



Vasilić, G., Živanović, S.¹⁾

UTICAJ REZOLUCIJE RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA NA TAČNOST KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE ZA PROCES OBRADJE SEČENJA ŽICOM ²⁾

Rezime

U okviru ovoga rada je predstavljena kompleksna višeosna mašina alatka koja je namenjena za proces obrade sečenja žicom. Kompleksnu mašinu alatku čine dva dvoosna rekonfigurabilna paralelna mehanizma spojenih žicom koja u ovom slučaju predstavlja alat same mašine. Rezolucija paralelnih mehanizama nije konstantna unutar celog radnog prostora pa i greške pozicioniranja platforme imaju različite vrednosti u različitim delovima radnog prostora. Ove greške se odražavaju na greške obrade kompleksne višeosne mašine a u ovom radu je prikazana analiza koja dovodi u vezu greške pozicioniranja platformi paralelnih mehanizama sa greškama obrade. Takođe, razmotra se i mogućnost umanjenja greške obrade rekonfigurisanjem paralelnih mehanizama od kojih je napravljena kompleksna višeosna mašina namenjena za proces obrade sečenja žicom.

Ključne reči: Inverzni i direktni kinematski problem, Ravanski paralelni mehanizam, Kompleksna mašina alatka, Sečenje žicom

1. UVOD

Proces obrade sečenja žicom je metoda koja je veoma zastupljena u privredi i koristi se sa sečenje različitih materijal poput metala WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) metodom, sečenja penastih materijala usijanom žicom, sečenja elektro neprovodnih materijala poput kamena i betona nazubljenom žicom. Za sečenje navedenih materijala, do sada su prodložene različite konfiguracije mašina alatki i industrijskih robota koji realizuju relativno kretanje alata (žice) u odnosu na pripremak čime se realizuje proces sečenja. Tako, za sečenje kamena je predložen industrijski robot RDWC (Robotic Diamond Wire cutting) sa dijamantskom nazubljenom žicom [1]. Za sečenje penastih materijala su prikazani industrijski robot RHWC (Robotic Hot Wire Cutting) [2,3]. Sečenje penastih materijala usijanom žicom je korišteno za oblikovanje laminiranih slojeva čijim se kasnijim spajanjem izrađuju brzi prototipovi [4]. U radovima [5] i [6] su takođe predložene neke konfiguracija mašina alatki i industrijskih robota namenjenih za sečenje penastih materijala usijanom žicom. WEDM metoda koja se koristi za sečenje metala je i najzastupljenija metoda koja koristi žicu za sečenje. Za WEDM metodu se koriste tradicionalne dvoosne [7] i višeosne mašine alatke [8,9]. Navedena rešenja predlažu mašine alatke i industrijske robote koji se baziraju na serijskim mehanizmima.

Mnoga istraživanja su pokazala da paralelni mehanizmi poseduju izvesne prednosti u odnosu na serijske mehanizme poput: i)veće krutosti, ii)manje mase pokretnih delova, iii)bolju pokretljivost, iv)manju grešku pozicioniranja, i to sve u zavisnosti od konfiguracije i geometrije mehanizma [10,11]. Takođe, paralelni mehanizmi poseduju izvesne nedostatke kao što su: i)radni prostori nepravilnog oblika, ii)postojanje singulariteta, iii)složenost jednačina koje predstavljaju rešenja kinematskih problema [10,11]. Kako bi se izbegli nedostaci paralelnih mehanizama a istovremeno zadržale prednosti koje pružaju, paralelni mehanizmi su korišteni za gradnju mašina alatki sa hibridnim mehanizmom (mehanizmi koji predstavljaju kombinaciju paralelnih i serijskih mehanizama) namenjenih za različite proizvodne procese. Tako su paralelni mehanizmi

¹⁾ Goran Vasilić, student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (goran.v.vasilic@gmail.com), Prof. dr Saša Živanović, (szivanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

²⁾ 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 „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.

korišteni za gradnju vertikalne [12] i horizontalne [13] troosne glodalice. Takođe, paralelni mehanizmi se mogu prepoznati i kod mašina alatki namenjenih za druge proizvodne procese poput mašine alatke za zavarivanje [14] ili kod manipulatora [15]. Znatno složeniji mehanizmi su mehanizmi sačinjeni od dva paralelna mehanizma i mogu se uočiti kod industrijskih robota namenjenih za pick-and-place operacije [16,17]. Kod ovih složenih hibridnih mehanizama, jedan paralelni mehanizam nosi drugi paralelni mehanizam i na ovaj način je ostvarena serijska veza dva paralelna mehanizma pa se celokupni mehanizam može svrstati u klasu hibridnih mehanizama.

Od svih do sada navedenih mašina alatki i industrijskih robota, kompleksna mašina alatka koja se razmatra u ovom radu se prvenstveno razlikuje po konfiguraciji a potom i po nameni. Mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom koja se razmatra u ovom radu je sačinjena od dva nezavisna dvoosna paralelna mehanizma MOMA (MODularna Mašina Alatka). Platforme ravanskih paralelnih mehanizama MOMA su međusobno povezani žicom. Kretanja platformi ravanskih paralelnih mehanizama MOMA obezbeđuju željena kretanja žice koja vrši obradu. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je do sada bio predmet više istraživanja [18-22] čiji rezultati su od značaja za analize u ovom radu. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je rokonfigurabilni mehanizam koji se prema programu gradnje [23] može rekonfigurisati na 33 različita načina što i celokupnu kompleksnu mašinu alatku za sečenje žicom svrstava u grupu rekonfigurabilnih mašina alatki. Kako je razmatrana mašina alatka sačinjena od dva ravanska paralelna mehanizma MOMA i namenjena je za proces obrade sečenja žicom, prema [24,25] kompleksnoj višeosnoj mašini alatki je dodeljen naziv MOMA-W (Wire).

Za višeosnu mašinu alatku MOMA-W u okviru ovoga rada, nakon prikazanog koncepta prikazan je kinematski model mašine alatke na osnovu koga su izvedene jednačine koje predstavljaju rešenja kinematskih problema kompleksne mašine alatke MOMA-W. Rešenja kinematskih problema su generalizovana i u opštem obliku. Uopštene jednačine kinematskih problema će biti korištene za analize različitih konfiguracija kompleksne višeosne mašine MOMA-W. Kako se uz izvesne nadogradnje kompleksna višeosna mašina alatka MOMA-W može koristiti i za sečenje metala WEDM metodom koja zahteva visoku tačnost obrade, u zasebnom poglavlju je analizirana tačnost obrade višeosne mašine. Kako tačnost obrade zavisi od parcijalnih grešaka pozicioniranja platformi upotrebljenih ravanskih paralelnih mehanizama.

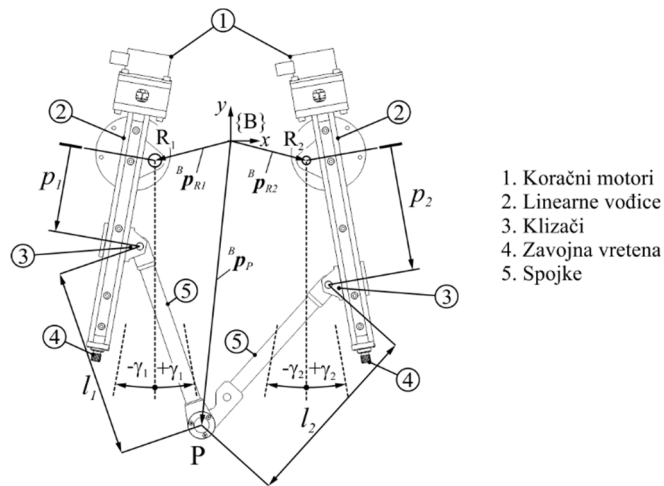
2. KONFIGURACIJA KOMPLEKSNE VIŠEOSNE MAŠINE

Kao što je već rečeno, višeosnu mašinu alatku MOMA-W čine dva dvoosna ravanska paralelna mehanizma MOMA. Ravanski paralelni mehanizam MOMA je prikazan na slici 1. dok je CAD model višeosne mašine alatke MOMA-W je prikazan na slici 2. Ravanski paralelni mehanizam MOMA čine dve identične pogonske ose. Svaka od pogonskih osa poseduje koračni motor (Slika 1-①) koji svoje obrtno kretanje preko zavojnog vretena (Slika 1-④) prenosi na klizača (Slika 1-③). Sprega zavojnog vretena i klizača omogućava linearno kretanje klizača duž vođice (Slika 1-②). Za klizače je zglobnom vezom povezan po jedan kraj od dve spojke (Slika 1-⑤). Spojke su takođe međusobno povezane zglobnom vezom i ova zglobna veza između spojki čini platformu ravanskog paralelnog mehanizma MOMA. Pozicija klizača na vođicama je definisana skalarnim veličinama p_1 i p_2 i njihova vrednost se kontroliše koračnim motorima a određuje se na osnovu željene pozicije platforme paralelnog mehanizma. Pozicija platforme paralelnog mehanizma se posmatra u odnosu na nepokretni koordinatni sistem $\{B\}$ a definisana je vektorom položaja ${}^B p_P$. Veličine p_1 i p_2 predstavljaju unutrašnje koordinate paralelnog mehanizma dok su spoljašnje koordinate određene projekcijama vektora ${}^B p_P$ na ose nepokretnog koordinatnog sistema $\{B\}$ odnosno ${}^B p_P = [x_p \ y_p]^T$.

Konfiguracija ravanskog paralelnog mehanizma MOMA je određena sledećim geometrijskim veličinama:

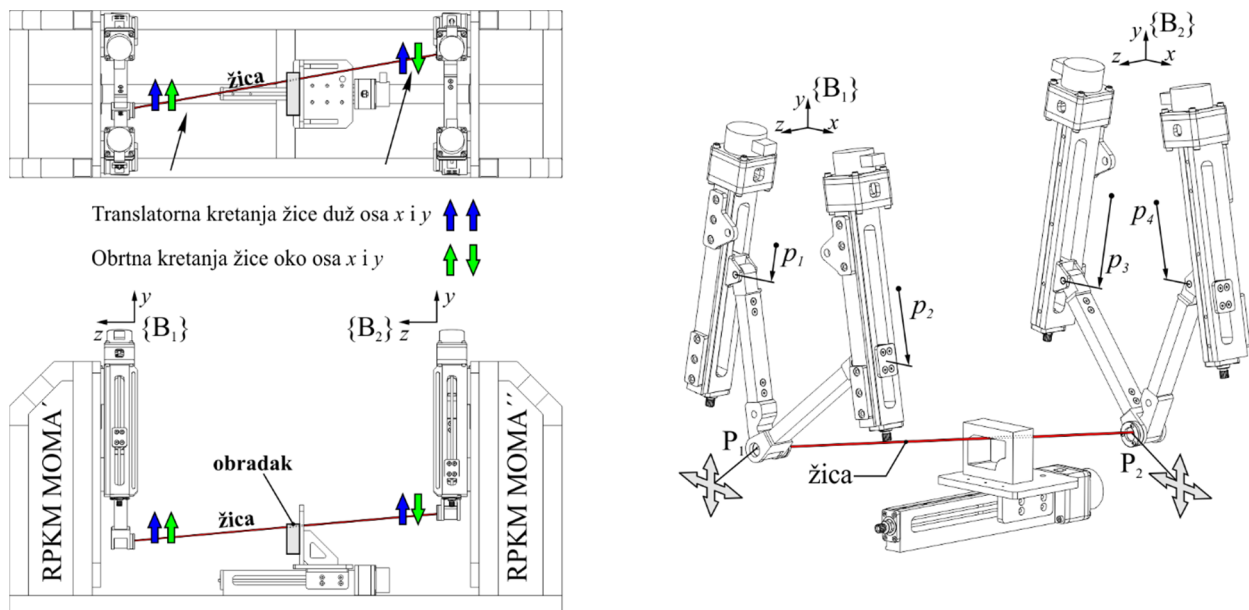
- Pozicijom referentnih tačaka R_1 i R_2 u koordinatnom sistemu $\{B\}$ odnosno vektorima ${}^B p_{R1}$ i ${}^B p_{R2}$. U referentnim tačkama unutrašnje koordinate imaju vrednost $p_1=p_2=0$;
- Uglovima orijentacije pogonskih osa g_1 i g_2 ;
- Dužinama spojki definisanih veličinama l_1 i l_2 .

Konfiguracije paralelnih mehanizama MOMA se mogu menjati promenom ugla orijentacije pogonskih osa g_i i/ili promenom dužina spojki l_i [18-25] a prema programu gradnje definisano je pet tipova mehanizma MOMA (M1, M2, M3, M4, M5). Navedene mogućnosti ravanski paralelni mehanizam MOMA svrstavaju u klasu rekonfigurabilnih mehanizama.



Slika 1. Dvoosni ravanski paralelni mehanizam MOMA

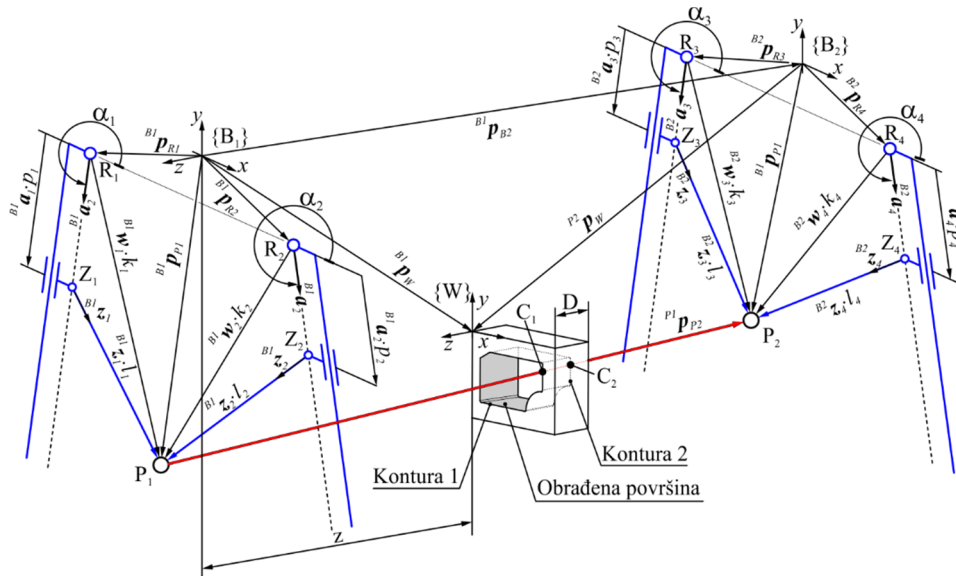
Dva ravanska paralelna mehanizma mašine alatke MOMA-W su međusobno povezani žicom (slika 2). U nastavku teksta, za ravanske paralelne mehanizme će se koristiti nazivi RPK-MOMA' i RPK-MOMA'' kao i u već objavljenim radovima [24,25]. Svaki od paralelnih mehanizama RPK-MOMA' poseduje sopstveni nepokretni koordinatni sistem $\{B_i\}$, $i=(1,2)$ a spajanjem dva dvoosna paralelna mehanizma u jednu celinu se dobija mašina alatka sa ukupno četiri stepena slobode koja se ogledaju u unutašnjim koordinatama p_1, p_2, p_3 i p_4 . Iz istog razloga se kod višeosne mašine alatke MOMA-W broj ostalih geometrijski veličina duplira. Svaka od platformi P_1 i P_2 višeosne mašine alatke MOMA-W nosi po jedan kraj žice i ima mogućnost translatornog kretanja u pravcu osa x i y . Slaganjem ovih kretanja platformi, omogućuje se translatorno kretanje žice duž osa x i y ali i obrtanje žice oko istih osa. Tokom obrade, dužina žice između platformi mehanizama RPK-MOMA' i RPK-MOMA'' je promenljiva te se u poređenju sa troosnim i višeosnim paralelnim mehanizmima slične konfiguracije žica ne može smatrati platformom višeosne mašine MOMA-W pa se i sama mašina alatka ne može okarakterisati kao mašina alatka sa potpuno paralelnim mehanizmom. Pošto su upotrebljeni ravanski paralelni mehanizmi MOMA međusobno nezavisni odnosno kretanje platforme mehanizma RPK-MOMA' ne utiče na kretanje mehanizma RPK-MOMA'' kao što je slučaj u radovima [16,17], ne može se tvrditi da žica predstavlja serijsku vezu dva paralelna mehanizma. Uzimajući u obzir prethodno navedene činjenice, višeosna mašina alatka MOMA-W se svrstava u klasu kompleksnih mašina alatki.



Slika 2. CAD model kompleksne mašine alatke MOMA-W

3. REŠENJA KINEMATSKIH PROBLEMA KOMPLEKSNE MAŠINE ALATKE MOMA-W

Prema geometrijskom modelu kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W, formiran je njen geometrijski model (slika 3.) na kome su prikazani vektori neophodni za rešavanje kinematskih problema mašine alatke MOMA-W. Osim već definisanih koordinatnih sistema $\{B_j\}$, uveden je i koordinatni sistem $\{W\}$ vezan za obradak i u kome se vrši programiranje mašine alatke. Prema standardu ISO-6983 (G-code), kod mašina alatki za proces obrade sečenja žicom relativno kretanje alata u odnosu na obradak je određeno nizom tačaka koje formiraju dve konture a obrada se vrši istovremenim kretanjem žice po obe konture. Koordinate tačaka obe konture su definisane u koordinatnom sistemu $\{W\}$ i nose oznaku x_w i y_w (koordinate tačaka prve konture) dok su tačke druge konture definisane koordinatama u_w i v_w .



Slika 3. Geometrijski model višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W

Geometrijske veličine i vektori prikazani na slici 3. predstavljaju:

- α_i Uglovi orijentacije pogonskih osa koji imaju vrednost $\alpha_i = 3\pi/2 \pm \gamma_i$;
- \mathbf{a}_i Jedinični vektori orijentacija pogonskih osa i definisani su uglovima orijentacije α_i ;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_{R_i}$ Vektori položaja referentnih tačaka R_i u nepokretnim koordinatnim sistemima $\{B_j\}$;
- ${}^{B_j}\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}_i$ Vektori unutrašnjih koordinata definisani skalarnim vrednostima p_i i vektorima orijentacija pogonskih osa \mathbf{a}_i ;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_{P_j}$ Vektori položaja platformi P_1 u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_j\}$;
- ${}^{P_2}\mathbf{p}_{P_1}$ Vektor položaja platforme P_2 u odnosu na koordinatne sisteme P_1 ;
- ${}^{B_2}\mathbf{p}_{B_1}$ Vektor položaja koordinatnog sistema $\{B_2\}$ u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_1\}$;
- ${}^{B_j}\mathbf{z}_i \cdot l_i$ Vektori spojnica određeni dužinama spojnica l_i i jediničnim vektorima ${}^{B_j}\mathbf{z}_i$;
- ${}^{B_j}\mathbf{p}_W$ Pozicije koordinatnog sistema $\{W\}$ u odnosu na koordinatne sisteme $\{B_j\}$.

Koordinate tačaka C_1 i C_2 u koordinatnom sistemu $\{W\}$ pripadaju dvema konturama i definišu trenutnu poziciju i orijentaciju žice su poznate. Prema geometrijskom modelu kompleksne mašine alatke MOMA-W, koordinate tačaka C_1 i C_2 u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ u $\{B_2\}$ se određuje vektorskim jednačinama (1) i imaju koordinate ${}^{B_j}\mathbf{p}_{C_1} = [{}^j x_{C_1} \quad {}^j y_{C_1} \quad {}^j z_{C_1}]^T$ i ${}^{B_j}\mathbf{p}_{C_2} = [{}^j x_{C_2} \quad {}^j y_{C_2} \quad {}^j z_{C_2}]^T$

$$\begin{aligned} {}^{B_j}\mathbf{p}_{C_1} &= {}^{B_j}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_{C_1} \\ {}^{B_j}\mathbf{p}_{C_2} &= {}^{B_j}\mathbf{p}_W + {}^W\mathbf{p}_{C_2} \end{aligned} \quad (1)$$

Koristeći prethodne jednačine, uzimajući u obzir da tokom obrade žica u svakom trenutku prolazi kroz određeni par tačaka, na osnovu grupe jednačina (2) se dobijaju pozicije platformi P_1 i P_2 u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$.

$$\begin{aligned}
{}^{Bj}x_{Pj} &= \frac{-{}^jz_{C1}}{{}^jz_{C2} - {}^jz_{C1}} ({}^jx_{C2} - {}^jx_{C1}) + {}^jx_{C1} \\
{}^{Bj}y_{Pj} &= \frac{-{}^jz_{C1}}{{}^jz_{C2} - {}^jz_{C1}} ({}^jy_{C2} - {}^jy_{C1}) + {}^jy_{C1}
\end{aligned} \tag{2}$$

Takođe, na osnovu geometrijskog modela kompleksne mašine alatke MOMA-W i već definisanih vektora se može napisati sledeća vektorska jednačina:

$$l_i \cdot {}^{Bj}\mathbf{z}_i = {}^{Bj}\mathbf{p}_{Pj} - {}^{Bj}\mathbf{p}_{Ri} - p_i \cdot {}^{Bj}\mathbf{a}_i \tag{3}$$

čijim se sređivanjem nakon kvadriranja dobija jednačina (4) koja predstavlja polaznu jednačinu za rešavanje kinematskih problema kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W.

$$p_i^2 - 2p_i({}^{Bj}\mathbf{a}_i \cdot k_i {}^{Bj}\mathbf{w}_i) + (k_i {}^{Bj}\mathbf{w}_i)^2 - l_i^2 = 0 \tag{4}$$

U prethodnim jednačinama indeks i može imati vrednosti $i=1,2,3,4$ i svaka veličina sa navedenim indeksom se vezuje za određenu pogonsku osu kompleksne kompleksne mašine alatke MOMA-W. Indeks j može imati vrednosti $j=1,2$ a veličine sa ovim indeksom se vezuju za mehanizme RPKM-MOMA' i RPKM-MOMA'' respektivno. Indeksi i i j su međusobno povezani tako da su geometrijske veličine jednog paralelnog mehanizma odvojene od veličine drugog paralelnog mehanizma što u stvari znači da uz indeks $j=1$ indeks i može imati vrednosti $i=1,2$ dok uz indeks $j=2$ indeks i može imati vrednosti $i=3,4$.

3.1 Inverzni kinematski problem kompleksne mašine alatke MOMA-W

Rešavanjem jednačine (4) po unutrašnjim koordinatama p_i , dobija se grupa jednačina (5) koje predstavljaju rešenje inverznog kinematskog problema kompleksne mašine alatke MOMA-W.

$$\begin{aligned}
p_i &= \frac{a_{xi}(x_{Pj} - x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - y_{Ri}) \pm}{\pm \sqrt{(a_{xi}(x_{Pj} - x_{Ri}) + a_{yi}(y_{Pj} - y_{Ri}))^2 - (x_{Pj} - x_{Ri})^2 - (y_{Pj} - y_{Ri})^2 + l_i^2}}
\end{aligned} \tag{5}$$

Jednačine (5) su u skraćenom obliku a tek nakon uvrštavanja koordinata platformi x_{Pj} i y_{Pj} definisanih jednačinama (2) se dobija konačan oblik jednačina koje predstavljaju rešenja inverznog kinematskog problema. Veličine a_{xi} i a_{yi} predstavljaju projekcije jediničnih vektora orijentacije osa \mathbf{a}_i i određeni su uglovima α_i .

3.2 Direktni kinematski problem kompleksne mašine alatke MOMA-W

Radi uopštavanja rešenja direktnog kinematskog problema kompleksne mašine alatke MOMA-W, vrednosti za indeksa $i=2$ i $i=4$ se eliminišu tako da u smenama datih jednačinama (6) indeks i može imati vrednosti $i=1,3$ a eliminisane vrednosti se nadomešćuju vrednostima $i+1$. Veza između indeksa i i j i dalje važi.

$$\begin{aligned}
{}^j t_1 &= 2(p_i \cdot a_{xi} + x_{Ri}) ; \quad {}^j t_2 = 2(p_i \cdot a_{yi} + y_{Ri}) \\
{}^j t_3 &= p_i^2 + 2p_i(a_{xi} \cdot x_{Ri} + a_{yi} \cdot y_{Ri}) + x_{Ri}^2 + y_{Ri}^2 - l_i^2 \\
{}^j t_4 &= 2(p_{i+1} \cdot a_{xi+1} + x_{Ri+1}) ; \quad {}^j t_5 = 2(p_{i+1} \cdot a_{yi+1} + y_{Ri+1}) \\
{}^j t_6 &= p_{i+1}^2 + 2p_{i+1}(a_{xi+1} \cdot x_{Ri+1} + a_{yi+1} \cdot y_{Ri+1}) + x_{Ri+1}^2 + y_{Ri+1}^2 - l_{i+1}^2 \\
{}^j t_7 &= \frac{{}^j t_6 - {}^j t_3}{{}^j t_4 - {}^j t_1} ; \quad {}^j t_8 = \frac{{}^j t_2 - {}^j t_5}{{}^j t_4 - {}^j t_1} ; \quad {}^j t_9 = \frac{{}^j t_2 + {}^j t_4 - {}^j t_1 + {}^j t_5}{{}^j t_4 - {}^j t_1} \\
{}^j t_{10} &= 2 \cdot {}^j t_7 \cdot {}^j t_8 - {}^j t_1 \cdot {}^j t_8 + {}^j t_2 ; \quad {}^j t_{11} = {}^j t_7^2 - {}^j t_1 \cdot {}^j t_7 + {}^j t_3
\end{aligned} \tag{6}$$

Koristeći prethodne smene i rešavajući jednačinu (4) po koordinatama platformi x_P i y_P u koordinatnim sistemima $\{B_1\}$ i $\{B_2\}$, dobija se zavisnost pozicija platformi od unutrašnjih koordinata p_i i data jednačinama

(7) koje predstavljaju rešenja direktnih kinematskih problema paralelnih mehanizama RPKM-MOMA' i RPKM-MOMA''.

$$y_{Pj} = \frac{-j_{t_{10}} \pm \sqrt{j_{t_{10}}^2 - 4 \cdot j_{t_9} \cdot j_{t_{11}}}}{2 \cdot j_{t_9}} \quad (7)$$

$$x_{Pj} = j_{t_7} + j_{t_8} \cdot y_{Pj}$$

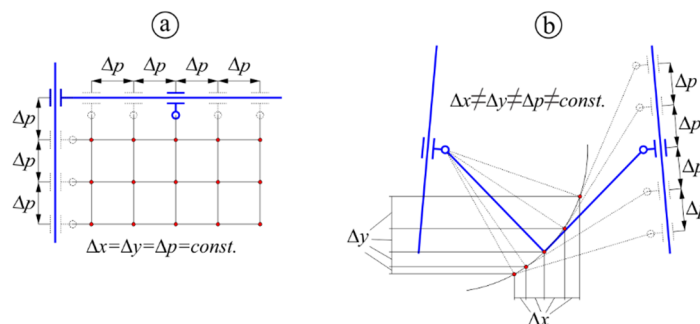
Kombinujući jednačine (2) sa jednačinama (7), dobijaju se jednačine (8) koje predstavljaju rešenje direktnog kinematskog problema kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W odnosno zavisnost koordinata tačaka C_1 i C_2 (tačke koje pripadaju programiranim konturama) od unutrašnjih koordinata p_i .

$$x_{C,k} = \frac{j_{Z_{C,k}} - j_{Z_{P1}}}{j_{Z_{P2}} - j_{Z_{P1}}} (j_{x_{P2}} - j_{x_{P1}}) + j_{x_{P1}}$$

$$y_{C,k} = \frac{j_{Z_{C,k}} - j_{Z_{P1}}}{j_{Z_{P2}} - j_{Z_{P1}}} (j_{y_{P2}} - j_{y_{P1}}) + j_{y_{P1}} \quad (7)$$

4. REZOLUCIJA RAVANSKOG PARALELNOG MEHANIZMA MOMA

Rezolucija bilo kog mehanizma je definisana kao minimalni pomeraj završnog uređaja mehanizma u određenom pravcu i prvenstveno zavisi od konstrukcije pogonskih osa a potom i od konfiguracije samog mehanizma. Konvencionalne mašine alatke namenjene za proces obrade sečenja žicom se zasnovanju na serijskom dvoosnom mehanizmu kod kojih je rezolucija konstantna u celom dostizivom radnom prostoru (slika 4.a). Za razliku od konvencionalnih mašina alatki, kod kompleksne mašine alatke MOMA-W, rezolucija upotrebljenih dvoosnih paralelnih mehanizma je promenljiva zbog same konstrukcije mehanizma (slika 4.b). Naime, linearno kretanje jednog klizača duž vođice za vrednost Δp uzrokuje kretanje platforme paralelnog mehanizma po kružnom luku pa samim time i pomeraji Δx i Δy zavise od trenutne pozicije platforme.

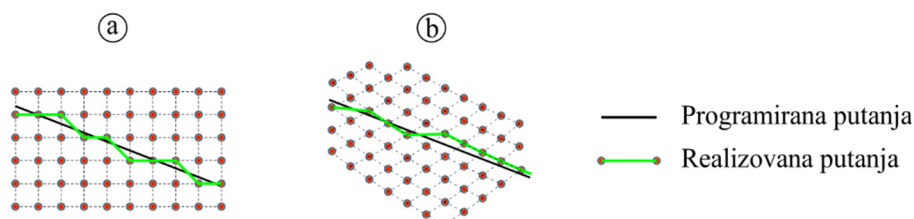


Slika 4. Raspodela rezolucije: a) Serijskih dvoosnih ravanskih mehanizama; b) Paralelnih dvoosnih ravanskih mehanizama

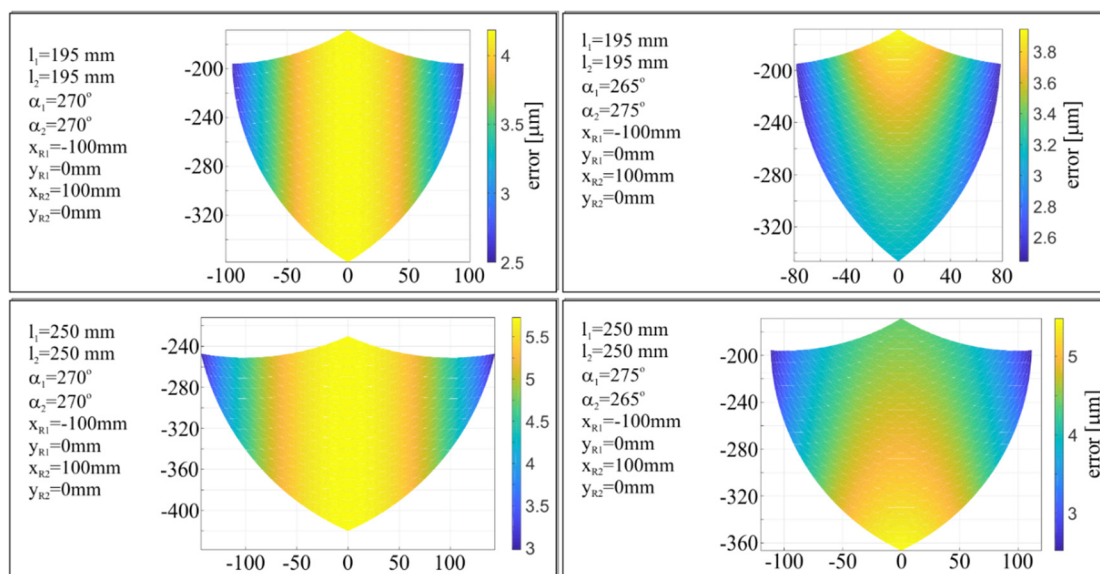
Veličina Δp predstavlja rezoluciju pogonske ose a njena vrednost zavisi minimalnog ugla zaokreta koračnog motora α_{sm} pogonske ose i od koraka zavojnog vretena s koje obrtno kretanje koračnog motora pretvara u translatorno kretanje klizača duž vođice. Uzimajući u obzir način rada koračnih motora, jasno je da će mehanizmi bilo serijski ili paralelni praviti grešku tokom rada to jest odstupanje realizovane od programirane putanje što je i prikazano na slici 5. Kao što se vidi na slici, na celoj putanji postoji izvesna greška i njena maksimalna vrednost može iznositi polovini rastojanja između dve susedne tačke radnog prostora.

Uzimajući uobičajenu vrednost ugla zaokreta koračnog motora $\alpha_{sm}=1.8^\circ$ koja odgovara zaokretu rotora za jedan dovedeni impuls na kalemove motora i korak zavojnog vretena $s=1\text{mm}$, dobija se rezolucija pogonske ose $\Delta p = \alpha_{sm} \cdot s / 360 = 5\mu\text{m}$. Ova vrednost rezolucije pogonske ose je korištena za analizu greške pozicioniranje platforme različitih konfiguracija ravanskog paralelnog. Koristeći jednačine (6) i (7) za samo jedan ravanski paralelni mehanizam MOMA, za vrednosti unutrašnjih koordinata su uzimane vrednosti $p_i=0$ do $p_i=200\text{mm}$ sa korakom $\Delta p = 0.005\text{mm}$. Za svaku izračunatu poziciju platforme definisanu koordinatama x_p i y_p , izračunate su koordinate osam susednih tačaka pri čemu se važećim unutrašnjim koordinatama dodavana ili oduzimate vrednosti Δp a potom i rastojanje između tekuće pozicije platforme i osam susednih tačaka. Za

grešku pozicioniranja je uzeta polovina najveće vrednosti od osam izračunatih rastojanja između tekuće pozicije platforme i susjednih tačaka. Rezultati analize različitih konfiguracija ravnog paralelnog mehanizma su prikazani na slici 6.



Slika 5. Odstupanje realizovane od programirane putanje: a) Serijskih mehanizama; b) Paralelnih mehanizama



Slika 6. Raspodela rezolucije različitih konfiguracija ravnog paralelnog mehanizma MOMA

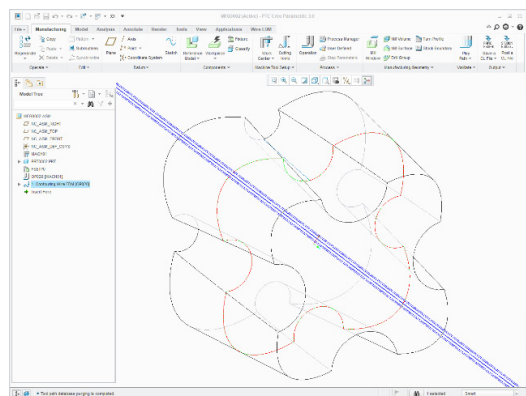
Prikazane raspodele grešaka predstavljaju samo potencijalnu grešku koju mehanizam može napraviti u određenom delu radnog prostora a stvarna greška koja će se napraviti tokom rada mehanizma zavisi od programirane putanje platforme mehanizma i ne može biti veća od grešaka dobijenih prethodnom analizom.

3. ANALIZE GREŠAKA RAZLIČITIH KONFIGURACIJA MAŠINE ALATKE MOMA-W

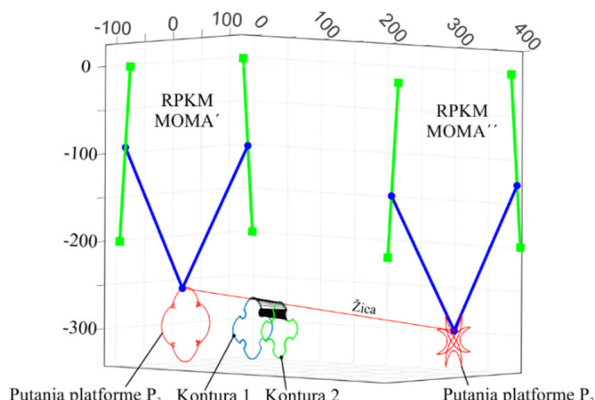
U svrhu verifikacije izvedenih jednačina, formiran je 3D model dela za koji je pomoću CAD/CAM sistema PTC Creo Parametric 3.0 definisana strategija obrade *Contouring Wire EDM* (Slika 7.a). Odgovarajućim postprocesorom je formiran G-kôd na osnovu koga su vršene analize različitih konfiguracija kompleksne višeosne mašine MOMA-W. Za analizu je korišten MatLAB kôd u kome su implementirane prethodno izvedene jednačine. Simulacija rada mašine alatke MOMA-W na osnovu izvedenih jednačina i definisane geometrije, prikazana je na slici 7.b. Tokom analiza za isti G-kôd u MatLAB kôd-u su menjani parametri koji definišu geometriju kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W tako da je analizirano pet različitih konfiguracija. Geometrijski parametri različitih konfiguracija kompleksne mašine alatke MOMA-W su dati u tabelama 1.a i 1.b.

Tabela 1.a Geometrijski parametri višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W									
	x_{R1}	y_{R1}	x_{R2}	y_{R2}	α_1	α_2	l_1	l_2	${}^{B1}p_W$
K1	-100	0	100	0	0	0	195	195	$[0 \ -250 \ 100]^T$
K2	-100	0	100	0	0	0	250	250	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K3	-100	0	100	0	265	275	180	180	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K4	-100	0	100	0	275	265	195	195	$[0 \ -300 \ 100]^T$
K5	-200	0	200	0	155	205	450	450	$[0 \ -500 \ 100]^T$

Tabela 1.b Geometrijski parametri višeosne kompleksne mašine alatke MOMA-W									
	X_{R3}	Y_{R3}	X_{R4}	Y_{R4}	α_3	α_4	l_3	l_4	${}^{B1}p_{B2}$
K1	-100	0	100	0	0	0	195	195	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K2	-100	0	100	0	0	0	250	250	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K3	-100	0	100	0	265	275	180	180	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K4	-100	0	100	0	275	265	180	180	$[0 \ 0 \ 400]^T$
K5	-150	50	150	50	155	205	400	400	$[0 \ 0 \ 400]^T$



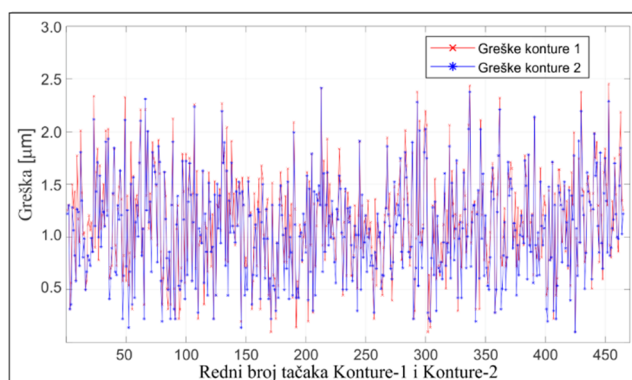
a)



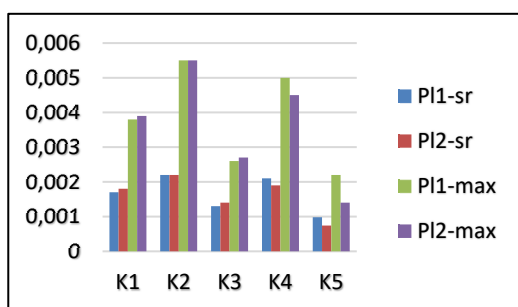
b)

Slika 7. Simulacija obrade: a) Definisanom strategijom Contouring Wire EDM; b) Simulacija rada mašine alatke MOMA-W konfiguracije K3 u MatLAB okruženju

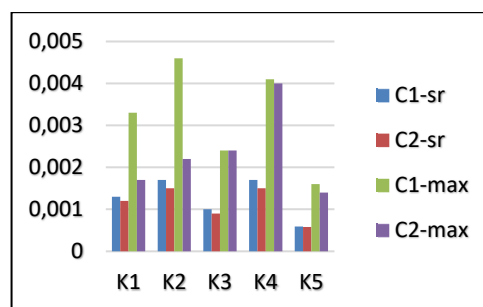
Kao što je već rečeno, tokom rada mašina pravi manju ili veću grešku. Upoređivanjem programiranih koordinata tačaka dve konture sa koordinatama tačaka koje su stvarno realizovane, dobija se greška obrade kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W. Na slici 8 su prikazane greške realizovanja programiranih kontura za konfiguraciju K3 mašine alatke MOMA-W dok je na slici 9 prikazan uporedni prikaz srednjih i maksimalnih grešaka pozicioniranja platformi P_1 i P_2 kao i srednje i maksimalne greške realizovanih pozicija tačaka C_1 i C_2 .



Slika 7. Greške obrade kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W konfiguracije K3



a)



b)

Slika 7. Uporedni prikaz grešaka različitih konfiguracija mašine alatke MOMA-W: a) Greške pozicioniranja platformi paralelnih mehanizama; b) Greške realizovanja programiranih tačaka Konture-1 i Konture-2

9. ZAKLJUČAK

U okviru rada je analizirana jedna kompleksna višeosna mašina alatka namenjena za proces obrade sečenja žicom. Koncept mašine alatke se bitno razlikuje od postojećih mašina alatki namenjenih za isti proces obrade po tome što je sačinjena od dva ravanska rekonfigurabilna paralelna mehanizma. Cilj rada je bio da pokaže opravdanost gradnje a potom i upotrebe prikazane mašine alatke. Kroz prikazane analize razmatrao se uticaj promenljive rezolucije upotrebljenih paralelnih mehanizama na tačnost obrade. Na osnovu dobijenih rezultata je ustanovljeno da bilo kakve promene konfiguracije mašine bitno utiču na krajnji rezultat obrade. Tako su neke od analiziranih konfiguracija pravile velike greške dok su se neke od konfiguracija pokazale kao izuzetno dobre i pravile grešku višestruko manju od rezolucije pogonskih osa. Na osnovu sprovedenih analiza, može se potvrditi opravdanost upotrebe predložena konfiguracija kompleksne višeosne mašine alatke MOMA-W za proces obrade sečenja žicom.

Istraživanja vezana za ovaj rad osim što su ostvarila postavljen cilj, postavila su i teme za buduća istraživanja vezana za prikazanu mašinu alatku. Dalja istraživanja će biti usmerena ka određivanju optimalne konfiguracije za unapred definisanu veličinu radnog prostora pri čemu će se uzimati u obzir i neuobičajene konfiguracije paralelnih mehanizama MOMA poput konfiguracija sa različitim dužinama spojki, sa spojkama koje imaju prepust, sa nesimetričnim uglovima orijentacije pogonskih osa itd. i očekuje se da se postignu bolji rezultati od rezultata prikazanih u ovome radu.

10. LITERATURA

- [1] McGee W., Feringa J., Sndergaard A.: *Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*, Springer, Vienna, 2013. DOI: [10.1007/978-3-7091-1465-0_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1465-0_5)
- [2] Søndergaard A., et al.: *Robotic hot-blade cutting*, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Springer, Cham, 2016, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_11
- [3] Jovanovic M., Rakovic M., Tepavcevic B., et al.: *Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels*, *Automation in Construction* Vol. 74, pp. 28–38, 2017. DOI: [10.1016/j.autcon.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.003)
- [4] Lee S.H., Ahn D.G., Yang D.Y.: *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. DOI: [10.1007/s00170-002-1456-2](https://doi.org/10.1007/s00170-002-1456-2)
- [5] Brooks H., Aitchison D.: *A review of state of the art large sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies*, *Rapid Prototyping Journal* Vol. 16, pp. 318–327, 2010. DOI: [10.1108/13552541011065713](https://doi.org/10.1108/13552541011065713)
- [6] Hamade R., Zeineddine F., Akle B., Smaili A.: *Modelangelo: A subtractive 5-axis robotic arm for rapid prototyping*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol. 21, No. 2, pp. 133–144, 2005. DOI: [10.1016/j.rcim.2004.06.004](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.06.004)
- [7] Zivanovic S., Puzovic R., *Off-line programming and simulation for 2-axis wire-edm*, *FME Transactions* Vol. 43, No. 2, pp. 138–143, 2015. DOI: [10.5937/fmet1502138Z](https://doi.org/10.5937/fmet1502138Z)
- [8] Pandit P.L., Patil S.A., *Effect of wedm parameters on MRR of carbide austempered ductile iron*, *International Journal of Science and Research* Vol. 6, pp. 384–387, 2015. ISSN (Online): 2319-7064
- [9] Cheng X., Wang Z.G., Kobayashi S., Nakamoto K., Yamazaki K.: *Development of a six-axis wire electrical discharge machine for the fabrication of micro end mills*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Vol. 223, No. 2, pp. 121–131, 2009. DOI: [10.1243/09544054JEM1299](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1299)
- [10] Tanev T.K.: *Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator*, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 35, No. 9, pp. 1183–1196, 2000. DOI: [10.1016/S0094-114X\(99\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00073-7)
- [11] Wu J., Wang J., Li T., Wang L.: *Dynamic analysis of the 2DOF planar parallel manipulator of a heavy duty hybrid machine tool*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 413–420, 2007. DOI: [10.1007/s00170-006-0605-4](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0605-4)
- [12] Wu J., Li T., Liu X., et al.: *Optimal kinematic design of a 2-DOF planar parallel manipulator*, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 269–275, 2007. DOI: [10.1016/S1007-0214\(07\)70040-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70040-8)
- [13] Wu J., Wang J., Li T., Wang L.: *Analysis and application of a 2-DOF planar parallel mechanism*, *ASME Journal of Mechanical Design* Vol. 129, No. 4, pp. 434–437, 2007. DOI: [10.1115/1.2437800](https://doi.org/10.1115/1.2437800)
- [14] Sun T., WU H., Lian B., et al.: *Stiffness modeling, analysis and evaluation of a 5 degree of freedom hybrid manipulator for friction stir welding*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 331, No.13, pp. 4441–4456,2016. DOI: [10.1177/0954406216668911](https://doi.org/10.1177/0954406216668911)

- [15] Huang T., Li Z., Li M., et al.: Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 2-dof translational parallel robot for pick-and-place operations, ASME Journal of Mechanical Design Vol. 126, No. 3, pp. 449–455, 2004. DOI: [10.1115/1.1711822](https://doi.org/10.1115/1.1711822)
- [16] Zheng X.Z., Bin H.Z., Luo Y.G.: *Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, No. 11–12, pp. 925–930, 2004. DOI: [10.1007/s00170-003-1782-z](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1782-z)
- [17] Romdhane L.: *Design and analysis of a hybrid serial manipulator*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 34, No. 7, pp. 1037–1055, 1999. DOI: [10.1016/S0094-114X\(98\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(98)00079-2)
- [18] Vasilic G., Živanović S., Kokotović B., Glavonjić M.: *Optimizacija dužina spojki dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma - MOMA*, 39. JUPITER konferencija, 35. simpozijum NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-838-3, str. 3.28-3.35, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, oktobar 2014.
- [19] Vasilic G., Živanović S.: *Modeliranje i analiza rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA sa osnaženim translatorskim zglobovima*, TEHNIKA: Časopis saveza inženjera i tehničara Srbije, Tehnika-Mašinstvo, Broj 1, str. 57-63, 2016. DOI: [10.5937/tehnika1601057V](https://doi.org/10.5937/tehnika1601057V)
- [20] Vasilic G., Živanović S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog dvoosnog paralelnog mehanizma MOMA*, 40. Jupiter konferencija, 36. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-893-2, str. 3.47-3.54, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Maj 2016.
- [21] Živanović S., Glavonjić M., Kokotović B., Dimić Z.: *Stona dvoosna rekonfigurabilna mašina sa paralelnom kinematikom – MOMA*, Tehničko rešenje (Novi laboratorijski proizvod, M82), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [22] Živanović S., Dimić Z., Vasilic G., Kokotović B.: *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, Tehnika-Mašinstvo, Vol. 67, No. 4, pp. 519-526, 2018. DOI: [10.5937/tehnika1804519Z](https://doi.org/10.5937/tehnika1804519Z)
- [23] Živanović S., Vasilic G., *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, B&H, Republic of Srpska, 2-5. December 2014.
- [24] Vasilic G., Živanović S.: *Analiza radnog prostora rekonfigurabilnog četvoosnog mehanizma sa hibridnom kinematikom sa proces obrade sečenja žicom*, 41. Jupiter konferencija, 37. simpozijum, NURoboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-978-6, str. 3.45-3.53, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Jun 2018.
- [25] Vasilic G., Živanović S.: *Configuring and analysis of complex multi-axis reconfigurable machine for wire cutting process*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 147, pp. 103833, 2020. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103833)

Vasilic, G., Živanović, S

INFLUENCE OF RESOLUTION OF PLANAR PARALLEL MECHANISM ON THE ACCURACY OF A COMPLEX MACHINE TOOL FOR THE WIRE CUTTING PROCESS

Abstract: Within this paper, a complex multi - axis machine tool is presented, which is intended for the wire cutting processing. The complex machine tool consists of two two-axis reconfigurable parallel mechanisms connected by a wire, which in this case represents the tool of the machine itself. The resolution of parallel mechanisms is not constant within the entire workspace, so the positioning errors of the platform have different values in different parts of the workspace. These errors are reflected in the machining process errors of a complex multi-axis machine, and in this paper an analysis is presented that connects the positioning errors of the platforms of parallel mechanisms with the processing errors. Also, the possibility of reducing the machining error by reconfiguring the parallel mechanisms from which the complex multi-axis machine intended for the wire cutting processing is made is considered.

Key words: Inverse and direct kinematics problems, Planar parallel mechanism, Complex machine tool, Wire cutting