

S. Živanović, M. Glavonjić<sup>1</sup>

## PREGLED MODERNIH BRZOHODNIH MAŠINA ALATKI<sup>2</sup>

### Rezime

*U radu se razmatra novi pristup u projektovanju modernih mašina alatki, za koje važi fenomen ubrzanja bar  $1g$  u pomoćnim kretanjima. Ovde je dat pregled nekih postojećih mašina sa ovom osobinom, koje mogu biti konvencionalne i mašine sa paralelnim mehanizmom. Mašine sa paralelnim mehanizmom u osnovi sadrže ideju Stjuartove platforme, koja je ovde konkretno razmatrana na primeru novog obradnog centra.*

### 1. UVOD

Pristup projektovanju mašina alatki nije se značajnije menjao dugi niz godina. U razvoju modernih brzohodnih mašina postoje dva pristupa:

- razvoj konvencionalnih mašina alatki,
- razvoj mašina sa paralelnim kinematičkim mehanizmom.

Daljim razvojem konvencionalnih mašina alatki, poboljšavamo njene performanse da bismo postigli željenu brzohodnost. Međutim ova brzohodnost se može postići i totalno novim pristupom u projektovanju mašina alatki, što je ovde razmotreno na primeru jednog novog obradnog centra. Visokokonkurentna priroda tržišta stvara povećan pritisak za smanjenje jediničnih troškova proizvodnje. Uspešan odgovor na ovu situaciju može biti dvostruk:

- 1) kraći proizvodni ciklus mašina smanjivanjem i vremena rezanja i izgubljenog vremena i
- 2) korišćenjem modula koji obezbeđuju smanjivanje investicija u fleksibilnim tehnološkim sistemima.

Italijanska firma COMAU je razvila  $1g$  mašinski modul za prizmatične delove, u cilju da odgovori zahtevima tržišta za različite oblasti proizvodnje. Fenomen ubrzanja  $1g$  nudi brojne prednosti u pogledu:

1. produktivnosti - vreme pomoćnih kretanja se drastično smanjuje. Pomeranja po osama je do  $60 \text{ m/min}$  sa ubrzanjem  $1g = 10 \text{ m/s}^2$ .
2. fleksibilnosti - mogućnost ugradnje u fleksibilne strukture višeg nivoa složenosti kao što su FT ćelije, FT linije, itd. Ovo je optimalan izbor za prilagodjavanje varijacijama u proizvodnom procesu.
3. pouzdanosti - komponente koje su se koristile i u ranijim tehnologijama, istorijski već dokazanim, koriste se i kod brzohodnih mašina uz izvesne rekonstrukcije i prilagodjavanje za veće brzine. Pouzdanost ovih mašina se dokazuje u praksi.

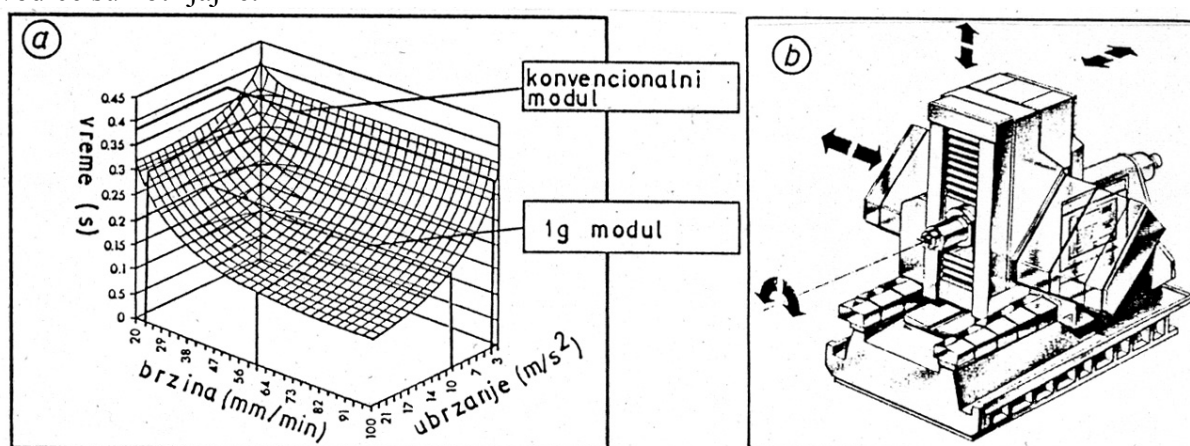
<sup>1</sup> Živanović Saša, dipl. maš. ing., asistent-pripravnik

Glavonjić dr Miloš, vanr. prof., Katedra za proizvodno mašinstvo, Mašinski fakultet, Beograd, 27. marta 80

<sup>2</sup> Projekat: Fleksibilni tehnološki sistemi i fleksibilna automatizacija u industriji prerade metala, evid. br. C.5.03.65.293 u čijem finansiranju učestvuje i MNT

Ovakvi obradni centri mogu biti ugrađivani u fleksibilne transfer linije, čemu im je prilagođena koncepcija sa sve tri ose na pogonima alata i mogu raditi kao pojedinačne tehnološke ćelije. Uz to se mogu ugraditi: ciklusi za merenje obratka, sistem za čitanje i upisivanje podataka o alatima, praćenje vremena rada svakog alata, uključivanje u LAN, adaptivno upravljanje i sl. Zahtevi za ovolikim brzinama usloveli su i ova dva konstrukcijska detalja (slika 1b):

1. zavojno vreteno za osu Z podignuto je neobično visoko, tako da se stub pokreće pogonom skoro na sredini svoje visine. Time se smanjuje na najmanju meru uticaj inercionog i/ili radnog opterećenja na Z osi,
  2. vođice X ose su iskošene zbog položaja vretena ose Z i smanjenja mase stuba
- Proizvođač ove mašine naglašava da je noseću strukturu detaljno proračunavao korišćenjem i metoda konačnih elemenata te joj tako dovoljno smanjio masu da mašina u celini može imati nabrojane performanse. Pogoni su tradicionalni: AC servomotori sa zavojnim vretenima; vođice su kotrljajne.



slika 1 a) dijagramski prikaz performansi, konvencionalne i mašine sa ubrzanjem 1g  
b) obradni centar Italijanske firme COMAU 1g [4]

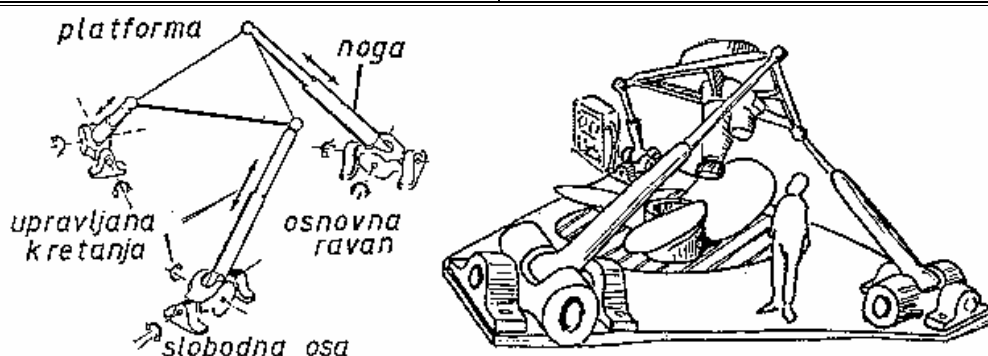
## 2. RAZVOJ MAŠINA SA PARALELNI MEHANIZMOM

Ideja za razvoj MA sa paralelnim mehanizmom potiče od 60-ih godina ovog veka. Bilo je potrebno 30-ak godina da bi se ova ideja realizovala. Danas postoje mašinski centri projektovani po ovoj ideji, koja se zasniva na Stjuartovoj platformi sa 6 stepeni slobode. Prvobitno se ovaj mehanizam koristio za simulaciju uslova leta pre obuci pilota. Osnovne ciljeve u projektovanju dao je još Stjuart i oni su dati tabelarno u Tablici I. U to vreme je već predlagao da se njegova platforma koristi za vozila neobičnih namena (za instaliranje na vodi ili nepoznatom tlu), za simulatore letenja i slično, ali i za sistem novih tipova mašina alatki i automata za montažu, što se danas pokušava. Ilustracija tih prvih ideja pokazana je na slici 2. Prve ovakve mašine alatke su se pojavile na sajmu IMTS '94 u Čikagu. Jedna od takvih mašina je, i obradni centar Variax američke firme GIDDINGS & LEWIS (slika 3a). Kod ovakvih mašina razlikujemo gornju i donju platformu koje su povezane sa 6 nogu. Svih 6 nogu je osnaženo servomotorima koji rade zajedno i pokreću gornju platformu koja nosi glavo vreteno (GV). Noge predstavljaju zavojna vretena sa recirkulacionim kuglicama, koja izduživanjem i skraćivanjem menjaju poziciju GV slaganjem kretanja po 6 virtualnih osa [3]. Ta virtualnost (prividnost) osa posledica je principa rada paralelnog mehanizma. Prvi put se pojavljuje na ovakvim mašinama alatkama. Svojstvena joj je neuparenost osa mašina i potrebnih kretanja alata u odnosu na obradak u programiranju. Radi toga se i metod programiranja mora postaviti na novi način. Pogodnost je lakoća rešavanja inverznog

kinematičkog problema za ovakve mehanizme primenom homogenih transformacija koordinata, svedenih na matricni račun.

Tab. I Funkcionalni zahtevi za paralelni mehanizam [1]

Projektovanje cilja	Svrha
1. Upotreba ne više od 6 motora	smanjiti i izbeći suvišne troškove
2. Svaki motor reaguje na temelj	izbeći interakciju između motora
3. Svaki motor radi čim je opterećen	ostvariti max performanse sa postojećom snagom izvora
4. Visoka korisna nosivost strukture	ostvariti max performanse sa raspoloživom snagom
5. Svaki motor identifikuje jedno kretanje	jednostavno upravljanje
6. Malo trenje motora	smanjiti gubitak snage i dobiti bolji odziv

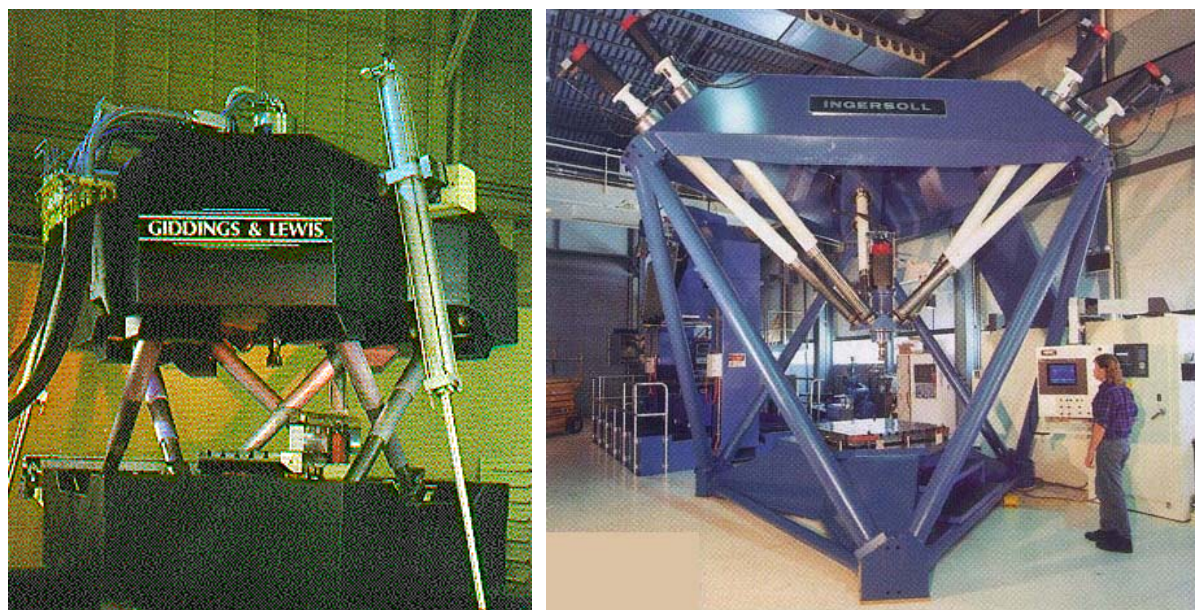


slika 2 a) Opšte rešenje Stjuartove platforme

b) Ideja primene Stjuartove platforme na univerzalnu mašinu alatku [1]

Izvodi se i ovakva računica za sekvencijalne ose jedne troosne mašine. Svaka od tih osa ima mogućnost greške u svih mogućih šest stepena slobode, bez obzira što prividno ne postoje zbog prisustva vođica i zavojnih vretena, jer su to greške tih veza. To pravi ukupno 18 mogućih grešaka. Dodaju se još tri od sekvencijalnosti osa (kretanje jedne po drugoj). Mernim sistemom numerički upravljane mašine alatke na svakoj osi se po jedna od takvih grešaka prati i umanjuje ispod nivoa značajnosti, ali ostalih 18 ostaju kao mogući uzroci grešaka obrade na tradicionalnim mašinama. U paralelnom mehanizmu sa virtualnih 6 osa postoji merni sistem za svaku. Sa dobrim algoritmom za upravljanje takve mašine može se obezbediti da nema nekontrolisanih grešaka i da delovi jedne mašine ne budugrađeni sa visokom tačnošću, kako se to traži za vođice i klizače i sl.[2]. Ispitivanjem radne tačnosti ustanovljena je geometrijska tačnost do 10  $\mu\text{m}$ . Merni sistem za virtualne ose je laserski, radi čega je i takva tačnost u radu. Na hidrauličnim mašinama se dodaju i dopunski merni sistemi za praćenje i/ili navigaciju još po nekom od preostalih 18 pravaca greške, ali i tada nisu sve obuhvaćene. Paralelan rad svih 6 virtualnih osa u jednoj mašini ostvaren je njihovom sinhronizacijom, svih upotrebljenih procesora u upravljačkom delu mašine, pomoću jednog 64 bitnog RISC koprocesora. U osnovi projektovanja noseće strukture je trougao, kao najjača geometrijska struktura. Obe platforme su napravljene upotrebom trouglasto povezanih štapova. Uz to su i tri para nogu stalno trouglasto ukrštene. Sve to doprinosi vrlo velikoj krutosti ove mašine. Kod konvencionalnih mašina sile su uzrok momenata savijanja, pa otuda uzrok za masivnim nosećim strukturama. U novoj konfiguraciji mašine sve sile su aksijalne, pa nema potrebe za masivnim konstrukcijama. Novom mašinskom centru nije potreban ni temelj. Ove mašine su vrlo krute što potiče od njihove geometrije, pa noseća struktura praktično održava samu sebe, bez ojačavanja i/ili ankerisanja pomoću temelja. Na taj način je

omogućeno da se mašina lako premešta i tako ugradi u novi tehnološki sistem, ali i da bude mobilna u notaciji tehnoloških sistema sa mobilnim ćelijama za rekonfigurisanje a posteriori.



slika 3. a) Variax mašinski centar - "Pauk", GIDDINGS & LEWIS [3]  
b) Novi mašinski centar , INGERSOLL [2]

Variax obradni centar je sposoban za ekstremno visoke brzine pomoćnog kretanja, do 66 mm/min, sa ubrzanjem od 10 m/s<sup>2</sup> (**1g**).

Drugi obradni centar dat na slici 3b, je takodje američke proizvodnje firme INGERSOLL [2]. I za ovu mašinu je karakteristična konstrukcija trouglasto vezanih štapova koji nose i gornju i donju platformu. Specifičnost u odnosu na prvu mašinu, predstavlja to što osnažena zavojna vretena sada vise sa gornje platforme i na svom kraju nose glavno vreteno. Pozicija glavnog vretena se dobija takodje slaganjem kretanja po 6 virtualnih osa. Brzina pomoćnih kretanja ove mašine su čak do 75 mm/min sa ubrzanjem od 10 m/s<sup>2</sup> (**1g**).

Izmenom noseće strukture u rešetkastu, u kojoj su i zavojna vretena štapovi te rešetke, obezbeđene su i neobično velike sile rezanja, jer svi ti štapovi nose samo aksijalno opterećenje. Otuda mašina tipa Variax može dostići silu u pravcu upravnom na sto i do 30 kN, sa masom noseće strukture daleko ispod tradicionalnih mašina alatki sa tolikim vučnim silama po njihovim sekvencijalnim osama. Procenjuje se i da je krutost ovakvih mašina oko 175 - 300 N/μm i da je to daleko iznad krutosti tradicionalnih mašina, procenjene na oko 35 N/μm, ali tako da se i pojedine ose tih mašina razlikuju po krutosti. Sopstvene frekvence su i iznad 200 Hz [3].

### 3. ZAKLJUČAK

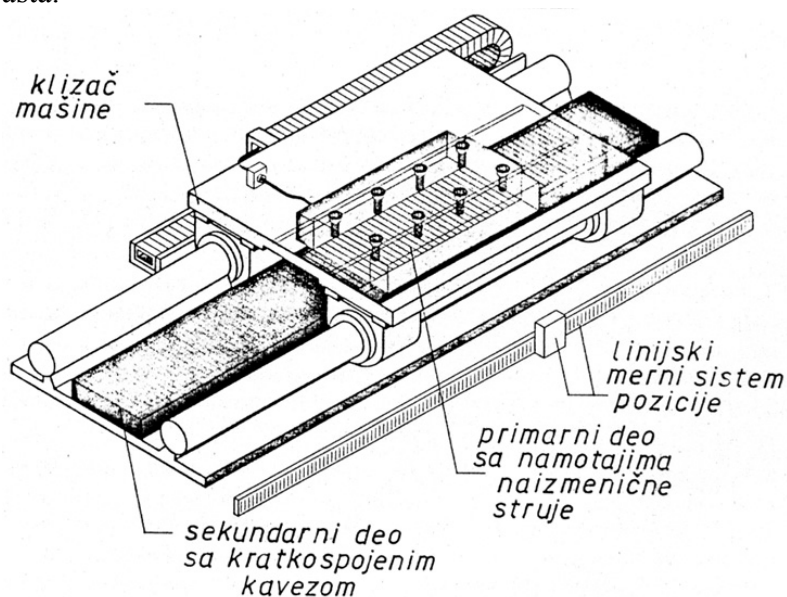
U radu su razmatrane postojeće moderne brzohodne mašine alatke sa ubrzanjem bar **1g** u pomoćnim kretanjima. Postoje dva moguća pristupa od kojih jedan bazira na konvencionalnoj mašini alatki, a drugi predstavlja totalno novi pristup u projektovanju. Razmatrane mašine su 5 -10 puta brže od tradicionalnih obradnih centara, što im daje nesumnjive prednosti. Na taj način ovi novoprojektovani obradni centri sa paralelnim kinematičkim mehanizmom otvaraju novu eru u projektovanju mašina alatki.

Upravljanje ovakvih brzohodnih mašina mora da ostvari dovoljnu brzinu pripreme i prenosa informacija za pripremu i praćenje tako velikih brzina pomoćnih kretanja. Radi toga je za mašine sa paralelnim mehanizmom razvijan poseban operacioni program. Za njega se i ranije uobičajeni formati i struktura programa tradicionalnih numeriki upravljanih mašina alatki moraju preraditi, kako bi se aktivirala i pratila virtualnost osa mašina sa paralelnim mehanizmom.

Koncepcijama mašina tipa Variax i Hexapod učinjeno je da su pogodnije za obradu pločastih i njima sličnih delova u avio industriji (za glodanje iz punog materijala velikim brzinama) i u izradi raznih alata. Za obradu glodanjem ove mašine imaju jedan stepen slobode više i njim se upravlja dopunskim uslovom u odnosu na petoosnu mašinu. Međutim ovima mašinama se može vršiti i obrada rendisanjem po zakrivljenim obrađenim površinama, jer imaju potrebni šesti stepen slobode kretanja i dovoljnu konturnu brzinu da može biti brzina glavnog kretanja. Prve šestoosne mašine su pravljenе od petoosnog obradnog centra [5] i na bazi koncepcija robota. Kao detalj se pominje i ovo: u obradi glodanjem tankih rebara iz punog materijala za delove letilica, kada se i glodalo konusno preoštrava, da pomeraji tih rebara od sila rezanja i oblik napravljen kopiranjem od preoštrjenog glodala prave dovoljno tačno rebro. Mašinom sa paralelnim mehanizmom moguće je naginjati osu nepreoštrenog (cilindričnog) glodala prema očekivanim pomerajima rebra i tako ostvariti potrebnu tačnost obrade. To podrazumeva i da upravljanje bude moderno koncipirano [2]. Neke osobine su:

- otvorenost arhitekture, sa mogućnošću integracije PC podsistema sa podrškom programa iz OS/2, Windows i DOS,
- otvorenost za uključivanje u mrežu i korišćenje CAD/CAM performansi,
- sigmoidna kriva ubrzavanja i usporavanja po osama,
- dinamičko upravljanje sa računanjem i mehanike mašine,
- prihvatanje programa u celosti radi optimizacije obrade delova komplikovane geometrije i sl.

U Evropi postoji jedna koncepcija mašine alatke sa paralelnim mehanizmom, razvijena u Velikoj Britaniji i prodana, kao patent, švajcarskoj firmi Geodetics [6], bez uočenog komercijalnog rasta.



Slika 4. Izgled jednog asinhronog linearnog motora [7]

Još je prisutna dilema o budućem razvoju brzih mašina alatki, odnosno, da li je rezultativnije investiranje u poboljšavanje postojećih, oko 200 godina starih koncepcija [4], ili otvaranje ere novih mašina. Za tradicionalne koncepcije postoji jaka podrška u recirkulacionim vretenima

velikog koraka, čak i u osi motora, kotrljajnim vođicama i linearnim motorima, kao na slici 4 [7]. Od tih motora se tek očekuje puni doprinos kada im se poveća vučna sila i smanje problemi sa hlađenjem. Sa ovim komponentama i razvojem pomenutog dinamičkog upravljanja može se očekivati značajan napredak i u performansama brzohodnih mašina tradicionalne koncepcije.

Kakve god, međutim bile nove mašine alatke, podrazumevaće bitno poboljšanje sadašnjih metoda za programiranje, otvorenost upravljačkog sistema za bogatiju komunikaciju sa rukovaocem i okruženjem, dinamičko upravljanje kao za mehatronski sistem, adaptivnost u odnosu na proces obrade i korišćenje komponenata novih generacija. U mašine alatke će se uvrstiti i mašine za brzu izradu prototipova, koje brzinu ne ispoljavaju velikim brzinama svojih osa, već brzinama pretvaranja koncepcije i/ili modela proizvoda u prototip itd. To može zasnivati takozvanu agilnu tehnologiju, odnosno, odvijanje simultanog inženjerstva. Ovim radom je razmotrena samo jedna od tih brzohodnosti i to pojedinačne mašine.

#### 4. LITERATURA

- [1] Stewart D., A Platform With Six Degrees of Freedom, The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965-66, Part 1, No 15, str. 371-386
- [2] Lewis H.W., Rockford/IL, Neue Werkzeugmaschinen für besondere Fertigungsaufgaben, Werkstatt und Betrieb 126, No 9, 1993, str. 511 - 514
- [3] Kieckhafer L., Sheldon P., McGuire M., Fond du Lac, Wisconsin, A Revolutionary New Machining Center, EPE , No 1-2, 1995, pp 44 - 46
- [4] Divisione Macchine Utensili Speciali COMAU, Prospekt novog obradnog centra sa ubrzanjem od **1g**, Torino, 1995
- [5] Takeuchi Y., Sato M., Suzuki H., New Concept of Machining by Means of Six Axis Control, Annals of the CIRP, 43 (1994),1, pp 341 - 344
- [6] Oertli - Cajacob P., New Machine Concepts Open Up Market Opportunities, EPE No19,1995, 1-2, pp 6-7
- [7] NN. LAR, LAF, Digitale intelligente Direktantriebe mit Asynchron - Linear motoren, Mannesmann Rexroth Indramat (1995), prospekt br. 71804IDE/01.95.

S. Živanović, M. Glavonjić

#### Review of Advanced High-Speed Machine Tools

##### Summary

The paper takes into consideration a new approach in design of advanced machine tools, for which the phenomenon of acceleration of at least **1g** in accessory motions is accepted. The review of some existing machines with this characteristic is given here, which could be conventional and machines with parallel mechanism. Machines with parallel mechanism basically content the idea of Stewart's platform, which is here particularly considered at the example of the new machining center.