

**EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KORELACIJE IZMEĐU
POKAZATELJA HAOSA OBRADNOG SISTEMA I PROCESA
OBRADE**

Sanel Gredelj, Milan Jurković, Fadil Islamović
Tehnički fakultet Bihać, ul. dr I. Ljubljankića, fb@bih.net.ba,
sanel_gredelj@hotmail.com, mi.jurkovic@gmail.com, f.islam@bih.net.ba

Ključne riječi: haotične vibracije, kvalitet izratka, pokazatelji haosa, brušenje, plan eksperimenta, stohastičko modeliranje, korelacija

SAŽETAK:

U cilju određivanja korelacije između vibracija obradnog sistema i ponašanja obradnog procesa u smislu kvaliteta izratka potrebno je eksperimentalno istražiti konkretnе obradne sisteme i procese kod kojih je ta veza izražena. Bitno je da postoji mogućnost generisanja haotičnih vibracija i da te vibracije utječu na kvalitet izratka, što je slučaj kod obrade brušenjem. Intenzitet i detekciju haotičnosti obradnih sistema i procesa daju pokazatelji haosa na osnovu eksperimentalno određene dinamičke vremenske serije podataka. Pri tome se istovremeno eksperimentalno mijere dvije vrste nelinearnih vremenskih serija: fizikalne veličine mehaničkih vibracija i karakteristika kvaliteta izratka po redoslijedu izrade. Na osnovu prve vrste vremenske serije izračunava se pokazatelj haosa obradnog sistema, dok se na osnovu druge vrste vremenske serije izračunava pokazatelj haosa procesa obrade. Da bi se pokazatelji haosa sistema i procesa mogli povezati potrebno je eksperimentalna mjerjenja izvršiti prema pravilima Plana eksperimenta i stohastičkog modeliranja sa istim ulaznim tehnoškim parametrima obrade. Razlog je dobivanje sličnih matematičkih modela za pokazatelje haosa sistema i procesa u funkciji tehnoških parametara obrade. Ovako dobiveni matematički modeli su pogodni za upoređivanje i određivanje korelacijske vezu različitih izlaznih parametara, odnosno pokazatelja haosa sistema i procesa.

1. UVOD

Određivanje pokazatelja haosa često predstavlja jedini način da se pouzdano identificuje oblik dinamike sistema i procesa. Pokazatelji haosa se dobiju na osnovu eksperimentalno određene dinamičke vremenske serije podataka, za što je matematički osnov Takensov teorem [6].

U konkretnom istraživanju se analiziraju dvije vrste nelinearnih vremenskih serija: fizikalne veličine mehaničkih vibracija i karakteristika izratka po redoslijedu izrade. Analizom prve vrste vremenske serije ustanovljava se intenzitet haotičnosti vibracija, dok se analizom druge vrste vremenske serije ustanovljava da li obradni proces ima stohastično ili haotično ponašanje. Ako se ustanovi da je obradni proces haotičan, tada se može pretpostaviti da su tome najvjerojatniji uzrok haotične vibracije. To znači da se između vibracija sistema i haotičnosti procesa može uspostaviti egzaktna korelacijska veza poređenjem pokazatelja haosa za vibracije i karakteristike izratka.

Da bi se pokazatelji haosa sistema i procesa mogli povezati potrebna su eksperimentalna mjerena prema pravilima Plana eksperimenta i stohastičkog modeliranja sa istim ulaznim parametrima i različitim izlaznim (pokazatelji haosa sistema i procesa). Sa ovim se dobivaju slični matematički modeli pogodni za upoređivanje i korelačiju vezu. Obradni sistem brusilica-tocilo-obradak vrlo lako može generisati haotične vibracije zbog raznih faktora. Pošto se radi o završnoj finoj obradi, utjecaj haotičnih vibracija na obradni proces može biti i očigledan u smislu jasno vidljivog lošeg kvaliteta obrade [5].

2. POKAZATELJ HAOSA OBRAĐNOG PROCESA

Fraktali su skupovi tačaka koji imaju tri svojstva: samosličnost, fraktalnu dimenziju i oblikovanje iteracijom. Fraktali se koriste na dva načina. Kao deskriptivni alati za izučavanje nepravilnih oblika i procesa ili u teoriji dinamičkih sistema kao jedan od pokazatelja haotičnog ponašanja. Fraktalnu dimenziju je najlakše definisati na način [3]:

$$D_{fp} = -\frac{\ln K_o}{\ln k_u} \quad (1)$$

gdje su: K_o – broj kopija samog sebe umanjenih za
 k_u – faktor umanjenja.

Fraktalna dimenzija za izlomljene linije iznosi $1 \leq D_{fp} \leq 2$, gdje vrijednosti 1 i 2 predstavljaju ekstremne slučajeve.

Kod određivanja fraktalne dimenzije nastale stohastičkim procesom, kakav je profil mikroneravnina, pretodna formula se ne može direktno primjeniti. Razlog je što takvi fraktali nisu ni u jednom svom dijelu potpuno samoslični i teško se oblikuju iteracijom, ali su dosta slični. Jedna od jednostavnijih tehniki je *box counting* tehnika gdje se fraktal aproksimira kvadratima [1].

Srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje nominalne linije profila se praktično izračunava na osnovu izraza:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

gdje su:
 y_i – rastojanje bilo koje tačke profila od srednje nominalne linije profila;
 n – broj tačaka;

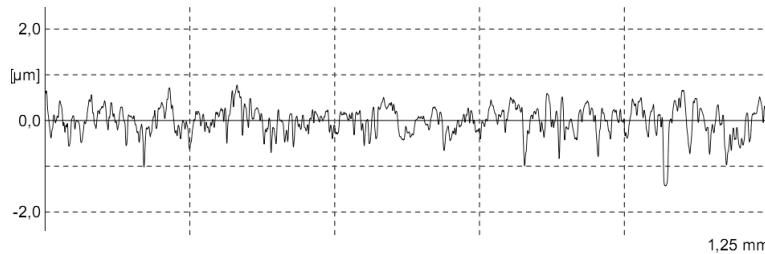
Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra se najčešće koristi kao pokazatelj hrapavosti obrađene površine. Za njegovo praktično određivanje razvijena je mjerena oprema, tako da je praktičnije određivati Ra nego fraktalnu dimenziju. U konkretnom slučaju mjerene profila mikroneravnina izratka vrši se uređajem za mjerenu hrapavosti marke "Perthometer", njemačkog proizvođača "Mahr", slika 1. Uređaj se sastoji iz dva dijela i to mjernog uređaja sa dijamantom iglom koja prelazi preko površine i uređaja za registriranje i obradu podataka. Jedan od izlaznih podataka je profil mikroneravnina (slika 2.), gdje je evidentna izrazita nepravilnost, tj. izlomljenost sa odgovarajućom fraktalnom dimenzijom.

Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra i fraktalna dimenzija profila D_{fp} imaju zajedničku karakteristiku da opisuju stepen krivudavosti profila, njegovu razuđenost, zbijenost, gustinu i sl. Iz tog razloga se za određivanje fraktalne dimenzije profila može koristiti funkcionalna zavisnost Ra i D_{fp} [2] :

$$D_{fp}(Ra) = 2 - e^{-\left(\frac{Ra}{10.6809}\right)^{0.7814}}. \quad (3)$$



Slika 1. Mjerenje profila mikroneravnina, obrada i registrovanje podataka



Slika 2. Dijagram profila mikroneravnina

Ovakav način određivanja fraktalne dimenzije je vrlo praktičan i može se primjeniti za sve procese obrade.

3. POKAZATELJ HAOSA OBRADNOG SISTEMA

Ako je zadana skalarna vremenska serija $y(i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, sa N podataka i vremenom odgode τ , korelaciona suma skalarne vremenske serije se određuje preko formule [3]:

$$C(\rho) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \Theta(\rho - |y_i - y_j|) \quad (4)$$

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

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{za } x \geq 0 \\ 0 & \text{za } x < 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Ako sve tačke padaju u udaljenosti ρ jedna od druge (ρ je veće ili jednako od najveće udaljenosti između tačaka), tada je $C(\rho) = 1$, a ako je ρ manje od najmanje udaljenosti između tačaka, tada je $C(\rho) = 0$.

Korelaciona dimenzija D_c se definiše kao broj koji zadovoljava:

$$C(\rho) = \lim_{\rho \rightarrow 0} g \rho^{D_c} \quad (6)$$

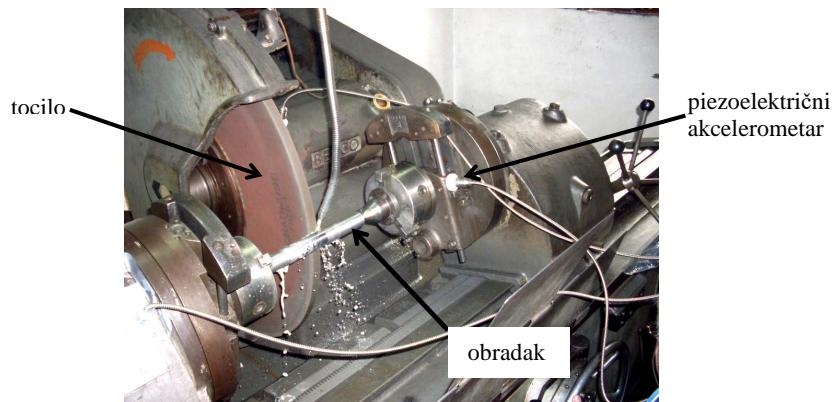
gdje je g konstanta proporcionalnosti. Praktično se D_c može naći logaritmovanjem jednačine (6) prije uzimanja limesa:

$$D_c = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\log C(\rho)}{\log \rho}. \quad (7)$$

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 pretpostavlja da su podaci slučajni.

4. EKSPERIMENT I MATEMATIČKI STOHAŠTIČKI MODEL

Da bi se izračunala korelaciona dimenzija D_c prvo je potrebno eksperimentalno odrediti dinamičke vremenske serije ubrzanja mehaničkih vibracija obratka. Pri tome se kao izlazna fizikalna veličina vibracija za određivanje pokazatelja haosa koristi vremenska serija ubrzanja. Osnovni razlog je što se radi o izvornom eksperimentalnom podatu. Ulagani parametri su usvojeni broj obrtaja obratka n , poluprečnik obratka r , i dubina rezanja a u rasponima navedenim u Tabeli 1. Eksperimentalno istraživanje je izvedeno na mašini za kružno (cilindrično) brušenje marke "Berco", slika 3. 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]. Prijevodnica eksperimenta pripremljeni su cilindrični obradci (epruvete) dužine 300 [mm]. Za mjerjenje se koristi mjeri sistem sa piezoelektričnim akcelerometrima. Piezoelektrični akcelerometri su kablovima povezani uređajem "Spider" koji registruje promjenu napona u davačima. U cilju snimanja i obrade rezultata "Spider" je povezan sa računarom, koji sa softverom "Catman" promjenu napona konvertuje u vrijednosti ubrzanja, prati mjerjenje i tu vrstu podatka obrađuje i snima kao fajlove u formatu "MSExcel", slika 4.



Slika 3. Obradni sistem sa postavljenim piezoelektričnim davačima

Prema Planu eksperimenta korištena je varijacija tri nezavisno promjenljiva faktora gdje je izvršeno ukupno 12 mjerena - pokusa [4].

Pretpostavlja se da je alat diskretni sistem koji vibrira u sistemu koncentrisana masa–opruga–prigušivač. Vrijeme odgode iznosi $\tau = 0,000417$ [s], dok se N - ukupan broj izmjerene vrijednosti (podataka) kreće oko 48000. 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 kod 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. Fraktalna dimenzija izračunava se na osnovu R_a preko formule (3).

Tabela 1. Plan matrica i eksperimentalni rezultati

Broj pokusa	Fizikalne vrijednosti			Kodirane Vrijednosti			Rezultati eksperimenta za koreacionu dimenziju	Rezultati eksperimenta za fraktalnu dimenziju
	a	n	r	X_1	X_2	X_3	$Y^{(e)} = D_c \times 10^3$	$Y^{(m)} = D_{fp} \times 10^3$
	mm	o./min	mm					
1	0,02	28	10	-1	-1	-1	694,60	1092,52
2	0,06	28	10	+1	-1	-1	769,41	1050,21
3	0,02	77	10	-1	+1	-1	699,42	1063,94
4	0,06	77	10	+1	+1	-1	723,25	1054,92
5	0,02	28	20	-1	-1	+1	766,22	1076,67
6	0,06	28	20	+1	-1	+1	692,67	1059,49
7	0,02	77	20	-1	+1	+1	756,15	1050,21
8	0,06	77	20	+1	+1	+1	683,15	1051,80
9	0,04	51	15	0	0	0	712,29	1050,21
10	0,04	51	15	0	0	0	711,33	1051,80
11	0,04	51	15	0	0	0	712,58	1051,80
12	0,04	51	15	0	0	0	711,06	1051,80

Nezavisno promjenjive fizikalne varijable (a, n, r) kod modeliranja stohastičkih procesa se prevode u kodirani oblik (X_1, X_2, X_3) (tabela 1.) [4].

Na osnovu plana matrice i rezultata eksperimenta određuju se stohastički matematički modeli odzivnih funkcija u kodiranom obliku preko linearne zavisnosti:

$$D_c \times 10^3 = 719,34 - 5,99X_1 - 7,62X_2 + 1,44X_3 - \\ - 6,3X_1X_2 + 2,72X_2X_3 - 30,65X_1X_3 + 6,44X_1X_2X_3 \quad (9)$$

$$D_{fp} \times 10^3 = 1060,93 + 4,89X_1 - 3,05X_2 - 6,41X_3 - \\ - 2,66X_1X_2 + 2,67X_2X_3 - 5,27X_1X_3 + 3,81X_1X_2X_3. \quad (10)$$

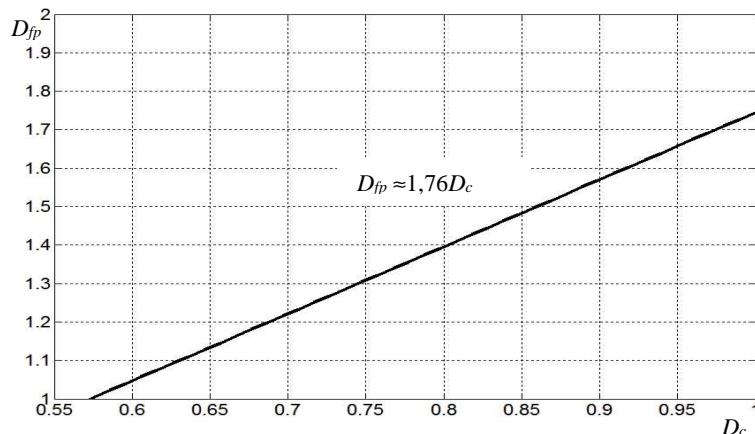
5. KORELACIJA IZMEĐU POKAZATELJA HAOSA OBRADNOG SISTEMA I PROCESA

Dijeljenjem matematičkih modela (10) sa (9) dobije se [1]:

$$\frac{D_{fp} \times 10^3}{D_c \times 10^3} = \frac{1058,78 - 8,37X_1 - 7,25X_2 - 2,93X_3 +}{719,34 - 5,99X_1 - 7,62X_2 + 1,44X_3 -} \\ + \frac{+6,51X_1X_2 - 1,28X_2X_3 + 4,47X_1X_3 - 1,81X_1X_2X_3}{-6,3X_1X_2 + 2,72X_2X_3 - 30,65X_1X_3 + 6,44X_1X_2X_3}. \quad (11)$$

Prema tome se D_{fp} može izraziti kao funkcija D_c i kodiranih ulaznih parametara. Ako su ulazni parametri konstantni, tada je D_{fp} rastuća linearna funkcija od D_c . Na slici 4. prikazan je dijagram linearne korelacije između pokazatelja haosa sistema D_c i procesa D_{fp} za $a=0,02$ [mm], $n=51$ o/min] i

$r=10$ [mm]. U ovom slučaju znači da ako je pokazatelj haosa sistema D_c manji od 0,5, proces obrade je u regularnom režimu, odnosno ako je D_c veći od 0,5, proces je u haotičnom režimu.



Slika 4. Linearna korelacija između pokazatelja haosa sistema i procesa

Kako je D_{fp} rastuća linearna funkcija od D_c to znači da intenzitet haotičnosti sistema direktno utječe na haotičnost procesa. Odnosno sa povećanjem intenziteta haotičnih vibracija, koje su uvijek prisutne u obradnom sistemu, kvalitet obradnog procesa se smanjuje i obratno.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je opća metodologija za određivanje korelacije između haotičnog ponašanja obradnog procesa i haotičnih vibracija obradnog sistema. Prema tome, potrebno je istovremeno izvršiti eksperiment prema Planu eksperimenta za oba pokazatelja, gdje se variraju parametri obrade kao ulazni parametri i dobiva odgovarajuća vremenska serija kao izlazni parametar. Rezultat eksperimenta su slični matematički modeli za pokazatelje haosa sistema i procesa u funkciji tehničkih parametara obrade, koji su pogodni za upoređivanje i određivanje korelačijske veze različitih izlaznih parametara, odnosno pokazatelja haosa sistema i procesa. U konkretnom slučaju dobivena je linearna korelacija što znači da intenzitet haotičnosti sistema direktno utječe na haotičnost procesa. Odnosno sa povećanjem intenziteta haotičnih vibracija, koje su uvijek prisutne u obradnom sistemu, kvalitet obradnog procesa se smanjuje i obratno.

7. LITERATURA

- [1] Gredelj S.: „Istraživanje utjecaja vibracija obradnih sistema na stohastično i haotično ponašanje procesa obrade“, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Bihać, 2017.
- [2] Gredelj S. i Pašalić S.: „Funkcionalna zavisnost srednjeg aritmetičkog odstupanja i fraktalne dimenzije profila obradene površine“, 9th International Scientific Conference on Production Engineering RIM 2013, Budva, 2013.
- [3] Hilborn C. R.: *Chaos and Nonlinear Dynamics*, 2nd edition, Oxford University Press, 2000.
- [4] Jurković M.: *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema*, Mašinski fakultet, Bihać, 1999.
- [5] Rowe W. B.: *Principles of Modern Grinding Technology*, William Andrew, USA, 2009.
- [6] Takens F.: *Reconstruction theory and nonlinear time series analysis*, Handbook of Dynamical Systems Vol. 3, North-Holland 2009.