



M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, V. Kvrđić, Z. Višnjic<sup>1</sup>

## O JEDNOJ TROOSNOJ PARALELNOJ MAŠINI<sup>2</sup>

### Rezime

Poznato je da su oblik i veličina radnog prostora slabost većine mašina sa paralelnom kinematikom. Mehanizmi Hexaglide i Triaglide su primeri u kojima je izvršeno izdužavanje radnog prostora povećavanjem hoda jedne od pogonskih osa u Dekartovom koordinatnom sistemu. Imajući u vidu takvo izdvajanje jedne dominantne ose, razvijen je jedan paralelni mehanizam za horizontalne i vertikalne glodalice. U poređenju sa sličnim napravljenim mehanizmima ovaj mehanizam ima nekoliko prednosti: bitno pravilniji oblik radnog prostora (nalik na modifikovanu prizmu), kako je to obično za serijske mašine; Veću krutost po prirodi koncepcije sa štapovima, vrlo dobar odnos sila i brzina u celom radnom prostoru mehanizma. U radu je opisana struktura mehanizma, dati su elementi modela, kao i parametri jednog projektovanog prototipa, koje je rezultat već sprovedene optimizacije i simulacije.

**Ključne reči:** paralelni mehanizma, modeliranje i simulacija

### 1. UVOD

Mašine alatke sa paralelnom kinematikom već imaju desetogodišnju tradiciju, računajući od pojavljivanja prvih primeraka, kao sajamskih eksponata. I pre i posle njih traženi su izazovi u tehnološkim sistemima da bi se tu maglo naći i pravo mesto mašina alatki, pa i mašina alatki sa paralelnom kinematikom. Jednom su glavni izazovi u tehnološkim sistemima ovako imenovani [1]:

- Simultano inženjerstvo
- Konverzija informacija u znanja
- Rekonfigurabilna preduzeća
- Integracija ljudskih i tehničkih resursa
- Ekološka kompatibilnost
- Procesi inoviranja

Za ove izazove tražene su i formulacije tehnologija: Rekonfigurabilni tehnološki sistemi, obrade i prerade bez otpada, obrada novih materijala, biotehnologije za tehnološke sisteme, modeliranje i simulacije preduzeća, metodi projektovanja proizvoda i procesa, poboljšanja interfejsa između ljudi i mašina.

Drugi put su posmatrane samo perspektive mašina alatki. Formirane su grupe istraživača za traženje odgovora. Teme tih grupa su bile [2]:

- Periferija i pomoćni pribori
- Digitalna fabrika
- Kvalitet, dinamika, pouzdanost
- Tehnologije
- Rekonfigurabilni tehnološki sistemi

Rezultat rada tih grupa bio je skup domena u kojima će se naći mašine alatke nove generacije. To su: Periferije i pomoćni pribori; nove tehnologije; virtuelni proizvodni sistemi; informaciono-komunikacione i tehnologije upravljanja; kvalitet, dinamika i raspoloživost; metodi projektovanja novih mašina alatki i tehnoloških sistema.

Pojavljuju se i inicijatori, koji se okupljaju oko neke teme, taman i da ima tradicionalnu formulaciju velikih izazova [3]. Cilj je opet da se preciznije formulišu očekivane koncepcije tehnoloških sistema. Ovom prilikom je stilizovano šest velikih izazova:

<sup>1</sup> dr Miloš Glavonjić, vanredni profesor, dr Dragan Milutinović, redovni profesor, mr Saša Živanović, asistent, Mašinski fakultet Beograd, 27.marta 80, 11000 Beograd, e-mail: [mglavonjic@mas.bg.ac.yu](mailto:mglavonjic@mas.bg.ac.yu), [dmilutinovic@mas.bg.ac.yu](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.yu), [szivanovic@mas.bg.ac.yu](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.yu), dr, Vladimir Kvrđić, Zoran Višnjic, dipl. maš. inž, LOLA MAA, Fabrika robota, alata i hidraulike, doo, Beograd

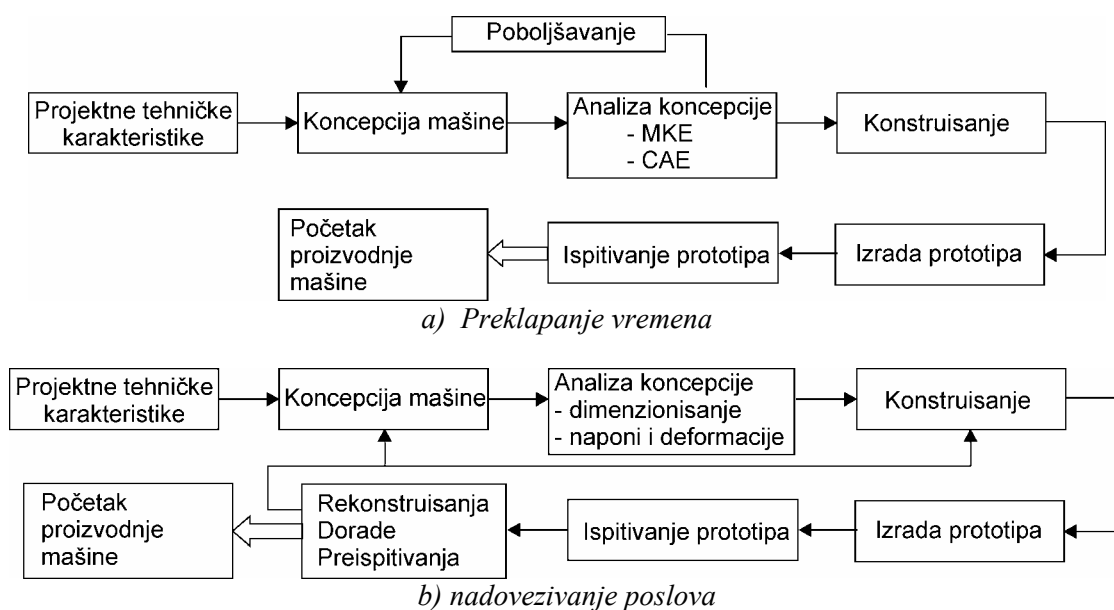
<sup>2</sup> Rađeno u okviru projekta: MIS.3.02.0101.B, Troosne paralelne mašine, u čijem finansiranju učestvuje MNTR Srbije i industrija. Rukovodilac projekta: dr Miloš Glavonjić.

- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| • Sinhronizacija tehnologija  | • Zadovoljavajuća agilnost   |
| • Potpuno umrežavanje resursa | • Ekološka održivost razvoja |
| • Upravljanje znanjima        | • Okupljanje oko tehnologija |

Razne firme na razne načine mogu prihvatiti ovakve izazove. Zависи to od njihovih resursa, proizvoda i kupaca. Ako se gleda po simultanom inženjerstvu, onda bi klasične krajnosti bile kao one sa slike 1.[4]. Tako će se odmah napraviti i razlika među firmama u njihovim ulaganjima u razvoj. Otuda se može nekada reći da neka firma u razvoj ulaže neobično veliki deo svog prihoda, a da se tu stvarno radi o firmi iz domena novih tehnologija, u odnosu na prosek u svetu u kojoj skoro svako ulaganje kao da je za razvoj. U nadovezivanju poslova nakupljaju se i problemi. U takvoj organizaciji početak proizvodnje mašine nije naznačen kao predvidivi naredni korak, slika 1b), taman da je kriterijum i noseća struktura te mašine.

Mašine sa paralelnom kinematikom imaju sasvim neobičnu noseću strukturu, a mašine alatke bez noseće strukture još uvek nisu formulisane. Za ovakve mašine treba:

- Tražiti i naći neke komponente sa tehnološkom tradicijom, da bi se dobio bar neki njihov robusni deo.
- Oformiti CAD/CAM/CAE okruženje za projektovanje, programiranje, ispitivanje i održavanje takvih mašina.
- Tražiti etalone za geometriju i kinematiku mašina sa paralelnom kinematikom u kojima su pogonske ose u svom koordinatnom sistemu, a alat sa svojim nosačem u svom.
- Premostiti diskontinuitet mašina sa paralelnom kinematikom u odnosu na zatečenu tradiciju standarde i preporuka za ispitivanje i eksploataciju mašina sa numeričkim upravljanjem i serijskom kinematikom.
- Proceniti šta se zaista govori, a šta realizuje kada je tema kalibracija mašina sa paralelnom kinematikom.
- Naslutiti vek ove generacije mašina sa paralelnom kinematikom, taman i da se svi očekivani izazovi u tehnološkim sistemima i ostvare.
- Naći način da se nešto proveriti sopstvenim snagama...



Slika 1. Tipične organizacije na jednom primeru projektovanja nosećih struktura mašina alatki [4]

Organizacija jedne takve provere za ovu troosnu paralelnu mašinu bila je ovakva:

- Naći nekoga ko će priznati trošenje vremena na razvoj ovakve mašine kao redovni posao. Bilo je to Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Srbije.
- Naći nekoga ko će prvobitnu zamisao proveriti na modelima. Bila je to Služba za razvoj Fabrike metalnih proizvoda, FMP A.D. iz Beograda.
- Naći nekoga ko će prvobitnoj zamisli dati industrijsko-inženjersku interpretaciju i napraviti prototip mašine. Bila je to LOLA Fabrika robota, alata i hidraulike, d.o.o., sada LOLA Sistem A.D.
- Naći nekoga ko će očuvati aktuelnost teme sugerisati resurse, planirati ispitivanje i eksploataciju i planirati šta dalje sa prvobitnom koncepcijom mašine. Bila je to Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta iz Beograda.

Tako je osnovana svojevrsna holarhija za ovu mašinu, a njen prototip je dobio ime pn101\_4 [5].

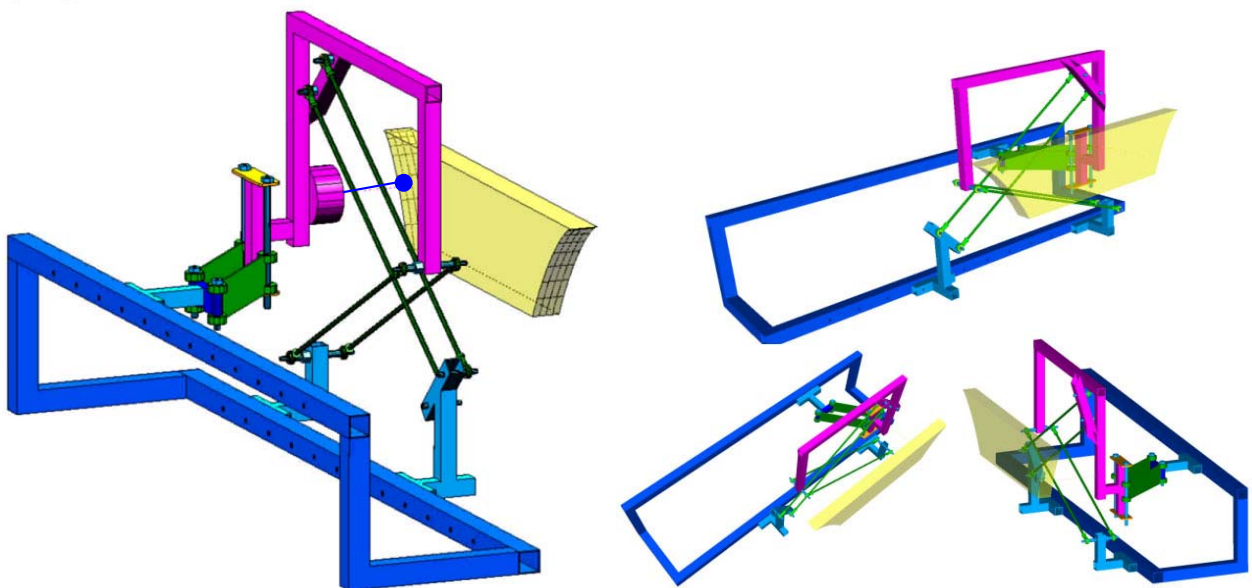
## 2. KONCEPCIJA MAŠINE

Pravilo je da se za svaku novu koncepciju mašine sa paralelnom kinematikom odmah pita:

- Kolika je zapremina radnog prostora?
- Kakav je oblik tog radnog prostora?
- Ima li singulariteta inverzne i direktne kinematike odabrani mehanizam?
- Koja je koncepcija pogonskih osa?
- Kako se upravlja mašinom?
- Kakvo je okruženje potrebno za njeno programiranje?
- Radi li ta mašina sa nekom kalibracijom i/ili kompenzacijom grešaka pozicioniranja u raznim delovima svog radnog prostora?
- Kakvi su rezultati ispitivanja po procedurama razvijenim za takve mašine i po procedurama za mašine sa serijskom kinematikom?
- Ima li takva koncepcija kakvu izgledniju primenu od njenih prethodnika?

Tako bi se moglo zaključiti da je ta mašina konkurentna za neki proizvodni program. Međutim, još uvek ne postoji metod koji bi pomogao da se sastavi mašina sa paralelnom kinematikom po meri nekog zahteva. Baš kao što se ne može dati opšte rešenje direktnog geometrijskog problema šestosne paralelne mašine, ne može se ni premostiti priroda funkcionisanja odabranog paralelnog mehanizma. Međutim, ako se intuitivno koncipira neki mehanizam, pa ako se desi da ga favorizuje povoljan odgovor na neko od postavljenih pitanja, onda se lako može formalizovati takvo rešenje danas uobičajenim procedurama. U njima bi se pominjalo: Rekonfigurabilnost, simultano inženjersvo, aksiomska teorija projektovanja, singulariteti, zatvorenost rešenja inverznog i direktong geometrijskog problema, dinamika,... Umesto toga, ovde se pokazuje samo koncepcija mašine pn101\_4. Ako se dođe do njenog prototipa, onda će se znati naredni korak po slici 1., ako se izvrši ispitivanje, onda će se znati i odnos performansi i uložnog rada,...

Model inicijalne verzije mašine pokazan je na slici 2. To je kombinovani prikaz fizičkog modela i analitički dobijenog očekivanog oblika radnog prostora. Bila je to prvobitna zamisao za ovu mašinu. Odgovori na postavljena pitanja za ovu koncepciju prvobitno su ovako stilizovani:

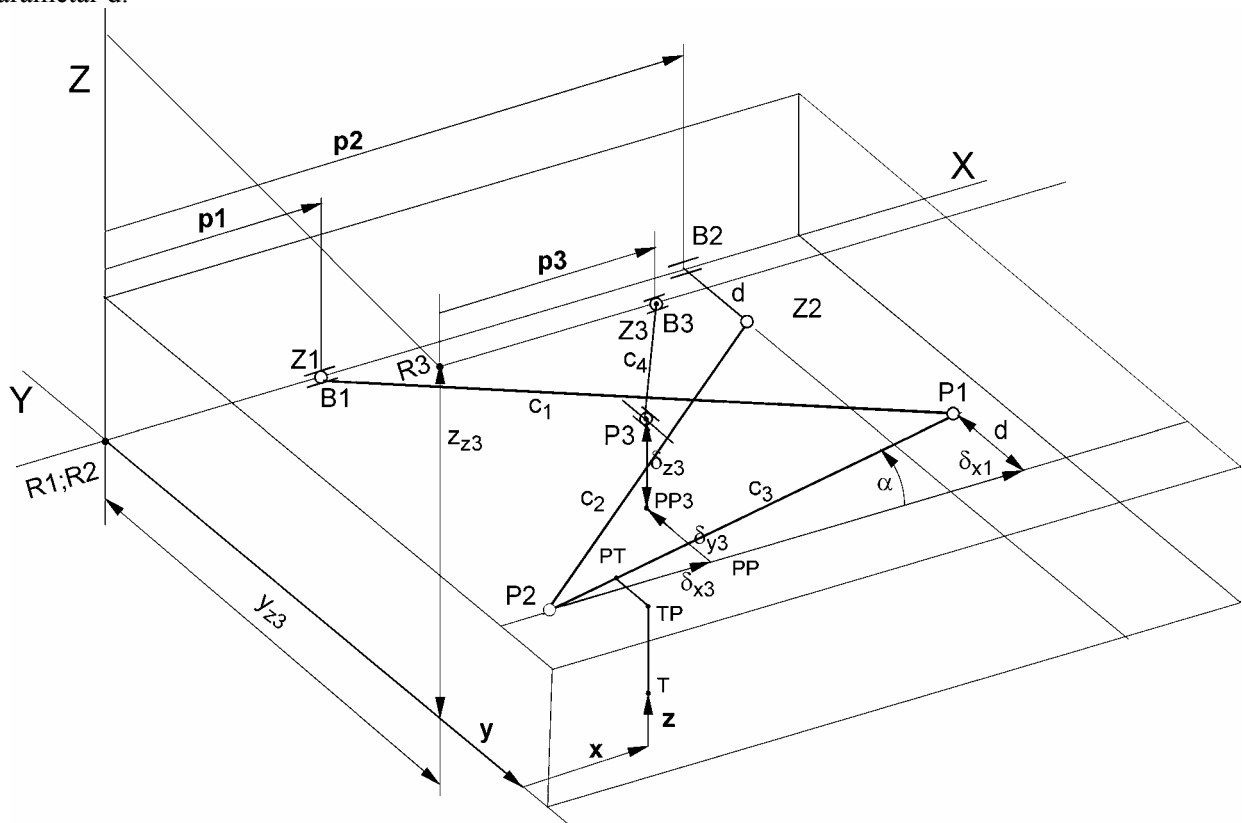


*Slika 2. Fizički i analitički model prvobitne verzije mašine pn101\_4. Rađeno u Službi razvoja Fabrike metalnih proizvoda iz Beograda.*

- Radni prostor ovakve mašine može da se poveća onoliko koliko se dugom sama mašina može napraviti.
- Radni prostor je približniji pravilnom paralelopipedu od radnih prostora svih drugih poznatih paralelnih mašina. Pravilan paralelopiped je uobičajeni radni prostor mašina sa serijskom kinematikom.
- Mehanizam ima jedan singularitet inverzne kinematike na jednoj od granica svog radnog prostora. Ovaj singularitet se može lako izbeći.
- Pogonske ose su translatorne, paralelne, sa mogućom proizvoljnom dužinom i sa jednim translatorskim pasivnim zglobovom.

- Mašina može da se upravlja prerađenim sistemom za upravljanje robotima kakav već postoji u firmi LOLA Sistem A.D.
- Programiranje može da se vrši u CAD/CAM okruženju, kao za troosne glodalice i postprocesiranjem sa pogodnim postprocesorima...

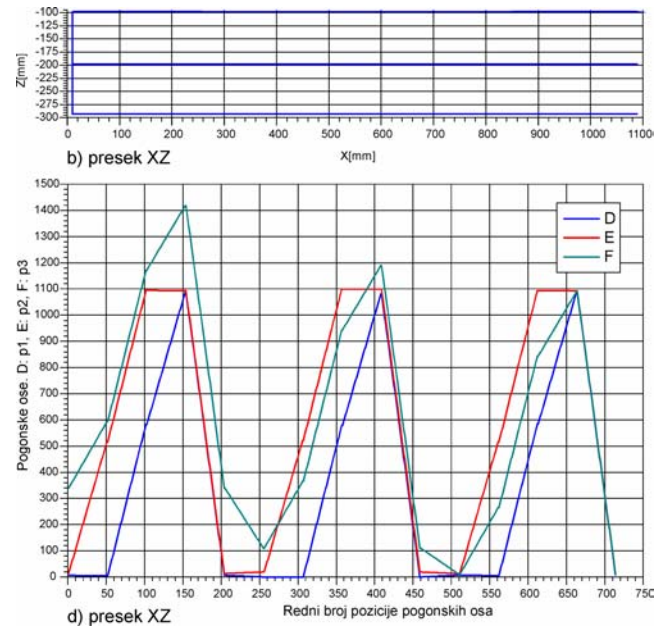
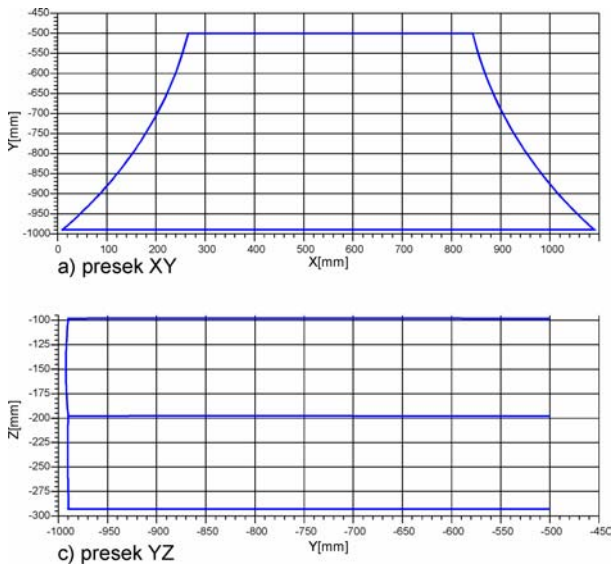
Postojanje translatornog pasivnog zgloba poboljšava oblik radnog prostora. Konceptija upotrebljenog mehanizma pokazana je na slici 3. [5]. Odabrano je da mašina bude vertikalna glodalica sa dugim hodom po osi X. Dve pogonske ose imaju ukrštene spojke i u dve uzajamno upravne ravni. Pozicije pogonskih osa imaju koordinate  $p_1$ ,  $p_2$  i  $p_3$ . Pravilo u označavanju detalja na slici 3. je : B – zglobovi na bazi ; Z – zglobovi između baze i platforme ; P – zglobovi na platformi ; T – vrh alata ; TP – vrh glavnog vretena u pokretnoj čauri ; R – referentne tačke pogonskih osa ; c – spojke, ... Pasivni zglob je u P3. Parametri mehanizma podešeni su tako da mašina ima zatvoreno rešenje za inverznu i direktnu kinematiku. Indikator za to je parametar  $d$ .



Slika 3. Model mehanizma mašine pn101\_4 [5]

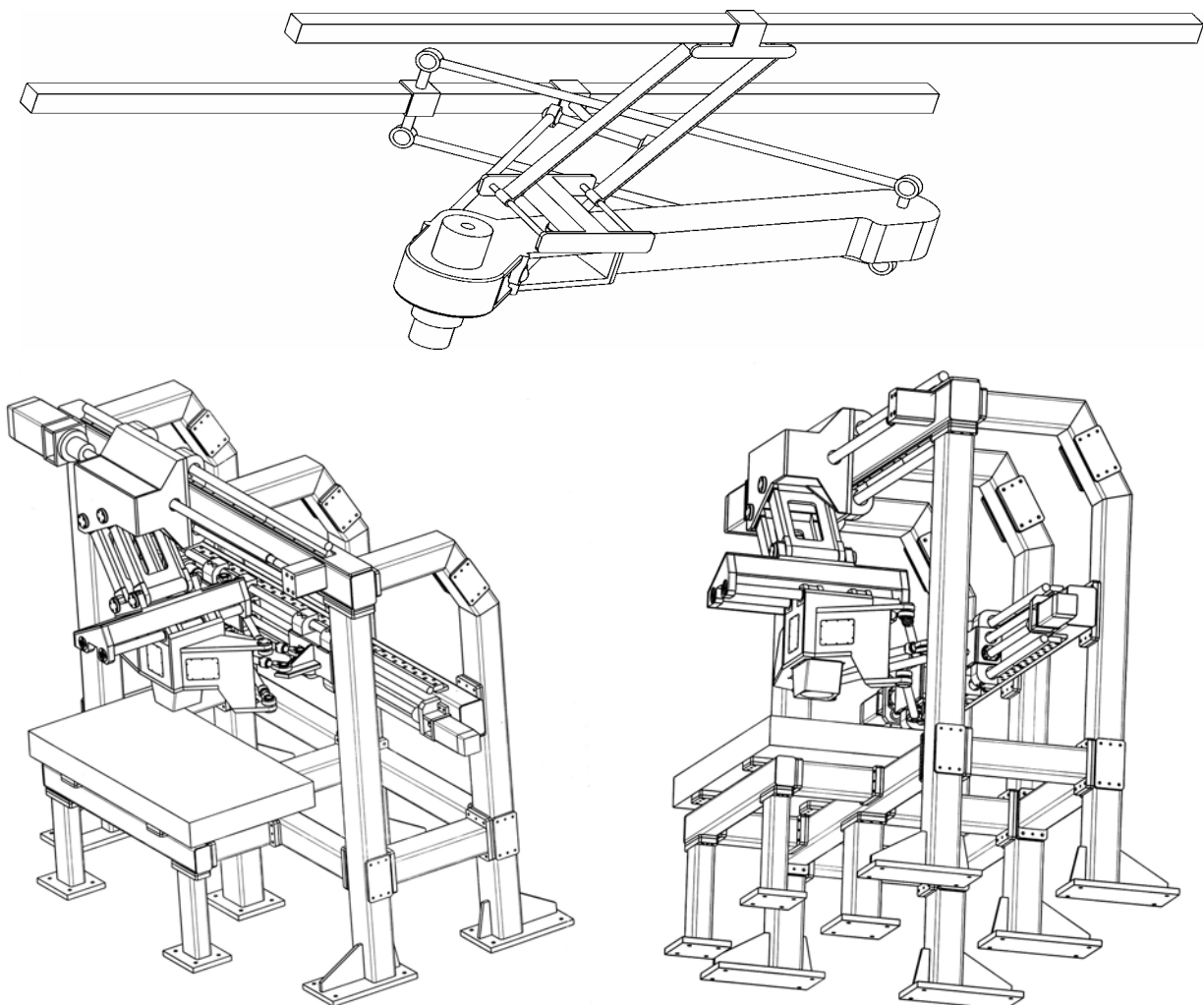
Ilustracija oblika i mera radnog prostora projektovanog prototipa pokazano je na slici 4 [5]. Specifični su sledeći detalji:

- U ravni (X,Y) radni prostor ima presek u koji se dobrim delom može upisati pravougaonik širine 500 mm.
- U pravcu Z pokazan je dostizivi prostor vrha vretena u uvučenoj čauri. Hod izvalčenja te čaure je 100 mm i ima graničnike za pozicije na 100, 50 i 0 mm. Ukupan bruto hod po osi po osi Z je 200 mm, a neto hod oko 195 mm.
- Skraćivanje je posledica izbegavanja da spojka  $c_4$  bude vertikalna, kada je mehanizam u singularnom položaju.
- U preseku ravnima paralelnim sa ravni (Y,Z) radni prostor ima blaga zaobljavanja na donjoj i gornjoj granici, slika 4c). Zbog toga je na slici 4a) data kontura radnog prostora koja se svakako može dostići na svakoj poziciji Z vrha alata T, a da pozicije pogonskih osa budu u propisanom uzajamnom odnosu. Na primer, da bude  $p_2 - p_1$  između 450 i 970 mm itd.
- Promene pozicija pogonskih osa  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , prilikom opisivanja ivica radnog prostora na slici 4a,b,c), pokazane su na slici 4d). Tu se može i videti koliki su hodovi pogonskih osa i u kom odnosu su koordinate njihovih pozicija za razne pozicije vrha vretena na ivicama radnog prostora. Valja uočiti da pogonska osa  $p_3$  ima specifičan tok u odnosu na ostale dve vezane za makaze mehanizma.



Slika 4. Neki detalji sa ivica radnog prostora projektovane mašine pn101\_4 [5]

Dispozicija projektovanog prototipa pokazana je na slici 5. To je tačno industrijska interpretacija prvobitnog mehanizma. Projektovanje je dovršeno u CAD okruženju. U toku je i izrada prototipa. To vrši LOLA Sistem A.D. Prototip je pokazan bez sklopa glavnog vretena, bez kabine i sistema za upravljanje da bi se mogao videti projekat samog paralelnog mehanizma.



Slika 5. Dispozicija projektovanog prototipa mašine, pn101\_4

### 3. ZAKLJUČAK

Nema mnogo mašina sa paralelnom kinematikom sa paralelnim i translatorskim pogonskim osama. Primeri su već klasične koncepcije Hexaglide i Triaglide. Kada se bude imao prototip mašine pn101\_4 i kada se bude obavilo planirano ispitivanje, znaće se i mera valjanosti prvobitne zamisli, stare oko četiri godine, pokazane na slici 2. Prototipom se ovde smatra ovaj komplet: Mašina pn101\_4, sistem za njeno upravljanje i procedure za njeno programiranje. Odnos hodova glavnog vretena, a time i mera radnog prostora u pravcima X, Y i Z je približno 5:2:1, respektivno kako je često i za portalne (vertikalne) glodalice, sa serijskom kinematikom. Oblik platforme je već sada pogodan za nadogradnju mašine u petoosnu dodavanjem dve serijske ose. Tako bi se potpunije iskoristile performanse već prerađivanog sistema za upravljanje robotom na ovu troosnu kinematiku, ali bi se mogla ispitati i perspektivnost mašina sa hibridnim mehanizmima: da se na osnovni mehanizam sa paralelnom kinematikom doda drugi sa serijskom (što bi ovde bio slučaj), ili da se na osnovni serijski mehanizam doda paralelni, sve u cilju poboljšavanja oblika i mera radnog prostora mašina sa čistom paralelnom kinematikom.

### 4. LITERATURA

- [1] N.N., Visionary Manufacturing Challenges for 2020, Committee on Visionary Manufacturing Challenges Board on Manufacturing and Engineering Design, National Academy Press, Washington, D.C., 1998.
- [2] N.N., Abschlussbericht Werkzeugmaschine 2010, VDW, Karlsruhe, 2002.
- [3] N.N., IMT's Grand Challenges, A Strategic View, V1.1, IMTI – Integrated Manufacturing Technology Initiative, Oack Ridge, 2000.
- [4] Schorry E. R., Machine Tool Structural Modeling and Simulation, UNOVA Industrial Automation Systems Inc., Cincinnati Machine, 2000.
- [5] Glavonjić M., Milutinović D., Živanović S., Troosne paralelne mašine, Elaborati (01,2,3)-03-2003, Mašinski fakultet Beograd, 2003.

M. Glavonjić, D. Milutinović, S. Živanović, V. Kvrđić, Z. Višnjić

#### One 3 – DOF Parallel Kinematic Machine

##### *Summary*

*It is well known that workspace shape and volume are one of the greatest PKM weaknesses. Hexaglide and Triaglide mechanisms are examples where workspace extension is achieved by elongating one axis as a principal axis of motion which is a common feature of all Cartesian machines. With the idea of principal axis of motion in mind, a new 3-DOF spatial parallel mechanism for horizontal and vertical milling machines has been developed. In comparison with similar developed mechanisms it has several advantages such as: rather regular shape of the workspace (slightly modified block) similar to serial machines; greater stiffness by nature of struts arrangement; very good force and speed ratio through the entire mechanism's workspace. The paper describes mechanism's structure, modelling approach, design parameters optimization and simulation.*

*Keywords: Parallel mechanism, Modelling and Simulation*