



Society of Production  
Engineering

**SPMS 2023**

39. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije

**ICPES 2023**

39<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of  
Serbia



Faculty of Technical  
Sciences  
University of Novi Sad

Novi Sad, Serbia, 26. – 27. October 2023

## KINEMATIKA PROCESA OBRADE SEČENJA ŽICOM

Goran VASILIĆ<sup>1\*</sup>, Saša ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>, Milan MILUTINOVIĆ<sup>1</sup>, Zoran DIMIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

<sup>3</sup>Lola institut, Beograd, Srbija

\*gvasilic@atssb.edu.rs

**Apstrakt:** Proces obrade sečenja materijala je jedan od značajnijih metoda obrade u savremenoj industriji. Sa ciljem da se proces obrade u određenoj meri unapredi, u okviru ovoga rada je analizirano kretanje alata tokom procesa obrade kao i uticaj kretanja alata na kretanja mehanizma mašine alatke. Pažnja je posvećena kompleksnoj višeosnoj mašini alatki koja je konfigurisana pomoću dva ravanska rekonfigurabilna mehanizma sa paralelnom kinematikom. Mašine alatke zasnovane na paralelnim mehanizmima, a namenjene za proces obrade sečenja žicom su nedovoljno izučavane te rezultati ovoga rada daju značajan doprinos u njihovom budućem razvoju.

**Ključne reči:** Sečenje žicom, Kompleksne mašine alatke, Paralelni mehanizmi, Rekonfigurabilni mehanizmi, Kinematički problemi.

### UVOD

Proces obrade sečenja žicom spada u nekonvencionalne metode obrade. Sam proces obrade sečenja materijala žicom je veoma zastupljen ta je veliki broj istraživača svoja istraživanja usmerio ka analizi i unapređenju procesa. Grubo govoreći, istraživanja vezana za proces obrade sečenja žicom se mogu podeliti u sledeće grupe: i) analize režima obrade pri sečenju metala nekonvencionalnom W-EDM (Wire Electrical discharge machining) metodom [1,2]; ii) sečenje penastih materijala usijanom žicom [3,4]; iii) mašine alatke i roboti namenjeni za proces obrade sečenja žicom [5,6]; iv) programiranje i upravljanje mašinama alatkama namenjenih za proces obrade sečenja žicom [7,8]. Oslanjajući se na prethodno dobijene rezultate, ali i na rezultate istraživanja drugih autora, u okviru ovoga rada je

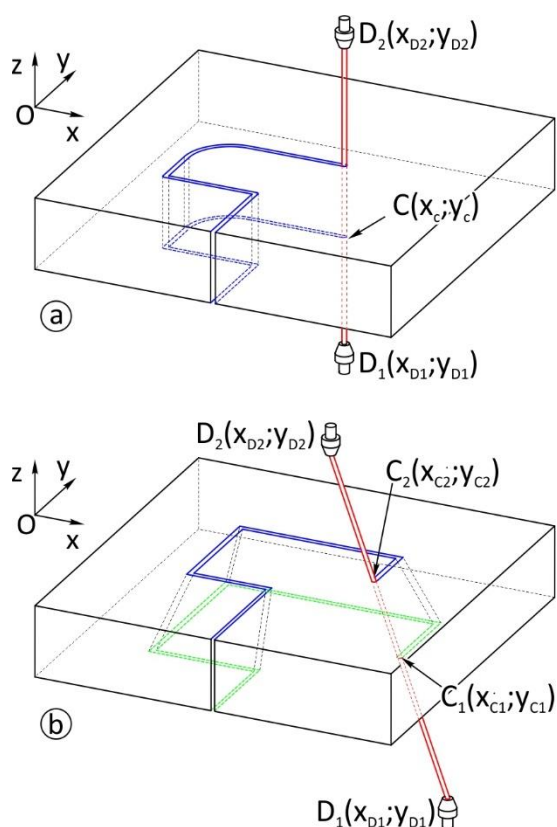
analizirana kinematika višeosne obrade sečenja materijala žicom koja važi za sve mašine alatke namenjene za ovaj proces obrade, bez obzira na konfiguraciju same mašine.

U okviru ovoga rada, najpre je razmatrana kinematika procesa obrade sečenja žicom tj. kretanje žice (alata) po programiranoj putanji a potom, uticaj kinematike procesa obrade na kinematiku mehanizma mašine alatke.

### PROCES OBRADE SEČENJA ŽICOM

Proces obrade sečenja žicom je proces obrade koji se karakteriše kao konturna obrada. Tokom procesa obrade, alat (žica) se kreće po programiranoj konturi. U zavisnosti od složenosti konture, proces obrade se može realizovati kretanjem alata po konturi bez promene orijentacije, pri čemu je žica upravna na Oxy ravan u kojoj leži kontura (slika 1.a) i

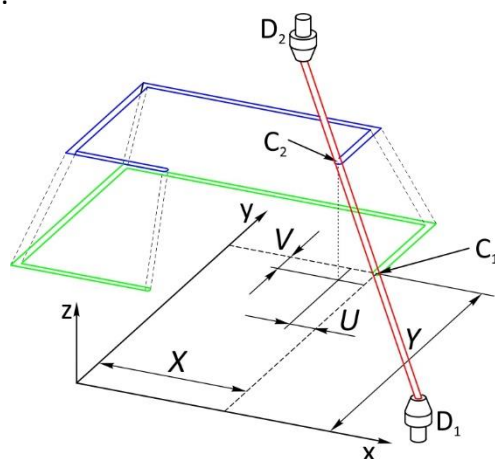
kretanjem alata po konturi sa promenom orijentacije (slika 1.b).



**Slika 1.** Proces obrade sečenja žicom: a) sa konstantnom orijentacijom žice; b) sa promenljivom orijentacijom žice

U prvom slučaju (slika 1.a), prema standardu ISO 6983 [9], karakteristične tačke konture se zadaju koordinatama  $X$  i  $Y$ . Kontura po kojoj se kreće žica (na slici prikazana plavom bojom), definisana je koordinatama karakterističnih tačaka  $C$ . Prema slici 1.a, koordinate tačke  $C$  i koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$  koje vode žicu po programiranoj konturi su u svakom trenutku procesa obrade iste tj.  $x_C = x_{D1} = x_{D2}$  i  $y_C = y_{D1} = y_{D2}$ . U drugom slučaju (slika 1.b), tokom procesa obrade, žica se kreće po dve različite konture. Na ovaj način obezbeđuje se promena orijentacija žice. Karakteristične tačke prve konture (na slici 1.b prikazana zelenom bojom), definisane su koordinatama  $x_{C1}$  i  $y_{C1}$ , dok su karakteristične tačke druge konture (na slici 1.b prikazana plavom bojom) definisane koordinatama  $x_{C2}$  i  $y_{C2}$ . Kao što se može primetiti, u drugom slučaju koordinate karakterističnih tačaka  $C_1$  i  $C_2$  i koordinate dizni koje vode žicu po zadatim konturama  $D_1$  i  $D_2$  međusobno se razlikuju, tj.  $x_{C1} \neq x_{C2} \neq x_{D1} \neq x_{D2}$  i

$y_{C1} \neq y_{C2} \neq y_{D1} \neq y_{D2}$ . Prema standardu ISO 6983 [9], koordinate karakterističnih tačaka prve konture su definisane koordinatama  $X$  i  $Y$  dok su koordinate karakterističnih tačaka druge konture definisane koordinatama  $U$  i  $V$ . Koordinate tačke  $X$  i  $Y$  su apsolutne koordinate tačke  $C_1$  u koordinatnom sistemu obratka a koordinate  $U$  i  $V$  su relativne koordinate tačke  $C_2$  u odnosu na tačku  $C_1$  kako je i prikazano na slici 2.



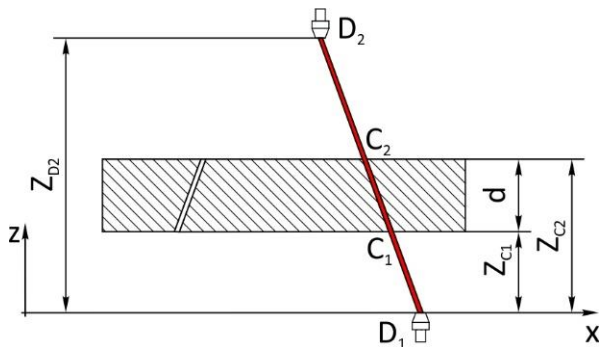
**Slika 2.** Koordinate karakterističnih tačaka kontura tokom procesa obrade sečenja žicom sa promenom orijentacije

Problematika koja se razmatra u ovom radu, odnosi se na kretanje dizni koje obezbeđuju kretanje žice po programiranoj putanji. U okviru rada, razmatra se proces obrade sečenja žicom sa promenom orijentacije. Pažnja se posvećuje određivanju koordinata dizni koje obezbeđuju programirano kretanje žice. Takođe, razmatra se i uticaj programirane brzine alata (žice) po programiranim konturama na brzine dizni tokom procesa obrade kojima se ostvaruju programirana brzina alata.

## KINEMATIKI MODEL PROCESA OBRADJE SEČENJA ŽICOM

Kao što je već rečeno, koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$  koje svojim kretanjima obezbeđuju kretanje žice po programiranim konturama zavise od koordinata karakterističnih tačaka kontura  $C_1$  i  $C_2$ . Kako su koordinate tačaka  $C_1$  i  $C_2$  poznate, neophodno je odrediti zavisnost koordinata dizni od koordinata karakterističnih tačaka. Posmatrajući sliku 3, kojom su definisane koordinate karakterističnih tačaka  $C_1$  i  $C_2$  kao i  $Z$

koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$  i uzimajući u obzir sliku 2, može se napisati grupa jednačina (1).



**Slika 3.** Z koordinate karakterističnih tačaka  $C_1$  i  $C_2$  i Z koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$

$$\begin{aligned} x_{D1} &= K_1 \cdot (x_{C2} - x_{C1}) + x_{C1} \\ y_{D1} &= K_1 \cdot (y_{C2} - y_{C1}) + y_{C1} \\ x_{D2} &= K_2 \cdot (x_{C2} - x_{C1}) + x_{C1} \\ y_{D2} &= K_2 \cdot (y_{C2} - y_{C1}) + y_{C1} \end{aligned} \quad (1)$$

Jednačinama (1) daje zavisnost koordinata dizni  $D_1$  i  $D_2$  od programiranih koordinata koordinata karakterističnih tačaka  $C_1$  i  $C_2$ . U jednačinama (1), koordinate tačke  $C_2$  su date u apsolutnim koordinatama. Uzimajući u obzir navedenu činjenicu da su koordinate tačke  $C_2$  zadate koordinatama  $U$  i  $V$  koje predstavljaju relativnu poziciju tačke  $C_2$  u odnosu na poziciju tačke  $C_1$  (definisane koordinatama  $X=x_{C1}$  i  $Y=y_{C1}$ ), vrednosti apsolutnih koordinata tačke  $C_2$  su date jednačinama (2).

$$\begin{aligned} x_{C2} &= U + X \\ y_{C2} &= V + Y \end{aligned} \quad (2)$$

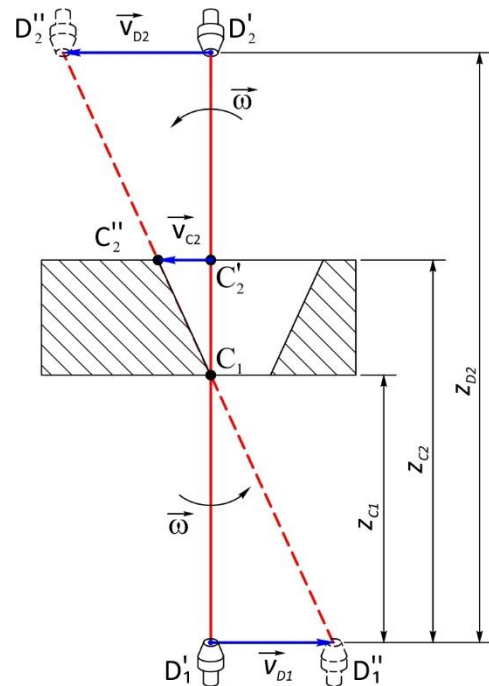
U jednačinama (1) figurišu koeficijenti  $K_1$  i  $K_2$  koji uzimaju u obzir Z koordinate tačaka  $C_1$  i  $C_2$  kao i Z koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$ . Koeficijenti  $K_1$  i  $K_2$  su određeni jednačinama (3).

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{Z_{D1} - Z_{C1}}{Z_{C2} - Z_{C1}} \\ K_2 &= \frac{Z_{D2} - Z_{C1}}{Z_{C2} - Z_{C1}} \end{aligned} \quad (3)$$

Jednačinama (1)-(3) određuju se koordinate dizni  $D_1$  i  $D_2$  na osnovu programiranih

koordinata tačaka  $C_1$  i  $C_2$ , i deo su postprocesorskog računa koji obavlja upravljački deo mašine.

Ako se uzme slučaj kada žica tokom procesa obrade menja orijentaciju, brzine dizni  $D_1$  i  $D_2$  koje svojim kretanjima obezbeđuju kretanje žice programiranim brzinama određuju se prema slici 4.



**Slika 4.** Brzine dizni  $D_1$  i  $D_2$  tokom procesa obrade sečenja žicom

U slučaju prikazanom na slici 4. kada žica ne menja poziciju ali menja orijentaciju, brzine žice u tački  $C_1$  iznosi  $\vec{v}_{C1} = 0$  dok brzina u tački  $C_2$  ima vrednost  $\vec{v}_{C2}$ . Razlike u vrednostima brzina  $\vec{v}_{C1}$  i  $\vec{v}_{C2}$  uzrokuju promenu orijentacije žice. Uzimajući u obzir teoriju kinematike krutog tela, brzina jedne tačke krutog tela ( $\vec{v}_{C2}$ ) u odnosu na drugu tačku ( $\vec{v}_{C1}$ ), određuje se vektorskom jednačinom (4)

$$\vec{v}_{C2} = \vec{\omega} \times \overline{C_1 C_2} \quad (4)$$

pri čemu je  $\vec{\omega}$  ugaona brzina žice pri promeni orijentacije. U slučaju da žica tokom procesa obrade vrši i translaciju i rotaciju, brzina  $\vec{v}_{C2}$  se određuje prema vektorskoj jednačini (5).

$$\vec{v}_{C2} = \vec{v}_{C1} + \vec{\omega} \times \overline{C_1 C_2} \quad (5)$$

Obzirom da se programom za mašinu osim putanje alata (žice) programira i brzina kretanja alata, brzine  $\vec{v}_{C1}$  i  $\vec{v}_{C2}$  su poznate te se na osnovu njih može odrediti ugaona brzina  $\vec{\omega}$ . Uz poznatu ugaonu brzinu  $\vec{\omega}$  i poznata rastojanja dizni  $D_1$  i  $D_2$  od obratka (slika 3), jednačinom (6) se određuju brzine dizni  $\vec{v}_{D1}$  i  $\vec{v}_{D2}$ .

$$\vec{v}_{Di} = \vec{v}_{Ci} + \vec{\omega} \times \vec{C_1D_i} \quad (i=1,2) \quad (6)$$

Do istih rezultata se dolazi i primenom Jakobijan matrice dobijene na osnovu jednačine (1), a čiji je oblik dat jednačinom (7). Jakobijan matrica se odnosi na obradni proces te nosi oznaku  $J_{OP}$ .

$$J_{OP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{D1}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial x_{D1}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial x_{D1}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial x_{D1}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial y_{D1}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial y_{D1}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial y_{D1}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial y_{D1}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial x_{D2}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial x_{D2}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial x_{D2}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial x_{D2}}{\partial y_{C2}} \\ \frac{\partial y_{D2}}{\partial x_{C1}} & \frac{\partial y_{D2}}{\partial y_{C1}} & \frac{\partial y_{D2}}{\partial x_{C2}} & \frac{\partial y_{D2}}{\partial y_{C2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Diferenciranjem jednačina (1), i uzimajući u obzir uvedene smene date jednačinama (2) i (3), konačan oblik Jakobijan matrice je dat jednačinom (8) na osnovu koje se određuju brzine dizni  $\vec{v}_{D1}$  i  $\vec{v}_{D2}$  na osnovu poznatih brzina  $\vec{v}_{C1}$  i  $\vec{v}_{C2}$ . Brzine dizni se određuju pomoću matrice jednačine (9).

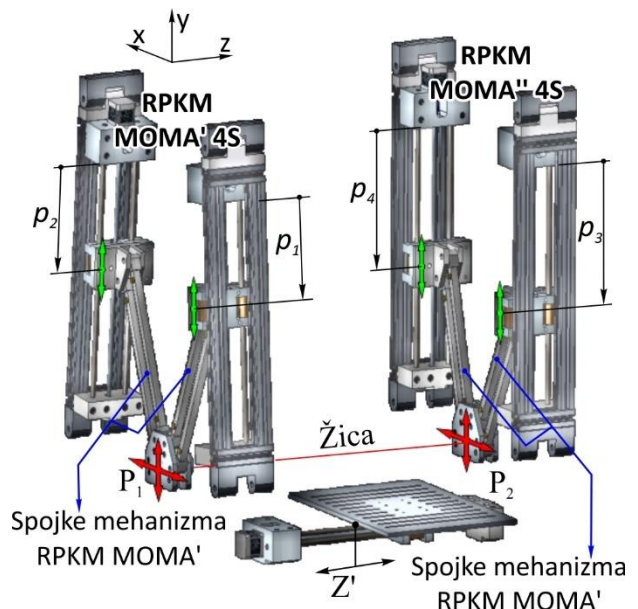
$$J_{OP} = \begin{bmatrix} 1 - K_1 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 1 - K_1 & 0 & K_1 \\ 1 - K_2 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 1 - K_2 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{D1} \\ \dot{y}_{D1} \\ \dot{x}_{D2} \\ \dot{y}_{D2} \end{bmatrix} = J_{OP} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{C1} \\ \dot{y}_{C1} \\ \dot{x}_{C2} \\ \dot{y}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - K_1 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 1 - K_1 & 0 & K_1 \\ 1 - K_2 & 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 1 - K_2 & 0 & K_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{C1} \\ \dot{y}_{C1} \\ \dot{x}_{C2} \\ \dot{y}_{C2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Matrična jednačina (9) kojom se određuju brzine  $\vec{v}_{D1}$  i  $\vec{v}_{D2}$ , složenija je od jednačina (4) do (6), ali je pogodnija za dalje analize kinematike procesa obrade sečenja žicom.

## KOMPLEKSNA VIŠEOSNA MAŠINA ALATKA MOMA-W

U slučaju da se kretanja dizni u dva pravca realizuju tradicionalnim dvoosnim serijskim mehanizmima, izvedene brzine  $\dot{x}_{Di}$  i  $\dot{y}_{Di}$  su brzine koje realizuje svaka od pogonskih osa. Međutim, ako kretanja dizni  $D_1$  i  $D_2$  obezbeđuju paralelni mehanizmi, kinematika celog procesa obrade se usložnjava. Mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom je već bila predmet istraživanja autora [10-11] i prikazana je na slici 5.



Slika 5. Kompleksna mašina alatka MOMA-W namenjena za proces obrade sečenja žicom

Mašinu alatku namenjenu za proces obrade sečenja žicom prikazane na slici 5, nazvana je MOMA-W (W-wire) i čine je dva mehanizma sa paralelnom kinematikom MOMA (RPKM) čija se konfiguracija može menjati [12-14]. Konfiguracije paralelnih mehanizama se mogu lako i brzo menjati promenom orijentacije pogonskih osa ili promenom dužine spojke mehanizama. Paralelni mehanizmi su međusobno nezavisni dok su platforme mehanizama međusobno povezane žicom. Platforme mehanizama se mogu kretati u

pravcima osa  $X$  i  $Y$ , a pozicije platformi su određene unutrašnjim koordinatama kompleksne mašine alatke  $p_1, p_2, p_3$  i  $p_4$ . Spoljašnje koordinate mašine alatke su koordinate programiranih tačaka, odnosno  $X, Y, U$  i  $V$  za koje važi jednačina (2). Na platformama mehanizma se nalaze dizne  $D_1$  i  $D_2$  koje obezbeđuju programirane pozicije i orijentacije žice tokom procesa obrade, te se jednačine (1) do (4) u ovom slučaju odnose na koordinate platformi mehanizama. Usled promene orijentacije žice, njena dužina se menja tokom procesa obrade pa se opisana veza dva paralelna mehanizma ne može okarakterisati kao serijska veza. Iz tog razloga, mašina alatka sa slike 5 je okarakterisana kao kompleksna mašina alatka. Koordinate dizni  $x_{D1}, x_{D2}, y_{D1}$  i  $y_{D2}$  date jednačinom (1) su ujedno i koordinate platformi mehanizama i polazne su jednačine za rešavanje kinematičkih problema višeosne mašine alatke sa slike 5. Postupak rešavanja kinematičkih problema se zasniva na rešavanju kinematičkih problema dvoosnih paralelnih mehanizama [12-14], a rešenja su data u radovima [10-11].

Uzimajući u obzir već određene brzine dizni  $D_1$  i  $D_2$ , za kompleksnu mašinu alatku MOMA-W neophodno je odrediti brzine kojima se kreću klizači duž vođica pogonskih osa kako bi se realizovale željene brzine platformi sa samim time i programirane brzine alata (žice). Jakobijan matrica kompleksne mašine alatke MOMA-W data je jednačinom (10). Kako se Jakobijan matrica odnosi na kompleksnu mašinu alatku MOMA-W, u označena je sa  $J_W$ .

$$J_W = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial x_{D1}} & \frac{\partial p_1}{\partial y_{D1}} & \frac{\partial p_1}{\partial x_{D2}} & \frac{\partial p_1}{\partial y_{D2}} \\ \frac{\partial p_2}{\partial x_{D1}} & \frac{\partial p_2}{\partial y_{D1}} & \frac{\partial p_2}{\partial x_{D2}} & \frac{\partial p_2}{\partial y_{D2}} \\ \frac{\partial p_3}{\partial x_{D1}} & \frac{\partial p_3}{\partial y_{D1}} & \frac{\partial p_3}{\partial x_{D2}} & \frac{\partial p_3}{\partial y_{D2}} \\ \frac{\partial p_4}{\partial x_{D1}} & \frac{\partial p_4}{\partial y_{D1}} & \frac{\partial p_4}{\partial x_{D2}} & \frac{\partial p_4}{\partial y_{D2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pomoću Jakobijan matrice  $J_W$  određuju se brzine klizača na pogonskim osama  $\dot{p}_i$  ( $i=1,2,3,4$ )

okjima se realizuju brzine platformi mehanizama i to putem jednačine (11).

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ p_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \end{bmatrix} = J_W \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{D1} \\ \dot{y}_{D1} \\ \dot{x}_{D2} \\ \dot{y}_{D2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Konačno, brzine klizača duž pogonskih osa kompleksne mašine alatke MOMA-W koje obezbeđuju programirane brzine alata (žice) tokom procesa obrade, prema do sada izvedenim jednačinama, određuju se matricnom jednačinom (12).

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ p_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \end{bmatrix} = J_W \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{D1} \\ \dot{y}_{D1} \\ \dot{x}_{D2} \\ \dot{y}_{D2} \end{bmatrix} = J_W \cdot J_{OP} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_{C1} \\ \dot{y}_{C1} \\ \dot{x}_{C2} \\ \dot{y}_{C2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

## ZAKLJUČAK

U okviru rada je prikazana kinematička analiza procesa obrade sečenja žicom pri čemu se pažnja posvetila jednoj kompleksnoj mašini alatki koja je sačinjena od dva paralelna mehanizma. Značaj prikazane analize se ogleda u tome što se zbog nelinearne zavisnosti unutrašnjih od spoljašnjih koordinata kompleksne mašine alatke ne mogu predvideti brzine klizača duž pogonskih osa. Drugačije rečeno, male programirane brzina alata, zbog opšte poznatih karakteristika paralelnih mehanizama, mogu zahtevati izuzetno velike brzine klizača duž pogonskih osa koje se ne mogu realizovati. Prikazanom analizom, prema programiranoj brzini alata mogu se odrediti brzine klizača u svakom delu programirane putanje. U slučaju da se brzine klizača ne mogu realizovati, kompleksna mašina alatka se može rekonfigurisati kako bi se dobila konfiguracija koja može realizovati željene brzine alata.

Izneta pretpostavka da se konfiguracija mašine alatke može prilagoditi programiranoj putanji i programiranoj brzini alata je jedan od pravaca budućih istraživanja koja za osnovu imaju višeosne mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja žicom.

## ZAHVALNOST

Predstavljeno istraživanje je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije ugovorom br. 451-03-47/2023-01/200105 od 03.02.2023. godine i ugovorom 451-03-47/2023-01/200066 od 2023. godine.

## LITERATURA

- [1] R. Chalisgaonkar, J. Kumar: Multi-response optimization and modeling of trim cut WEDM operation of commercially pure titanium (CPTi) considering multiple user's preferences, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, pp. 125-134, 2015.
- [2] R. Ramakrishnan, L. Karunamoorthy; Multi response optimization of wire EDM operations using robust design of experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 105-112, 2006.
- [3] S. H. Lee, D. G. Ahn, D. Y. Yang: 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, pp. 175-183, 2003.
- [4] R.F. Hamade, F. Zeineddine, B. Akle, A. Smaili: Modelangelo: a subtractive 5-axis robotic arm for rapid prototyping, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.121, No.2, pp.133-144, 2005.
- [5] M. Jovanović, M. Raković, B. Tepavčević, B. Borovac, M. Nikolić: Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels, *Automation in Construction*, Vol. 74, pp. 28-38, 2017.
- [6] X. Cheng, Z. G. Wang, S. Kobayashi, K. Nakamoto, K. Yamazaki: Development of a six-axis wire electrical discharge machine for the fabrication of micro end mills, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol.23, No.2, pp.121-131. 2009.
- [7] S. Živanović, R. Puzović: Simulacija elektro erozijske obrade žicom na temelju STEP-NC programa, *Tehnički vjesnik*, Vol. 23 No. 6, 2016.
- [8] S. Zivanovic, R. Puzovic: Off-line Programming and Simulation for 2-axis Wire EDM, *Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, FME Transactions*, Vol. 43, No. 2, pp. 138-143, 2015.
- [9] ISO 6983-1, *Automation systems and integration — Numerical control of machine — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*, 2009.
- [10] G. Vasilić, S. Živanović: Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process, *Mechanism and Machine Theory*, Vol.149, pp.203833, 2020.
- [11] G. Vasilić: *Koncepcijsko projektovanje jedne klase kompleksnih mašina alatki*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2023.
- [12] G. Vasilić, S. Živanović, B. Kokotović, Z. Dimić: Configuring and analysis of a class of generalized reconfigurable 2-axis parallel kinematic machine, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33, pp. 3407-3421, 2019.
- [13] G. Vasilić, S. Živanović: Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA, *40. JUPITER konferencija, NU-Roboti-FTS*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
- [14] G. Vasilić, S. Živanović: Modelling and Analysis of 2-Axis Reconfigurable Parallel mechanism MOMA with translatory Actuated Joints. *TECHNICS-magazine of the union of engineers and technicians od Serbia*, Special edition, pp. 59-66, 2016.

## KINEMATICS OF THE WIRE CUTTING PROCESS

**Abstract:** *The wire-cutting process is one of the most important processing methods in modern industry. To improve the machining process to a certain extent, the movement of the tool during the machining process as well as the influence of the movement of the tool on the movement of the mechanism of the machine tool were analyzed in this paper. Attention is devoted to a complex multi-axis machine tool, which is made up of two planar reconfigurable mechanisms with parallel kinematics. Machine tools based on parallel mechanisms, intended for the wire-cutting process, are insufficiently studied, and this work's results significantly contribute to their future development.*

**Keywords:** *Wire cutting process, Complex machine tools, Parallel mechanisms, Reconfigurable mechanisms, Kinematics problems*