

UTJECAJ TEHNOLOŠKIH PARAMETARA OBRADE CILINDRIČNOG BRUŠENJA NA HAOTIČNOST VIBRACIJA

Atif Hodžić, Milan Jurković, Sanel Gredelj
Tehnički fakultet Bihać, ul. dr I. Ljubijankića, tfb@bih.net.ba,
atif.hodzic@gmail.com, mi.jurkovic@gmail.com, sanel_gredelj@hotmail.com

Ključne riječi: haotične vibracije, tehnološki parametri, pokazatelj haosa, cilindrično brušenje, plan eksperimenta, stohastičko modeliranje

SAŽETAK:

Obrađni sistemi generišu haotične vibracije koje su po intenzitetu zavisne od tehnoloških parametara obrade. Razlog je nelinearna dinamička složenost obradnih sistema sa velikim brojem faznih koordinata. Intenzitet i prisustvo haotičnih vibracija detektuje se pokazateljima haosa na osnovu eksperimentalne vremenske serije fizikalne veličine mehaničkih vibracija. Eksperimentalna vremenska serija je prva faza i izlazni parametar eksperimentalnih istraživanja. Zbog veće mogućnosti generisanja haotičnih vibracija eksperimentalno istraživanje je izvedeno na obradnom sistemu za cilindrično brušenje. Za ulazne parametare su usvojeni broj obratova obratka, poluprečnik obratka i dubina rezanja. Vrlo je bitno da pokazatelj haosa kao izlazni parametar pokazuje osjetljivost na variranje ulaznih parametara. Cilj je dobiti matematički model prema pravilima Plana eksperimenta i stohastičkog modeliranja. Prema matematičkom modelu konstruišu se odgovarajući dijagrami, na osnovu kojih se određuje utjecaj tehnoloških parametara obrade na vrijednost pokazatalja haosa, odnosno intenzitet haotičnosti vibracija

1. UVOD

Težinu istraživanje vibracija alatnih mašina (machine tool chatter), je prvi prepoznao i opisao Frederick Winslow Taylor [1856-1915] u svom radu "On the Art of Cutting Metals" iz 1907. godine. Nakon toga je bilo nekoliko pokušaja u cilju objašnjenja ovoga fenomena. Tek sa uvođenjem tzv. regenerativnog efekta došlo je do prekretnice u modeliranju vibracija, koji se odnosi na na promjenu sile rezanja prouzrokovano prethodnim prolazom alata [6]. Matematička posljedica regenerativnog efekta je nelinearna diferencijalna jednačine odgode (Delay Differential Equations - DDE). Numeričkim rješavanjem DDE dobiju se haotična (neuređena) rješenja, koja ukazuju na haotičnost vibracija [4]. Ovakva rješenja su za realne uslove obrade i eksperimentalno verificirana, što se objašnjava velikim brojem faznih koordinata obradnih sistema. Intenzitet i prisustvo haotičnih vibracija detektuje se pokazateljima haosa na osnovu eksperimentalne vremenske serije fizikalne veličine mehaničkih vibracija. Da bi se odredio utjecaj tehnoloških parametara obrade na haotičnost vibracija, potrebno je uspostaviti funkcionalnu vezu između tehnoloških parametara i pokazatelja haosa. Jedini način za to je izvođenje eksperimentalnih mjerjenja prema pravilima Plana eksperimenta u cilju dobivanja stohastičkog modela. U ovom radu razmatraće se vibracije alata za brušenje (tocila).

2. POKAZATELJI HAOSA

Da bi dinamički sistem bio haotičan, potrebno je da ispunjava sljedeće uslove: nelinearnost, disipativnost sa vanjskom pobudom i osjetljivost na početne uslove. Osnov za ispitivanje haotičnosti čine eksperimentalna mjerjenja varijabli sistema uzetih u toku realnog vremena i njihovo registrovanje koje predstavlja dinamičku vremensku seriju. Uvođenjem vremena kašnjenja (time delay) i "lažnih opservabilnih" (dodatanih varijabli koje vremenski kasne za izmjerrenom varijablom) iz vremenske serije podataka samo jedne dinamičke varijable, moguće je rekonstruisati topologiju atraktora nelinearnog sistema koji generiše tu vremensku seriju. To znači da vremenska serija jedne varijable ekstrahuje kompletan multidimenzionalni opis dinamike faznog prostora, što izgleda kontradikorno, ali se može objasniti na način da ako jedna varijabla faznog prostora ima određeni tip ponašanja, tada i ostale varijable slijede to ponašanje. Ovaj proces se odvija preko takozvane *rekonstruktivne sheme*, za što strogi matematički dokaz daje Rekonstruktivni Takenov teorem [7].

Pokazatelji haosa dijagnosticiraju da li neki sistem ima haotično ili regularno ponašanje. Ako pokazatelji utvrde da haosa nema, tada je sistem (kvazi)periodičan. Osnovna podjela pokazatelja haosa je na kvalitativne i kvantitativne. Kvalitativni pokazatelji haosa su: geometrija atraktora, Poincaréov presjek, spektar snage, autokorelaciona funkcija, DFA pokazatelj i wavelet transformacija. Kvantitativni pokazatelji su: fraktalna dimenzija atraktora, korelaciona dimenzija, Lyapunovi eksponenti i Kolmogorjeva entropija [3], [2].

Koji od pokazatelja najbolje kvantificira haotične vibracije točila i povezuje ih sa tehnološkim parametrima, zavisi od više činilaca. Najbitniji su da pokazatelj haosa kao izlazni parametar pokazuje osjetljivost na variranje ulaznih tehnoloških parametara i da dobiveni matematički model ima visoku adekvatnost. S tim u vezi kao najbolji pokazatelj haosa se pokazala korelaciona dimenzija D_c . Ako je zadana skalarna vremenska serija $y(i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, sa N podataka i vremenom odgode τ , *korelaciona suma skalarnе vremenske serije* se određuje preko formule [3]:

$$C(\rho) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \Theta(\rho - |y_i - y_j|) \quad (1)$$

gdje je $\Theta(x)$ Heavisideova funkcija definisana na način:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{za } x \geq 0 \\ 0 & \text{za } x < 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Korelaciona dimenzija D_c se definiše kao broj koji zadovoljava:

$$C(\rho) = \lim_{\rho \rightarrow 0} g \rho^{D_c} \quad (3)$$

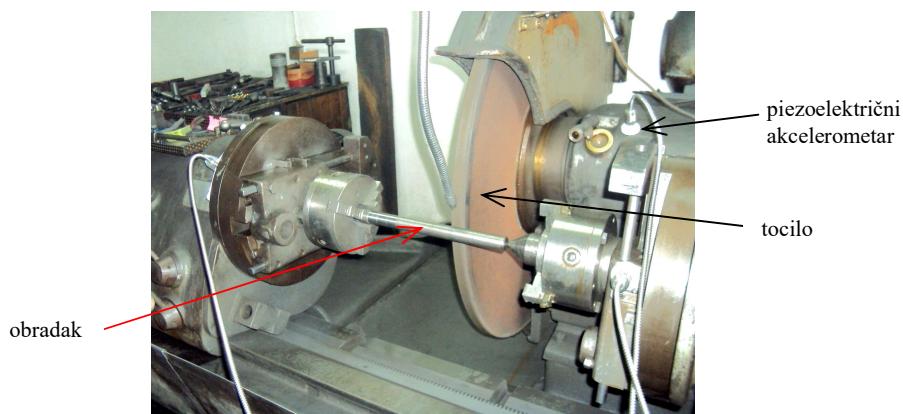
gdje je g konstanta proporcionalnosti. Praktično se D_c može naći logaritmovanjem jednačine (3) (prije uzimanja limesa):

$$D_c = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\log C(\rho)}{\log \rho}. \quad (4)$$

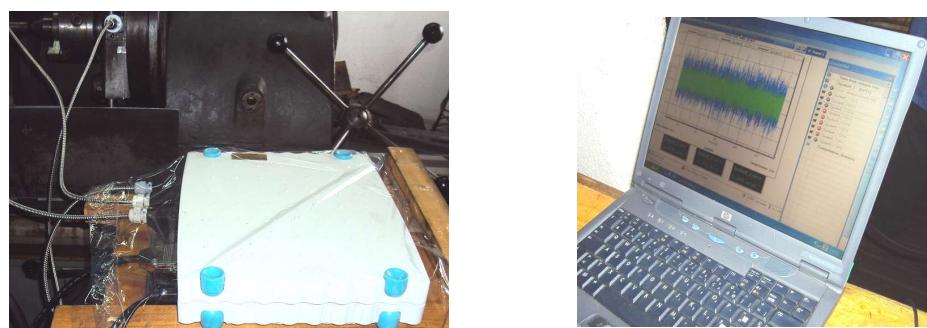
Prema tome, korelaciona dimenzija D_c se praktično dobije kao nagib regresione prave logaritamskih vrijednosti $C(\rho)$ i ρ . Ako je regresiona prava konstantna, tada se radi o periodičnim podacima. Ako nagib regresione prave teži ka 1, tada se prepostavlja da su podaci slučajni.

3. EKSPERIMENT I MATEMATIČKI STOHALSTIČKI MODEL

Zbog mogućnosti generisanja haotičnih vibracija (dvostruki regenerativni efekat) eksperimentalno istraživanje je izvedeno na mašini za kružno (cilindrično) brušenje marke "Berco", slika 1. U cilju određivanja pokazatelja haosa, eksperimentalno su izmjerene vremenske serije ubrzanja mehaničkih vibracija alata. Za to su korišteni piezoelektrični davači ubrzanja, mjerna oprema "Spider" i softver "Catman", slika 2. Prema tome je vremenska serija ubrzanja izlazna fizikalna veličina vibracija za određivanje pokazatelja haosa. Osnovni razlog je što se radi o izvornom eksperimentalnom podatku sa čim su izbjegnute greške numeričke integracije. Za ulazne parametare su usvojeni broj obrtaja obratka n , poluprečnik obratka r i dubina rezanja a u rasponima navedenim u Tabeli 1.



Slika 1. Brusilica za cilindrično brušenje sa piezoelektričnim akcelerometrima



Slika 2. Uređaj „Spider“ i registracija podataka sa softverom „Catman“

Alat je tocilo mase 40 [kg], prečnika 900 [mm] i širine 23 [mm]. Broj obrtaja tocila je 1450 [o/min], a posmak 1 [mm/s]. U toku eksperimenta alat se ne mijenja, niti oštri. Prije izvođenja eksperimenta pripremljeni su cilindrični obradci (epruvete) dužine 300 [mm].

Za mjerjenje se koristi mjerni sistem sa piezoelektričnim akcelerometrima, slika 1. Piezoelektrični akcelerometri su kablovima povezani uređajem "Spider" koji registruje promjenu napona u davačima, slika 2. U cilju snimanja i obrade rezultata "Spider" je povezan sa računarom, koji sa softverom

"Catman" promjenu napona konverte u vrijednosti ubrzanja, prati mjerjenje i tu vrstu podatka obrađuje i snima kao fajlove u formatu "MSExcel", slika 2.

Prema Planu eksperimenta korištena je varijacija tri nezavisno promjenljiva faktora tj. varijacija samih ulaznih faktora je na dva nivoa (min, max), sa 4 ponavljanja u tzv. centralnoj tački, tako da je izvršeno ukupno 12 mjerena - pokusa [5].

Pretpostavlja se da je alat diskretni sistem koji vibrira u sistemu koncentrisana masa–opruga–prigušivač. Vremenska razlika između dva uzastopna mjerena, tj. vrijeme odgode iznosi $\tau = 0,000417$ [s], dok se N - ukupan broj izmjerene vrijednosti (podataka) kreće oko 48000 i neznatno varira za različita mjerena, što nema bitnog utjecaja. U toku jednog pokusa koji traje oko 20 [s] nema prekidanja. Da bi se izračunao izlazni parametar - korelaciona dimenzija D_c prvo se izračunava korelaciona suma (1) importovanjem ulaznih vrijednosti u kôd programa "Matlab" za odgovarajuće udaljenosti ρ . Korelaciona suma se ne izračunava iz cijelokupne vremenske serije, nego za 1.000 podataka od ukupnog broj izmjerene vrijednosti.

Tabela 1.Plan matrica i eksperimentalni rezultati

Broj pokusa	Fizikalne Vrijednosti			Kodirane vrijednosti			Rezultati eksperimenta	Rezultati matematičkog modela		
	a	N	r	X_1	X_2	X_3				
1	0,02	28	10	-1	-1	-1	646,28	644,9208		
2	0,06	28	10	+1	-1	-1	652,44	651,0808		
3	0,02	77	10	-1	+1	-1	660,25	658,8908		
4	0,06	77	10	+1	+1	-1	652,89	651,5308		
5	0,02	28	20	-1	-1	+1	648,94	647,5808		
6	0,06	28	20	+1	-1	+1	650,49	649,1308		
7	0,02	77	20	-1	+1	+1	659,97	658,6108		
8	0,06	77	20	+1	+1	+1	655,02	653,6608		
9	0,04	51	15	0	0	0	649,11	651,9258		
10	0,04	51	15	0	0	0	650,02	651,9258		
11	0,04	51	15	0	0	0	648,14	651,9258		
12	0,04	51	15	0	0	0	649,56	651,9258		

Za određivanje matematičkog modela prethodno je potrebno izvršiti kodiranje osnovnih faktora, tj. prevesti ih u prostor kodiranih koordinata. Nezavisno promjenjive fizikalne varijable (a, n, r) kod modeliranja stohastičkih procesa se prevode u kodirani oblik (X_1, X_2, X_3) (tabela 1.), pri čemu vrijedi da je $-1 \leq X_i \leq 1$, $i = 1, 2, 3$ [5].

Na osnovu plan matrice i rezultata eksperimenta određuje se stohastički matematički model odzivne funkcije u kodiranom obliku preko linearne zavisnosti:

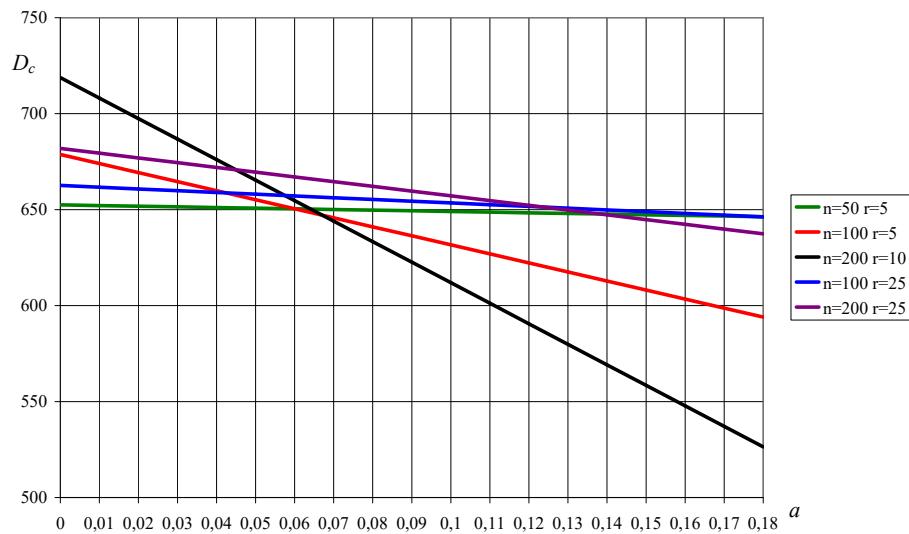
$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (5)$$

gdje koeficijenti: b_0, b_1, b_2 i b_3 predstavljaju linijski efekat, a b_{12}, b_{23}, b_{13} i b_{123} predstavljaju efekat interakcije i izračunavaju se na osnovu Plan matrice i rezultata eksperimenta. Nakon izračunavanja koeficijenata dobije se stohastički matematički model u kodiranom obliku:

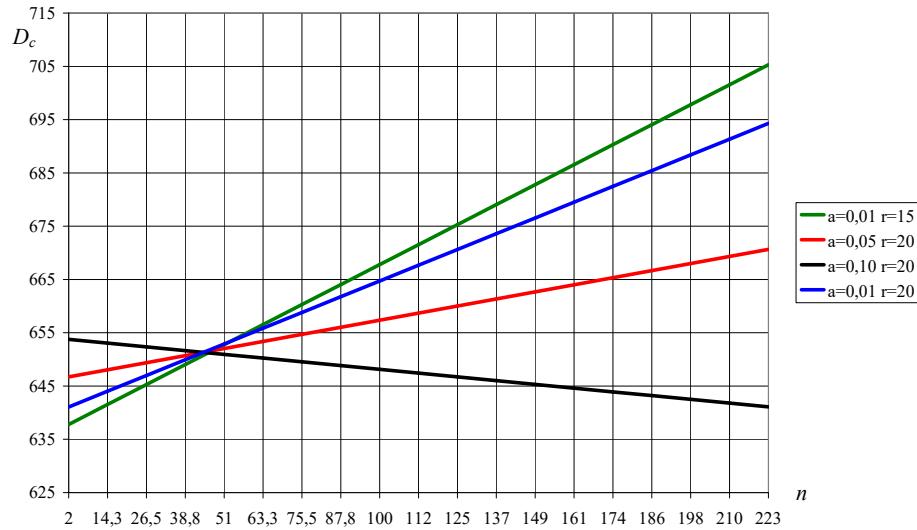
$$\begin{aligned} D_c \times 10^3 = & 651,9258 - 0,575 X_1 + 3,7475 X_2 + 0,32 X_3 - \\ & - 2,5025 X_1 X_2 + 0,1425 X_1 X_3 - 0,275 X_2 X_3 + 0,8775 X_1 X_2 X_3. \end{aligned} \quad (6)$$

4. UTJECAJ PARAMETARA OBRADE NA KORELACIONU DIMENZIJU

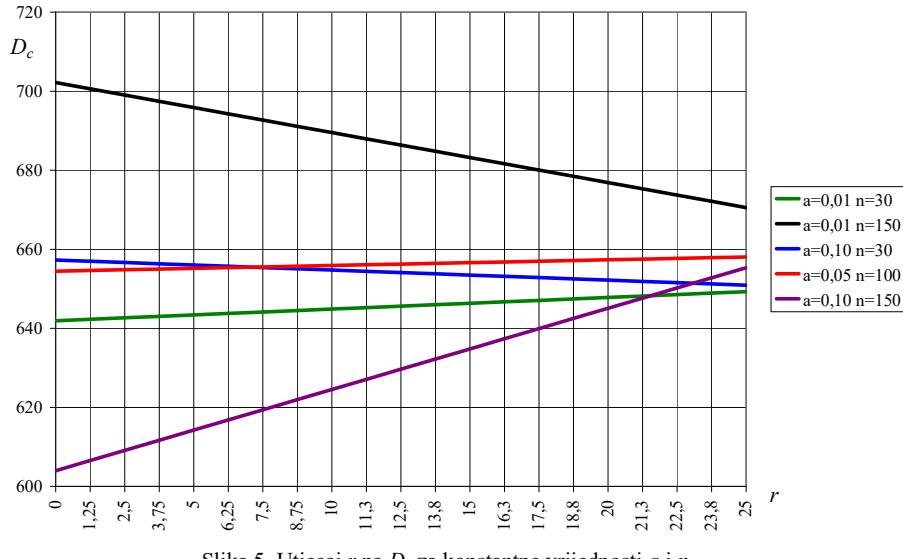
Utjecaj ulaznih parametara obrade na D_c prikazan je u narednim dijagramima, slike 3, 4 i koji su urađeni na osnovu matematičkog modela (6).



Slika 3. Utjecaj a na D_c za konstantne vrijednosti n i r



Slika 4. Utjecaj n na D_c za konstantne vrijednosti a i r



Slika 5. Utjecaj r na D_c za konstantne vrijednosti a i n

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je opća metodologija za uspostavljanje načina u izboru parametra obrade koji sistem održavaju u haotičnom režimu niskog intenziteta. Prema tome, potrebno je izvršiti eksperiment prema Planu eksperimenta, gdje se variraju parametri obrade kao ulazni parametri i dobiva odgovarajuća vremenska serija kao izlazni parametar. Vremenska serija je osnov za izračunavanje pokazatelja haosa, kojih ima više, a osnovni kriterij za izbor je osjetljivost na variranje izabranih ulaznih parametara. Na osnovu dobivenog matematičko-stohastičkog modela izraduju se odgovarajući dijagrami, na osnovu kojih se analizira utjecaj parametara obrade na haotičnost i mogućnost pravilnog izbora. Za navedeni obradni sistem, najčešće je dubina rezanja a u direktnoj, a brzina obratka n u indirektnoj korelaciji sa korelacijom dimenzijom, dok promjena poluprečnika obratka r nema veći utjecaj. Prema tome, treba težiti većim realnim dubinama rezanja i brojevima obrtaja.

6. LITERATURA

- [1] Gilat A.: *MATLAB® An Introduction With Applications*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, USA
- [2] Gredelj S.: *Istraživanje utjecaja vibracija obradnih sistema na stohastično i haotično ponašanje procesa obrade*, doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Bihać, 2017.
- [3] Hilborn C. R.: *Chaos and Nonlinear Dynamics*, 2nd edition, Oxford University Press, 2000.
- [4] Insperger T. & Stépán G.: *Vibration Frequencies in High-Speed Milling Processes*, Journal of Manufakturing Science and Engineering, 2004.
- [5] Jurković M.: *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema*, Mašinski fakultet, Bihać, 1999.
- [6] Moon F.C. & Kalmár-Nagy T.: *Nonlinear models for complex dynamic in cutting materials*, The Royal Society, London 2000.
- [7] Takens F.: *Reconstruction theory and nonlinear time series analysis*, Handbook of Dynamical Systems Vol. 3, North-Holland 2009.