

Mašine alatke sa hibridnom kinematikom

SAŠA T. ŽIVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-4950-8203

SLOBODAN N. TABAKOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

ORCID: 0000-0001-6470-2376

ZORAN Ž. DIMIĆ, LOLA Institut, Beograd

ORCID: 0000-0002-1496-4981

Pregledni rad

UDC: 621.9:531.1

621.9:004.388

DOI: 10.5937/tehnika2404445Z

Značajan pravac za inovacije i razvoj novih mašina alatki je razvoj mašina alatki sa hibridnom kinematikom (MHK) koja ima odgovarajuće prednosti serijskog i paralelnog mehanizma. Ovaj rad razmatra i daje pregled razvijenih domaćih konfiguracija mašina sa hibridnom kinematikom. U radu su prikazane originalne konfiguracije mašina na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu i Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu.

Ključne reči: mašine sa hibridnom kinematikom, CAD/CAM, virtuelna mašina

1. UVOD

Kinematička struktura većine mašina alatki je zasnovana je na serijskom mehanizmu. Zahtevi u pogledu dinamike, krutosti, brzohodnosti i preciznosti mašina alatki doveli su do ideja za primenu mašina sa paralelnom kinematikom (MPK). Paralelna kinematika poseduje veći potencijal da ispuni ove zahteve. Složenost paralelnog mehanizma usporava razvoj i integraciju ove vrste mašina u industriju. Zbog toga je primena mašina alatki sa hibridnom kinematikom (MHK) koje predstavljaju kombinaciju paralelnih i serijskih mehanizama, kompromis sa dobrim performansama, posebno kada je reč mašinama alatkama za višesonu obradu [1].

2. PREGLED KONCEPCIJA MAŠINA SA HIBRIDNOM KINEMATIČKOM U SVETU

U poređenju sa serijskim mašinama alatkama, MPK imaju mnoge prednosti. Korišćene su mnoge različite topologije paralelnih mehanizama sa 3-6 stepena slobode. Nije uvek nepходно da mašine imaju više od 3 stepena slobode, ukoliko ne zahtevaju višesonu obradu. Ako je nepходna višesona obrada onda u

zavisnosti od topologije mehanizma, mogu postojati značajna ograničenja u pogledu ostvarivanja željenih uglova orijentacije pokretne platforme. Uzimajući u obzir da postoje ograničenja koja su zaista posledica topologije paralelnih mehanizama, pažnju istraživanja privlače mehanizmi zasnovani na hibridnim kinematičkim strukturama gde su kombinovani serijski i paralelni mehanizmi [2,].

Ima puno realizovanih koncepcija i paralelnih i hibridnih mehanizama. Ovde se razmatra pregled nekih osnovnih koncepcija mašina sa hibridnom kinematikom (MHK) [1, 2, 4-6] u svetu, kao i pregled naših domaćih istraživanja, kroz više ciklusa nacionalnih projekata.

Dodavanje serijskih mehanizama sa 1 ili 2 stepena slobode paralelnim mehanizmima se pri konfigurisanju hibridnih kinematičkih struktura radi iz dva osnovna razloga:

- da se poveća broj stepeni slobode mehanizma, kao na primer u slučaju Delta, Tricept, TriJoint mehanizama i
- za povećanje opsega orijentacije glavnog vretena na pokretnoj platformi koji je uobičajno mali kod čisto paralelnih mehanizama sa 6 stepeni slobode (Stjuart-Gočovi mehanizmi), kao na primeru u slučaju Geodetic mašine sa paralelnom kinematikom.

U cilju opisa formalizma za predstavljanje kinematičkih struktura mašina alatki, na slici 1 su

Adresa autora: Saša Živanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

e-mail: szivanovic@mas.bg.ac.rs

Rad primljen: 17.06.2024.

Rad prihvaćen: 17.07.2024.

prikazane najčešće korišćene kinematičke veze u mehanizmima mašina alatki i robota sa paralelnom i hibridnom kinematikom. Ovi spojevi su međusobno povezani odgovarajućim krutim segmentima.

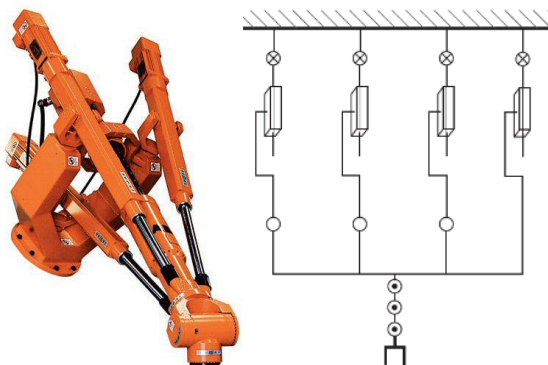
U cilju poređenja kinematičkih struktura koncepcija razvijenih u svetu sa našim domaćim istraživanjima mašina sa hibridnom kinematikom, iskorišćeno je predstavljanje kinematičke strukture odgovarajućim šemama, koje koriste kinematičke veze predstavljene u slici 1.

Naziv	Šematski prikaz	SS	Kretanje
Obrtni		1	rotacija
Translatorni		1	Translacija
Zavojni		1	Spregnuta rotacija i translacija
Unverzalni/ Kardanski		2	Rotacija (2x)
Cilindrični		2	Translacija (1x) Rotacija (1x)
Sferni		3	Rotacija (3x)

● Tačka povezivanja

Slika 1 - Šematski prikaz kinematičkih veza [1]

Kinematička šema pojednostavljuje opis strukture mehanizma na njegove osnovne komponente, osnovne kinematičke veze i krute segmente (koji međusobno povezuju zglobove). Kinematička šema ne uključuje informacije o aktuatorima ili geometrijskim dimenzijama. Kinematičke šeme poznatih koncepcija MHK [1] ilustrovane su na slikama 2-6.

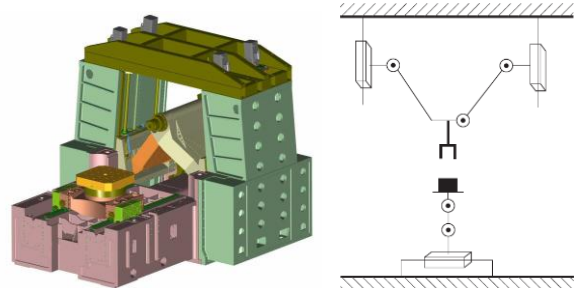


Slika 2 - ABB IRB 940 Tricept [1]

Na slici 2 je pokazan jedan od najpoznatijih robotskih hibridnih kinematičkih mehanizama, Tricept. Njegova kinematika je sastavljena od paralelnog i serijskog dela. Paralelni mehanizam je deo zatvorene petlje, a serijski deo mehanizma otvorene petlje i jasno su vidljivi na prikazanoj kinematičkoj šemi, koja jasno pokazuje strukturu mehanizma. Ovde je razlog

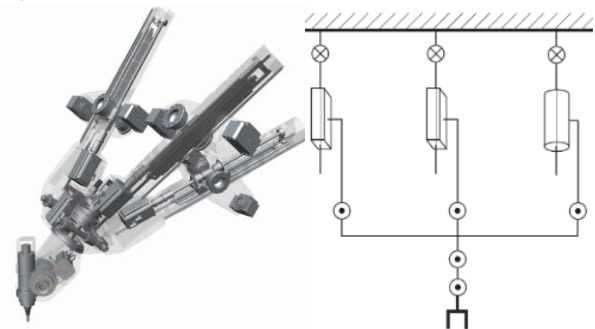
dodavanja serijskog mehanizma povećanje broja stepeni slobode, ali i povećanje orijentacije pokretne platforme. Robot, sa slike 2 je dobro poznat 6-osni hibridno-kinematički robot kompanije ABB, koji se može koristiti za zadatke višeosne obrade.

Na slici 3 je prikazana mašina alatka Trijoint 900H [7] kompanije Kovosvit, koja predstavlja jedan horizontalni obradni centar. Ovde je kinematički deo mašine alatke na grani alata zasnovan na paralelnoj kinematici gde se translacija u X,Y ravni realizuje paralelnim mehanizmom u vidu makaza. Glavno vreteno je orijentisano horizontalno, a translatorna osa Z je serijska i nalazi se na kinematičkoj grani radnog predmeta. Ovo je hibridna kinematička struktura gde je kombinovan jednostavni paralelni mehanizam sa 2 stepena slobode sa dodatnim serijskim mehanizmom sa 3 stepena slobode, na grani obratka.



Slika 3 - Trijoint 900H obradni centar [1]

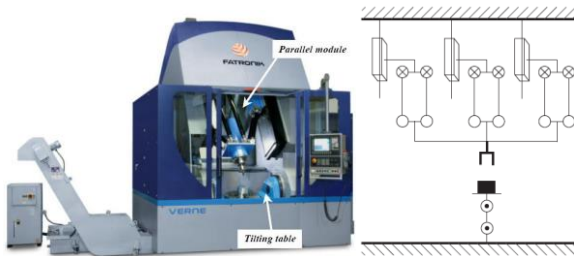
Na osnovu iskustva napravljenog sa Tricept robotom, K.-E. Neumann je razvio novi koncept hibridnog mehanizma, Exechon [8]. Ovaj novi koncept takođe predstavlja mašinu alatku sa 5 stepeni slobode, koja može da se koristi za višeosnu obradu. Novo rešenje Exechon, ima modifikacije i poboljšanja u poređenju sa Tricpetom, jer novi dizajn eliminiše centralni, pasivni podupirač, koji je bio izložen torziji. Slično kao i kod Tricpeta ima dvoosnu obrtnu glavu kao serijski mehanizam sa 2 stepena slobode na kraju kinematičkog lanca.



Slika 4 - Exechon petoosna MHK [1]

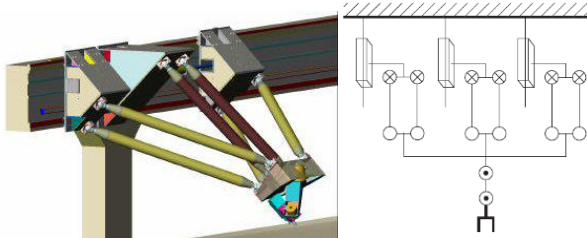
Sledeća mašina je pod nazivom VERNE koju je razvio Fatronik [9], a prikazana je na slici 5. Na grani alata se nalazi paralelno-kinematički modul sa DELTA mehanizmom koji ostvaruje translacije (X,Y i Z) u prostoru. Na grani radnog predmeta je serijski nagibno

obrtne radni sto sa 2 stepena slobode. Na ovakav način konstruktori su od troosne MPK, dodavanje dvoosnog radnog stola konfigurisali petoosni obradni centar za višesonu obradu.



Slika 5 - Verne petoosni obradni centar [1]

Kompanija Reichenbacher GmbH, specijalizovana za proizvodnju CNC mašina alatki za obradu drveta, razvila je mašinu zasnovanu na DELTA konceptu (slika 6), koja je poznata kao PEGASUS [1].



Slika 6 - Pegasus petoosna mašina alatka za obradu drveta [1]

Za razliku od prethodno razmatrane koncepcije VERNE, PEGASUS koncepcija ima kinematičku strukturu u kojoj sva kretanja vrši alat i ima dvoosnu obrtnu glavu na pokretnoj platformi. Ovakva struktura mašine pogoduje prirodi delova koji se obrađuju jer su uobičajeno velikih dimenzija, pa se tokom obrade ne pomeraju.

Neke od karakterističnih kinematičkih struktura mašina sa hibridnom kinematikom analizirane su na prethodnim slikama, dok će rezultati domaćeg razvoja biti predstavljeni u nastavku.

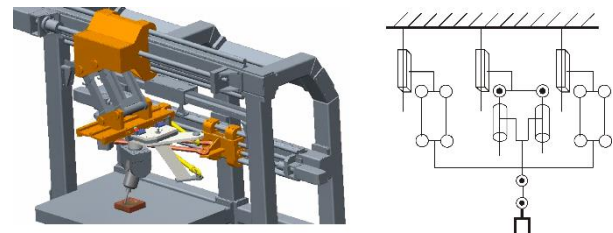
3. MAŠINE SA HIBRIDNOM KINEMATIKOM - DOMAĆI RAZVOJ

U narednom poglavlju dat je pregled istraživanja i razvoja domaćih prototipova mašina sa hibridnom kinematikom. Rezultati ovih istraživanja deo su projekata na Univerzitetu u Beogradu, Mašinskom fakultetu i Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, uz podršku resornog ministarstva Republike Srbije.

3.1. LOLA_pn101_V5

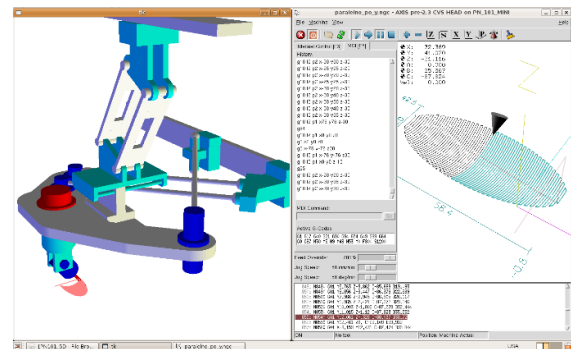
Prva mašina domaćeg razvoja sa hibridnom kinematikom je realizovana u okviru projekta na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, TR6309B 5-osne paralelne mašine, uz podršku Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Srbije i LOLA Sistema, MAU,

Beograd [10]. U osnovi, radi se o istraživanju razvoja prototipa 5-osne mašine sa hibridnom kinematikom. Mašina je zasnovana na patentiranom troosnom paralelnom mehanizmu [11] i serijskoj dvoosno obrtnoj glavi sa 2 stepena slobode na kraju kinematičkog lanca, slika 7. Sva kretanja ovde se izvode na grani alata, pa po strukturi odgovara mašini tipa Pegasus. Paralelno-kinematički modul sa mehanizmom LOLA pn101_4 ostvaruje translacije (X, Y i Z) u prostoru. Na pokretnoj platformi serijska dvoosna obrtna glava ostvaruje zadatu orijentaciju alata.



Slika 7 - LOLA pn101_V5

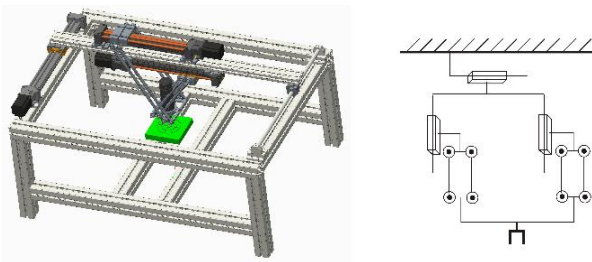
Mašina je realizovana do nivoa virtuelnog prototipa, ali je zbog nedostatka sredstava ostala na nivou troosne MPK. Pored varijante industrijskog prototipa, istraživanje je sprovedeno i na stonj verziji mašine [12], za koju je realizovan sistem upravljanja sa integrisanom virtuelnom mašinom na bazi LinuxCNC (EMC2), slika 8. Ova verzija mašine je potvrdila i verifikovala kinematiku mašine, koja je implementirana u sistem upravljanja otvorene arhitekture. Ova virtuelna mašina se koristi na Univerzitetu u Beogradu – Mašinskom fakultetu u edukaciji studenata u oblasti mašina sa hibridnom kinematikom i u višesonoj obradi.



Slika 8 - Virtuelna mašina sa hibridnom kinematikom pn101_V5

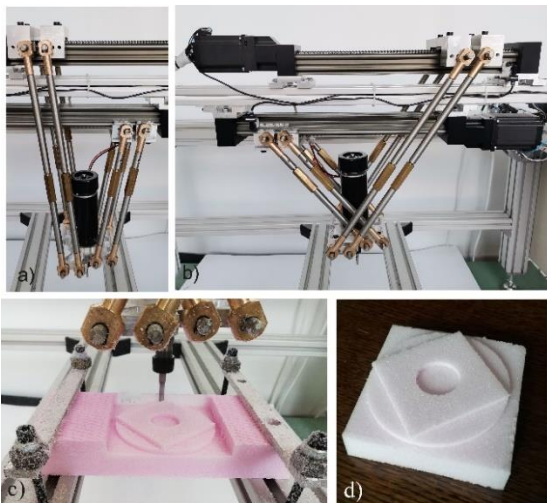
3.2. O-X glide mehanizam

Ovaj mehanizam je realizovan u okviru projekta na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. O-X glide mehanizam je patentirani mehanizam [13] sa hibridnom kinematikom uzet kao osnova mehaničke strukture nove koncepcije mašine alatke [14-16]. Ovakav tip mašine alatke je nastao kao kombinacija dvoosnog paralelnog mehanizma O-X i noseće konstrukcije koja omogućava njeno translatorno kretanje, slika 9.



Slika 9 - O-X glide mehanizam za troosnu mašinu sa hibridnom kinematikom

O-X glide je ravanski paralelni mehanizam sa dva stepena slobode projektovan tako da izvršni mehanizam mašine može da se ponaša dvostruko kao dva paralelna mehanizma sa različitim karakteristikama u pogledu: dimenzija radnog prostora, krutosti, brzine itd. Na slici 10 prikazan je realizovani prototip mašine sa hibridnom kinematikom u opruženoj (O)- slika 10a i ukrštenoj (X) konfiguraciji, slika 10b. Primer eksperimentalne verifikacije razvijene mašine sa hibridnom kinematikom realizovan je obradom prilagođenog test probnog dela, koji je prikazan na slikama 10c, d.

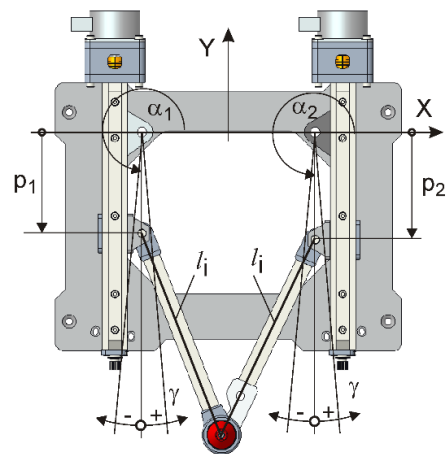


Slika 10 - Realizovani prototip O-X glide mašine sa hibridnom kinematikom tokom obrade probnog dela

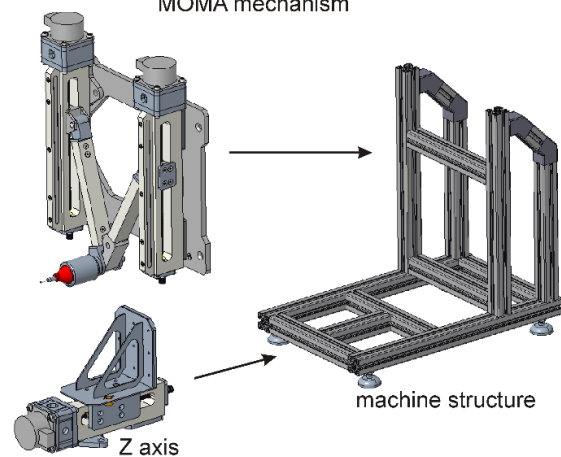
3.3. MOMA V3

Još jedna troosna varijanta mašine se hibridnom kinematikom realizovana je u okviru projekta na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, uz podršku Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije, kao stona verzija mašine [17, 18, 19] koja se aktivno koristi u laboratorijskim vežbama i izradi seminarskih i master radova.

MOMA V3 je uspostavljena kao modularni sistem na osnovu kojeg se može izvršiti rekonfigurisanje i hardverskog i softverskog dela mašine. Ovde se koristi integrisana funkcija rekonfigurisanja u paralelnom mehanizmu same mašine, kao i mogućnost zamene nogu paralelnog mehanizma, slika 11.

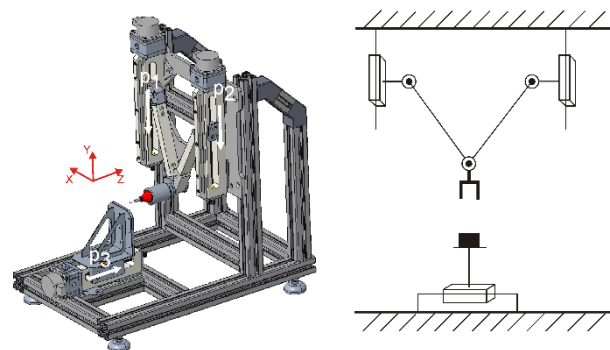


2-axis reconfigurable MOMA mechanism



Slika 11 - MOMA V3 – troosna rekonfigurabilna mašina sa hibridnom kinematikom [19]

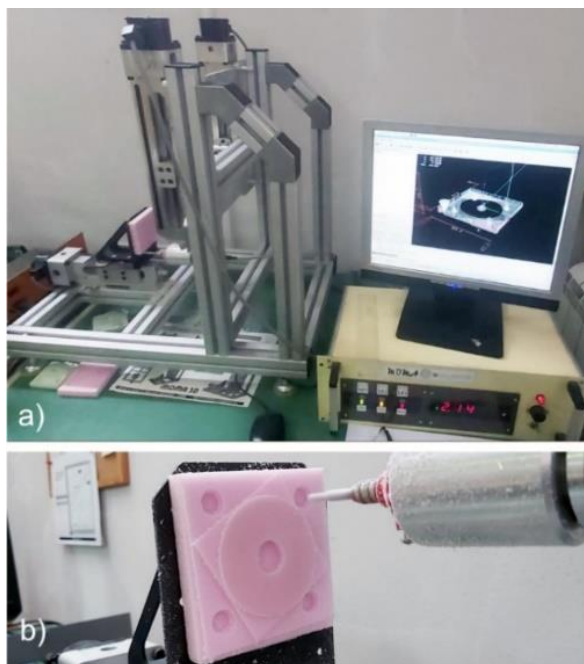
Paralelni mehanizam je zasnovan na modularnom principu, dok se njegova rekonfigurabilnost ogleda u tome što se može menjati orijentacija modula translacionih osa (rotacija oko pasivnih obrtnih osa za ugao α_i), a takođe je moguće menjati i dužine nogu (spojki) jer postoji familija različitih dužina u tri nazivne veličine ($l_i = 250, 195$ i 180 mm). Konfiguracija paralelnih mehanizama može se lako i brzo promeniti u skladu sa programom izgradnje [17].



Slika 12 - MOMA V3 – troosna rekonfigurabilna mašina sa hibridnom kinematikom

MOMA V3 je 3-osna mašina sa hibridnom kinematikom [18], koja se sastoji od dvoosnog rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma koji ostvaruje translacije u ravni (X, Y) i dodatne serijske translatorne ose, koja ostvaruje kretanje duž Z ose, slika 12. Po koncepciji odgovara tipu razmatrane mašine Trijoint sa slike 3.

Realizovani prototip MOMA V3 mašine sa hibridnom kinematikom verifikovan je tokom probnog rada kada je izvršena obrada prilagođenog test probnog dela, koji je prikazan na slici 13.



Slika 13 - Realizovani prototip MOMA V3 tokom obrade test probnog dela

Mašina MOMA V3 predstavlja rezultat analize koncepta za izgradnju horizontalnog obradnog centra za glodanje gde se glavno vreteno pokreće pomoću rekonfigurabilnog paralelnog mehanizma u ravni XY, dok se treća osa pomera na strani radnog predmeta duž Z ose. Naravno i ova koncepcija je otvorena za dalju nadogradnju u smislu dodavanja serijskog dvoosno obrtno nagibnog radnog stola u cilju povećanja broja osa i mogućnosti višesone obrade.

4. ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovoj oblasti u našoj zemlji bila su usmerena na razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema i mašina alatki po obimnom i planiranom dugoročnom programu.

Razmatrane mašine sa hibridnom kinematikom prate aktuelne trendove u razvoju savremenih mašina alatki kao što su: (i) modernizacija strukture mašine, (ii) novi koncepti primenjenih mehanizama mašina alatki, (iii) uvođenje rekonfigurabilnih i prilagodljivih

mašina alatki; (iv) strategije digitalizacije i virtualizacije prema paradigmi Industrije 4.0.

Ovakva istraživanja su do sada sprovedena kroz istraživačke projekte, edukacije, diplomske radove, magistarske teze i doktorske disertacije i još uvek su aktivna i aktuelna. Prikazani rezultati imaju za cilj da motivišu i druge istraživačke centre da nam se pridruže u ovoj oblasti istraživanja kako bismo dalje razvijali i podizali nivo tehnološke sposobnosti Republike Srbije.

5. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Rad predstavlja rezultat istraživanja na projektima koje finansijski podržava Vlada Republike Srbije (ugovor br. 451-03-47/2023-01/200105, ugovor br. 451-03-65/2024-03/200156 i ugovor br. 451-03-66/2024-03/200066 za 2024. godinu.

LITERATURA

- [1] Pham P, *Design of hybrid-kinematic mechanisms for machine tools*, Advisor: Clavel, Reymond, Publisher Lausanne, EPFL, 2009.
- [2] Milutinovic M, Slavkovic N, Milutinovic D, Kinematic Modelling of Hybrid Parallel-Serial Five-Axis Machine Tool, *FME Transactions*, Vol. 41, No.1, pp.1-10, 2013.
- [3] Pierrot F, Towards non-hexapod mechanisms for high performance parallel machines, *Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE, IECON 2000*, Nagoya, Vol. 1, pp. 229 – 234, 2000.
- [4] Ur-Rehman R, Caro S, Chablat D, Wenger P, Kinematic and Dynamic Analysis of the 2-DOF Spherical Wrist of Orthoglide 5-axis, *Proceedings of the 3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM'2009*, pp 1-8, Hammamet, Tunisia, 2009.
- [5] Harib K. H, Moustafa, K. A. F, Sharif Ullah, A. M. M, Zenieh S, Parallel, Serial and Hybrid Machine Tools and Robotics Structures: Comparative Study on Optimum Kinematic Designs, Chapter 6, pp.109-124, in book: *Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization* Edited by Dr. Serdar Kucuk, InTech, 2012.
- [6] Kanaan D, Wenger P, Chablat D, Kinematic analysis of a serial-parallel machine tool: The VERNE machine, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, No.2, pp. 487–498, 2009.
- [7] Valášek M, Šika Z, Zavřel J, Skopec T, Steinbauer, P, *Control rapid prototyping of redundantly actuated parallel kinematical machine*, CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering.
- [8] Neumann K. E, *Exechon Concept, Proceedings of the PKS Chemnitz Parallel Kinematic Seminar*, Chemnitz, Germany, 2006.

- [9] Martin Y. S, Gimenez M, Rauch M, Hascoet J. Y, Verne A New 5-Axes Hybrid Architecture Machining Centre, *Proceedings of the PKS Chemnitz Parallel Kinematic Seminar*, Chemnitz, Germany, 2006.
- [10] Glavonjić M, Milutinović D, Živanović S, Dimić Z, Konfiguracija jedne hibridne petoosne mašine, 33. *JUPITER konferencija*, str. 3.1-3.6, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, 2007.
- [11] Glavonjić M, Milutinović D. and Kvirgić V, Triaxial spatial parallel mechanism, machine tool and industrial robot with this mechanism, Publication of patent application number 645/04, in: *Intellectual Property Gazette (GIS) No5*, Department of Intellectual Property, Belgrade, pp. 1095-1096, 2006.
- [12] Zivanovic S, *Konfigurisanje novih mašina alatki, Doktorska disertacija*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2010.
- [13] Tabakovic S, Zeljkovic M, Gatalo R, Mladjenovic C., Device for manipulating workpieces or tools in machine tools and industrial manipulators, in: S. Intellectual Property Office (Ed.), Republic of Serbia
- [14] Zivanovic S, Tabakovic S, Zeljkovic M, Milojevic Z, Configuring a machine tool based on hybrid O-X glide mechanism, *Machine Design*, Vol.8, pp.141-148, 2016.
- [15] Tabakovic S, Zivanovic S, Dimic Z, Zeljkovic M, Programming and program verification of 3-axis hybrid kinematics CNC machine for rapid prototyping, *Proceedings of th 14th International Scientific Conference mma 2021*, pp. 71-74, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, 2021.
- [16] Zivanovic S, Tabakovic S, Dimic Z, Zeljkovic M, Variants of hybrid kinematics machine tools based on O-X glide mechanism with additional rotary axes, *Proceedings of th 39th International Conference on Production Engineering of Serbia*, pp. 278-283, Novi Sad, 2023.
- [17] Živanović S, Vasilic G, Variants of configuring the 2-axis reconfigurable parallel mechanism - MOMA, *Proceedings of th 2nd International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA 2014*, pp.33-40, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, Jahorina, RS, B&H, 2014.
- [18] Živanović S, Vasilic G, Kokotović B, Vorkapić N, Dimić Z, Slavković N, Configuring and verification of a reconfigurable machine with hybrid kinematics MOMA V3, *Proceedings of th 6th International Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications COMETA2022*, pp.17-19 University of East Sarajevo Faculty of Mechanical Engineering, East Sarajevo-Jahorina, RS, B&H, 2022.
- [19] Zivanovic S, Vasilic G, Dimic Z, Vorkapic N, Kokotovic B, Slavkovic N, Programming methods and program verification for 3-axis reconfigurable hybrid kinematics machine, *Proceedings of the 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2023*, pp. 136-143, University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, 2023.

SUMMARY

HYBRID KINEMATIC MACHINE TOOLS

Significant direction for the innovation and development of new machine tool is a developing a hybrid kinematic machine (HKM) which have the respective advantages of serial and parallel mechanism. This paper considers the developed domestic configurations of HKM. The paper presents the developed original HKM configurations in University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering and Faculty of Technical Science University of Novi Sad.

Key Words: *Hybrid kinematic machine, CAD/CAM, virtual machine*