mašine, njeno konfigurisanje, sistem za programiranje i upravljanje i verifikacija rada.*

*Ključne riječi: konfigurisanje, rekonfigurabilna mašina alatka, LinuxCNC, simulacija, programiranje, verifikacija*

### **CONFIGURING AND VERIFICATION OF A RECONFIGURABLE MACHINE WITH HYBRID KINEMATICS MOMA V3**

*Abstract: This paper presents configuring a 3-axis reconfigurable machine with hybrid kinematics MOMA V3, which represents an educational desktop milling machine with a horizontal position of the main spindle. The paper consider the machine's prototype, its configuring, the system for programming and control and verification of work.*

*Key words: configuring, reconfigurable machine tool, LinuxCNC, simulation, programming, verification*

<sup>1</sup>Prof. dr Sasa Zivanovic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, szivanovic@mas.bg.ac.rs (CA)

<sup>2</sup> Goran Vasilic, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Odsek za saobraćaj, mašinstvo i inženjerstvo zaštite, gvasilic@atssb.edu.rs

<sup>3</sup>Doc. dr Branko Kokotovic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, bkokotovic@mas.bg.ac.rs

<sup>4</sup>Nikola Vorkapic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, nvorkapic@mas.bg.ac.rs

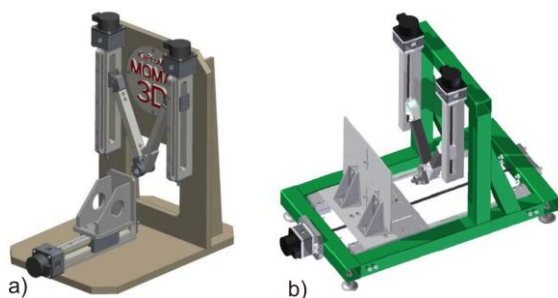
<sup>5</sup>Dr Zoran Dimic, Lola Institute, Belgrade, Serbia, zoran.dimic@li.rs

<sup>6</sup>Prof. dr Nikola Slavkovic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, nslavkovic@mas.bg.ac.rs

## 1 UVOD

Intenzivan razvoj numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) predstavlja osnovu savremenih industrijskih tehnoloških sistema. U doba Industrije 4.0 aktuelni trendovi unapređenja industrijske proizvodnje se ogledaju i kroz pravce razvoja savremenih mašina alatki kao što su [1,2]: usvajanje koncepta digitalizacije i integrisanja virtuelnih mašina alatki sa sistemima za njihovo programiranje i upravljanje, uvođenje novih koncepcija mašina alatki baziranih na paralelnoj i hibridnoj kinematici, prilagođavanje specifičnim potrebama pojedinih grana industrije, uvođenje rekonfigurabilnih [3] i prilagodljivih mašina alatki, dalji razvoj nadzora i dijagnostike procesa obrade na mašinama alatkama, itd.

U radu se razmatra konfigurisanje mašine na bazi dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma [4,5], koji pripada generaciji rekonfigurabilnih tehnoloških modula, koji može egzistirati samostalno ili u kombinaciji sa drugim mehanizmima, gradeći nove mašine alatke. Rezultat konfigurisanja je projekat i realizacija jedne rekonfigurabilne troosne glodalice sa upravljanjem otvorene arhitekture koja u osnovi ima rekonfigurabilni dvoosni paralelni mehanizam MOMA (MODularna MAšina alatka sa upravljanjem otvorene arhitekture) [4,5]. Sa još jednom dodatnom serijskom traslatornom osom čini troosnu mašinu sa hibridnom kinematikom. Prve varijante ove mašine pokazane su na slici 1.



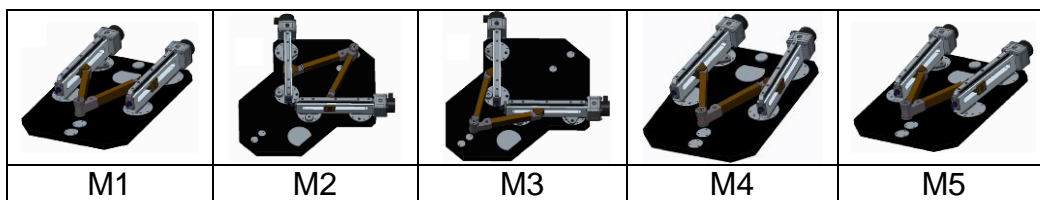
Slika 1. Prikaz polaznih varijanti 3-osne rekonfigurabilne mašine MOMA

MOMA je uspostavljena kao sistem sastavnih elemenata (modularni sistem), na osnovu koga se može vršiti rekonfigurisanje i hardverskog i softverskog dela sistema [4]. MOMA je u osnovi namenjena za edukaciju u: (i) konfigurisanju i rekonfigurisanju novih mašina alatki, (ii) programiranju i (iii) upravljanju na bazi softvera otvorene arhitekture LinuxCNC [6].

U nastavku se daje opis strukture razmatrane mašine MOMA V3, dok je u trećem poglavlju predstavljeno konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine. U četvrtom poglavlju predstavljen je sistem za programiranje i upravljanje mašinom, sa upotrebom virtuelne mašine za potrebe verifikacije programiranja. Poglavlje 5 pokazuje ekeperimentalnu verifikaciju mašine kroz njen probni rad.

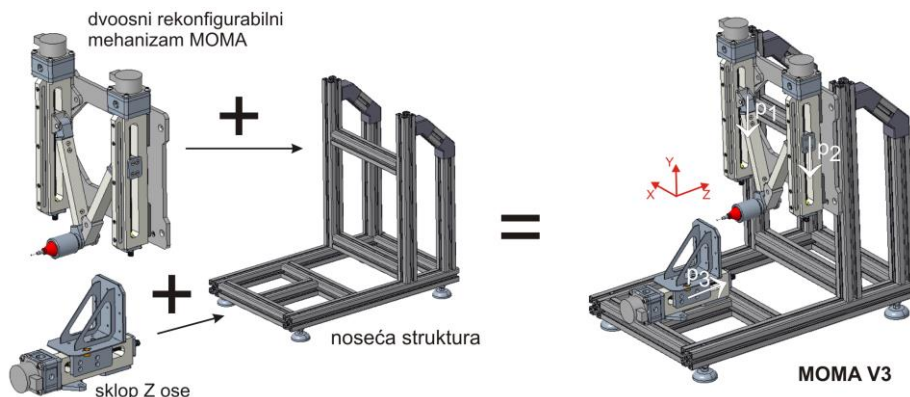
## 2 OPIS REKONFIGURABILNE MAŠINE MOMA V3

Ravanski rekonfigurabilni paralelni mehanizam MOMA je mehanizam sa dva stepena slobode, koji se sastoji od dve identične pogonske translatorne ose, po kojima se kreću dva klizača. Maksimalan hod klizača duž pogonskih osa iznosi 200 mm. Klizači su pomoću dve spojke povezani u paralelni mehanizam. Spojke su sa klizačima i međusobno povezane obrtnim zglobovima, obrtna veza između spojki je ujedno i pokretna platforma paralelnog mehanizma. Dvoosni rekonfigurabilni paralelni mehanizam se konfigurira prema programu gradnje [4]. Prikaz osnovnih pet tipova (M1 do M5) iz plana gradnje stane dvoosne rekonfigurabilne mašine MOMA je dat na slici 2.



Slika 2. Osnovni tipovi dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA

Paralelni mehanizam je baziran na modularnom principu, dok se njegova rekonfigurabilnost ogleda u tome što se međusobni položaj pojedinih modula translatorskih osa može menjati, a takođe je moguće izvršiti promenu dužina spojki, pošto postoji familija različitih dužina spojki u tri nazivne veličine (200, 195 i 180 mm). Konfiguracija paralelnog mehanizma se može lako i brzo menjati prema programu gradnje [4,5,7,8]. Programom gradnje je definisana svaka od mogućih konfiguracija paralelnog mehanizma. Kao osnova za gradnju troosne rekonfigurabilne mašine sa hibridnom kinematikom koriste se izabrana tri tipa mašine i to M1, M4 i M5, sa slike 2, uz dodatnu serijsku translatorsku osu, što je pokazano na slici 3.



Slika 3. Mašina MOMA V3 sa hibridnom (paralelno-serijskom) kinematikom

CAD model virtuelnog prototipa mašine sa hibridnom kinematikom MOMA V3 je prikazan na slici 3 i predstavlja troosnu horizontalnu glodalicu sa glavnim vretenom koje se pokreće paralelnim mehanizmom po osama X i Y dok se pomeranje obratka ostvaruje po Z osi (p3). Paralelni mehanizam ima dve pogonske translatorske ose sa klizačima p1 i p2. Paralelni mehanizam čine dve spojke koje su obrtnim zglobovima povezane prvo međusobno a potom i za dva klizača (p1 i p2). Osa obrtnog zgloba, gde su povezane spojke čini pokretnu platformu mehanizma i u ovoj osi se postavlja glavno vreteno. Analiza kinematičkog modela, rešenje inverzne i direktne kinematike, radni prostor i analiza singulariteta dati su u radu [7].

### 3 KONFIGURISANJE VIRTUELNOG PROTOTIPA

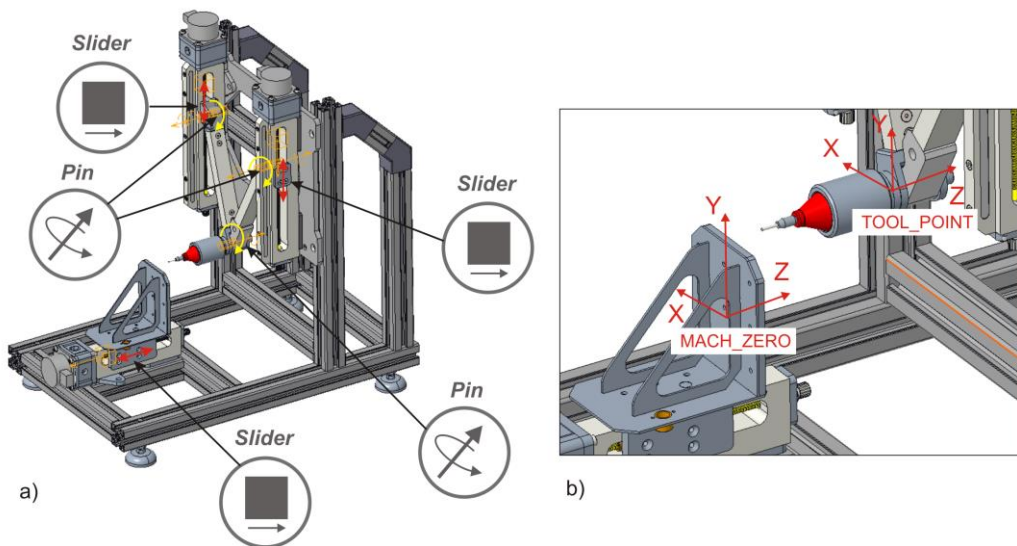
Kao glavni rezultat konfigurisanja dobijaju se, konfiguracije mašine MOMA V3. Tokom konfigurisanja bilo je potrebno preći put, od geometrijskih i kinematičkih modela, preko Jakobijana, inverzne i direktne kinematike, analize singulariteta, analize

radnog prostora, optimizacije nekih elementa mašine (npr. dužina spojki), do dobijanja virtuelnog prototipa, simulacija na virtuelnim prototipovima i konfigurisanja hardvera mašine na bazi raspoloživog fonda modula i testiranja upravljanja za konačnu verifikaciju konfigurisane nove mašine alatke [7,8].

Varijantnost strukture već prikazanog osnovnog rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma omogućava, po definiciji, široku primenljivost ovog mehanizma kao tehnološkog modula za vertikalne i horizontalne troosne mašine alatke sa hibridnom (paralelno-serijskom) kinematikom. Za konfigurisanje razmatrane mašine uspostavljen je sistem sastavnih elemenata, ili modularni sistem, sa bazom raspoloživih modula i pravilima pomoću kojih je moguće njeno rekonfigurisanje [4,8].

Konfigurisanje virtuelnog prototipa mašine MOMA V3 je realizovano u okviru CAD/CAM sistema PTC Creo. Sve komponente i kompletiranje glavnog sklopa mašine su realizovani u CAD/CAM okruženju, pri čemu je iskorišćena mogućnost sklapanja mašine sa odgovarajućim kinematičkim vezama. Ovo omogućava korišćenje opcije simulacije rada kompletnog virtuelnog prototipa po zadanom programu. Potrebne kinematičke veze za razmatranu troosnu mašinu sa hibridnom kinematikom su tri translacije (p1, p2 i p3) koje koriste vezu tipa klizača (Slider), i 3 rotacije, koje koriste obrtne veze (Pin), na mestima veze spojki paralelnog mehanizma sa klizačima i međusobno, slika 4a.

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 [9]. Na virtuelnoj mašini alatki se definišu koordinatni sistem MACH\_ZERO, na radnom stolu i TOOL\_POINT na glavnom vretenu, slika 4b. Koordinatne sisteme sa istim nazivima imaju i obradak i alat. Ovi koordinatni sistemi se koriste tako da se njihovim poklapanjem ostvaruje postavljanje virtuelnog alata na virtuelnu mašinu i virtuelnog obratka sa pripremkom, na radni sto virtuelne mašine. Nakon ovako izvedenog virtuelnog baziranja obratka i postavljanja alata, moguće je pokrenuti simulaciju rada virtuelne mašine alatke po zadanom programu, opcijom Machine Play [9].



Slika 4. Prikaz kinematičkih veza i koordinatnih sistema na virtuelnom prototipu mašine

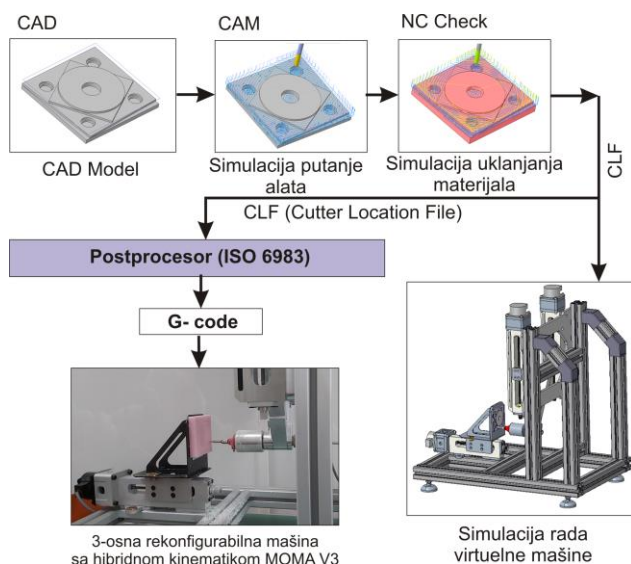
## 4 SISTEM ZA PROGRAMIRANJE I UPRAVLJANJE

Kao sistem za programiranje planirano je korišćenje raspoloživog CAD/CAM sistema PTC Creo, u kome je i konfigurisan virtuelni prototip, dok je u pogledu realizacije sistema upravljanja izabran sistem otvorene arhitekture baziran na LinuxCNC sistemu koji je od ranije poznat i kao EMC2 (Enhanced Machine Control) [6,9]. U ovom poglavlju su date osnovne informacije o 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 razmatraju se dva pristupa. Prvi klasičan koji se odnosi na programiranje primenom G koda, odnosno prema standardu ISO6983, i novi pristup programiranju NUMA, poznatiji kao objektno orijentisano programiranje ili programiranje primenom STEP-NC protokola [10,11].

#### 4.1.1 Programiranje primenom CAD/CAM sistema



Slika 5. Osnovna struktura sistema za programiranje prienom CAD/CAM sistema

Na slici 5 je prikazana osnovna struktura sistema za programiranje. Verifikacija programa je moguća simulacijom putanje alata, simulacijom uklanjanja materijala i simulacijom rada virtuelne mašine koja radi po zadatom programu u CLF formatu. Postprocesiranje se vrši kao za troosnu glodalicu, gde se dobija G kod prema standardu ISO6983, koji je u ovom slučaju po formatu sličan programima za Fanuc CNC sisteme. Za prikazani primer test probnog dela sa slike 5, u poglavlju 5 je pokazana i obrada ovog dela.

#### 4.1.2 Programiranje primenom protokola STEP-NC

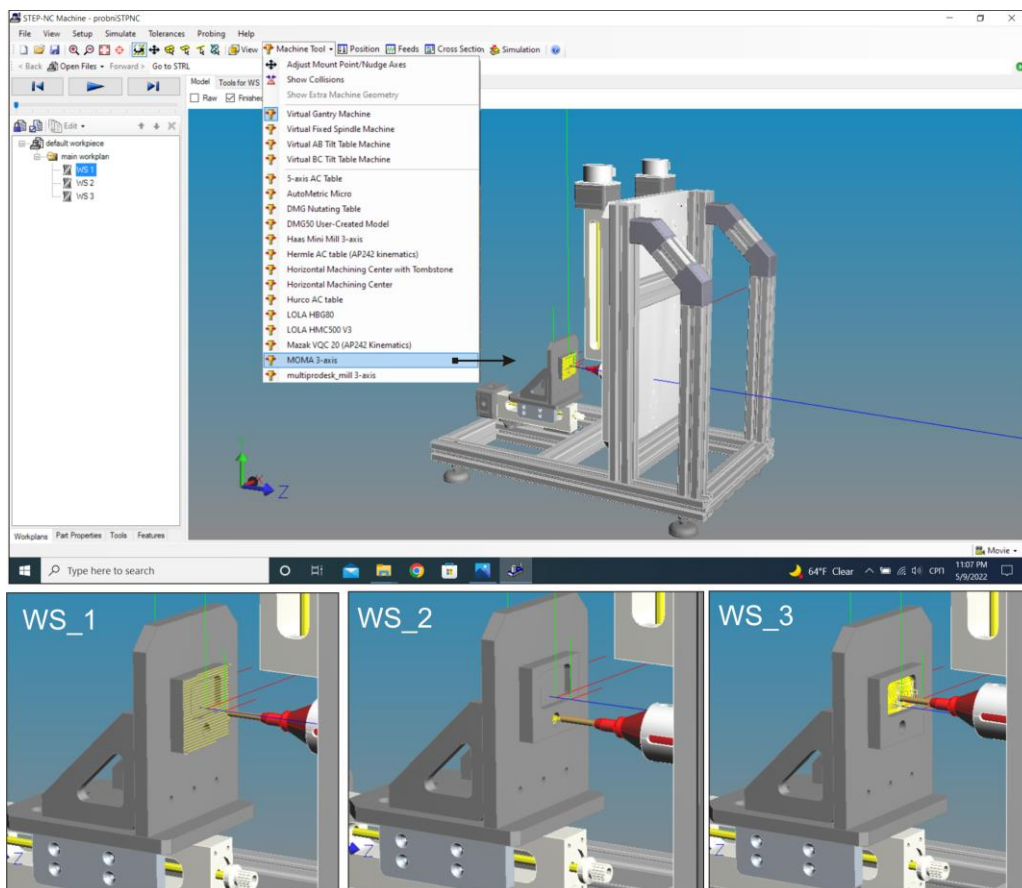
Za pripremu uvođenja novog metoda programiranja primenom STEP-NC standarda, takođe je razmatrano konfigurisanje i inegriranje virtuelne mašine koja radi po programu u STEP-NC formatu u okruženju softvera STEP-NC Machine, slika 6.

Danas mali broj mašina može direktno interpretirati STEP-NC program. S tim u



vezi, za direktnu verifikaciju STEP-NC programa korisno je koristiti konfigurisane virtuelne mašine koje mogu raditi u okruženju STEP-NC Machine i izvršavati programe u \*.stpnc formatu, slika 6. Razmatrana mašina MOMA V3 je konfigurisana i integrisana u okruženje STEP-NC Machine, prema metodologiji koja je detaljno data u [11]. Za programiranje je primenjen indirektni metod programiranja [10,11], dok je prilikom obrade STEP-NC program preveden u G kod, pošto razmatrana mašina može da interpretira samo G kod.

Kao primer za obradu iskorišćen je tipičan STEP-NC probni deo. Za obradu ovog dela korišćeno je čeono vretenasto glodalo prečnika 3mm i obradak od stirodura. Pri obradi dela izvršena su tri zahvata (workingsteps – WS): WS\_1 glodanje ravne površine, WS\_2 glodanje cilindričnog džepa i WS\_3 glodanje pravougaonog džepa, slika 6. Na slici 6 pokazana je simulacija obrade dela na mašini MOMA V3 koja je učitana iz baze mašina kao nova dodata mašina, koja je prethodno konfigurisana u STEP-NC Machine okruženju. Nakon simulacije na virtuelnoj mašini u STEP-NC Machine okruženju, izvršeno je prevođenje programa na G kod korišćenjem exopt opcije za generisanje Fanuc G koda koji je učitani u upravljanje mašine nakon čega je realizovana i obrada dela, što je pokazano u poglavlju 5.



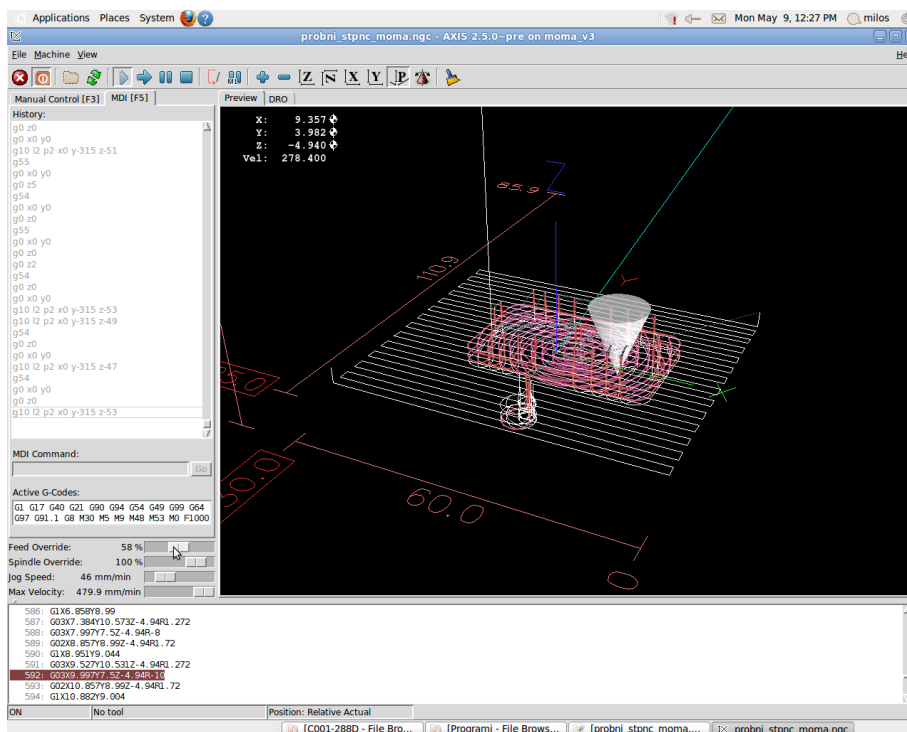
Slika 6. Simulacija rada integrisane virtuelne mašine u okruženju STEP-NC Machine

## 4.2 Sistem za upravljanje

Za razmatranu rekonfigurabilnu mašinu sa hibridnom kinematikom, čije se konfigurisanje razmatra u ovom radu kao sistem za upravljanje izabran je LinuxCNC koji predstavlja real-time softver za upravljanje mašinama alatkama i robotima, čiji se kod može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License) [6].

Softverska struktura LinuxCNC-a sadrži četiri osnovna programska modula i to: kontroler kretanja (EMCMOT), kontroler diskretnih ulaznih/izlaznih signala (EMCIO), kontroler procesa koji ih koordiniše (EMCTASK) i kolekciju grafičkih korisničkih inerfejsa (GUI). Detaljnije o ovoj strukturi se može videti u [12].

S obzirom da kinematika razmatrane mašine nije trivijalna, neophodna je bila zamena funkcija trivijalne kinematike, kinematikom za mašinu MOMA V3 u kojoj su implementirana rešenja i inverzne i direktne kinematike [7,8] u C jeziku. Prilikom integrisanja modela upravljanja, definišu se i parametri mašine, kao i referentni položaji svih osa, a na kraju se realizuje prevođenje i povezivanje softvera.



Slika 7. Grafički korisnički interfejs AXIS

Grafički korisnički interfejs - GUI (Graphical User Interface) predstavlja eksterni program koji komunicira sa LinuxCNC-om slanjem komandi kao što su: uključenje mašine, prelazak na automatski režim rada, start programa, isključenje. GUI može slati i manuelne poruke, inicirane od operatera, kao što su: pomeranje osa mašine u ručnom režimu (JOG) ili slanje svih osa u referentnu poziciju (HOME AXES). Najčešće je u upotrebi Axis korisnički grafički interfejs, koji je korišćen za pokazano upravljanje mašinom MOMA V3 i prikazan je na slici 7, sa učitanim programom za programiranu

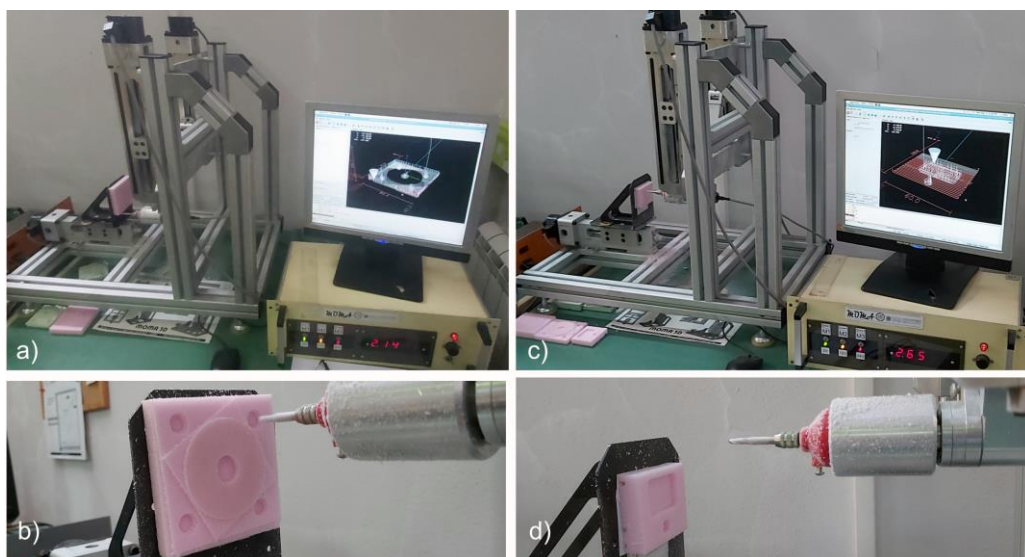
test konturu, koja je analizirana u prethodnom poglavlju. Ovo okruženje je vrlo intuitivno za rad, sa prepoznatljivim ikonicama koje olakšavaju rad operatera. Pored toga, pogodnost Axis okruženja je i mogućnost integracije sa virtuelnom mašinom, što je za sada realizovano za dvoosni paralelni mehanizam [12], a u planu je da se realizuje i za kompletnu mašinu sa hibridnom kinematikom.

## **5 VERIFIKACIJA PROTOTIPA – PROBNI RAD**

Verifikacija prototipa mašine MOMA V3 realizovana je tokom probnog rada obradom izabranih radnih predmeta. Prvi se odnosi na test radni predmet za ispitivanje radne tačnosti NUMA, koji je skaliran i prilagođen merama radnog prostora mašine. Na ovaj način se postavlja prvo i najvažnije ispitivanje: provera da li sistem za upravljanje korektno interpolira putanju alata i da li alat zaista vodi po toj putanji. Pošto se u radu predstavljeni klasičan i novi metod programiranja razmatrane mašine pripremljeni su i programi za dva primera.

Prvi je primer sa slike 5, koji se odnosi na skalirani i prilagođeni test radni premet za ispitivanje geometrijske tačnosti NUMA, koji je obrađen i pokazan na slikama 8a,b. Materijal obratka je mekani materijal stirodur, a alat veretenasto ravno glodalno prečnika 3 mm.

Drugi primer se odnosi na verifikaciju indirektnog metoda programiranja primenom STEP-NC protokola obradom odgovarajućeg probnog dela, čija je simulacija obrade pokazana na slici 6, a simulacija putanje u sistemu za upravljanje na slici 7. Ovo je uobičajeni probni deo koji se sastoji od tri osnovna zahvata i čija je obrada, takođe vršena na pripremu od stirodura alatom prečnika 3 mm, pokazana na slikama 8c,d.



*Slika 8. Obrada test probnih delova*

Na osnovu realizovanih eksperimenata obrade tokom probnog rada mašine može se zaključiti, da je konfigurisanje virtuelnog i stvarnog prototipa, kao i odgovarajućeg upravljanja za mašinu korektno, odnosno virtuelna mašina daje veran prikaz rada i iscrtanu test konturu kao i na stvarnoj mašini. Ovo može biti od značaja



za: (i) uvežbavanje rada na rekonfigurabilnim obradnim sistemima, (ii) verifikaciju programa obrade pre njegovog izvršenja na stvarnoj mašini, (iii) rekonfigurisanje upravljanja prilikom promene konfiguracije mašine, (iv) edukaciju za programiranje postojećim (G kod) i novim metodama programiranja (STEP-NC), itd.

## 6 ZAKLJUČCI

U radu je prikazano konfigurisanje jedne horizontalne 3-osne mašine sa hibridnom kinematikom, koja sadrži rekonfigurabilni paralelni mehanizam koji u kombinaciji sa serijskom translacionom osom može da predstavlja realnu koncepciju za gradnju industrijskih mašina ovog tipa. Mašina predstavljena u ovom radu je edukaciona, laboratorijskog tipa sa konceptom CNC upravljanja otvorene arhitekture za mašine alatke specifične konfiguracije.

Razmatrana mašina MOMA V3 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 prilagodljivih mašina alatki; (iii) razmatranje novih metoda u programiranju NUMA, na bazi protokola STEP-NC; (iv) usvajanje pristupa digitalizacije i virtuelizacije u skladu sa, u svetu usvojenim, strategijama unapređenja industrijske proizvodnje pod paradigmom Industrije 4.0.

Pravci daljeg razvoja mašine MOMA V3 podrazumevaju dalje unapređenje sistema za upravljanje i integraciju virtualne mašine u sistem upravljanja.

## ZAHVALNOST

U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "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 po Ugovoru 451-03-68/2022-14/200105, od 4.02.2022. godine.

## LITERATURA

- [1] Živanović, S., Tabaković, S., Zeljković, M. (2018). Machine tools and industry 4.0 - trends of development, Invited paper - Plenary lectures, Proceedings of the 4th international scientific conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA2018, University of East Sarajevo Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo-Jahorina, RS, B&H.
- [2] Tabaković, S., Zeljković, M., Živanović, S. (2017). Savremene mašine alatke – trendovi u edukaciji, Konferencija sa međunarodnim učešćem - Primena novih tehnologija i ideja u školskom inženjerskom obrazovanju, Zbornik radova, Rad po pozivu, str. 9-17, Tehnička škola Požega.
- [3] Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Brussel H.V. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, 48/2, pp. 527-540.
- [4] Živanović S., Vasilić, G. (2014). Variants of configuring the 2-axis reconfigurable parallel mechanism - MOMA, Proceedings of 2nd International Scientific Conference Conference on Mechanical Engineering Technologies and

- Applications COMETA 2014, pp.33-40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, RS, B&H.
- [5] Vasilic, G., Živanović, S. (2016). Modelling and analysis of 2-axis reconfigurable parallel mechanism MOMA with translatory actuated joints. *TECHNICS special edition*, pp. 59-66.
- [6] Linux CNC, Enhanced Machine Control - EMC2, <http://www.linuxcnc.org/> , pristupljeno 17.10.2020.
- [7] Vasilic, G., Zivanovic, S., Kokotovic, B. (2017). Modelling and analysis of 3-axis reconfigurable hybrid kinematics mechanism with translatory actuated joints, Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH 2017, Editors: Majstorovic, V., Jakovljevic, Z., Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 429-441, 5th – 9th June 2017, Belgrade, Serbia, Springer International Publishing AG 2017.
- [8] Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B., Dimić, Z. (2014). Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA, Tehničko rešenje (Novi laboratorijski proizvod, M82), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.
- [9] Tabakovic, S., Zivanovic, S., Zeljkovic, M., Dimic, Z. (2021). Konfigurisanje nove edukacione mašine alatke na bazi mehanizma sa hibridnom kinematikom, *Časopis Tehnika*, Vol. 71, No. 5, str 603-612.
- [10] Zivanovic, S., Vasilic, G. (2017). A New CNC Programming Method using STEP-NC Protocol, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, *FME Transactions*, ISSN 1451-2092, Vol. 45, No. 1, pp. 149-158.
- [11] Zivanovic, S., Slavkovic, N. (2021). Programming of machine tools and robots for machining using STEP-NC in the era of Industry 4.0, Keynote Lecture, Proceedings of the 15th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2021, pp. 3-26.
- [12] Živanović, S., Dimić, Z., Vasilic, G., Kokotović, B. (2018). Konfigurisanje virtuelne rekonfigurabilne dvoosne mašine sa paralelnom kinematikom integrisane sa CNC sistemom otvorene arhitekture na bazi EMC2 softvera, *TEHNIKA*, Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Vol. 4, str 519-526.