

Kokotović, B., Slavković, N. ¹⁾

VERIFIKACIJE PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA PRI OBRADI CILINDRIČNIM VRETNASTIM GLODALIMA ²⁾

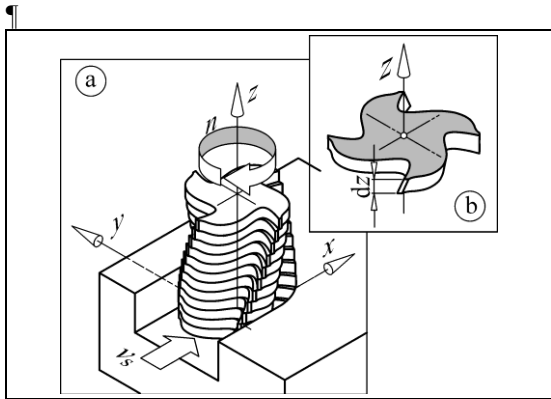
Rezime

U konceptu virtuelne obrade (VM), bitnu funkciju predstavlja predikovanje sila duž programirane putanje. To je važno kako za ocenu projektovanog tehnološkog procesa, tako i za njegovu optimizaciju, kroz off-line podešavanje parametara obrade. U radu je primenjen makromehanički model sila rezanja i procedura predikovanja trenutnih vrednosti sila glodanja, zasnovan na simulaciji obrtanja alata diskretizovane rezne geometrije. Obavljena je procedura eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja. Poznati simulacioni model je unapređen detaljima koji se odnose na radijalno bacanje sečiva alata i na složenije mape zahvata. Eksperimentalno je potvrđen kvalitet predstavljene procedure kroz skup reprezentativnih primera obrade.

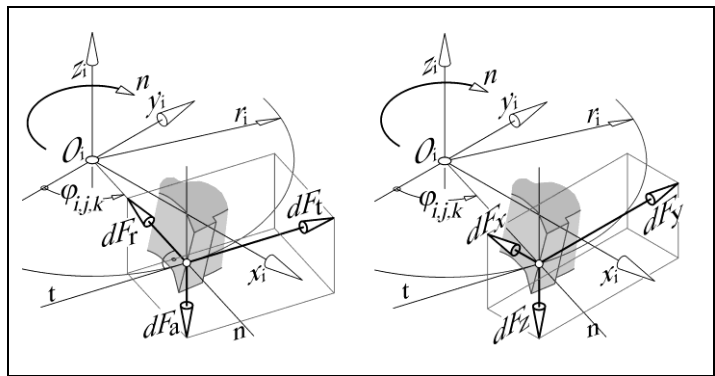
Ključne reči: obrada vretenstim glodalom, modeliranje, predikovanje sila, eksperimentalna verifikacija

1. UVOD

Procedure predikovanja sila pri obradi alatima složenije geometrije polaze, po pravilu, od diskretizacije reznog dela alata. Za slučaj vretenastih glodala sa zavojnim zubima ova diskretizacija podrazumeva identifikaciju diskova (kao na slici 1) konačno male debljine dz dužine elementarnih sečiva dL .



Slika 1. Diskretizacija reznog dela glodala



Slika 2. Plan sila na elementarnoj dužini sečiva

Komponente sile rezanja na elementarnoj dužini sečiva [1], koje pripada i -tom disku i j -tom sečivu glodala su, kao na slici 2 (pokazani su otpori):

$$dF_t(i, j) = dF_{tc}(i, j) + dF_{te}(i, j) = K_{tc} h_s(i, j) \cdot dz + K_{te} dL$$

$$dF_r(i, j) = dF_{rc}(i, j) + dF_{re}(i, j) = K_{rc} h_s(i, j) \cdot dz + K_{re} dL$$

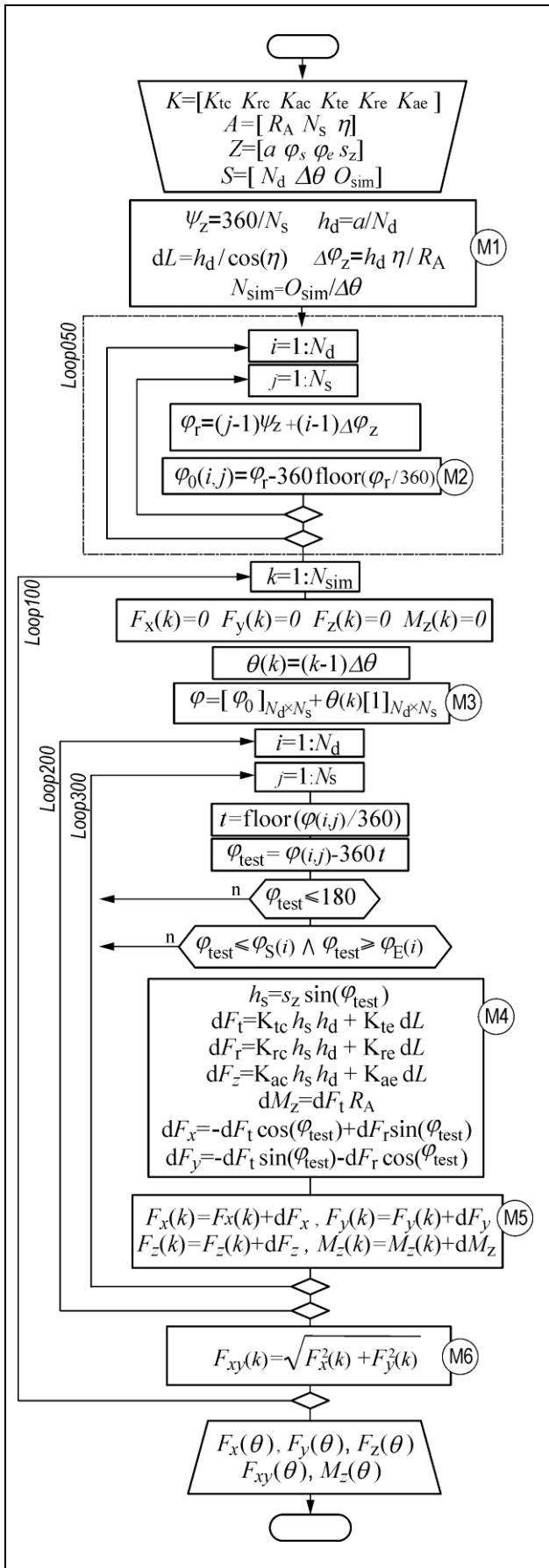
(1)

$$dF_a(i, j) = dF_{ac}(i, j) + dF_{ae}(i, j) = K_{ac} h_s(i, j) \cdot dz + K_{ae} dL$$

¹⁾ Doc. dr Branko Kokotović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (bkokotovic@mas.bg.ac.rs)

Nikola R. Slavković, dipl.inž.maš., asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (nslavkovic@mas.bg.ac.rs)

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR035022 Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansijski podržava Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.



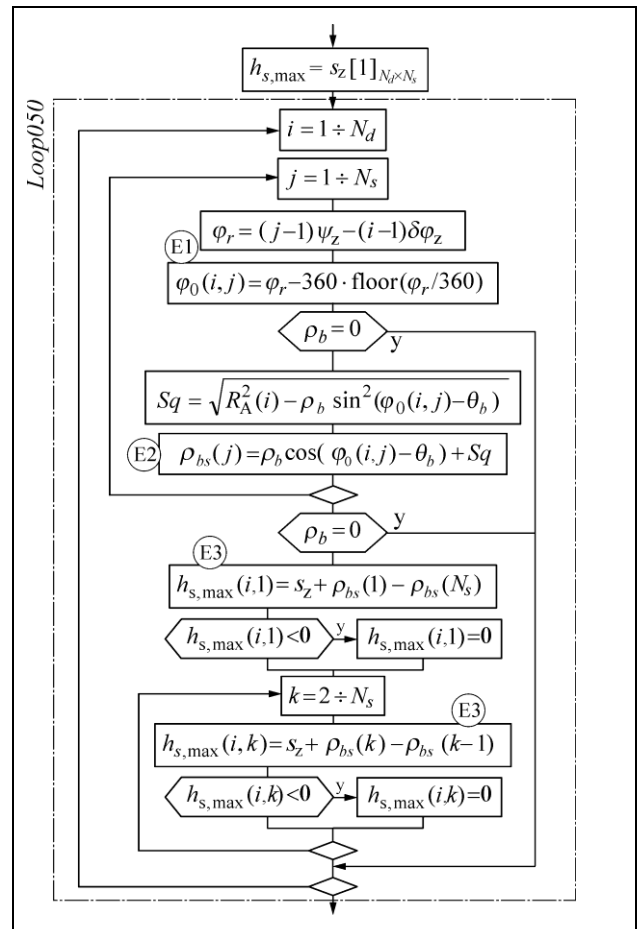
Slika 3. Predikovanje trenutnih vrednosti komponenata sile – osnovni model

Koordinatni sistem je pravougli desni sa osom x , koja se poklapa sa vektorom v_s brzine pomoćnog kretanja. Koordinatni početak je na vrhu glodala. Svaka od sila dF_t , dF_r i dF_a je dualne prirode [1] i obuhvata efekte smicanja u zoni rezanja dF_{mc} i efekte trenja u tercijalnoj zoni rezanja $dF_{m,e}$ ($m=t, r, a$). Komponente dF_{mc} se smatraju linearnom funkcijom trenutnog preseka strugotine ($h_s dz$) a ivične komponente $dF_{m,e}$ su srazmerne dužini sečiva u kontaktu (dL).

U k -tom koraku simulacije obrtanja glodala ugaoni položaj elementarnog sečiva je određen uglom $\varphi(i,j,k)$. U idealnom slučaju, kada nema radijalnog bacanja reznog dela alata, sva elementarna sečiva cilindričnog vretenastog glodala će se obrtiti sa radiusom $R_A = D/2$. Tada je moguće promenu debljine strugotine definisati kao funkciju koraka po zubu s_z :

$$h_{s,n}(i,j,k) = s_z \sin \varphi(i,j,k) \quad (2)$$

Uz ovakvu pretpostavku, za slučaj jednostavnih mapa zahvata, dijagram toka simulacije trenutnih vrednosti sila je kao na slici 3.



Slika 4. Početni uslovi za slučaj radijalnog bacanja reznog dela glodala

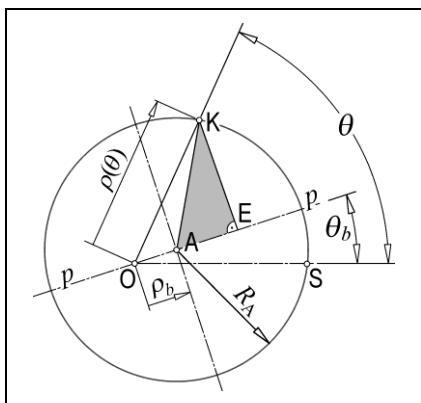
Skup ulaznih parametara za proceduru pokazanu na slici 3 čine:

- podskup koeficijenata komponentnih sila rezanja, $K = [K_{tc} \ K_{te} \ K_{rc} \ K_{re} \ K_{ac} \ K_{ae}]$,
- podskup atributa alata, $A = [R_A \ N_s \ \eta]$ (R_A – nazivni poluprečnik, $N_s = z$ - broj sečiva, η -ugao nagiba sečiva),
- podskup parametra zahvata, $Z = [s_z \ \varphi_S \ \varphi_E \ a]$ (s_z -korak po zubu; φ_S, φ_E - ulazni i izlazni ugao zahvata; a -dubina) i
- podskup parametara same simulacije, $S = [N_d \ \Delta\theta \ O_{sim}]$ (N_d -broj diskova glodala na datoj dubini glodanja a , $\Delta\theta$ -ugaoni inkrement simulacije obrtanja alata; O_{sim} - ugao, u okviru punog obrta, koji je predmet simulacije).

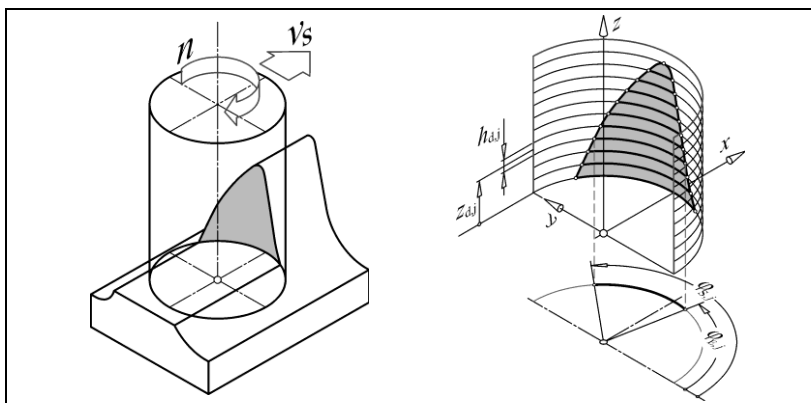
U slučaju radijalnog bacanja [2], svako elementarno sečivo diskretizovanog reznog dela glodala se obrće sa drugačijim radijusom i trenutni presek strugotine se izračunava kao:

$$h_s(i, j, k) = h_{s,max}(i, j) \sin \varphi(i, j, k) \quad (3)$$

što podrazumeva promenu u modulu M4 osnovne procedure. Svako sečivo (i, j) diskretizovanog reznog dela glodala se karakteriše svojom veličinom $h_{s,max}(i, j)$. Vrednosti za $h_{s,max}(i, j)$ se određuju u korigovanoj petlji (Loop050) za određivanje početnih položaja pojedinih sečiva [3], kako je pokazano na slici 4. Pod pretpostavkom da je geometrijska osa reznog dela glodala translirana radijalno u odnosu na osu obrtanja, radijalno bacanje reznog dela se definiše preko dva parametra: ρ_b [mm], kao rastojanja tih dveju osa i θ_b [°] koje predstavlja ugao vektora ρ_b prema potegu vrha izabranog referentnog zuba glodala na njegovom čeonom delu [5], kao na slici 5.



Slika 5. Stvarni radijus obrtanja tačke na obimu glodala



Slika 6. Obrada vretenastim glodalom pri složenijim mapama zahvata, ulazni i izlazni uglovi zahvata

Procedura pokazana na slici 3 se odnosi na najjednostavniji slučaj, a pored nultog radijalnog bacanja podrazumeva jednostavnu mapu zahvata, definisanu sa tri parametra (dubina a , ulazni i izlazni ugao zahvata: φ_S, φ_E). U brojnim praktičnim slučajevima mapa zahvata (površ kontakta obratka i omotača rotirajućeg glodala) je složenijeg oblika i zahteva definisanje para $(\varphi_{S,i}, \varphi_{E,i})$ ulaznog i izlaznog ugla zahvata za svaki od $i=1 \div N_d$, diskova diskretizovane rezne geometrije glodala, kao na slici 6. Tačnije, aproksimacija mape zahvata skupom lukova u ekvidistantnim ravnima, na rastojanju dz , u opštem slučaju bi podrazumevala mogućnost definisanja parova ulaznih i izlaznih uglova za proizvoljan broj lukova u svakoj od tih ravni. U praktičnoj implementaciji ove procedure, izvedene u programskom okruženju Matlab, postavljeno je ograničenje da za svaki disk glodala mogu biti definisana do dva luka. Na taj način je moguće opisati vrlo veliki broj praktičnih slučajeva pri obradi ravanskih kontura cilindričnim vretenastom glodalom: istosmerno i suprotnosmerno glodanje, glodanje žljeba, proširivanje žljeba, kao i prelazni režimi ulaza i izlaza alata u/z materijala obratka.

U okviru obavljenih istraživanja [3] programska implementacija (program *sim1rev.m*) opisane procedure je razvijena sa ciljem da posluži kao rutina, koja se ponavlja u većem broju tačaka, sa ciljem razvoja procedure predikovanja reprezentativnih (min,max) vrednosti komponenata sile glodanja duž programirane putanje glodala.

Verifikacija procedure predikovanja sila i njene programske implementacije podrazumevaju dve faze. To su identifikacija specifičnih sila (koeficijenta sile), odnosno vektora $K = [K_{tc} \ K_{te} \ K_{rc} \ K_{re} \ K_{ac} \ K_{ae}]$, za izabrani par koji čini materijal obratka, s jedne strane i materijal alata i geometrija njegovog reznog dela, sa druge strane. Detalji identifikacije ovih koeficijenata su pokazani u poglavlju 2 ovog rada. Drugu fazu čini sama verifikacija procedure, koja podrazumeva poređenje profila trenutnih vrednosti komponenata sile glodanja i to predikovanih, kroz opisanu proceduru, i dobijenih merenjem u eksperimentima sa obradom.

Za ilustraciju je izabrana obrada legure aluminijuma AlZn4Mg2 vretenastim cilindričnim glodalima od HSSE, sa reznom geometrijom koja je definisana grudnim uglom od 11° i uglom nagiba zavojnih zuba od 30° . Razmatranje je ograničeno na komponente sile glodanja u ravni obrade.

2. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA GLODANJA

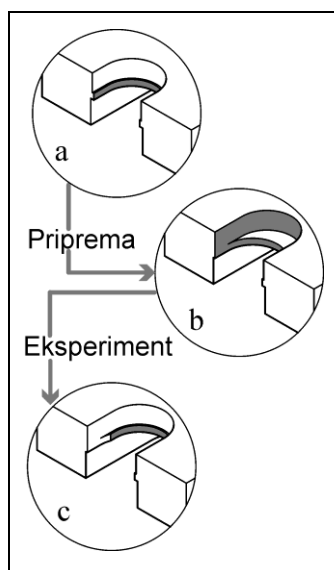
Jedan od postupaka eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja, kakav se često navodi u literaturi [1,4,5], podrazumeva niz eksperimenata obrade žljeba u punom materijalu glodalom odgovarajuće rezne geometrije i broja zuba z . U nizu od N_c takvih eksperimenata se, pri konstantnoj dubini a i širini glodanja $b=D$, varira korak po zubu $s_{z,p}$ ($p=1 \div N_c$), u reprezentativnom intervalu i tokom obrade se formiraju vremenski zapisi pojedinih komponenata sile glodanja (F_x , F_y i F_z). Iz takvih vremenskih zapisa se izdvaja interval koji odgovara punom obrtu alata i unutar njega se izračunavaju srednje vrednosti komponenata (\bar{F}_x , \bar{F}_y i \bar{F}_z) za svaki eksperiment, odnosno za svaki korak po zubu $s_{z,p}$.

U [1] su dati dokazi da se srednje vrednosti komponenata sile glodanja u zavisnosti od koraka po zubu, u slučaju obrade žljeba, mogu opisati linearnim funkcijama:

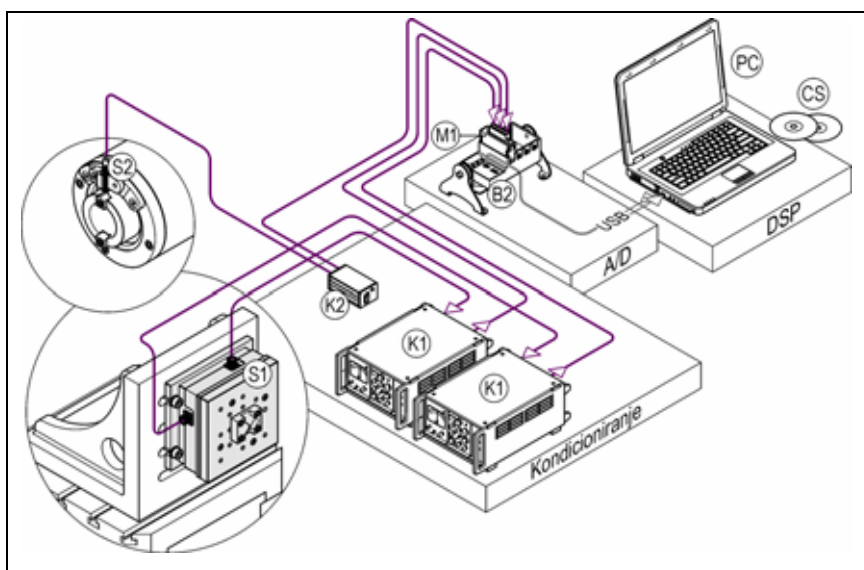
$$\begin{aligned} \bar{F}_X &= \bar{F}_{Xc}s_z + \bar{F}_{Xe} = -\frac{za}{4} K_{rc}s_z - \frac{za}{\pi} K_{re} \\ \bar{F}_Y &= \bar{F}_{Yc}s_z + \bar{F}_{Ye} = \frac{za}{4} K_{tc}s_z + \frac{za}{\pi} K_{te} \\ \bar{F}_Z &= \bar{F}_{Zc}s_z + \bar{F}_{Ze} = \frac{za}{\pi} K_{ac}s_z + \frac{za}{2} K_{ae} \end{aligned} \quad (4)$$

Dovoljan broj (N_e) tačaka u dijagramima $\bar{F}_X(s_z)$, $\bar{F}_Y(s_z)$ i $\bar{F}_Z(s_z)$ dopušta da se odrede parametri svakog od tri linearna modela (\bar{F}_{Xc} , \bar{F}_{Xe} , \bar{F}_{Yc} , \bar{F}_{Ye} , \bar{F}_{Zc} , \bar{F}_{Ze}) nekim od regresionih metoda i da se na osnovu (4) odrede nepoznate specifične sile: K_{tc} , K_{te} , K_{rc} , K_{re} , K_{ac} i K_{ae} .

Umesto serije uobičajenih testova sa obradom žljeba, ovde se u svakom testu obrađuje tanka lamela materijala, kako je pokazano na slici 7, tako da se izbegava obrada sečivima na čeonom delu glodala,



Slika 7. Priprema obratka i obrada tanke lamele



Slika 8. Instalacija za formiranje vremenskih zapisa komponenata sile glodanja

Svakom testu prethodi obrada, kojom se formira lamela koja će imati vrlo mali prepust u odnosu na ostatak priprema, kako bi se izbegao uticaj elastičnih deformacija pri njenoj obradi. Pripremom lamele (slika 7a,b) se obezbeđuje i da tokom njene obrade (slika 7b,c) nema kontakta obimnog dela glodala sa ostatkom materijala (ispod i iznad lamele).

Obrada u svim testovima je vršena bez hlađenja, na horizontalnom obradnom centru (LOLA HMC500/40). Instalacija za merenje i akviziciju podataka je pokazana na slici 8. Ulazi modula za akviziciju su signali dveju komponentata sile sa dinamometra. Treći ulazni signal je okidački signal sa induktivnog prekidača, koristan u naknadnoj obradi vremenskih zapisa za izdvajanje perioda koji odgovara punim obrtima glavnog vretena. Pri izboru intervala koji odgovara punom obrtu alata, unutar vremenskog zapisa, potrebno je izabrati one njegove delove koji ne odgovaraju prelaznim režimima, kao što je zahvatanje pune širine glodanja, na početku, ili faza usporavanja na kraju programiranog hoda.

Oznake na slici 8 su: četvorokanalni (X/Y/Z/Mz) dinamometar sa mernim trakama, Kaprom DYN-F4M1-85 (S1) pričvršćen za ugaonik na stolu obradnog centra, induktivni beskontaktni prekidač, normalno otvoreni (S2), jednokanalni merni most sa nosećom frekvencijom 5kHz, HBM-KWS3082A (K1), baterijski modul 9VDC Kaprom PS-B-9VDC (K2), 4-kanalni analogni naponski ulazni modul sa simultanim uzorkovanjem 16 bit, 100 kS/s/CH, NI 9215 (M1), USB 2.0 CompactDAQ sistem, NI cDAQ-9174 (B2), računar konfigurisan za rad sa sistemom za akviziciju podataka (PC) i programski paket NI LabView (CS₁) i Matlab (CS₂). Detalji pripreme obradnog sistema i merne instalacije pokazani su na slici 9.

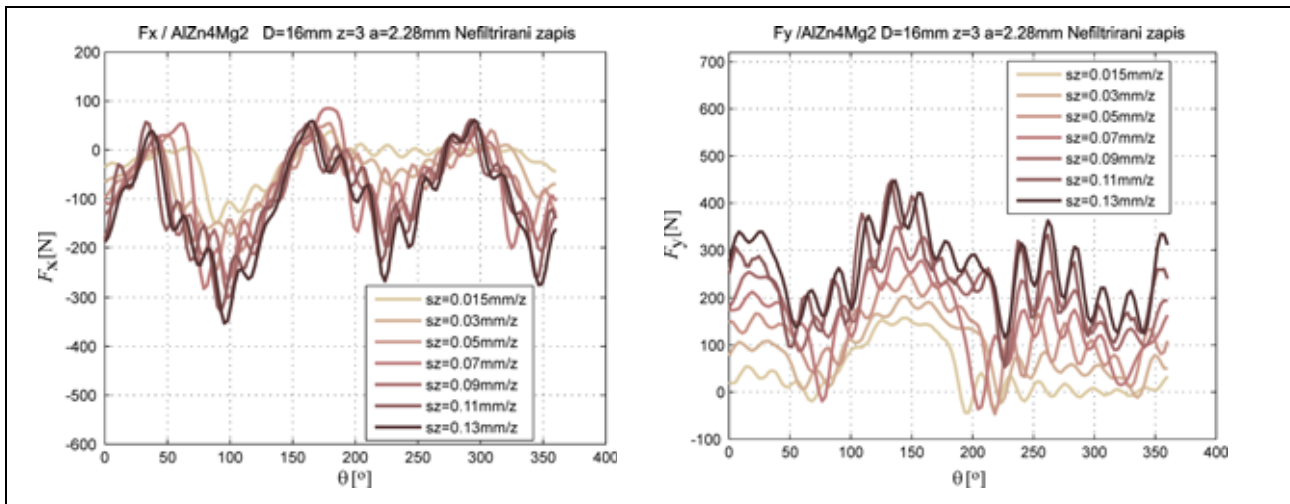


Slika 9. Detalji pripreme eksperimenata za identifikaciju specifičnih sila rezanja

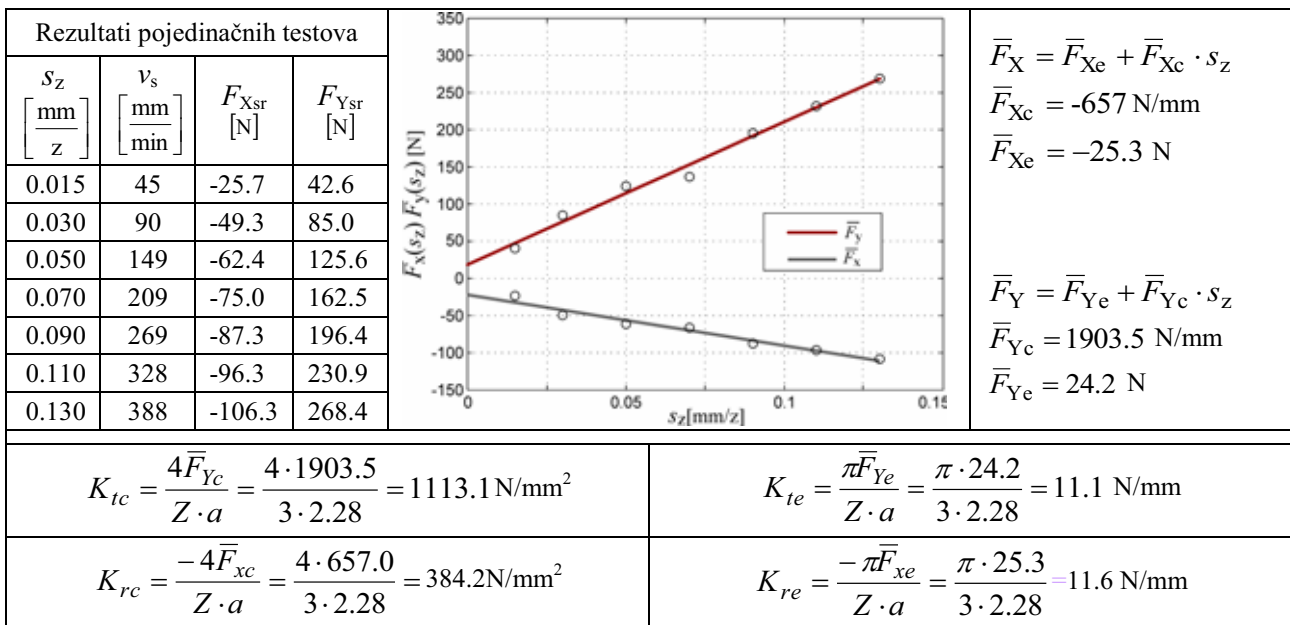
Detalji pripreme i izvođenja niza eksperimenata, radi formiranja vremenskih zapisa promene komponentata F_x i F_y , sile glodanja, pokazani su u tabeli 1. U svakom od 7 eksperimenata je vršena obrada tanke lamele materijala (prema slici 7) iste debljine i širine koja je jednaka prečniku reznog dela glodala. Svaki od ovih eksperimenata je izveden sa drugačijim korakom po zubu, u intervalu od 0.015 do 0.13 mm/z. Vremenski zapisi dveju komponentata sile glodanja, izolovani na punom obrtu alata su pokazani na slici 10. Za svaki od ovako dobijenih zapisa izdvajaju se srednje vrednosti za F_x i F_y . Te vrednosti i parametri linearnih funkcija, kojima su opisane zavisnosti $\bar{F}_X(s_z)$ i $\bar{F}_Y(s_z)$, kao i konačno identifikovane specifične sile rezanja (K_{tc} , K_{te} , K_{rc} i K_{re}), pokazani su na slici 11. Pomenuti parametri (koeficijent pravca i odsečak na koordinatnoj osi) su određeni korišćenjem Matlab funkcije *polyfit*.

U dijagramima vremenskih zapisa je, pored perioda ulaska zuba glodala u zahvat, uočljiva i dinamička komponenta više frekvencije koja se može pripisati uticaju dinamike mehaničke strukture dinamometra. Radi smanjenja ovog uticaja, srednje vrednosti \bar{F}_X i \bar{F}_Y su, za svaki eksperiment, računane iz vremenskih zapisa za 5 punih obrta.

Tabela 1. Uslovi izvođenja eksperimenata za identifikaciju specifičnih sila rezanja	
Materijal obratka	AlZn4Mg2 (EN AW 7019), $R_m=390\text{Mpa}$, 125HB. Pripremak: 84 x 74 x 26mm
Alat	Vretenasto glodalo sa cilindričnom drškom (DIN327) HSSE(8%Co), Prečnik reznog dela $D_A=16\text{mm}$, 3 zuba, Nagib zavojnice sečiva $\eta=30^\circ$, Grudni ugao $\gamma=11^\circ$
Stežanje alata	Držač ISO40/glava za elastične stezne čaure; Stezna čaura OZ40 $\varnothing 16$ (DIN ISO 15488).
Obrada	Širina glodanja $b=D_A$, bez kontakta čeonih sečiva sa obratkom. Dužina sečiva u kontaktu $a=2.28\text{ mm}$. Broj obrta glavnog vretena $n=995\text{min}^{-1}$ (odgovara brzini rezanja $v=50\text{m/min}$). Obrada duž ose +X, mašine.
Specifičnosti akvizicije podataka	Brzina odabiranja (uzorkovanja) $n_s=2200\text{ S/s}$, Vreme obuhvaćeno svkim zapisom $T_A=4\text{s}$. Analogni filter (hadverski) $f_f=2000\text{Hz}$ (Butterworth).



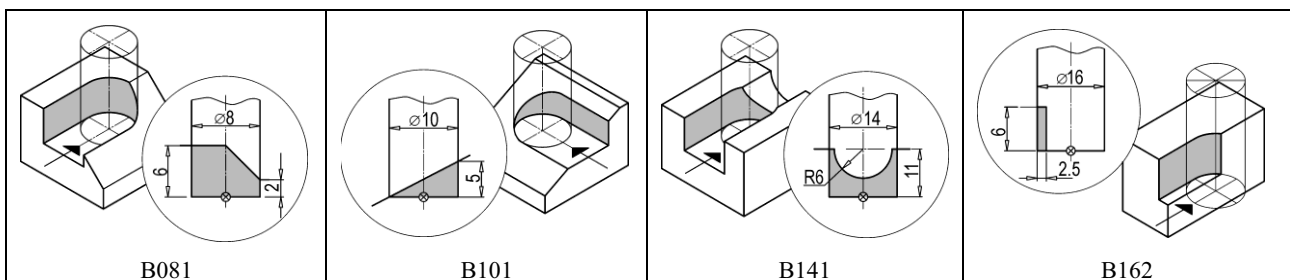
Slika 10. Dijagrami vremenskih zapisa (izdvojenih na punom obrtu alata) za komponente sile F_x i F_y



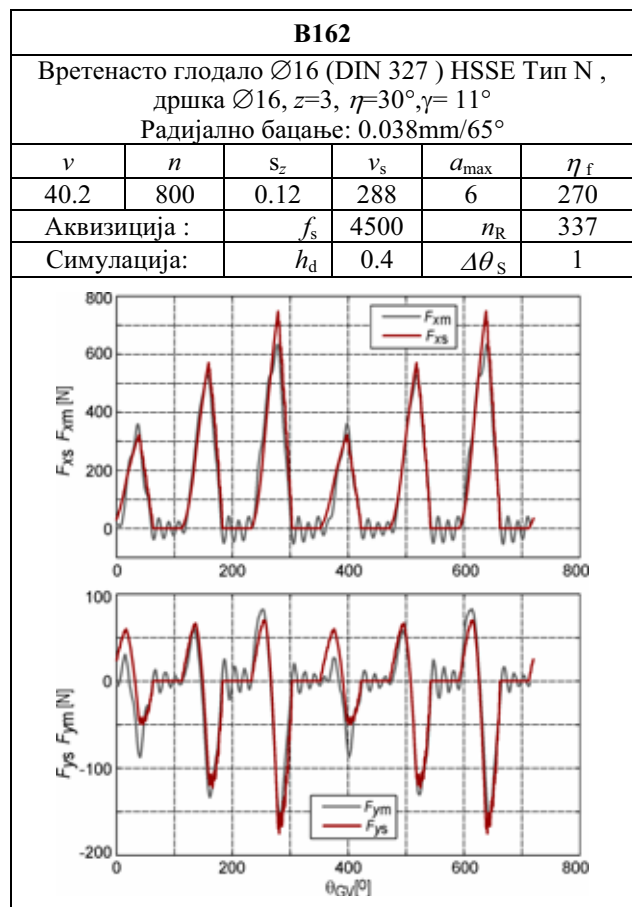
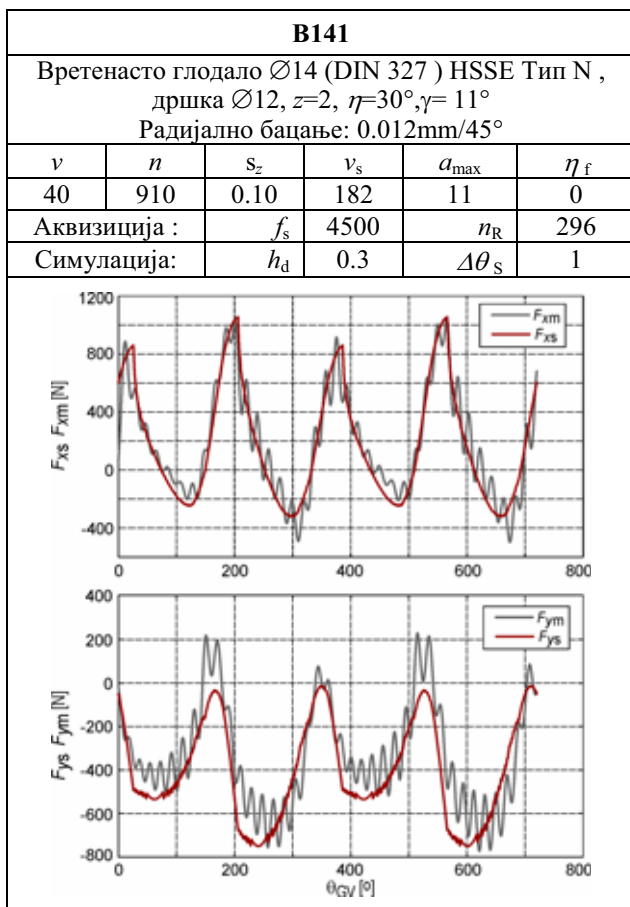
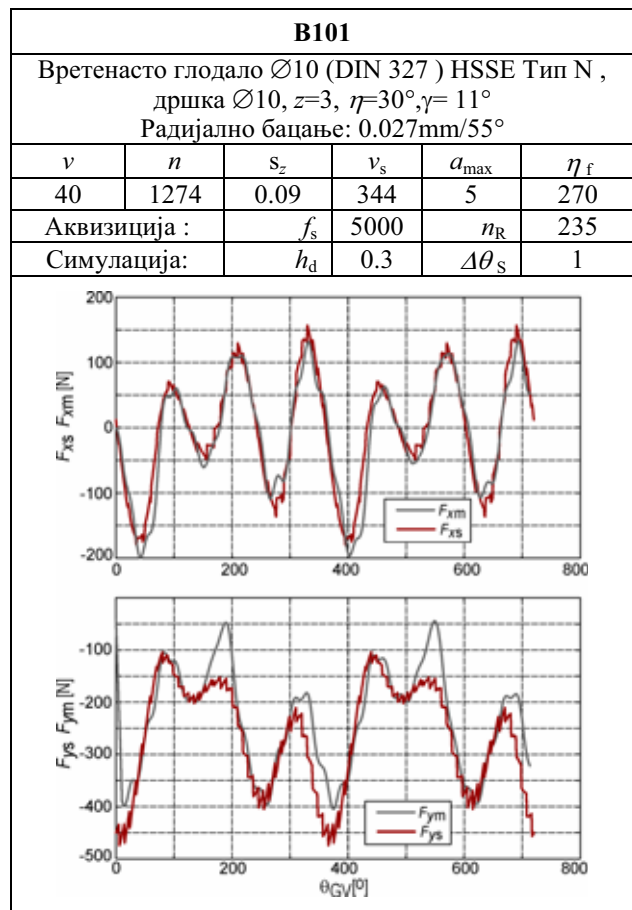
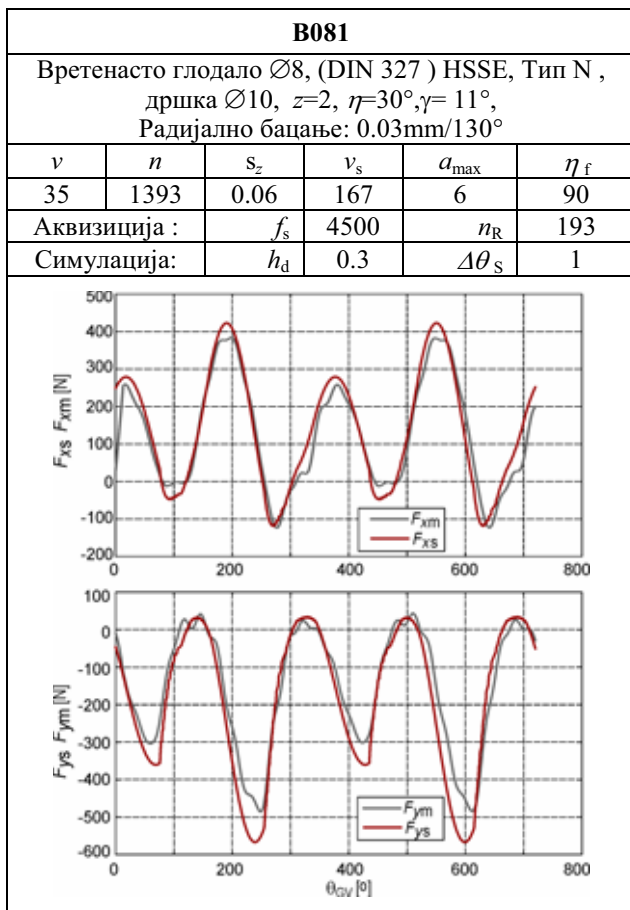
Slika 11. Identifikacija specifičnih sila rezanja na osnovu serije obavljenih eksperimenata

3. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA PROCEDURE PREDIKOVANJA SILA GLODANJA

Verifikacija pokazanog algoritma za predikovanje sila glodanja, kao i identifikovanih specifičnih sila rezanja je ostvarena kroz niz od 20 eksperimenata [3], sa različitim nazivnim prečnicima i brojevima zuba glodala i pri različitim mapama zahvata i pri različitim programiranim koracima po zubu. Ovde je za ilustraciju pokazan podskup od 4 eksperimenata, za koje su mape zahvata pokazane na slici 12.



Slika 12. Mape zahvata u eksperimentima za verifikaciju procedure predikovanja sila glodanja



Слика 13. Мапе захвата у експериментима за верификацију алгорита и идентификованих коефицијената

Podrazumeva se da je materijal obratka, u svim eksperimentima, onaj za koji su određene specifične sile rezanja (AlZn4Mg2). Eksperimenti su izvedeni na obradnom centru, pomoću iste instalacije (slika 8), koja je korišćena u eksperimentalnoj identifikaciji specifičnih sila rezanja. Detalji izvođenja pojedinih eksperimenata, sa uporednim dijagramima merenih (F_{xm}, F_{ym}) i predikovanih (F_{xs}, F_{ys}) komponenta sile glodanja, pokazani su na slici 13. Na slici su korišćene oznake: $\eta_f [^\circ]$ za ugao koji zaklapa vektor brzine v_s prema pozitivnom smeru ose +X obratka, $f_s [S/s]$ za frekvencija odabiranja u instalaciji za akviziciju podataka, n_R za broj odabiraka koji u eksperimentu odgovara jednom punom obrtu alata, $h_d [mm]$ za debljinu diskova diskretizovanog reznog dela alata, kakva je korišćena u simulaciji i $\Delta\theta_s [^\circ]$ za ugaoni inkrement simulacije obrtanja alata. Profili, koji se obrađuju, birani su na način da se jednostavno mogu izračunati ulazni i izlazni ugao zahvata, za svaki disk diskretizovane rezne geometrije.

U vremenskim zapisima merenih komponenta sile glodanja uočljiv je različit uticaj dinamike dinamometra. To se može tumačiti činjenicom da obrada u pojedinačnim primerima nije vršena u istim pravcima u odnosu na ose dinamometra (ugao η_f). I u slučajevima kada je ovaj uticaj naglašen (Primer B141, slika 13), može se uočiti zadovoljavajući kvalitet predikcija komponenta sile glodanja, kako u pogledu kvaliteta tako i kvantitativno. U sva 4 primera prisutan je uticaj radijalnog bacanja sečiva glodala, naročito u primeru B162. S obzirom na saglasnost eksperimentalnih i predikovanih profila promene trenutnih vrednosti komponenta sile glodanja jasno je da je deo procedure, koji vrši korekciju trenutne debljine strugotine saglasno parametrima radijalnog bacanja, neophodan za ostvarenje pouzdanih predikcija.

4. ZAKLJUČAK

Opisana procedura predikovanja sila glodanja je zasnovana na poznatom simulacionom modelu obrtanja alata diskretizovane rezne geometrije i makromehaničkog modela sila ne elementarnoj dužini sečiva. U odnosu na osnovni model, procedura predikovanja sila (i njena programska implementacija) pri glodanju cilindričnim vretenastim glodalima je upotpunjena na način da se u obzir uzimaju i parametri radijalnog bacanja reznog dela glodala. Dodatno unapređenje se odnosi na mogućnost predikovanja sila za slučaj složenijeg oblika mape zahvata. Kroz skup obavljenih eksperimenata pokazan je dobar kvalitet predikcija komponenta sile glodanja čime je potvrđena, kako pouzdanost same procedure i njene programske implementacije, tako i skupa eksperimentalno identifikovanih specifičnih sila rezanja.

5. LITERATURA

- [1] Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A.: *Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp.216-224, Transactions of the ASME, 1996.
- [2] Kline, W.A., DeVor, R.E. : *The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling*, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 2, pp.123–140, 1983.
- [3] Kokotović, B.: *Obrada glodanjem u virtuelnom obradnom sistemu*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2014.
- [4] Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H., Sanz, C.: *A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, pp.765-774, 2010.
- [5] Wang, M., Gao, L., Zheng, Y.: *An examination of the fundamental mechanic of cutting force coefficients*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 78, pp.1-7, 2014.

Kokotovic, B., Slavkovic N.

VERIFICATION OF THE PROCEDURE FOR PREDICTING OF FORCES IN FLAT END MILLING OPERATIONS

Abstract: *In the Virtual Machining (VM) concept, predicting of cutting forces along programmed tool path has an important function. Such function is important for evaluation of designed machining process as well as for its optimization through off-line adjustment of machining parameters. In this paper macro-mechanical model of cutting forces was used as well as procedure of milling force predicting, based on simulation of tool revolution with discretized cutting geometry. Experimental procedure for determination of specific cutting forces was conducted. Well-known simulating model was upgraded with details referred to runout of cutter and for more complex shapes of tool engagement maps. Quality of the proposed procedure was examined through the series of machining tests.*

Key words: *end milling, modelling, cutting force prediction, experimental verification.*