



MAŠINA ALATKA SA PARALELNIM MEHANIZMIMA NAMENJENA ZA SEČENJE PENASTIH MATERIJALA USIJANOM ŽICOM

Goran Vasilić¹, Saša Živanović², Milan Milutinović³, Zoran Dimić⁴

Rezime: U okviru ovoga rada je prikazana mašina alatka koja u svojoj strukturi sadrži dva ravanska paralelna mehanizma. Prikazana mašina alatka je namenjena za sečenje penastih materijala usijanom žicom. Platforme paralelnih mehanizama nose po jedan kraj žice a kretanja platformi su uslovljena kretanjem žice po konturama na obratku. Upotrebljeni paralelni mehanizmi su nezavisni, tako da mašina alatka omogućava translatorno kretanje žice u pravcu dve ose kao i obrtno kretanje žice oko istih osa.

Ključne riječi: Kompleksne mašine alatke, Nekonvencionalne metode obrade, Paralelni mehanizmi, Rekonfigurabilne mašine alatke

MACHINE TOOL WITH PARALLEL MECHANISMS INTENDED FOR CUTTING FOAM MATERIALS WITH HOT WIRE

Abstract: In this paper, a machine tool is presented, which in its structure contains two planar parallel mechanisms. The shown machine tool is intended for cutting foam materials with a hot wire. At the displayed machine tool, the platforms of the parallel mechanisms carry one end of the wire each, and the movements of the platforms are determined by the desired movement of the wire along the contours of the workpiece. The parallel mechanisms used are independent, so that the machine tool enables translational movement of the wire in the direction of two axes as well as rotary movement of the wire around the same axes.

Key words: Complex machine tools, Unconventional machining processes, Parallel mechanisms, Reconfigurable machine tools

¹ Goran Vasilić, Akademija tehničkih strukovnih studija, Odsek za saobraćaj, mašinstvo i inženjerstvo zaštite, Beograd, Srbija, gvasilic@atssb.edu.rs

² prof dr Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, szivanovic@mas.bg.ac.rs

³ dr Milan Milutinović, Akademija tehničkih strukovnih studija, Odsek za saobraćaj, mašinstvo i inženjerstvo zaštite, Beograd, Srbija, mmilutinovic@atssb.edu.rs

⁴ dr Zoran Dimić, Lola institut, Beograd, Srbija, zoran.dimic@li.rs

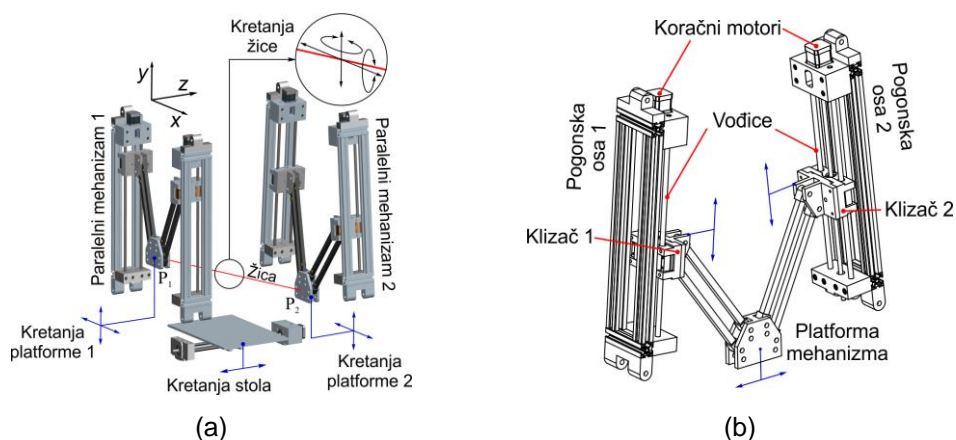
1 UVOD

Mašine alatke zasnovane na paralelnim mehanizmima su u sve većoj meri predmet mnogih istraživanja iz razloga što paralelni mehanizmi poseduju izvesne prednosti u odnosu na tradicionalne serijske mehanizme [1]. Kao rezultat mnogih istraživanja, autori predlažu mašine alatke različitog koncepta, različitih konfiguracija i različite namene [2][5]. Navedeni ali i mnogi drugi naučni radovi uglavnom predlaži koncept hibridnih mašina alatki koje su zasnovane na kombinaciji paralelnih i serijskih mehanizama. Mašine alatke [2][5] zasnovane na hibridnim mehanizmima su u najvećoj meri namenjene za proces obrade glodanjem, za "Pick & Place" operacije i u nešto manjoj meri za procese zavarivanja. U grupu hibridnih mehanizama spadaju i mehanizmi dobijeni serijskim povezivanjem najmanje dva mehanizma sa paralelnom kinematikom [6][8]. Proces obrade sečenje penastih materijala usijanom žicom je do sada razmatran i primenom industrijskih robota [9][10].

U okviru ovoga rada je prikazana mašina alatka koja se po svom konceptu razlikuje od većine poznatih mašina alatki koje u svojoj strukturi sadrže bar jedan paralelni mehanizam. Prema dostupnoj literaturi, autori ovog naučnog rada zaključuju da se prikazana mašina alatka i prema strukturi i mogućoj nameni razlikuje od svih poznatih mašina alatki zasnovanih na paralelnim mehanizmima što je bio dovoljan razlog za njen razvoj.

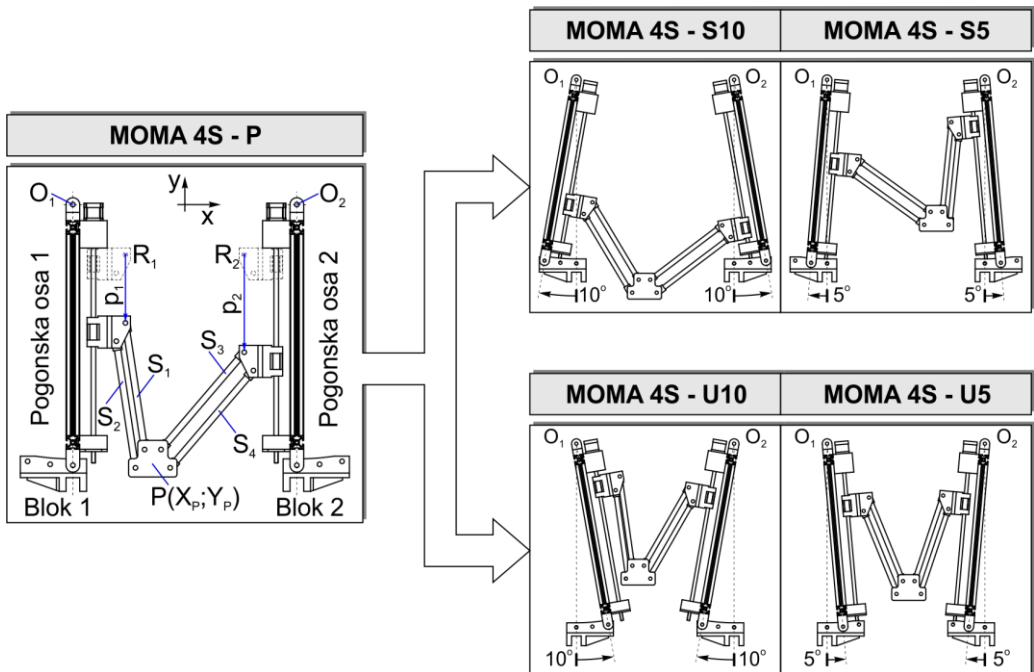
2 OPIS KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE

Mašina alatka koju autori predstavljaju u ovom radu spada u do sada nedovoljno istraženu grupu mašina koje u svojoj strukturi sadrže više od jednog mehanizma sa paralelnom kinematikom. Mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom (slika 1.a) sadrži dva ravanska dvoosna mehanizma sa paralelnom kinematikom prikazanih na slici 1.b. Kao što je već rečeno platforme paralelnih mehanizma nose po jedan kraj usijane žice kojom se tokom procesa obrade seku penasti materijali poput stiropora, stirodura itd. Na ovaj način je omogućeno translatorno kretanje krajeva žice i to u pravcu osa "x" i "y", a slaganjem translatorskih kretanja krajeva žice se realizuje promena orijentacije žice i to obrtanjem oko osa "x" i "y". Osim kretanja alata, omogućeno je i kretanje radnog stola na koji se postavlja obradak i to duž ose "z" koja je upravna na ravni paralelnih mehanizama "Oxy".



Slika 1. CAD model: a)Mašine alatke za sečenje žice; b)Dvoosnog ravanskog mehanizma sa paralelnom kinematikom (preuzeto i doradeno [11])

Paralelni mehanizmi koji su korišteni za gradnju mašine alatke sa slike 1.a su konfigurisani prema uzoru na rekonfigurabilni dvoosni mehanizam sa paralelnom kinematikom "MOMA" koji je bio predmet nekih ranijih istraživanja autora [12],[13],[14]. Ravanski paralelni mehanizam sa slike 1.b. je kao i mehanizam "MOMA" rekonfigurabilnog tipa pa se njegova konfiguracija može brzo i lako promeniti u skladu sa trenutnim potrebama [15]-[17] koje proizvodni proces nalaže. Konfiguracija dvoosnog mehanizma sa paralelnom kinematikom sa slike 1.b se kao i u slučaju mehanizma "MOMA" može menjati promenom orijentacije pogonskih osa kao i upotrebom spojki različitih dužina. Glavna razlika između dvoosnog rekonfigurabilnog mehanizma "MOMA" i dvoosnog rekonfigurabilnog mehanizma sa slike 1.b je u tome što mehanizam sa slike 1.b poseduje fizičku platformu. Uvođenjem fizičke platforme su se obezbedile dodatne mogućnosti za upotrebu mehanizma. Za ispravan rad mehanizma je neophodno obezbediti da orijentacija platforme zadržava konstantnu orijentaciju tokom rada mehanizma pa se iz tog razloga umesto dve (što je slučaj kod mehanizma "MOMA") koriste četiri spojke. Iz tog razloga je mehanizmu sa slike 1.b dodeljen naziv "MOMA 4S". Za sada je definisano pet osnovnih konfiguracija mehanizma "MOMA 4S" od kojih je jedna polazna konfiguracija (Slika 2. "MOMA 4S-P") kod koje su pogonske ose mehanizma paralelne i vertikalne. Ostale četiri konfiguracije se dobijaju obrtanjem pogonskih osa oko tačaka O_1 i O_2 za ugao od 5° ili 10° stepeni na spoljašnju ili unutrašnju stranu. U skladu sa tim, konfiguracije i nose nazive "MOMA 4S-S_" i "MOMA 4S-U_" u kojima je prema slici 2. naveden i ugao rotacije pogonskih osa čije su moguće vrednosti već navedene. Zauzeta orijentacija pogonskih osa se zadržava učvršćivanjem pogonskih osa za nepokretne delove mehanizma nazvanih "Blok 1" i "Blok 2".



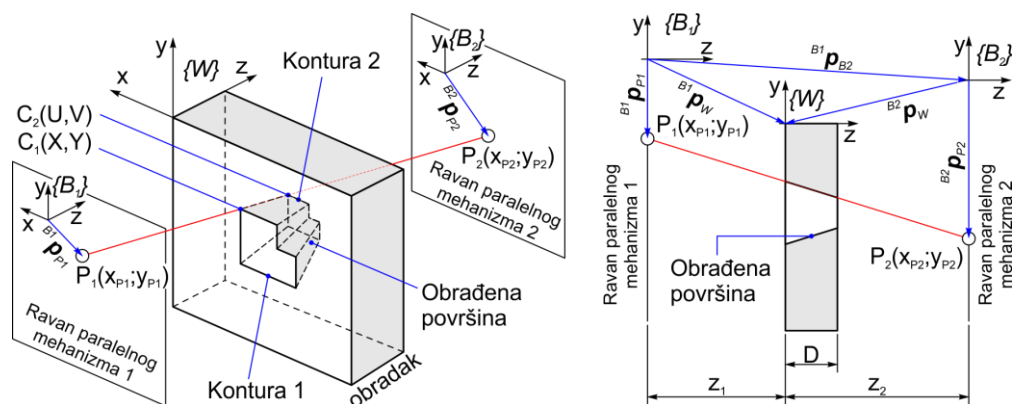
Slika 2. Osnovne konfiguracije dvoosnog rekonfigurabilnog mehanizma MOMA 4S

Upotrebom dva paralelna mehanizma MOMA 4S i povezivanjem njihovih platformi žicom kako je prikazano na slici 1, dobija se kompleksna mašina alatka

namenjena za obradu penastih materijala usijanom žicom. Ovakva konfiguracija mašine alatke podseća na neke već analizirane mašine sa tri i više stepeni slobode [18],[19]. Međutim, prikazana mašina alatka (slika 1) se razlikuje od navedenih i drugih sličnih mašina po tome što su upotrebljeni mehanizmi nezavisni i rade sinhronizovano tokom obrade pri čemu se dužina žice između dve platforma menja tokom procesa obrade usled promene orijentacije žice. Zbog promene dužine žice tokom procesa obrade, žica se ne može posmatrati kao platforma četvorosnog paralelnog mehanizma već se ceo mehanizam, kao što već je rečeno mora posmatra kao mehanizam sastavljen od dva nezavisna dvoosna paralelna mehanizma. Sa druge strane, mehanizam mašine alatke sa slike 1 se razlikuje i od drugih mehanizma sastavljenih od dva ili više paralelna mehanizma [20],[21] po tome što su u navedenim radovima upotrebqeni paralelni mehanizmi međusobno zavisni a celokupni mehanizam čini jedan hibridni mehanizam dobijen serijskim povezivanjem dva paralelna mehanizma. Prema datom opisu mehanizma mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja žicom i upoređivanjem, sama mašina alatka se svrstava u grupu kompleksnih mašina alatki. Prema procesu obrade za koji je mašina alatka namenjena, dodeljen joj je naziv MOMA-W (W-wire).

3 PROGRAMIRANJE MAŠINE ALATKE MOMA-W

Mašina alatka MOMA-W je konfigurisana tako da se programiranje vrši na isti način kao i programiranje višeosnih mašina alatki namenjenjenih za nekonvencionalnu metodu obrade W-EDM (Wire - Electrical Discharge Machining). Prema standardu ISO-6983 [22], kretanje alata se za navedenu metodu obrade definiše pomoću koordinata x , y , u i v . Prema slici 2, tokom realizacije procesa obrade, alat (žica) se kreće po dve zadate konture pri čemu se svaka od kontura sastoji od niza tačaka. U skladu sa standardom ISO-6983, koordinate tačaka "Konture 1" su definisane koordinatama x i y dok su koordinate tačaka "Konture 2" definisane koordinatama u i v .



Slika 3. Uprošten geometrijski model kompleksne mašine alatke MOMA-W

Koordinate tačaka x , y , u i v su definisane u koordinatnom sistemu obratka $\{W\}$ dok su koordinate platformi paralelnih mehanizama "P₁" i "P₂" definisane u nepokretnim koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$ koji su vezani za "Paralelni mehanizam 1" i "Paralelni mehanizam 2" respektivno.

4 KINEMATIKA OBRADNOG PROCESA KOMPLEKSNOM MAŠINOM ALATKOM MOMA-W

Kao što je već rečeno u prethodnom poglavlju, kretanje alata (žice) tokom procesa obrade kompleksnom mašinom alatkom MOMA-W je određeno koordinatama tačaka koje definišu dve konture. Kako svaka od platformi kompleksne mašine alatke nosi po jedan kraj žice, zadatak mašine je da na osnovu programiranih koordinata tačaka obe konture (x , y , u i v) dovede platforme oba mehanizma u određenu poziciju kako bi se ostvarila željena pozicija i orijentacija žice. Pozicija nepokretnog koordinatnog sistema $\{B_2\}$ u odnosu na koordinatni sistem $\{B_1\}$ kompleksne mašine alatke MOMA-W je definisana vektorom ${}^{B_1}\mathbf{p}_{B_2}$ i poznata je na osnovi konfigurisanog hardverskog dela mašine alatke. Pre samog procesa obrade, obradak sa slike 3 se može postaviti i pozicionirati na bilo kom mestu na radnom pokretnom radnom stolu mašine sa slike 1. Pozicija koordinatnog sistema obratka $\{W\}$ u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B_1\}$ je definisana vektorom ${}^{B_1}\mathbf{p}_W$. Kako je vektor ${}^{B_1}\mathbf{p}_{B_2}$ poznat, prema slici 3 se određuje i pozicija koordinatnog sistema obratka $\{W\}$ u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B_2\}$ prema vektorskoj jednačini ${}^{B_2}\mathbf{p}_W = {}^{B_1}\mathbf{p}_W - {}^{B_1}\mathbf{p}_{B_2}$. Koristeći prethodno definisane vektore, koordinate platformi "P₁" i "P₂" i koordinate tačaka programiranih kontura "C₁" i "C₂" se mogu posmatrati u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B_1\}$. U tom slučaju, pozicije platformi "P₁" i "P₂" u koordinatnom sistemu $\{B_1\}$ su određene vektorskim jednačinama (1)

$$\begin{aligned} {}^{B_1}\mathbf{p}_{P_1} &= [{}^{B_1}X_{P_1} \ {}^{B_1}Y_{P_1} \ 0]^T \\ {}^{B_1}\mathbf{p}_{P_2} &= [{}^{B_1}X_{B_2} \ {}^{B_1}Y_{B_2} \ {}^{B_1}Z_{B_2}]^T + [{}^{B_2}X_{P_2} \ {}^{B_2}Y_{P_2} \ 0]^T \end{aligned} \quad (1)$$

dok su koordinate tačaka programiranih kontura "C₁" i "C₂" u koordinatnom sistemu $\{B_1\}$ određene vektorskim jednačinama (2)

$$\begin{aligned} {}^{B_1}\mathbf{p}_{C_1} &= [{}^W X_{C_1} \ {}^W Y_{C_1} \ 0]^T + [{}^{B_1}X_W \ {}^{B_1}Y_W \ {}^{B_1}Z_W]^T \\ {}^{B_1}\mathbf{p}_{C_2} &= [{}^W X_{C_2} \ {}^W Y_{C_2} \ D]^T + [{}^{B_1}X_W \ {}^{B_1}Y_W \ {}^{B_1}Z_W]^T \end{aligned} \quad (2)$$

Koristeći jednačine (1) i (2), na osnovu poznatih (programiranih) koordinata tačaka "C₁" i "C₂", koordinate platforme "P₁" u koordinatnom sistemu $\{B_1\}$ se određuju na osnovu jednačine (3). Na isti način se prema jednačini (4) određuju koordinate platforme "P₂" u koordinatnom sistemu $\{B_2\}$.

$$\begin{aligned} {}^{B_1}X_{P_1} &= -{}^{B_1}Z_{C_1} \cdot ({}^{B_1}X_{C_2} - {}^{B_1}X_{C_1}) / ({}^{B_1}Z_{C_2} - {}^{B_1}Z_{C_1}) + {}^{B_1}X_{C_1} \\ {}^{B_1}Y_{P_1} &= -{}^{B_1}Z_{C_1} \cdot ({}^{B_1}Y_{C_2} - {}^{B_1}Y_{C_1}) / ({}^{B_1}Z_{C_2} - {}^{B_1}Z_{C_1}) + {}^{B_1}Y_{C_1} \end{aligned} \quad (3)$$

Na isti način se prema jednačini (4) određuju koordinate platforme "P₂" u koordinatnom sistemu $\{B_2\}$.

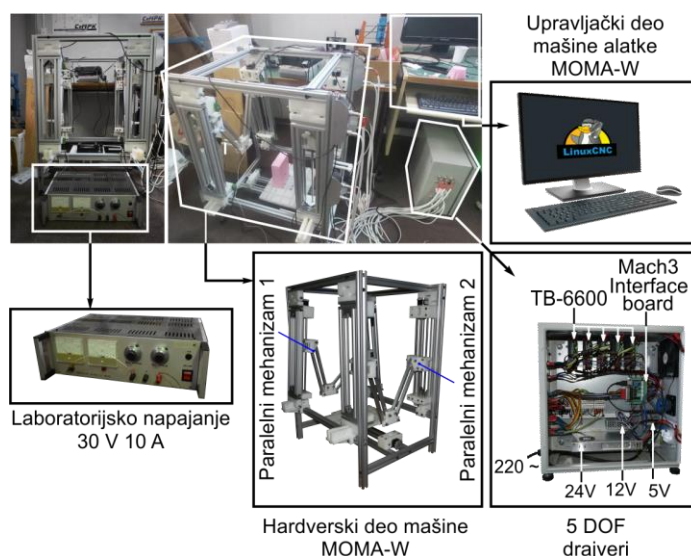
$$\begin{aligned} {}^{B_2}X_{P_2} &= -{}^{B_2}Z_{C_1} \cdot ({}^{B_2}X_{C_2} - {}^{B_2}X_{C_1}) / ({}^{B_2}Z_{C_2} - {}^{B_2}Z_{C_1}) + {}^{B_2}X_{C_1} \\ {}^{B_2}Y_{P_2} &= -{}^{B_2}Z_{C_1} \cdot ({}^{B_2}Y_{C_2} - {}^{B_2}Y_{C_1}) / ({}^{B_2}Z_{C_2} - {}^{B_2}Z_{C_1}) + {}^{B_2}Y_{C_1} \end{aligned} \quad (4)$$

U prehodnim jednačinama, koordinate tačaka "C₁" i "C₂" tj. koordinate ${}^W X_{C_1}$,

${}^wY_{C1}$, ${}^wX_{C2}$ i ${}^wY_{C2}$ odnosno X , Y , U i V respektivno, predstavljaju spoljašnje koordinate kompleksne mašine alatke MOMA-W i one se realizuju dovođenjem platformi upotrebljenih paralelnih mehanizama u pozicije koje su određene jednačinama (3) i (4). Koordinate platformi "P₁" i "P₂" u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$ predstavljaju spoljašnje koordinate upotrebljenih paralelnih mehanizama i realizuju se dovođenjem klizača pogonskih osa u određenu poziciju. Pozicije klizača na vođicama pogonskih osa se posmatra u odnosu na referentnu tačku (na slici 2 - R_i) a rastojanja klizača od odgovarajućih referentnih tačaka nose oznake p_i . Veličine p_i su unutrašnje koordinate upotrebljenih paralelnih mehanizama a ujedno i kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W. Na osnovu datog opisa, može se konstatovati da kompleksna mašina alatka MOMA-W, programiranu poziciju i orijentaciju alata (žice) realizuje dovođenjem klizača pogonskih osa u određene pozicije kojima se ostvaruju koordinate platformi paralelnih mehanizama datih jednačinama (3) i (4). Postupak određivanje vrednosti unutrašnjih koordinata p_i ($i=1-4$) je prikazan u ranije objavljenim naučnim radovima autora [12][13],[23] kao i u [11] te se ne prikazuje u okviru ovoga rada.

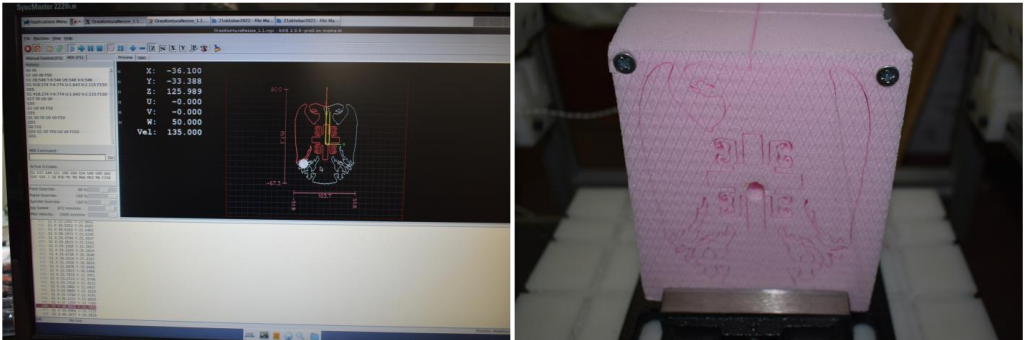
5 EKSPERIMENTALNA POSTAVKA I VERIFIKACIJA RADA KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE MOMA-W

Eksperimentalnu postavku kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W namenjene za sečenje penastih materijala usijanom žicom je prikazana na slici 4. Eksperimentalnu postavku čine: i) Hardverski deo mašine; ii) Upravljački deo mašine i iii) Laboratorijsko napajanje. Laboratorijsko napajanje se koristi za grejanje žice kojom se seče materijal, ovde stirodur. Hardver mašine čiji je 3D-CAD model prikazan na slici 1, je sačinjen od noseće konstrukcije na koju su pričvršćena dva ravanska rekonfigurabilna mehanizma sa paralelnom kinematikom. Upravljački deo mašine alatke MOMA-W čini softverski sistem otvorene arhitekture LinuxCNC u koji je implementirana kinematika mašine alatke. Deo upravljačkog sistema i drajveri kojima se na osnovu signala iz softverskog dela upravljačkog sistema upravlja radom koračnih motora pogonskih osa, takođe je pokazan na slici 4.



Slika 4. Eksperimentalna postavka kompleksne mašine alatke MOMA-W namenjena za proces obrade sečenja žicom penastih materijala

Primenjujući metod ručnog (manuelnog) programiranja kao i upotrebom dostupnog CAD/CAM softverskih paketa, izrađeno je više delova sa postavljenim različitim zahtevima kako bi se prvenstveno potvrdila ispravnost izvedenih jednačina na osnovu kojih se upravlja mašinom alatkom MOMA-W a potom i da bi se utvrdile mogućnosti koje mašina alatka pruža. Rad mašine je prikazan na slici 5, dok su izrađeni delovi podeljeni po grupama i prikazani na slikama 6-9.



Slika 5. Mašina alatka MOMA-W tokom procesa obrade



(a)

(b)

Slika 6. Tankozidi delovi: a) Logo centra za nove tehnologije (CeNT) Mašinskog fakulteta u Beogradu; b) Logo MOMA mašina alatki zasnovanih na ravanskom rekonfigurabilnom mehanizmu sa paralelnom kinematikom

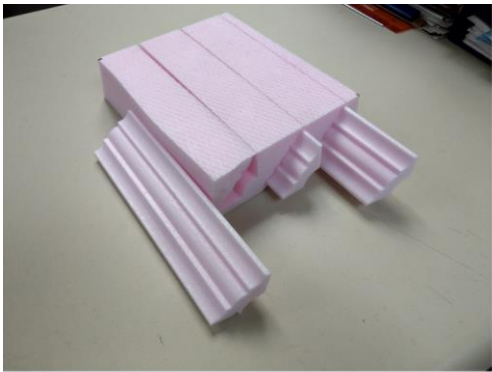


(a)



(b)

Slika 7. Delovi složene geometrije: a) Grb Reublike Srbije; b) Lavlja glava

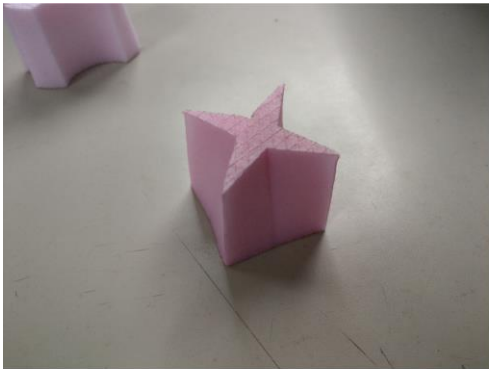


(a)



(b)

Slika 8. Delovi većih dužina: a)Ukrasna lajsna; b)Aero profil



(a)



(b)

Slika 9. Delovi izrađeni sa velikim promenama nagiba žice: a)Četvorokraka zvezda; b)Šestougaona uvijena zarubljena piramida

6 ZAKLJUČCI

Kompleksna višeosna mašina alatka MOMA-W prikazana u ovom radu je jedna od retkih mašina alatki koju čine dva paralelna mehanizma koja su međusobno nezavisna i povezana žicom promenljive dužine koja predstavlja alat, pa se mašina alatka može svrstati u klasu kompleksnih mašina alatki koja pripada grupi mašina alatki nove generacije. Dosadašnje analize i ispitivanja prikazane mašine alatke su dala dobre rezultate na osnovu kojih se može zaključiti da postoji opravdanost za gradnjom i upotrebom mašine sa ovakvim konceptom. Takođe, dobijeni rezultati su pokazali da postoje mogućnosti za daljim unapređenjem i usavršavanjem kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W kao i drugih mašina alatki zasnovanih na istom ili sličnom konceptu što će i biti predmet budućih istraživanja autora.

Verifikacijom rada mašine alatke MOMA-W su se stekli uslovi da se mašina alatka MOMA-W koristi u edukacione svrhe na visoko školskim ustanovama pri čemu bi se akcenat stavio prvenstveno na programiranje a potom i na konfigurisanje mašina alatki zasnovanih dvoosnom ravanskom rekonfigurabilnom mehanizmu sa paralelnom kinematikom.

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 451-03-68/2022-14/200105, od 4.02.2022. godine.

LITERATURA

- [1] Tanev, T.K. (2000) Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, 35/9, p.p 1183–1196 [DOI: 10.1016/S0094-114X\(99\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00073-7)
- [2] Wu, J., Wang, j., Li, T., Wang, L. (2007) Analysis and application of a 2-DOF planar parallel mechanism, *ASME Journal of Mechanical Design*, 129/4, p:p 434–437 [DOI: 10.1115/1.2437800](https://doi.org/10.1115/1.2437800)
- [3] Wu, J., Wang, j., Wang, L. (2008) Optimal kinematic design and application of redundantly actuated 3DOF planar parallel manipulator, *ASME Journal of Mechanical Design*, 130/5, p.p.054503 [DOI: 10.1115/1.2890118](https://doi.org/10.1115/1.2890118)
- [4] Sun, T., WU, H., Lian, B., et al.(2016) Stiffness modeling, analysis and evaluation of a 5 degree of freedom hybrid manipulator for friction stir welding, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 331/13, p:p:4441–4456 [DOI: 10.1177/095440621666689](https://doi.org/10.1177/095440621666689)
- [5] Huang, T., Li, Z., Li, M., Chetwynd, D.G., Gosselin, C.M. (2004) Conceptual design and dimensional syntesis of a novel 2-dof translational parallel robot for pick-and-place operations, *ASME Journal of Mechanical Design*, 126/3, p.p.449–455 [DOI: 10.1115/1.1711822](https://doi.org/10.1115/1.1711822)
- [6] Romdhane, L. (1999): Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, 34/7. pp.1037–1055 [DOI: 10.1016/S0094-114X\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(98)00079-2)

- [7] Zheng, X.Z. , Bin, H.Z., Luo, Y.G. (2004). Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.23: pp.925–930 [DOI: 10.1007/s00170-003-1782-z](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1782-z)
- [8] Lu, Y., Dai, Z. (2016). Dynamics model of redundant hybrid manipulators connected in series by three or more different parallel manipulators with linear active legs. Mechanism & Machine Theory, Vol.103, pp.222–235 [DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.003](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.003)
- [9] Jovanovic, M., Rakovic, M., Tepavcevic, et al.(2017). Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels, Automation in Construction 74, p.p.28–38 [DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.003)
- [10] Lee, S.H. , Ahn, D.G. , Yang, D.Y. (2003)Calculation and verification of rotation angle of a four-axis hotwire cutter for transfer-type variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.22 p.p.175–183, [DOI: 10.1007/s00170-002-1456-2](https://doi.org/10.1007/s00170-002-1456-2)
- [11] Vasilić, G. (U postupku odbrane). *Koncepcijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet.
- [12] Vasilić, G., Živanović, S., Kokotović, B., Dimić, Z. (2019). Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematik machine, Journal of Mechanical Science and Technology, 33/7, p.p. 3407-3421 [DOI: 10.1007/s12206-019-0636-z](https://doi.org/10.1007/s12206-019-0636-z)
- [13] Vasilić, G., Živanović, S. (2016). Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima, TEHNIKA Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, 71/1, p.p. 57-63 [DOI: 10.5937/tehnika1601057V](https://doi.org/10.5937/tehnika1601057V)
- [14] Živanović, S., Vasilić, G. (2014). Varijantnost konfigurisanja dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma – MOMA. COMETA 2014, 2nd International Scientific Conference, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering
- [15] Katz, R. (2007). Design principles of reconfigurable machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume, Vol.34, p.p.430–439 [DOI:10.1007/s00170-006-0615-2](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0615-2)
- [16] Moon, Y. (2006): Reconfigurable Machine Tool Design. Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Springer, Berlin, Heidelberg. [DOI: 10.1007/3-540-29397-3_7](https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3_7)
- [17] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F. Moriwaki, T., Pitschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H. (1999). Reconfigurable manufacturing systems. CIRP Annals, 48/2, p.p.527–540, [DOI:10.1016/S0007-8506\(07\)63232-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63232-6)
- [18] Huang, Z., Li, Q.C. (2002): General Methodology for Type Synthesis of Symmetrical Lower-Mobility Parallel Manipulators and Several Novel Manipulators, The International Journal of Robotics Research 21/2, p.p.131-146 [DOI: 10.1177/027836402760475342](https://doi.org/10.1177/027836402760475342)
- [19] Feng Gao, Weimin Li, Xianchao Zhao, Zhenlin Jin, Hui Zhaoc (2002): New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs, Mechanism and Machine Theory, 37/11, p.p.1395-1411 [DOI:10.1016/S0094-114X\(02\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(02)00044-7)
- [20] Zheng, X. Z., Bin, H. Z., Luo , Y. G. (2004): Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol.23, p.p. [DOI:10.1007/s00170-003-1782-z](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1782-z)

- [21] Romdhane, L. (1999): Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator, Mechanism and Machine Theory Vol.34, Issue 7, p.p.1037-1055
[DOI:10.1016/S0094-114X\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(98)00079-2)
- [22] ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration - numerical control of machines-program format and definitions of address words.
<https://www.iso.org/standard/34608.html>.
- [23] Vasilic, G., Živanović, S. (2020). Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process, Mechanism and Machine Theory 149, p.p 103833. [DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833)