



Živanović, S., Kokotović, B., Slavković, N., Milutinović, D. ¹⁾

KONFIGURISANJE MULTIFUNKCIONALNIH I REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI I METODI ZA NJIHOVO PROGRAMIRANJE I VERIFIKACIJU PROGRAMA OBRADE ²⁾

Rezime

U radu su pokazane koncepcije rekonfigurabilnih mašina alatki, kao mašina sa serijskom i kao mašina sa hibridnom kinematikom. Razmatrani su metodi za njihova programiranja na bazi G koda (ISO 6983) i novog metoda programiranja na bazi STEP-NC standarda (ISO10303, ISO14649). Pripremljena su i pokazana okruženja za off-line programiranje u izabranom CAD/CAM sistemu (u G kodu) i softveru STEP-NC Machine za novi metod programiranja na bazi STEP-NC programa. Za oba okruženja su realizovani virtuelni modeli razmatranih stonih rekonfigurabilnih mašina alatki za potrebe simulacije rada mašina po zadatom programu u okruženju za programiranje.

Ključne reči: CAD/CAM, STEP-NC, rekonfigurabilna mašina alatka

1. UVOD

Istraživanja multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki su intenzivna i imaju dosta kompletiranih rezultata [1-5]. Predmet ovog rada je konfigurisanje i metodi programiranja za familiju stonih rekonfigurabilnih mašina alatki sa serijskom i hibridnom kinematikom čiji je razvoj tema na projektu Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema TR35022 [6,7]. Za realizaciju multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih mašina alatki ovde je uspostavljen sistem sastavnih elemenata pomoću kojeg se može konfigurisati više različitih mašina. Svaka od razmatranih mašina se može konfigurisati na osnovu raspoložive baze modula, čime se kompletira struktura mašine alatke. Osnovni deo strukture mašine alatke čine: noseća struktura, pogoni, prenosnici, aktuatori, upravljanje i programiranje. Tokom rada na temi Multifunkcionalna mašina alatka razmatran je veći broj različitih konfiguracija i tipova rekonfigurabilnih troosnih, četvorosnih i petoosnih mašina alatki za koje je uspostavljen sistem sastavnih elemenata na modularnom principu za njihovo konfigurisanje, što je pokazano u poglavlju 2 i prethodnim radovima [8-10].

Pored konfigurisanja tema rada je i priprema odgovarajućeg CAD/CAM okruženja za programiranje rekonfigurabilnih mašina alatki (poglavlje 3), koje ima mogućnost za uključivanje virtuelnih prototipova za simulaciju rada mašine koja radi po zadatom programu (poglavlje 4) u cilju verifikacije programa obrade. Pored toga, u cilju pripreme za programiranje mašina primenom novog metoda programiranja na bazi protokola STEP-NC [11], u poglavlju 5 je pokazana i simulacija rada mašina koje rade po zadatom programu u STEP-NC Machine okruženju.

2. KONFIGURISANJE STONIH REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI

Za ovaj rad prikazano je nekoliko klasa razmatranih rekonfigurabilnih mašina alatki, koje su pokazane na slici 1. Mašine prvo delimo u dve grupe: mašine sa serijskom i mašine sa hibridnom kinematikom, koje imaju deo strukture sa serijskom, a deo sa paralelnom kinematikom. Analizom osnovnih komponenata (modula) mašina alatki i metodologije za konfigurisanje novih mašina alatki [12], omogućeno je uspostavljanje sistema sastavnih elemenata rekonfigurabilnog hardvera mašina, koji je u vidu jedne morfološke matrice pokazan na slici 1.

¹⁾ Prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), doc dr Branko Kokotović, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Nikola Slavkovic, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs), prof. Dr Dragan Milutinović (dmilutinovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana na projektu koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

Pokazane su realizacije sistema sastavnih elemenata za postolja, stubove, obrtne stolove, glavna vretena i deo plana uzoraka za razmatrane mašine, koje predstavljaju neke od do sada razmatranih polaznih koncepcija za projekat razvoja rekonfigurabilne stone petoosne mašine alatke. Prolaskom kroz morfološku matricu i skupljanjem odgovarajućih realizacija za osnovne funkcije mašine, dobija se plan uzoraka mogućih mašina. Na slici 1.1 su pokazane varijante za četiri klase rekonfigurabilnih mašina alatki:

- (i) multifunkcionalne rekonfigurabilne petoosne mašine alatke (4 varijante),
- (ii) vertikalne rekonfigurabilne petoosne mašine (2 varijante),
- (iii) rekonfigurabilne mašine alatke sa 3, 4 i 5 serijskih osa i varijanta 5-osne sa hibridnom kinematikom
- (iv) petoosna mašina sa hibridnom kinematikom za koju su tri ose sa paralelnom kinematikom, a dve sa serijskom.

Prolaskom kroz morfološku matricu, sa slike 1.1, može se izvršiti opis realizacije svake od razmatranih mašina na sledeći način:

- mašina tipa S1 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module $S1 = P1 \wedge BB \wedge JSM \wedge GV \wedge SV$,
- mašina tipa S3 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module $S3 = P1 \wedge ST \wedge JSM \wedge DOS \wedge GV \wedge SV$,
- mašina tipa S4 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module $S4 = P1 \wedge ST \wedge DSH \wedge GV_{HG} \wedge SV$,
- mašina tipa S5 se dobija kao varijanta koja sadrži sledeće module $S5 = P3 \wedge T1 \wedge DSV \wedge UFO$, itd.

Prva klasa multifunkcionalne rekonfigurabilne petoosne mašine alatke obuhvata 4 varijante struktura: S1, S2, S3 i S4. Alternative za stubove za svaku mašinu su pokazane ili kao „Box in Box” (S1), ili kao stub (S2, S3 i S4). Druga klasa vertikalne rekonfigurabilne petoosne mašine obuhvata dve varijante struktura S5 i S6. Kod ovih mašina je planirana portalna osnovna mašina strukture VXYZ sa dodavanjem dvoosnog nagibno-obrtnog stola (A,C), za S5 ili (B,C), za S6, ispred osnovne mašine.

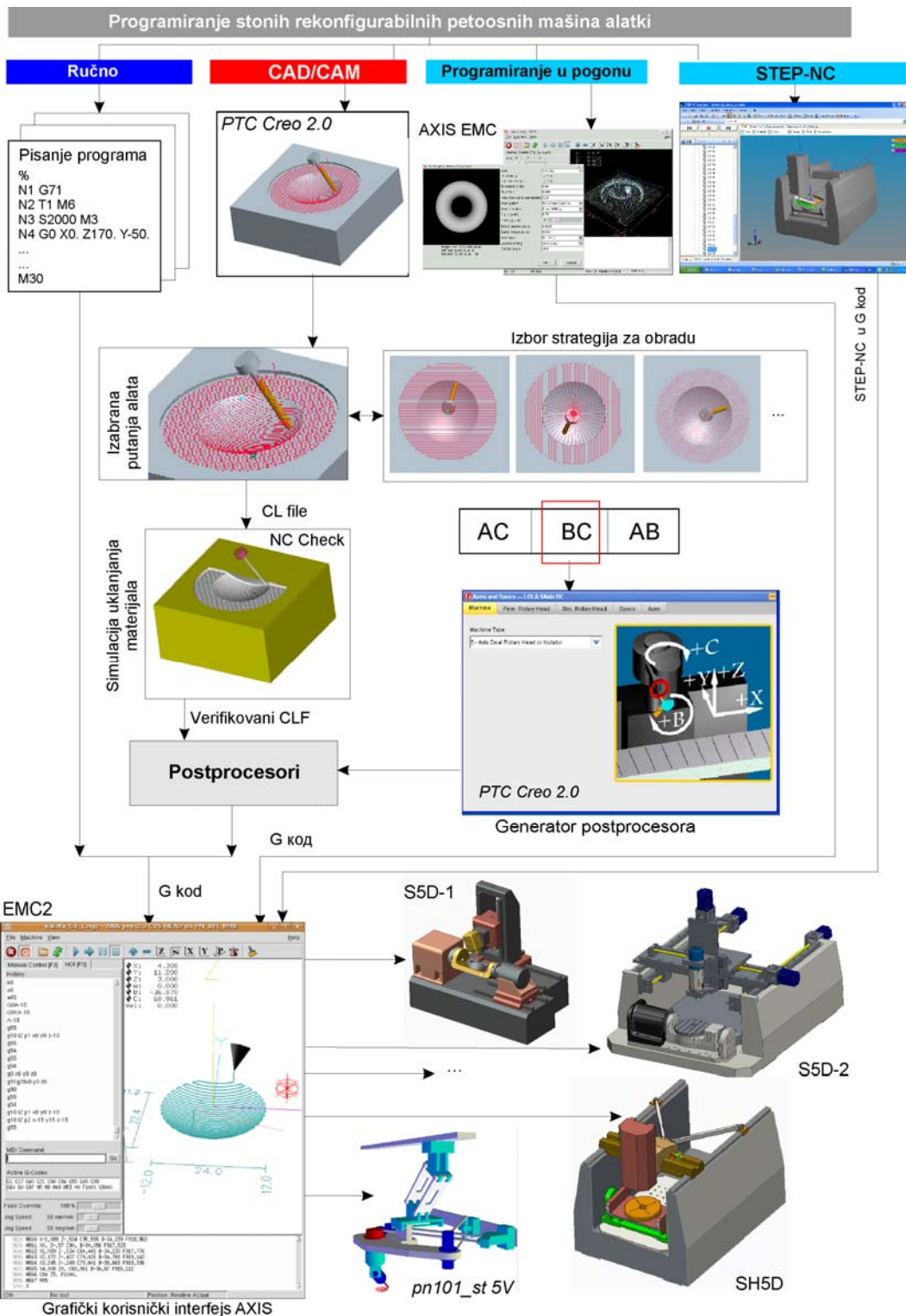
Treća klasa rekonfigurabilne mašine alatke obuhvata varijante mašine sa serijskom i hibridnom kinematikom. Osnovna mašina je troosna portalna glodalica strukture VXYZ (S3D). Dodavanjem dvoosnog nagibno obrtnog stola (B,C) ispred osnovne mašine, ova mašina postaje petoosna (S5D), strukture WCBVXYZT [8]. Fiksiranjem ose $B=0^\circ$ ili $B=90^\circ$, uz zadržavanje upravljive ose C, mašina postaje četveroosna na kojoj je moguća i obrada struganjem (S4D). Četvrta moguća koncepcija podrazumeva osnovnu mašinu sa hibridnom kinematikom i to: dvoosni paralelni modul MOMA, koji ostvaruje pomeranje u ravni (X,Y) preko pasivnog translatorskog modula, dok je Z osa serijska. Na ovakvoj osnovnoj mašini ostaje i dvoosno obrtni nagibni sto, čime je dobijena i petoosna mašina sa hibridnom kinematikom (H5D).

Četvrta klasa petoosne mašine sa hibridnom kinematikom predstavlja nadogradnju stone troosne mašine sa paralelnim kinematikom pn101_st na petoosnu, dodavanjem serijske dvoosne glave na pokretnu platformu mehanizma. U okviru svake od klasa stonih rekonfigurabilnih mašina alatki uspostavljen je sistem sastavnih elemenata, na modularnom principu, u cilju rekonfigurisanja kako hardverskog tako i softverskog (upravljačkog) dela sistema. Za razmatrane mašine je planirano upravljanje otvorene arhitekture na PC Linux platformi i EMC2 upravljačkom softveru [8,13].

Za rekonfigurabilne mašine, prikazane u ovom radu, razmatrani su metodi za njihovo programiranje i odgovarajuća okruženja u poglavlju 3. Na bazi pripremljenih odgovarajućih virtuelnih prototipova u CAD/CAM okruženju ostvarena je simulacija rada kompletnih modela mašina po zadatom programu i to u dva okruženja. Prvo, u CAD/CAM okruženju na bazi CLF (Cutter Location File) i G koda, poglavlje 4, i okruženju STEP-NC Machine softvera na bazi *.stpnc programa, poglavlje 5, kao novog pristupa u programiranju numerički upravljanih mašina alatki [11].

3. OKRUŽENJE ZA OFF-LINE PROGRAMIRANJE STONIH REKONFIGURABILNIH PETOOSNIH MAŠINA ALATKI

Programiranje stonih rekonfigurabilnih petoosnih mašina alatki se vrši pomoću G koda, bez ograničenja u odnosu na pripremne i pomoćne funkcije, koordinatne sisteme i korekcije alata. Ilustracija metoda i okruženja za programiranje rekonfigurabilnih petoosnih mašina alatki, prikazana je na slici 2. Zadržana je i mogućnost ručnog i parametarskog programiranja, kao i programiranja u pogonu. Za programiranje je izabrano okruženje PTC Creo 2.0 koje ima mogućnost korišćenja generatora postprocesora, za konfigurisanje odgovarajućih postprocesora prema konfiguraciji osa petoosnih mašina alatki, što je od velike važnosti za uspešno generisanje G koda. U okruženju za programiranje je moguće vršiti izbore različitih strategija za obradu i njihovu simulaciju putanje alata, koja uključuje i mogućnost simulacije uklanjanja materijala (NC Check).



Slika 2. Metodi i softverska okruženja za programiranja rekonfigurabilnih mašina

Za primenu novog metoda programiranja je izabrano okruženje *STEP-NC Machine* u kombinaciji sa izabranim *CAD/CAM* okruženjem za programiranje. Komunikacija između softvera se obavlja na bazi modela izratka, priprema, alata u STEP formatu, kao i dobijenih putanja alata (CLF). Pošto još uvek ne raspolažemo mašinama čije upravljačke jedinice mogu da interpretiraju *STEP-NC* programe, softver ima veliku bazu postojećih postprocesora, kojim se programi iz *STEP-NC* formata mogu postprocesirati u odgovarajući G kod.

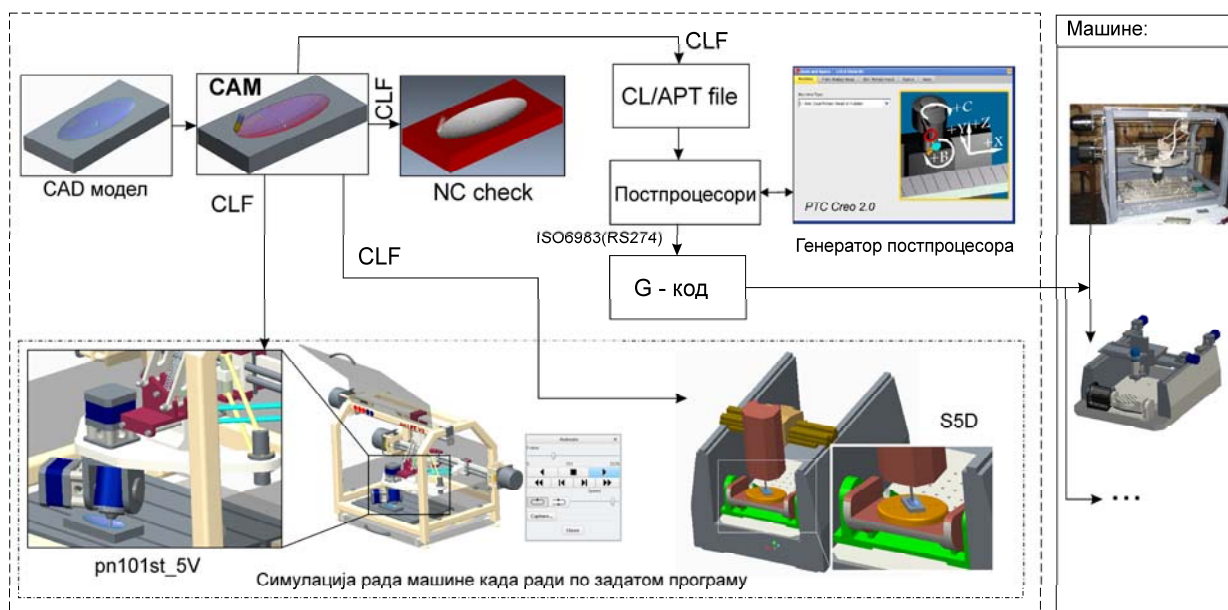
Simulacija obrade u cilju verifikacije programa, pre same obrade na mašini su za mašine alatke u višeosnoj obradi vrlo značajne. U tom cilju je i *CAD/CAM* okruženje za programiranje, pripremljeno da može da uključi i simulaciju rada kompletnog virtuelnog prototipa mašine. Ova simulacija podrazumeva, mogućnost da prilikom simulacije putanje alata, budu pokretne sve ose mašine, odnosno da virtuelna mašina

radi po zadatom programu na bazi CLF-a. Ova simulacija se može realizovati kako u CAD/CAM sistemu PTC Creo 2 tako i u okruženju VeriCUT-a, koji se koristi za simulacije uklanjanja materijala, a integrisan je sa pomenutim CAD/CAM sistemom.

4. SIMULACIJA RADA MAŠINE U REŽIMU RADA_PO ZADATOM PROGRAMU U CAD/CAM OKRUŽENJU

U ovom odeljku je pokazano izabrano okruženje za programiranje i dva izabrana prototipa (pn101_st_5V i S5D) sa primerima simulacije rada mašina prema zadatom programu za obradu probnog dela sa elipsoidnim udubljenjem, slika 3. Simulacija kinematike virtuelnog prototipa omogućava kretanje modeliranih segmenata, sa alatom na kraju, koji na ekranu iscrtava putanju alata, koja je nastala kao rezultat izvršenja zadatog programa u CLF formatu [12,14]. Primenjeni metodi za verifikaciju programa su: simulacija putanje alata, simulacija uklanjanja materijala (NC Check) i simulacija rada mašine po zadatom programu. Jedan isti tehnološki postupak se može koristiti za obradu na različitim konfiguracijama mašine izborom različitih konfigurisanih postprocesora, čime se G kod prilagođava formatu konkretne izabrane mašine. Format programa, koji koriste razmatrane mašine koje se upravljaju pomoću sistema EMC2, zasniva se na G kôdu po standardu RS 274 (ISO6983). Odabrana je verzija koja je slična formatu programa koje koriste Fanuc CNC sistemi, za koje postoje pouzdani postprocesori.

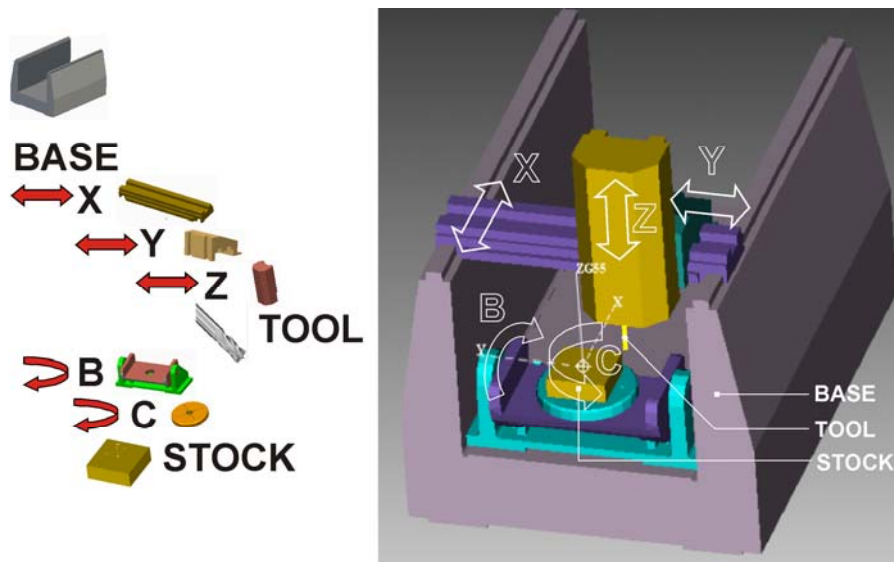
CAD/CAM систем - PTC Creo 2.0



Слика 3. Okruženje za programiranje i simulacija rada mašina prema zadatom programu

Simulacija rada mašine primenom virtuelne mašine je najbezbedniji i najisplativiji način verifikacije programa za višeosnu obradu. Za završnu verifikaciju programa u G kôdu korišćen je i softver za simulaciju uklanjanja materijala VeriCUT. Pored uobičajene simulacije uklanjanja materijala, u ovom radu je pokazan primer integrisanja virtuelnog prototipa mašine u simulaciju na primeru mašine SH5D.

Prvi korak za pripremu virtuelnog prototipa mašine za simulaciju je priprema skeleton modela koji definiše kinematičku strukturu mašine, odnosno opisuje način povezivanja linearnih i obrtnih osa, slika 4. Za svaku mašinu treba učitati i definisati način vezivanja komponenata baze, alata i priprema (BASE, TOOL i STOCK) [4]. Hijerarhijsko drvo komponenata mašine je pokazano na slici 4. Baza (BASE) je prva komponenta, za koju se prvo povezuje klizač za X osu, za nju klizač za Y osu, i za nju klizač za Z osu. Poslednja komponenta na ovoj grani je alat, koji je povezan za modul Z ose. Druga grana, koja je takođe povezana sa bazom, počinje sa modulom obrtne ose B, za koju je vezan modul obrtnog stola C, na koji se postavlja pripremak (STOCK). Ovaj opis kinematike predstavlja osnovnu uprošćenu strukturu mašine na bazi skeleton modela, bez suvišnih detalja. Većina softvera koji omogućavaju simulaciju rada mašine, koriste STL fajlove za konfigurisanje virtuelne mašine, što je i ovde slučaj. U okruženje VeriCUT-a, su učitavane komponente mašine u STL formatu i povezivane odgovarajućim kinematičkim vezama, saglasno strukturi mašine alatke.

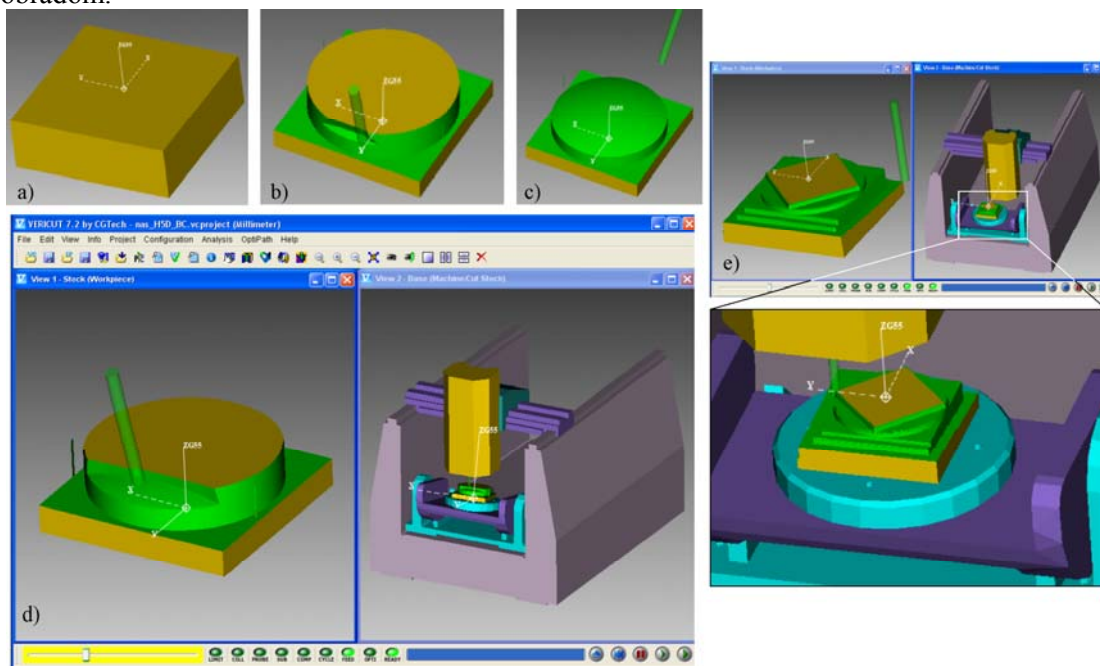


Slika 4. Konfigurisana virtuelna mašina i simulacija rada u VeriCUT-u [14]

Primer verifikacije programa koja uključuje i rad virtuelne mašine simulacijom uklanjanja materijala u VeriCUT okruženju pokazan je na slici 5, za mašinu SH5D.

Pokazana su dva primera i to:

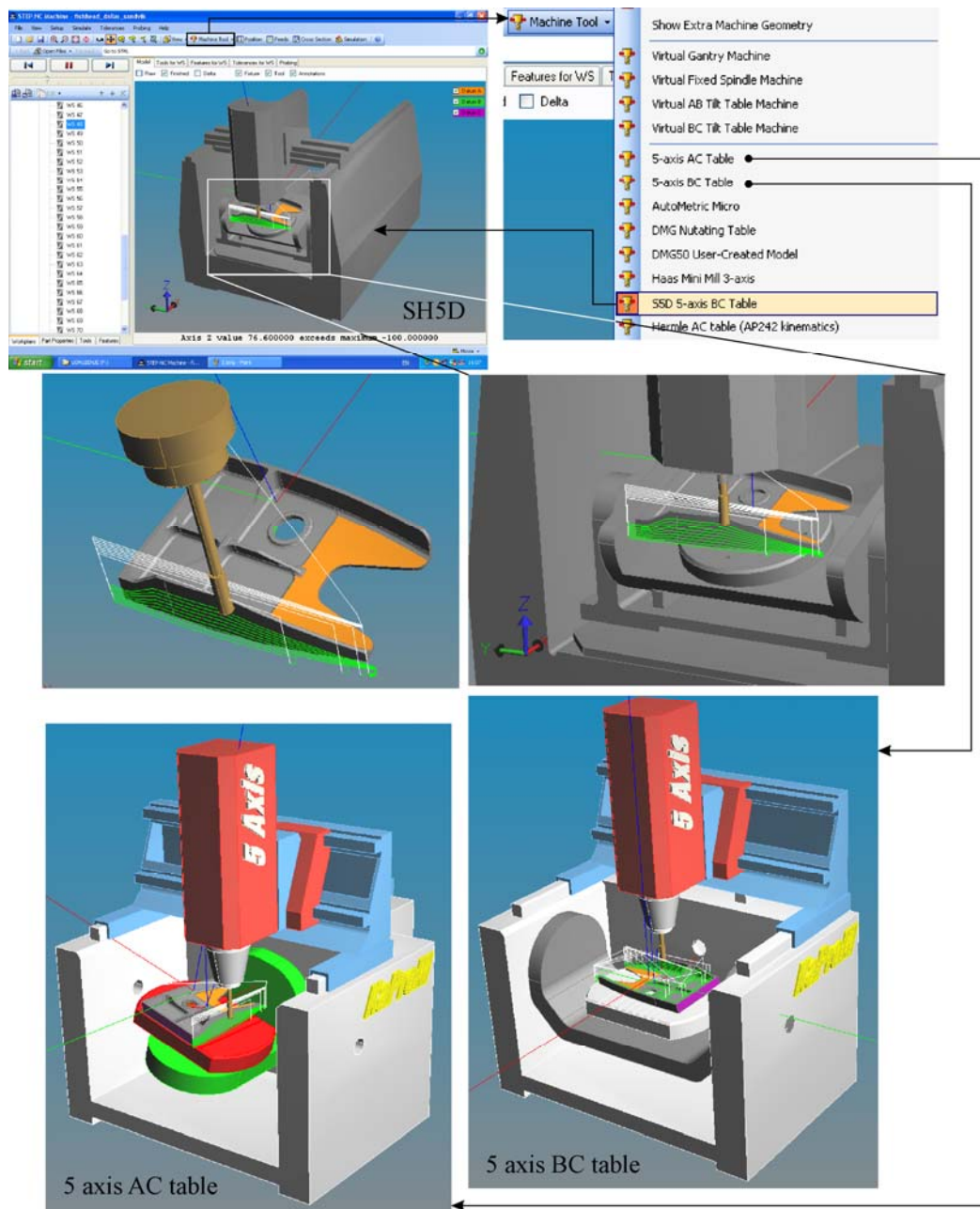
- (1) probni deo oblika kalote (slike 5a-d) na cilindričnoj osnovi, gde je predobrada ostvorena troosnom obradom, dok je završna obrada kalote ostvorena petoosnom obradom i
- (2) primer obrade probnog dela po standardu *NAS979* (slika 5e), koja je kompletno urađena troosnom obradom.



Slika 5. Konfigurisana virtuelna mašina i simulacija rada u VeriCUT-u

5. SIMULACIJA RADA MAŠINE U REŽIMU RADA PO ZADATOM PROGRAMU U STEP-NC MACHINE OKRUŽENJU

U cilju pripreme za novi metod programiranja primenom *STEP-NC* standarda, takođe su konfigurisane i inegrirane virtuelne mašine koje rade po programu u *STEP-NC* formatu u okruženju softvera *STEP-NC Machine*. Za ilustraciju je na slici 6 pokazan primer simulacije rada na bazi *STEP-NC* programa rekonfigurabilnih petoosnih mašina SSD, 5-axis AC table i 5-axis BC table. Mašine su konfigurisane i uključene u bazu raspoloživih mašina ovog softvera, pa se mogu izabrati iz menija (*Machine Tool*) i pratiti njihov rad.



Slika 6. Virtuelne mašine S5D, 5-axi c AC table i 5-axis BC table u okruženju STEP-NC Machine

Može se očekivati da će se projektovanje proizvoda i u budućnosti odvijati primenom CAD sistema, dok bi se programiranje numerički upravljanih mašina alatki moglo odvijati i po novim procedurama zasnovanih na formatizovanju integrisnog modela mašinskog dela po STEP-NC protokolu i standardima ISO 10303 i/ili ISO 14649.

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane četiri klase rekonfigurabilnih mašina alatki kao i 11 varijanti ovih mašina. Uspostavljen je sistem sastavnih elemenata za konfigurisanje ovakvih mašina sa formalizmom za opis konfiguracije mašine, prolaskom kroz morfološku matricu.

Razmotreni su metodi za programiranje rekonfigurabilnih mašina alatki, kao i simulacija rada mašina po zadatom programu za verifikaciju programa obrade i uočavanje eventualnih kolizija u toku obrade, radi kompletiranja okruženja za programiranje.

Primena rekonfigurabilnih mašina je značajna za dalja istraživanja u oblasti višeosne obrade i rekonfigurabilnih petoosnih mašina, kao i za edukaciju za programiranje, što je posebno značajno za obrazovne ustanove, prilikom sticanja znanja o kompleksnim rekonfigurabilnim višeosnim mašinama. Do sada su za neke od mašina pripremljena i odgovarajuća upravljanja sa integrisanim virtuelnim mašinama

(pn101_st i pn101_5V) u EMC2 upravljačkom softveru. U sklopu daljih istraživanja razmatraće se i realizacija virtuelnih petoosnih mašina integrisanih u sistem upravljanja za one koncepcije koje budu izabrane za realizaciju.

7. LITERATURA

- [1] Moriwaki T.: *Multi-functional machine tool*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, p.736-749, 2008.
- [2] Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Brussel H.V.: *Reconfigurable Manufacturing Systems*, Annals of the CIRP, Vol. 48/2, p. 527-540. 1999.
- [3] Lee, R.S., She C.H., *Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools*, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 13, No. 9, p. 658–665, 1997.
- [4] Apro, K., *Secrets of 5-axis machining*, Industrial Press Inc., ISBN 978-0-8311-3375-7, Printed by Thomson Press India Limited, 2008.
- [5] She, C-H., Lee, R-S.: *A Postprocessor Based on the Kinematics Model for General Five-Axis Machine Tools*, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 2, No. 2, p.131-141, 2000.
- [6] Tanović, Lj., Bojanić, P., Glavonjić, M., Milutinović, D., Majstorović, V., Puzović, R., Kokotović, B., Popović, M., Živanović, S., Slavković, N., i drugi, *Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema*, TR-035022, Godišnji izveštaj o realizaciji projekta za period 01.01. 2014. do 31.12.2014., Mašinski fakultet, Beograd, 2014.
- [7] Tanović, Lj., Milutinović, D., Majstorović, V., Puzović, R., Živanović, S., Kokotović, B., Popović, M., Slavković, N., i drugi, *Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema*, TR-035022, Godišnji izveštaj o realizaciji projekta za period 01.01.2015. do 31.12.2015., Mašinski fakultet, Beograd, 2015.
- [8] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Konfigurisanje stonih petoosnih mašina alatki*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo 62, Broj 5, str 857-863, Godina LXVIII 2013.
- [9] Glavonjić, M., Živanović, S., Kokotović, B.: *Koncepcije multifunkcionalnih i rekonfigurabilnih stonih petoosnih mašina alatki*, Infotech 2014, Zbornik radova, str. 857-863, Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, Jahorina, 2014.
- [10] Živanović, S., Glavonjić, M., Kokotović, B., *Development of Multifunctional Reconfigurable Desktop Machine Tool with Hybrid Kinematics*, TECHNICS special edition, Magazine of the Union of Engineers and Technicians of Serbia, Mechanical Engineering, pp. 71-80, Year LXX 2015.
- [11] STEP-NC Machine for CAM/CNC, <http://www.steptools.com/products/stepncmachine/>, 2016.
- [12] Živanović S., *Konfigurisanje novih mašina alatki*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.
- [13] Linux CNC, <http://linuxcnc.org/>, 2016.
- [14] Zivanovic, S., Kokotovic, B., *Configuring a virtual desktop 5-axis machine tool for machine simulation*, Proceedings of the 12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2015, ISBN 978-99938-39-53-8, pp 255-262, Faculty of Mechanical Engineering Banja Luka, 29-30 May, 2015.

Zivanovic, S., Kokotovic, B., Slavkovic, N., Milutinovic, D.

CONFIGURING OF MULTIFUNCTIONAL AND RECONFIGURABLE MACHINE TOOLS AND METHODS FOR THEIR PROGRAMMING AND PROGRAM VERIFICATION

Abstract: *The paper presents the concept of reconfigurable machine tools, as a machine with serial and hybrid kinematics. The methods for their programming based on G codes (ISO 6983) and the new method of programming based on STEP-NC standard (ISO10303, ISO14649), are considered. Environment for off-line programming in selected CAD/CAM system (in G code) and software STEP-NC Machine for the new programming method based on STEP-NC program, have been prepared and demonstrated. In both environments are implemented virtual models for considered desktop reconfigurable machine tools for the purpose of machine simulation when the virtual machine working by running program in environment for programming.*

Key words: *CAD/CAM, STEP-NC, desktop reconfigurable machine tools*