



---

## RAZVOJ EDUKACIONIH MINI CNC MAŠINA ALATKI SA SISTEMOM UPRAVLJANJA OTVORENE ARHITEKTURE

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

*Rezime: Ovaj rad predstavlja pregled istraživanja na temu razvijenih edukacionih mini CNC mašina alatki na bazi upravljanja otvorene arhitekture, na PC platformi i na kompaktnim računarskim platformama. Razmatraju se sledeće varijante edukacionih desktop mašina alatki: mini CNC troosna mašina alatka sa tri translatorne ose, troosne mašine alatke sa jednom obrtnom osom i dve translatorne ose i virtuelna 5-osna mašina alatka sa integrisanim upravljanjem. Pokazane su prve razvijene varijante ovih mašina, njihovo konfigurisanje, sistem za programiranje i upravljanje i verifikacija rada.*

*Ključne riječi: konfigurisanje, CNC mašina alatka, virtuelni prototip, sistem za programiranje i upravljanje*

### **DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL MINI CNC MACHINES TOOLS WITH OPEN ARCHITECTURE CONTROL SYSTEM**

*Abstract: This paper presents an overview of research on the topic of developed educational mini CNC machine tools based on open architecture control, on PC platforms, and on compact computer platforms. The following variants of educational desktop machine tools are considered: mini CNC three-axis machine tool with three translational axes, three-axis machine tools with one rotary axis and two translatory axes, and a virtual 5-axis machine tool with integrated control. The first developed variants of these machines, their configuration, programming, and control system, and work verification are shown.*

*Key words: configuring, CNC machine tool, virtual prototype, programming and control system*

---

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

<sup>2</sup> Nikola Vorkapic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, nvorkapic@mas.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dr Zoran Dimic, Lola Institute, Belgrade, Serbia, zoran.dimic@li.rs

<sup>4</sup> Doc. Dr Nikola Slavkovic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, nslavkovic@mas.bg.ac.rs

<sup>5</sup> Doc. Dr Branko Kokotovic, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, bkokotovic@mas.bg.ac.rs

## **1 UVOD**

Stalni razvoj proizvodnih tehnologija i industrije omogućen je intenzivnim razvojem numerički upravljanih mašina alatki (NUMA) koje predstavljaju osnovu današnjih industrijskih tehnoloških sistema. Aktuelni trendovi unapređenja industrijske proizvodnje kroz strategije kao što je Industrija 4.0 i sveopšta digitalizacija uslovile su i dalji razvoj mašina alatki koje prate ove trendove. U tom pogledu najznačajniji pravci razvoja savremenih mašina alatki su: osavremenjavanje mehaničke strukture u smislu uvođenja novih koncepcija mašina alatki baziranih na paralelnoj i hibridnoj kinematici, prilagođavanje specifičnim potrebama pojedinih grana industrije, uvođenjem rekonfigurabilnih i prilagodljivih mašina alatki, dalji razvoj nadzora i dijagnostike procesa obrade na mašinama alatkama, usvajanje koncepcije digitalizacije i integrisanja virtuelnih mašina alatki sa sistemima za njihovo programiranje i upravljanje [1, 2].

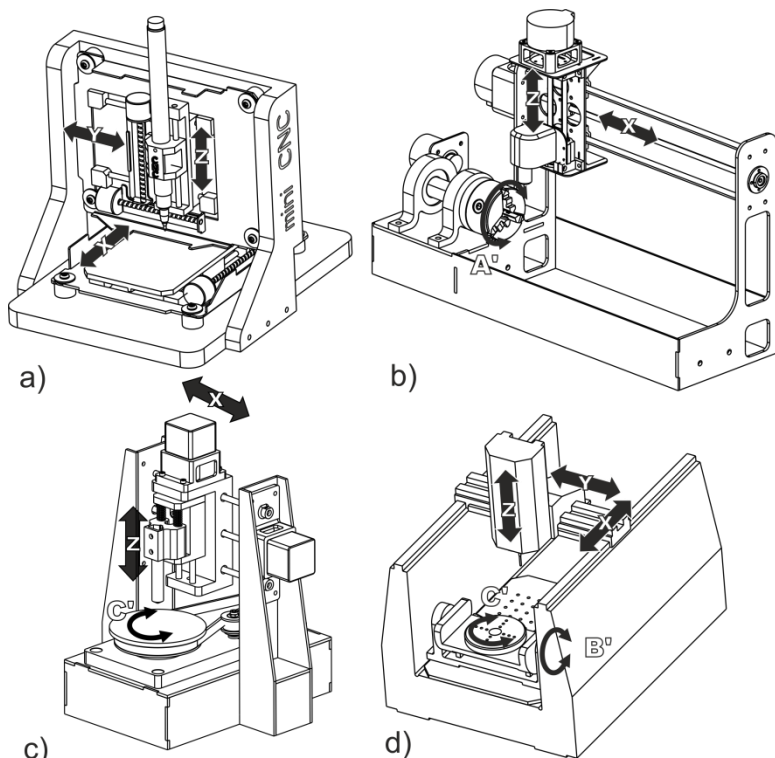
Za postojeće i nove NUMA, odnosno CNC mašine alatke, potrebna je sveobuhvatna edukacija za njihovo efikasno korišćenje na različitim nivoima edukacije (na fakultetima, visokim i srednjim školama), ali i adekvatna obuka u fabrikama. Za ovakvu edukaciju su neophodni resursi, koji će omogućiti verifikaciju stečenih znanja na realnim mašinama alatkama, koje mogu biti edukacione ili industrijske varijante. Uobičajeno je da su ovakvi edukacioni zadaci do sada rešavani nabavkom edukacionih mašina industrijskog tipa i edukacionih mašina laboratorijskog stonog tipa (Desktop CNC machine tools). Problem je u nabavci edukacionih resursa, jer zahtevaju značajna ulaganja, koja često nisu raspoloživa, pa veliki broj fakulteta, visokih i srednjih škola imaju nedovoljno razvijene kapacitete za verifikaciju ostvarenih edukacija na realnim mašinama [3].

Na Mašinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, postoji duga tradicija u radu i edukaciji sa CNC mašinama alatkama kao i razvoju većeg broja edukacionih mašina laboratorijskog i industrijskog tipa. U ovom radu se daje pregled aktuelnih razvijenih edukacionih CNC mašina alatki, laboratorijskog tipa, sa upravljanjem otvorene arhitekture bazirane na PC platformi, kao i na kompaktnim računarskim platformama.

## **2 KONCEPT EDUKACIONIH MAŠINA ALATKI**

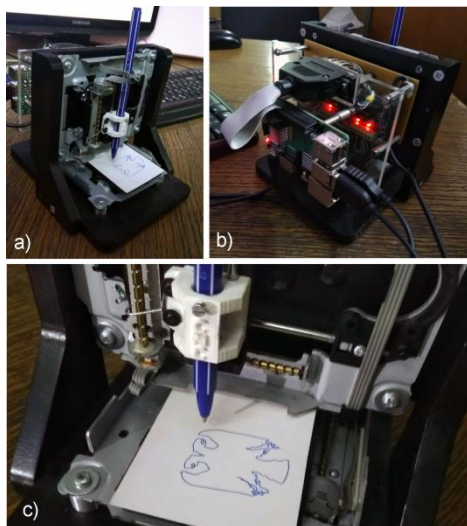
CAD modeli edukacionih mašina alatki razvijenih na Katedri za proizvodno mašinstvo u Laboratoriji za obradne sisteme, Mašinskog fakulteta u Beogradu, koje su predmet ovog rada pokazane su na slici 1. Razmatrane mašine pripadaju klasi mašina sa serijskom kinematikom, dok se broj numerički upravljanih osa kreće od tri do pet. Ideja za razvojem serije edukacionih mašina alatki pokrenuta je sa ciljem realizacije niskobudžetnih CNC mašina alatki, dostupnih za samostalan rad studenata, kao i za samostalnu gradnju i korišćenje ovakvih mašina. Na taj način se planiraju ostvariti edukacije u:

- konfigurisanju novih CNC mašina alatki,
- konfigurisanju virtuelnih prototipova mašina,
- pripremi i korišćenju CAD/CAM okruženja za programiranje razmatranih mašina,
- pripremi i korišćenju postprocesora,
- realizaciji upravljanja otvorene arhitekture, bazirane na sistemu LinuxCNC za PC platforme i Machinekit za kompaktne računarske platforme (Raspberry Pi, Beagle Bone black).



Slika 1. Edukacione mašine alatke u Laboratoriji za obradne sisteme

## 2.1 Mini CNC troosna mašina alatka – M1



Slika 2. Mini CNC troosna mašina alatka [5]

Mini CNC troosna mašina alatka je edukaciona mašina, koja se može lako napraviti od dostupnih komponenta kao što su stari pogoni od DVD/CD čitača, koji se koriste kao pogoni numerički upravljanih (NU) osa.

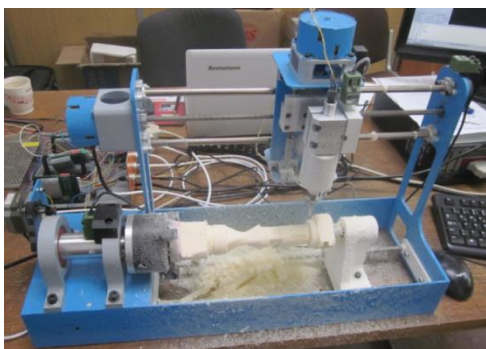
Mašina je realizovana sa dve varijante upravljanja: (i) na PC platformi primenom LinuxCNC sistema [4], (ii) na jednoj od kompaktnih računarskih platformi kao što je Raspbery Pi [5].

Mogućnost jednostavne samogradnje, i dostupnost komponenta, preporučuje ovakvu mašinu za samostalan rad studenata kako u pogledu konfigurisanja i izrade, upravljanja i na kraju programiranja takve mašine. Mašina se programira u G kôdu, na sličan način kao što bi se programirala i industrijska mašina, što omogućava da mini CNC mašina može biti deo

edukacionog sistema za obuku u programiranju i rukovanju.

Na slici 2a pokazana je mašina sa prednje strane, dok je pogled sa zadnje strane gde su smešteni drajveri i kompaktno računarsko upravljanje na Raspberry Pi3 platformi pokazan na slici 2b. Mašina na mestu glavnog vretena ima pisač i može da iscrtava programirane konture. Jedna od iscrtanih kontura na mašini je pokazana na slici 2c i predstavlja konturu oblika grba Srbije.

## **2.2 Troosna CNC mašina alatka sa horizontalnom obrtnom osom i dve translatorne ose – M2**



*Slika 3. Troosna CNC mašina sa horizontalnom obrtnom osom i dve translatorne ose strukture A'OXZ*

Troosna mašina alatka sa horizontalnom obrtnom osom i dve translatorne ose je pokazana na slici 3. 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. Mašina ima obrtnu osu A' oko horizontalne X ose i dve translatorne ose X i Z, slika 1b. Obradak se bazira na obrtnu osu A', a alat nose dve translatorne ose. Za potrebe povećanja krutosti dužih obradaka, postoji i nosač zadnjeg šiljka. 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. Konceptija mašine sa koordinatnim osama X, Z i A' ekvivalent je osama polarno-cilindričnog koordinatnog sistema, koje su takođe prostorne koordinate. Struktura usvojene konceptije mašine za realizaciju je A'OXZ.

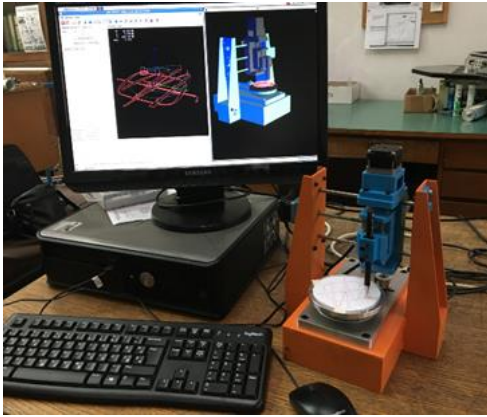
Mašine alatke sa obrtnom osom mogu biti identifikovane i kao četvoroosne, što bi predstavljalo tri translatorne i jednu obrtnu horizontalnu osu. Međutim, postoji klasa mašina koja jednu translatornu osu zamenjuje obrtnom i kao takva i dalje predstavlja troosnu mašinu. Na ovakvim mašinama je moguće obraditi kompleksne delove sa asimetričnom geometrijom u odnosu na osu obrtanja. Ovakvi delovi se mogu nazvati i delovi sa skulpturnom ili reljefnom geometrijom duž obrtne ose.

Prikazana mašina je realizovana kao mašina za brzu izradu prototipova i predstavlja prvu fazu njenog kompletiranja, s obzirom da se ova konceptija planira proširiti i na procese laserskog graviranja i sečenja i na procese dodavanja materijala i sve to u jednoj mašini.

## **2.3 Troosna CNC mašina alatka sa vertikalnom obrtnom osom i dve translatorne ose – M3**

Pored prethodne mašine realizovana je i mašina sa vertikalnom obrtnom osom i dve translatorne. Po konceptiji osa vrlo je slična sa prethodnom, s tom razlikom da je ovde obrtna osa vertikalna, a kinematička struktura mašine je C'OXZ.

Na slici 4 je prikazano kompletno okruženje realizovanog prototipa mašine PolarCNC, koje uključuje, mašinu alatku, upravljanje na PC LinuxCNC platformi sa integrisanom virtuelnom mašinom (Digital Twin).



Slika 4. Troosna CNC mašina sa vertikalnom obrtnom osom i dve translatorne ose strukture C'OXZ

U sadašnjoj fazi realizacije mašina se koristi za iscrtavanje programiranih kontura pomoću pisača. U daljoj realizaciji planirana je ugradnja lasera za lasersko graviranje, zatim glava za ekstrudiranje materijala za postupke dodavanja materijala i ugradnja brzhodnog glavnog vretena za obradu glodanjem mekših materijala. Na taj način bi se zaokružio koncept jedne multifunkcionalne mašine alatke za brzu izradu prototipova.

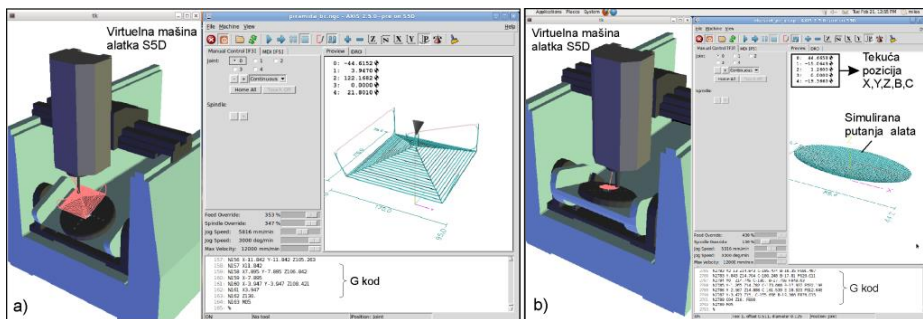
Karakteristika ove mašine je i njeno programiranje u polarno-cilindričnim koordinatama i potreba za razvojem adekvatnog postprocesora za prevodjenje Dekartovskog G koda u polarno cilindrične koordinate.

## 2.4 Virtuelna petoosna CNC mašina alatka sa integrisanim upravljanjem otvorene arhitekture – M4

Cilj konfigurisanja jedne virtuelne petoosne mašine alatke integrisane sa sistemom upravljanja je da se i bez fizičkog resursa mašine, ostvari efikasan vid verifikacije programiranja petoosnih mašina alatki kroz rad na virtuelnoj mašini, koja se upravlja na isti način, odnosno istim upravljačkim signalima, kao i stvarna mašina. Virtuelna mašina je integrisana sa upravljačkim sistemom Linux CNC, koji je od ranije bio poznat kao EMC2 [6].

Geometrijski model razmatrane petoosne mašine S5D je pokazan na slici 1d. Osnovna mašina je troosna sa dodatnim dvoosnim obrtnim stolom koji ima rotacije B' oko Y ose i C' oko Z ose. Dvoosni obrtno nagibni sto je postavljen poprečno zbog jednostavnog uklapanja u troosnu koncepciju mašine. Petoosna varijanta mašine ima osnovnu strukturu C'B'VXYZ.

Kao ilustracija rada virtuelne mašine, pokazana su dva karakteristična primera obrade: na slici 5a je pokazan primer virtuelne obrade pravilne četverostrane piramide, što odgovara tzv. 3+2 obradi, dok je na slici 5b, pokazana simulacija simultanog rada svih 5 osa, odnosno 5-osna obrada udubljenog elipsoida.



Slika 5. Virtuelna petoosna mašina alatka S5D integrisana sa sistemom upravljanja LinuxCNC



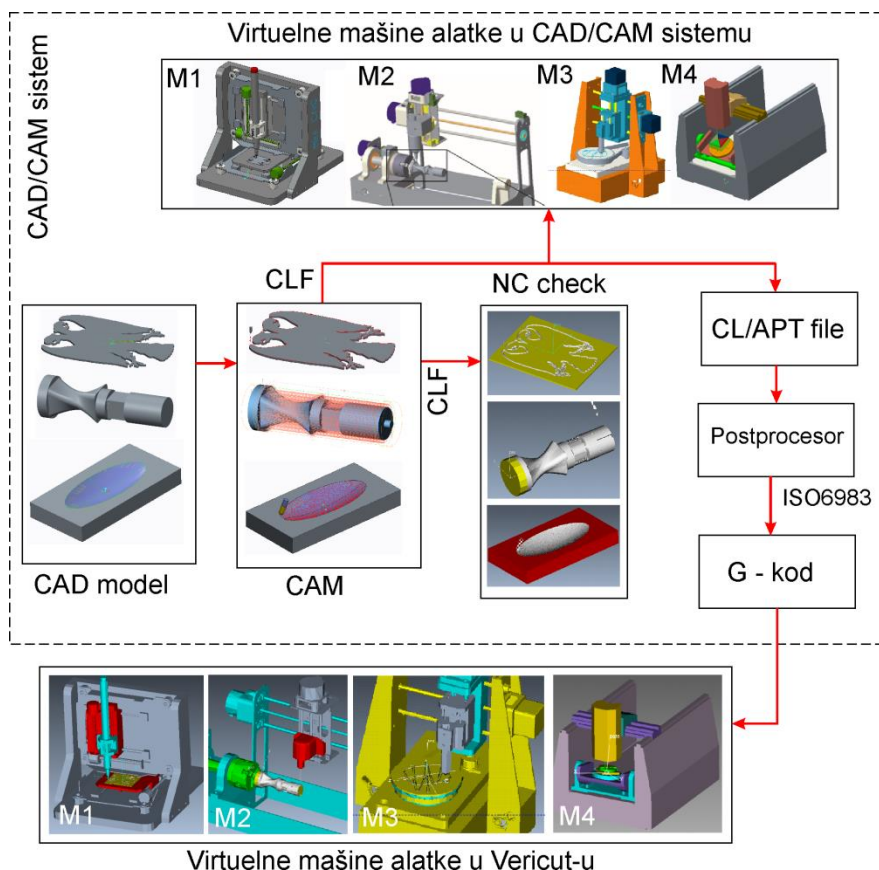
Razvoj virtuelnih okruženja, za programiranje i simulaciju rada mašina alatki su značajni iz više razloga: (i) potreba verifikacije upravljačkih programa, (ii) verifikacija upravljanja pri razvoju novih mašina alatki, (iii) obuka i edukacija za programiranje i rukovanje mašinom. Poslednji pomenuti razlog je posebno značajan jer omogućava obuku za njihovo programiranje i rukovanje i bez postojanja fizičkih resursa kao što je petoosna mašina [6].

### 3 SISTEM ZA PROGRAMIRANJE I UPRAVLJANJE

Sve razmatrane edukacione mašine (M1-M4) u ovom radu koriste adekvatne sisteme za programiranje bazirane na CAD/CAM sistemima. U pogledu upravljanja sve su realizovane na bazi upravljanja otvorene arhitekture primenom LinuxCNC sistema za upravljanje na PC platformi i sistema Machinekit za kompakte računarske platforme, kao što je korišćena Raspberry Pi platforma.

#### 3.1 Sistem za programiranje

Sistem za programiranje edukacionih mašina alatki je pokazan na slici 6. Baziran je na standardnim CAD/CAM sistemima (PTC Creo, Catia), kao i na specijalizovanim CAM sistemima za brzu izradu prototipova (Cut3D, Deskproto).



Slika 6. Sistem za programiranje edukacionih mašina alatki

Programiranje se vrši uobičajenom procedurom, pokazanoj na slici 6. Polazi se od CAD modela obratka na osnovu kojeg se u CAM modulu vrši generisanje putanje alata za izabranu strategiju obrade. Po dobijanju putanje alata koja se čuva u CL/APT fajlu, moguće je izvršiti simulaciju uklanjanja materijala, kao i simulaciju rada mašine po zadatom programu u CAD/CAM okruženju. CL/APT fajl se postprocesira i tako dobijeni kod može biti dodatno verifikovan na konfigurisanim virtuelnim mašinama u Vericut okruženju. U sledećoj fazi usledila bi obrada na stvarnoj mašini. Za sve mašine od M1 do M4 postoje konfigurisane virtuelne mašine.

Mašine M1 i M3 se za sada koriste za iscrtavanje programirane konture i za njihovo programiranje se može koristiti bilo koji CAD/CAM sistem, kao i specijalizovani CAM sistemi kao što su Cut3D i Deskproto. Mašina M3 je specifična zbog toga što je za njeno programiranje neophodno G kod iz Dekartovih koordinata (X,Y,Z), prevesti u polarno cilindrične koordinate (X,Z,C'), što je rešeno razvijenim translatorom. Za programiranje mašine M2, najpogodniji je softver Deskproto koji ima posebne pogodnosti za programiranje mašina sa obrtnom osom (Rotary Machining) [7], kao i adekvatan postprocesor za korektne polarno-cilindrične koordinate G koda. S obzirom da su mašine M2 i M3, planirane kao mašine za brzu izradu prototipova, pogodnost softvera Cut3D i Deskproto, su i mogućnost učitavanja STL fajla za generisanje putanje alata.

Programiranje petosnih mašina alatki, kao što je pokazana mašina M4, je nezamislivo bez primene CAD/CAM sistema, osim u slučajevima nekih elementarno jednostavnih obrada. Primena CAD/CAM sistema u domenu verifikacije programa omogućava prikaz simulacije putanje alata, simulaciju uklanjanja materijala (NC Check), simulaciju rada kompletnog modela mašine alatke na bazi putanje alata (CL/APT) i/ili programa za obradu (G - kôda). Pri tome je ovaj poslednji vid simulacije koji uključuje kompletan model mašine, koja radi po zadatom programu, vrlo značajan za petosne obrade zbog mogućnosti uočavanja eventualnih kolizija koje se ne mogu uočiti prethodno pomenutim simulacijama [6].

## 3.2 Sistem za upravljanje

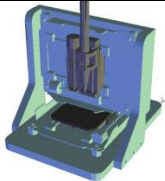
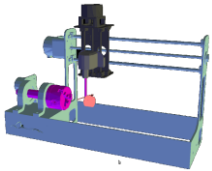
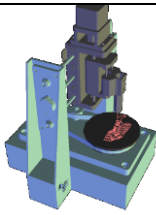
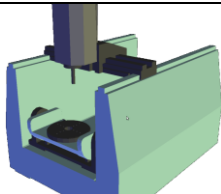
Prilikom konfigurisanja upravljanja za sve razmatrane mašine, jedan od zajedničkih kriterijuma je niskobudžetna varijanta i raspoloživ sistem upravljanja otvorene arhitekture, koji će biti implementiran na PC platformi ili na nekoj od kompaktnih računarskih platformi. Kao sistem upravljanja izabran je softver otvorene arhitekture LinuxCNC [8,9] za PC platformu i Machinekit [10] za kompaktne računarske platforme. Oba izabrana rešenja predstavljaju real-time softvere za upravljanje mašinama alatkama i robotima, čiji se kod može slobodno koristiti, modifikovati i distribuirati (GNU-General Public License). Korišćeni softveri omogućavaju programiranje razvijenih mašina alatki pomoću programa u G kôdu prema standardu RS274, odnosno ISO 6983.

Interna softverska struktura LinuxCNC je detaljno opisana u radovima [4-6] 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).

Na raspolaganju postoji više različitih grafičkih korisničkih interfejsa, od kojih je izabran Axis GUI, sa okruženjem koje je vrlo intuitivno za korišćenje čime je olakšan rad rukovaoca mašinom. Pored toga, pogodnost Axis GUI okruženja je i mogućnost integracije sa virtuelnom mašinom, radi verifikacije programa pre obrade na stvarnoj mašini. Integracija upravljanja i virtuelne mašine je savremena 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) [11]. Tokom razvoja svih razmatranih edukacionih mašina, prvo su konfigurisani virtuelni prototipovi u CAD/CAM okruženju, koji su potom iskorišćeni da se pripreme virtuelne mašine integrisane sa sistemom upravljanja. Upravljanje za svaku od mašina je bilo završeno i testirano na integrisanoj virtuelnoj mašini pre nego je realizovana stvarna mašina. U Tabeli 1 je dat pregled razvijenih mašina i upravljanja za njih.

Table 1. Razvijena upravljanja za edukacione mašine alatke M1 do M4 sa integrisanim virtuelnim mašinama

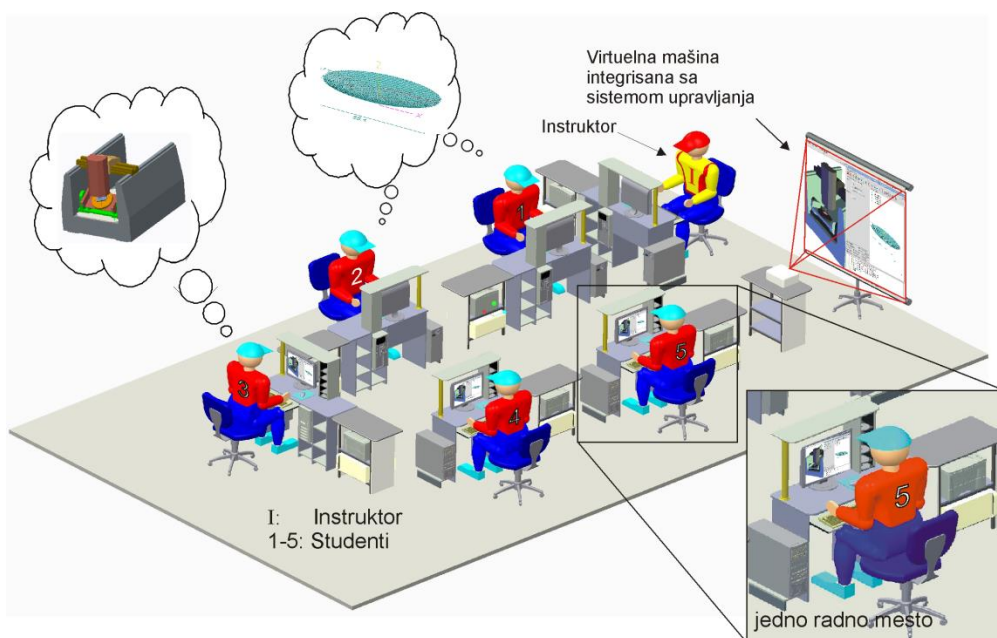
	<i>Mašina</i>	<i>Upravljanje</i>	<i>Integrisana virtuelna mašina</i>
<b>M1</b>	<i>Mini CNC troosna mašina alatka</i>	<i>LinuxCNC, Machinekit</i>	
<b>M2</b>	<i>Troosna CNC mašina sa horizontalnom obrtnom osom i dve translatorne ose strukture A'OXZ</i>	<i>LinuxCNC</i>	
<b>M3</b>	<i>Troosna CNC mašina sa vertikalnom obrtnom osom i dve translatorne ose strukture C'OXZ</i>	<i>LinuxCNC</i>	
<b>M4</b>	<i>Virtuelna petoosna mašina alatka S5D</i>	<i>LinuxCNC</i>	

#### 4 EDUKACIONI SISTEM BAZIRAN NA RAZVIJENIM MAŠINAMA

Edukacioni sistem, koji se bazira na razvijenim edukacionim mašinama alatkama ima mogućnost višestruke primene na različitim nivoima obrazovanja i sa različitim temama edukacije. Ovakav resurs je pogodan za formiranje učionica ili obrazovnih edukacionih centara sa razvijenim mašinama alatkama, kao resursima koji će biti dostupni svakom polazniku edukacije za samostalan rad, kao što je to pokazano na slici 7. Na klupama pored svakog radnog mesta se može instalirati po jedna edukaciona mašina. Za efikasniji rad moguće je ovakve centre opremiti većim brojem pojedinačnih edukacionih mašina na svakom radnom mestu. S druge strane raspoloživost virtuelnih mašina integrisanih sa sistemom upravljanja, omogućava i rad



sa većim brojem polaznika, kao i rad preko platformi za edukaciju na daljinu, što je postalo aktuelno sa vremenom svetske pandemije Korona virusa.



Slika 7. Primer jednog edukacionog centra

## 5 ZAKLJUČCI

Predstavljene edukacione mašine alatke, razvijene na Katedri za proizvodno mašinstvo u Laboratoriji za obradne sisteme, imaju za cilj podizanje nivoa edukacije u radu sa CNC sistemima na značajno viši nivo. Osnovna ideja je prelazak sa grupnog rada na pojedinačni, gde će svaki polaznik edukacije imati svoje mesto za samostalan rad. Takođe se populariše i samostalna gradnja CNC mašina alatki, čime se podiže i nivo znanja u konfigurisanju mašina alatki i upravljanja za njih.

Primena razmatranih edukacionih mašina alatki se uspešno koristi za izvođenje nastave na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, u okviru laboratorijskih vežbi, seminarskih, završnih i master radova.

Edukacioni sistem baziran na razvijenim mašinama predstavljnim u ovom radu, je primenljiv u oblastima konfigurisanja, upravljanja, programiranja i rukovanja CNC obradnim sistemima. U edukacioni sistem mogu biti ugrađene sve razmatrane mašine ili veći broj jedinica iste mašina u sklopu edukacione učionice.

I na kraju ovo je pokušaj rešavanja problema edukacije na numerički upravljanim mašinama alatkama koje se neprekidno usavršavaju, ali i povremeno revolucionarno menjaju. Takođe, menja se i okruženje, i zahteva nove oblike edukacije, koje se baziraju na virtuelnim obradnim sistemima i edukaciji na daljinu, što je uslovljeno svetskom pandemijom Korona virusa.

## ZAHVALNOST

U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrisana 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] 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.
- [2] 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.
- [3] Živanović S., Glavonjić M., Milutinović D., Slavković N., Dimić Z., Kvirgić V. (2013). Edukacioni sistem edumat za programiranje CNC mašina alatki, Nacionalna konferencija sa međunarodnim učešćem Reinženjering poslovnih procesa u obrazovanju RPPO13, Zbornik radova, str. 298-305, Fakultet tehničkih nauka u Čačku.
- [4] Zivanovic, S., Dimic, Z., Vorkapic, N. Mitrovic, S. (2019). Configuring of 3 axis mini CNC machine tool with control system based on LINUXCNC, Proceedings of the 14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2019, pp. 15-28, University of Banjaluka, Faculty of Mechanical Engineering.
- [5] Živanović, S., Vorkapić N., Dimić, Z. (2019). Konfigurisanje sistema za programiranje i upravljanje 3-osneminim CNC mašine alatke naRaspberry Pi platformi, *TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije*, vol. 6, str. 823-831.
- [6] Živanović, S., Dimić, Z. (2019). Virtuelna petoosna mašina alatka integrisana sa sistemom programiranja i upravljanja, *TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije*, vol. 3, str 397-404.
- [7] Vorkapić, N., Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Dimić, Z. (2020). Programiranje troosnih nu glodalica sa dve translatorne i jednom obrtnom osom, 42. JUPITER konferencija, 38. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, str. 3.122-3.128, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [8] Linux CNC, Enhanced Machine Control - EMC2, <http://www.linuxcnc.org/> , pristupljeno 17.10.2020.
- [9] Staroveški T., Brezak D., Udiljak T. (2013). LINUXCNC – the Enhanced Machine Controller: application and an overview, *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, vol.20, no.6, p.p.1103-1110.
- [10] Machinekit, <https://www.machinekit.io/> , pristupljeno 21.10.2020.
- [11] Hoffmann, P., Maksoud, T. M. A. (2010). Virtual commissioning of manufacturing systems: a review and new approaches for simplification, in Proc. 24th European Conference on Modelling and Simulation, Kuala Lumpur, Malaysia.