

Ivanović, M., Radičević, B., Grković, V., Petrović, A. ¹⁾**METODOLOGIJA PROJEKTOVANJA MODULARNIH REKONFIGURABILNIH
MAŠINA ALATKI****Rezime**

Savremeno industrijsko okruženje zahteva prelazak sa tradicionalnih proizvodnih sistema fiksne arhitekture na inteligentna, autonomna rešenja sposobna za brzu adaptaciju. Ovaj rad istražuje koncept modularnih rekonfigurabilnih mašina alatki. Ovakav pristup omogućava da mašina poseduje samo one funkcije koje su joj trenutno potrebne, čime se drastično smanjuju početni investicioni troškovi u poređenju sa skupim CNC sistemima. Projektovanje modularnih struktura ne samo da osigurava visoku preciznost obrade, već i značajno skraćuje vreme zastoja pri promeni proizvodnog programa. Rad zaključuje da modularnost i rekonfigurabilnost predstavljaju ključne stubove održive i ekonomski isplative pametne proizvodnje.

Ključne reči: Modularno projektovanje, Rekonfiguracija mašina alatki, Pametna proizvodnja

1. UVOD

Današnja proizvodnja zahteva brz odgovor na promene tržišta, što tradicionalne CNC mašine sa fiksnom arhitekturom teško ispunjavaju. Rekonfigurabilni proizvodni sistemi (RMS - Reconfigurable Machining Systems) nude rešenje kroz prilagodljivu funkcionalnost i brzo izmenjivi kapacitet. Modularno projektovanje omogućava da mašina poseduje samo one funkcije koje su neophodne za trenutnu familiju delova, čime se smanjuju investicioni troškovi.

Proizvodnja se kreće ka projektovanju gde mašine treba da misle i prilagođavaju se bez ljudske intervencije. Tradicionalne mašine alatke sa fiksnom arhitekturom ili skupi CNC sistemi često imaju višak funkcija koje se ne koriste ili su neprilagođene brzim promenama na tržištu. Glavni izazov kod modularnih rekonfigurabilnih mašina (MRMT) je kako brzo i precizno preći od dizajna dela-obradka (CAD - Computer Aided Design) do optimalne konfiguracije mašine. Ručno prepoznavanje karakteristika obrade je sporo i podložno greškama.

Započeto je istraživanje o integrisanim sistemima koji koriste duboko učenje 3D neuronske mreže (3D CNN - 3D Convolutional Neural Networks - termed FeatureNet) za automatsko prepoznavanje oblika karakterističnih površina na obradku iz CAD modela, što direktno generiše ulazne podatke za sintezu optimalne modularne mašine i rezultati će biti predstavljeni u nekom narednom naučnom radu.

2. MODULARNE REKONFIGURABILNE MAŠINE ALATKE (MRMT)

Pregled metoda konfigurisanja mašina alatki prate evoluciju od jednostavne modularnosti do autonomnih AI sistema. Razvoj se može podeliti u nekoliko ključnih faza:

- Rani modularni koncepti (1980-te)

Početak sistematskog modularnog projektovanja vezuje se za radove *Shinno i Ito (1984)*, koji su predložili dekompoziciju struktura mašina na jednostavne geometrijske oblike poput ploča, greda i kutija. Cilj je bio stvaranje mašina za tadašnje fleksibilne proizvodne sisteme (FMS – Flexible Machining Systems) [1,10].

1) Marina Ivanović, dipl.inž.maš., asistent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, (ivanovic.m@mfkv.kg.ac.rs), dr Branko Radičević, vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, (radicevic.b@mfkv.kg.ac.rs), dr Vladan Grković, vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, (grkovic.v@mfkv.kg.ac.rs), dr Aleksandra Petrović, docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, (petrovic.a@mfkv.kg.ac.rs)

- Razvoj biblioteka modula i nabranje (1990-te)

Istraživači (naročito sa Univerziteta u Mičigenu) proširili su ove koncepte na kreiranje biblioteka mehaničkih modula od kojih se mašine mogu sklapati. Uvedene su metode nabranja modula (*Ouyang et al., 1995*) kako bi se automatski generisali mogući rasporedi komponenti.

- Matematički i kinematički okviri (kraj 90-ih i 2000-te)

Ovaj period donosi naučnu preciznost u dizajn: *Kota i Moon (1999-2002)*. Uveli su upotrebu teorije zavrtnja (screw theory) za kinematičku analizu i teoriju grafova za strukturnu sintezu mašina. *Xu i Xi (2017)*. Postavili su trostepeni metod: identifikacija (povezivanje karakteristika dela sa smerom kretanja alata TAD- Tool Approach Direction), određivanje (minimalni set modula) i sinteza rasporeda (layout synthesis).

- Kontrola otvorene arhitekture (OAC - Open Architecture Control) (2000-2018)

Uporedo sa dizajnom, razvijali su se kontroleri koji nisu vezani za fiksni hardver. Kompjuterski bazirani kontroleri (PC-based) sa operativnim sistemima u realnom vremenu omogućili su da se upravljački sistem rekonfiguriše uporedo sa mehaničkim promenama. Autori koji su najznačajniji su Kommareddy, Kazuo, Yoshihito et al. [2].

- Savremena faza: Veštačka inteligencija (AI - Artificial Intelligence) i Digitalni blizanci (DT - Digital Twins) (2018–2025) [5].

Najznačajnija rešenja za ovaj period dali su autori Zhang, Braudel, Yang et al.

Danas se fokus pomera na autonomiju i integraciju:

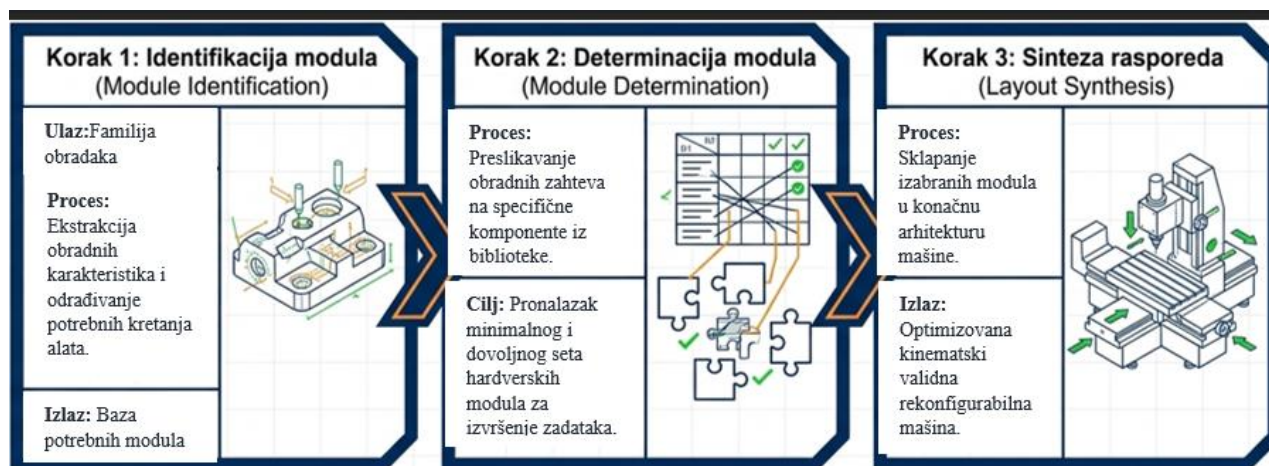
- AI Prepoznavanje (FeatureNet, FeatureFox): Duboko učenje (3D-CNN) prepoznaje karakteristike obrade direktno iz CAD modela, eliminišući manuelno planiranje [3].
- Digitalni blizanci (DT): Sistemi sada koriste digitalne replike za simulaciju rekonfiguracije pre fizičke izmene, smanjujući vreme zastoja.
- Sajber-fizička rekonfiguracija: Integracija AI, DT i proširene stvarnosti (XR) omogućava mašinama da same predlažu strategije rekonfiguracije na osnovu stanja alata i senzora u realnom vremenu.

Tabela 1. Karakteristike tradicionalnih i savremenih metoda projektovanja i konfigurisanja		
Kriterijum	Tradicionalne metode (Heuristike/Grafovi)	Savremene AI metode (DT - Deep Learning)
Metodologija	Ručno kodirana pravila, dekompozicija zapremine i uparivanje grafova.	Automatsko učenje prostornih distribucija iz 3D modela (vokseli ili grafovi).
Geometrijska složenost	Često otkazuju kod kompleksnih, preklapajućih i presecajućih karakteristika.	Uspešno prepoznaju preklapajuće geometrije (npr. FeatureNet, FeatureFox).
Efikasnost i održavanje	Skupo održavanje sa porastom varijanti delova; zahtevaju ekspertsko definisanje pravila.	Visoka izmenljivost i preciznost
Brzina rekonfiguracije	Spora, zasnovana na manuelnom planiranju procesa (CAPP).	Brža rekonfiguracija uz integraciju AI.
Upravljanje (Control)	Fiksne arhitekture i ograničena programabilnost.	Otvorene arhitekture sa niskom latencijom (kašnjenjem u prenosu podataka) i AI-vođenim odlučivanjem.

Tabela 1. pokazuje da je glavni naučni pomak u prelasku sa reaktivnog projektovanja (zasnovanog na pravilima) na proaktivno i autonomno projektovanje (zasnovano na AI).

Modularne rekonfigurabilne mašine alatke (MRMT) predstavljaju naprednu klasu inteligentnih proizvodnih sistema projektovanih na principu „gradivnih blokova“. Za razliku od konvencionalnih CNC mašina sa fiksnom arhitekturom, MRMT omogućavaju kinematičku rekonfiguraciju mehaničke strukture i upravljačkog softvera radi prilagođavanja specifičnim operacijama unutar familije delova. Prema utvrđenoj inženjerskoj metodologiji, proces projektovanja se odvija kroz tri sukcesivne faze [1]:

- **Identifikacija modula (Module Identification):** Dekompozicija opštih mašina alatki i formiranje biblioteke komponenti (module component library) i biblioteke karakteristika obrade (machining feature library).
- **Determinacija -određivanje modula (Module Determination):** Selekcija optimalnog seta modula na osnovu kinematičkog mapiranja zahteva alata.
- **Sinteza rasporeda (Layout Synthesis):** Generisanje i evaluacija finalnih konfiguracija korišćenjem algoritama teorije grafova. Primarni cilj je postizanje „prilagodljive fleksibilnosti“ (customisable flexibility) uz minimalnu investiciju u hardver, omogućavajući skalabilnost kapaciteta i funkcionalnosti sistema.



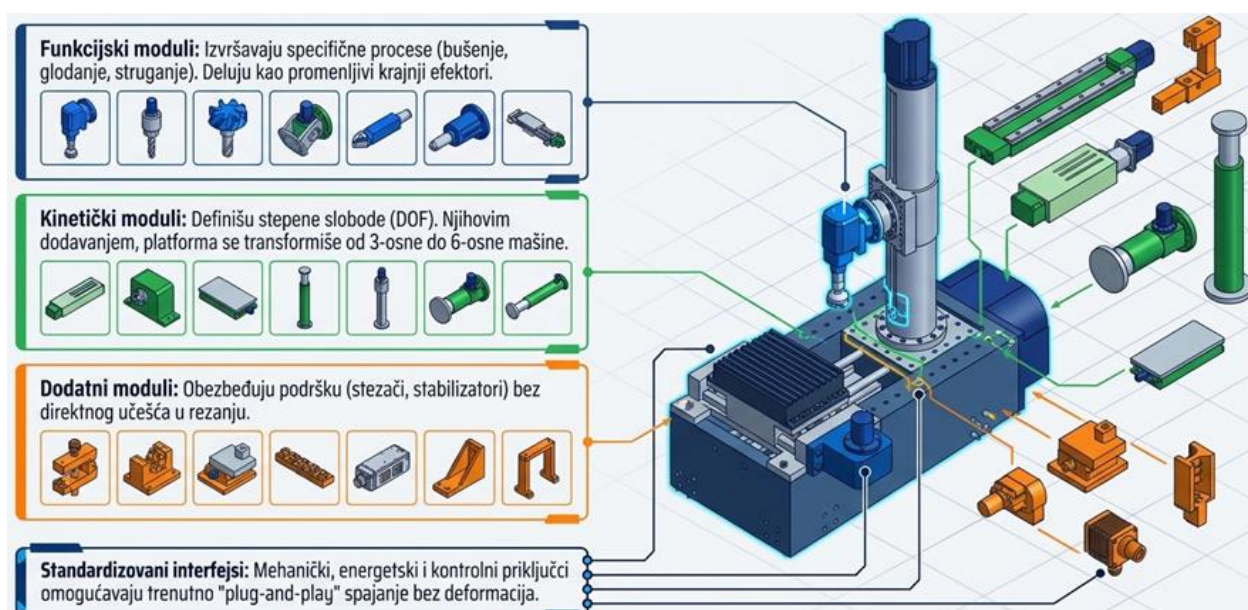
Slika 1. Metodologija projektovanja u 3 koraka

3. MODULI MAŠINA ALATKI I NAČINI POVEZIVANJA U JEDAN FUNKCIONALAN SISTEM

3.1 Klasifikacija modula Modularne rekonfigurabilne mašine (MRMT)

Modularne rekonfigurabilne mašine (MRMT) sastoje se od biblioteke unapred pripremljenih komponenti koje se dele u tri osnovne kategorije:

- **Funkcionalni moduli:** Obezbeđuju specifične procese obrade kao što su glodanje, bušenje, struganje ili brušenje.
- **Kinematički moduli – moduli kretanja:** Određuju stepene slobode (DOF - Degree of Freedom) mašine i uključuju linearne klizače (X, Y, Z ose) i rotacione stolove.
- **Pomoćni (dodatni) moduli:** Obuhvataju potporne strukture kao što su postolja (beds), stubovi (columns), stezne glave i stabilizatori.



Slika 2. Osnovne kategorije modula mašina alatki

Da bi se moduli fizički spojili u kinematički lanac, koriste se tri tipa portova (priključnih mesta) [4]:

- **Fiksni portovi:** Služe za čvrsto spajanje statičnih komponenti gde je koordinatni sistem fiksiran.
- **Prizmatski portovi:** Omogućavaju linearno kretanje jednog modula u odnosu na drugi duž ose (klizni spojevi).
- **Rotacioni portovi:** Omogućavaju rotaciju modula oko određene ose (obrti spojevi).

Povezivanje modula po principu „Lego kocki“ oslanja se na tri nivoa standardizacije:

- Mehanički interfejsi: Fizičke površine za spajanje, najčešće pomoću vijčanih veza koje omogućavaju brzu izmenu topologije mašine.
- Energetski interfejsi: Obezbeđuju napajanje za aktuator (motore) unutar svakog modula.
- Upravljački interfejsi: Razmena signala sa senzorima i kontrolerom, često organizovana kroz Master/Slave arhitekturu preko USB mreže.

U procesu projektovanja, moduli se grupišu prema učestalosti korišćenja za određenu porodicu delova [6]:

- Zajednički (Common) moduli: Čine bazu mašine koja se ne menja.
- Slični (Similar) moduli: Koriste se za promenu konfiguracije radi prilagođavanja različitim zadacima.
- Singularni moduli: Specifični za samo jedan tip operacije i retko se rekonfigurišu.

Preciznost pozicije vrha alata direktno zavisi od kvaliteta veza. Tokom montaže mogu nastati tri tipa grešaka: greška u nadovezivanju (concatenation), ekscentričnost ivica (edge offset) i ukošenost (skewness). Iako su ove greške na pojedinačnim spojevima male, njihova akumulacija kroz modularnu strukturu može značajno uticati na tačnost obrade ako se ne primeni softverska kompenzacija.

3.2. Biblioteka komponenti modula (Module Library)

Biblioteka modula služi kao centralna baza podataka iz koje se biraju gradivni blokovi za mašinu. Ona se formira analizom standardnih mašina alatki opšte namene, uključujući vertikalne i horizontalne strugove, kao i glodalice [9,10].

Sve komponente u biblioteci se klasifikuju prema svojoj primarnoj funkciji:

- **Moduli kretanja:** Sistemi za linearno (X, Y, Z klizači) i rotaciono kretanje. Oni definišu kinematičke stepene slobode mašine.
- **Moduli podrške (strukturni):** Postolja (bed) i stubovi (column) koji nose ostale module.
- **Funkcionalni moduli:** Vretena (spindles) i glave alata koji direktno vrše obradu.

Svaki modul u bazi ima precizno definisane interfejse (portove) koji omogućavaju „Lego“ princip spajanja. Započeta je analiza prizmatičnih obradaka i karakterističnih površina koje se na njima obrađuju. Takođe je cilj da se u narednom naučnom radu predstavi primena 3D CNN u analizi obradaka kako bi se nakon toga dobio predlog mašine alatke neophodne za obradu [3].

Prizmatični obradci su delovi čija se geometrija definiše kroz skup standardnih karakteristika obrade (machining features) kao što su džepovi, rupe, žlebovi i stepenici. Njihova složenost varira od jednostavnih oblika do kompleksnih konfiguracija sa preklapajućim i isprepletenim karakteristikama koje zahtevaju proaktivnu analizu direktno iz CAD modela. Za obradu ovakvih delova koriste se specifične konfiguracije mašina alatki prilagođene potrebnim smerovima prilaza alata (TAD).

Glavne konfiguracije mašina za obradu prizmatičnih delova su:

- **3-osna vertikalna konfiguracija:** Sastoji se od tri translacije (X, Y, Z ose) i vretena postavljenog vertikalno. Ova postavka je dovoljna za većinu karakteristika kao što su džepovi, ispusti, žlebovi i stepenici.
- **Rotaciona (4-DOF) konfiguracija:** Uključuje dodatni rotacioni sto koji omogućava obradu karakteristika pod različitim uglovima, što je često neophodno za specifične tipove rupa bez promene stezanja dela.
- **Konfiguracija za struganje:** Koristi translaciju i vreteno postavljeno duž Y ose za obradu karakteristika rotacionog oblika koje se mogu naći na prizmatičnim blokovima.

Modularni pristup omogućava da se mašina adaptira na složenost dela dodavanjem ili uklanjanjem modula kretanja, čime se postiže varijabilnost od 3 do čak 6 stepeni slobode na istoj platformi. Ovaj pristup osigurava da mašina uvek poseduje samo onu funkcionalnost koja joj je trenutno potrebna, bez skupih viškova koji su karakteristični za standardne CNC sisteme [7,8].

4. ZAKLJUČAK

Implementacija modularnih rekonfigurabilnih mašina alatki (MRMT), podržana naprednim metodama veštačke inteligencije predstavlja ključni pomak ka inteligentnoj proizvodnji. Glavna prednost ovog pristupa je prilagodljiva fleksibilnost, koja omogućava proizvođačima da investiraju isključivo u set modula koji je

neophodan za trenutne potrebe, čime se drastično smanjuju početni troškovi i izbegava kupovina suvišnih funkcija.

Tabela 2. Prednosti primene rekonfigurabilnosti mašina alatki			
Kriterijum	Namenske mašine alatke	Fleksibilne mašine i sistemi	Rekonfigurabilne mašine alatke i sistemi
Izmenljivost kapaciteta	Loša	Loša	Odlična
Izmenljivost funkcija	Nulta	Prekomerna	Optimalna (tačno po potrebi)
Visina početnog kapitala	Nizak	Ekstremno visok	Minimalan
Otvorenost softvera	Zatvoren	Zatvoren	Potpuno otvoren

Integracija AI alata i softvera omogućava automatizaciju procesa od CAD dizajna do fizičke konfiguracije, postizuci preciznost prepoznavanja karakteristika razlicitih obradaka i mašina. Matematička evaluacija kroz indekse krutosti i osetljivosti na greške osigurava da modularni sistemi zadrže preciznost i stabilnost konvencionalnih mašina, dok agent-bazirane metode optimizuju putanje alata za vrhunski kvalitet obrade. Budućnost rekonfiguracije leži u potpuno autonomnim, samorazvijajućim sistemima koji će omogućiti održivu i proizvodnju visokog stepena prilagodljivosti u dinamičnom tržišnom okruženju.

ЗАХВАЛНОСТ

Аутори изражавају захвалност Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на подршци овом истраживању (број уговора 451-03-34/2026-03/200108). Ово истраживање доприноси Агенди Уједињених нација за одрживи развој до 2030. године, посебно Циљу одрживог развоја 9: Изградња отпорне инфраструктуре, промоција инклузивне и одрживе индустријализације и неговање иновација.

5. LITERATURA

- [1] Xu, Z., Xi, F., Liu, L., & Chen, L. (2017). *A Method for Design of Modular Reconfigurable Machine Tools*, Machines 2017, 5, 5; doi:10.3390/machines5010005
- [2] Padayachee J., Bright G. and Masekamela I., *Modular reconfigurable machine tools: design, control and evaluation*, South African Journal of Industrial Engineering, Vol 20(2), 2009, pp. 127-143.
- [3] Zhang Z., Jaiswal P., Rai R., *FeatureNet: Machining Feature Recognition based on 3D Convolution Neural Network*, Computer-Aided Design (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.03.006>
- [4] Huang, S., Xu, Z., et al., *Reconfigurable machine tools design for multi-part families*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105, 2019, pp.813–829.
- [5] Mayer A., Greif L., Häußermann T., Otto S., Kastner K., Bobbou S., Chardonnet J., Reichwald J., Fleischer J., Ovtcharova J., *Digital Twins, Extended Reality, and Artificial Intelligence in Manufacturing Reconfiguration: A Systematic Literature Review*, Sustainability 2025, 17, 2318 <https://doi.org/10.3390/su17052318>
- [6] Kumar, A. S., & Milisavljevic-Syed, J., AI-based Reconfigurable Inspection System (RIS): Comprehensive Model and Implementation in Industry. *Procedia CIRP*, 120, 2023, pp. 87-92.
- [7] Huang, S., Xu, Z., et al., Reconfigurable machine tools design for multi-part families. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2019, pp. 813–829.
- [8] Koren, Y., et al., Reconfigurable manufacturing systems. *Annals of the CIRP*, 48(2),1999, pp. 527-540.
- [9] Yoshimi Ito: *Modular Design for Machine Tools*, The McGraw-Hill Companies, 2008. DOI: 10.1036/0071496602
- [10] Ljubomir S. Lukić: *Fleksibilni tehnološki sistemi*, Mašinski fakultet, Kraljevo, 2008

Ivanović, M., Radičević, B., Grković, V., Petrović, A.

DESIGN METHODOLOGY OF MODULAR RECONFIGURABLE MACHINE TOOLS

Abstract: The modern industrial environment requires a transition from traditional production systems of fixed architecture to intelligent, autonomous solutions capable of rapid adaptation. This paper explores the concept of modular reconfigurable machine tools. This approach allows the machine to have only the functions it currently needs, which drastically reduces initial investment costs compared to expensive CNC systems. The design of modular structures not

only ensures high processing precision, but also significantly reduces downtime when changing the production program. The paper concludes that modularity and reconfigurability are key pillars of sustainable and economically profitable smart production.

Keywords: *Modular design, Reconfiguration of machine tools, Smart manufacturing*