

IDENTIFIKACIJA TRIBOLOŠKIH PROCESA PRI PROFILNOJ OBRADI PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA

Sovilj B.¹, Brežočnik M.², Sovilj-Nikić I.¹, Đokić V.³, Radonjić S.⁴, Kovač P.¹

¹Fakultet tehničkih nauka, Srbija, bsovilj@uns.ns.ac.yu

²Fakulteta za strojništvo, Slovenija, mbrezocnik@uni-mb.si

³Mašinski fakultet u Nišu, Srbija, dzul@masfak.ni.ac.yu

⁴Tehnički fakultet u Čačku, Srbija, snezar@tfc.kg.ac.yu

Apstrakt: Neophodnost povećanja produktivnosti rada i ekonomičnosti poslovanja proizvodnih sistema stvara pogodne uslove za razvoj istraživanja u oblasti tribologije i sve veću primenu triboloških znanja u industrijskoj praksi.

U današnje vreme u procesima obrade metala prisutno je intenzivno uvođenje postupaka automatizacije, pri čemu se pred odvalna glodala postavljaju sve noviji i teži zahtevi.

U radu je data analiza uticajnih parametara na proces profilne obrade i primena genetskog algoritma u identifikaciji triboloških procesa pri profilnoj obradi

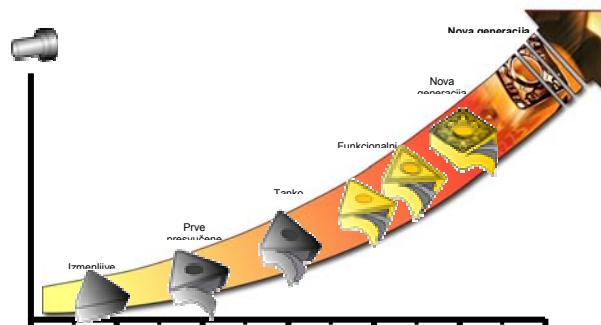
Cljučne reči: tribološki procesi, profilna obrada, produktivnost, ekonomičnost, genetski algoritam

1. UVOD

Povećanje efikasnosti obrade metala rezanjem jeste jedan od osnovnih smerova razvoja savremenog mašinstva. Uspešno rešavanje postavljenih ciljeva povezano je sa istraživanjem uslova rada alata za obradu rezanjem kao jednog od najvažnijih učesnika u procesu obrade metala rezanjem. Primena optimalnih geometrijskih parametara reznog dela alata za obradu rezanjem i optimalni uslovi rada obezbeđuju najmanju cenu koštanja proizvoda i najveću proizvodnost rada. Takođe i novi materijali za alate za obradu rezanjem utiču na proizvodnost. (slika 1.).

Odvalna glodala se koriste za proizvodnju ozubljenja zupčanika sa pravim, kosim i spiralnim zubima, kao i pužnih točkova za spoljašnje sprezanje sa evolventnim profilom. (slika 2.)

Alati za obradu rezanjem visokog kvaliteta su neophodni za ekonomičnu proizvodnju. Proizvodnja ovih alata zahteva detaljno proučavanje, proračun i konstruisanje za svaki pojedinačni slučaj.



Slika 1. Uticaj novih materijala alata na proizvodnost



Slika 2. Proizvodi sa ozubljenjem i alati za obradu ozubljenja

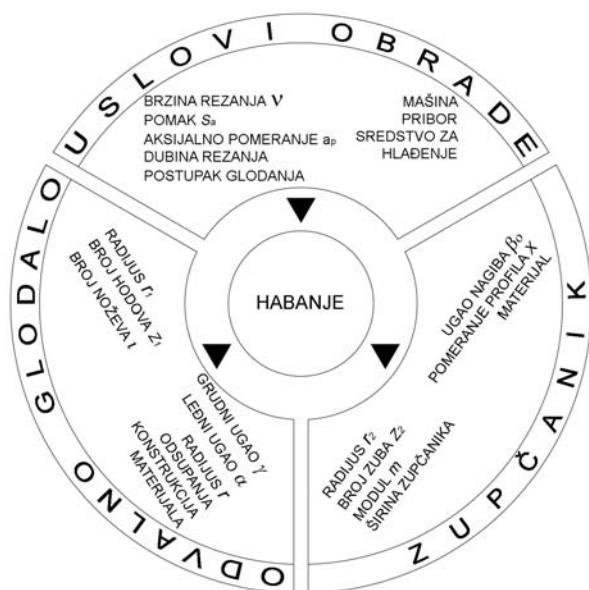
Odvalno glodanje, kao jedan od najsloženijih procesa obrade rezanjem, nalazi najširu primenu pri obradi zubaca cilindričnih zupčanika zahvaljujući visokoj proizvodnosti procesa. Komplikovane kinematske i geometrijske veze između odvalnog glodala i obratka stvaraju niz teškoća i problema, koji sprečavaju optimalno korišćenje alata i mašine, kao na primer: određivanje optimalne brzine rezanja i pomaka, utvrđivanje racionalne postojanosti odvalnog glodala, maksimalno i ravnomerno korišćenje što većeg broja zuba alata, utvrđivanje što produktivnije geometrije odvalnog glodala itd. [1].

Unapređenje procesa odvalnog glodanja značajno je i korisno kako za proizvođače zupčanika, tako i za proizvođače odvalnih glodala. Zbog komplikovanosti procesa, visoke vrednosti zupčanika, a osobito alata istraživanja podloga za optimizaciju procesa odvalnog glodanja i optimizaciju geometrijskih parametara zahtevaju znatna finansijska sredstva i značajne napore istraživača.

Osnovni pravci usavršavanja odvalnog glodanja zubaca zupčanika dati su u [2] a isto se može ostvariti preko povećanja proizvodnosti i povećanja kvaliteta ozubljenja.

Postoje mnogobrojni faktori koji utiču na proces odvalnog glodanja. Mnogobrojni faktori, kao i njihovi međusobni uticaji čine proces habanja teškim za proučavanje.

Na slici 3 prikazani su faktori koji utiču na habanje tokom procesa odvalnog glodanja.



Slika 3. Veličine koje utiču na habanje

U ovom radu, na osnovu eksperimentalnih istraživanja, biće određena funkcija postojanosti profilnog alata primenom genetskog algoritma.

2. ODREĐIVANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI PROFILNOG ALATA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA

Proces odvalnog glodanja je jedna od najznačajnijih karika u lancu mehaničke obrade jer od njega u velikoj meri zavisi produktivnost, završna geometrijska tačnost i kvalitet površine ozubljenja. Razvojem tehnologije odvalnog glodanja, odvalno glodanje se uspešno primenjuje kako u gruboj obradi, tako i u završnoj obradi ozubljenja. Zbog toga je porastao zahtev za optimizaciju procesa, kako sa stanovišta kvaliteta površine, tako i sa stanovišta produktivnosti. Preduslov za uspešnu optimizaciju i adaptivno upravljanje procesom jeste njegova identifikacija, odnosno identifikacija pojava nastalih pri odvalnom glodanju. Zato istraživačka aktivnost na ovom polju razvija pored novih odvalnih glodala i tehnoloških poboljšanja na mašinama i potpuno nove identifikacione metode za verodostojan opis procesa i pojava nastalih pri odvalnom glodanju [3].

Na polju identifikacije obradnih procesa razvijena su dva osnovna prilaza: deterministički i probabilistički. Prvi tretira proces obrade kao potpuno determinisan sistem i daje osnovne parametre u determinističkom obliku. Ovaj prilaz pogodan je pre svega za osnovna istraživanja. Drugi pristup polazi od koncepta obradnog sistema sastavljenog od procesa rezanja i mašine u zatvorenoj petlji, te tretira fizičke i geometrijske relacije pomoću stohastičkih metoda.

Mogućnost raspolaganja aktuelnim informacijama o procesu odvalnog glodanja je bitna pretpostavka za ekonomično vođenje procesa izrade ozubljenja cilindričnih zupčanika.

U procesu rezanja kontakt profilnog alata sa materijalom obratka ostvaruje se između strugotine i grudne površine reznog klina i ledne površine reznog klina i obrađene površine obratka. U principu sve teorije trenja koje se odnose na trenje klizanja mogu se primeniti i na slučaj rezanja. Tribološki procesi koji se javljaju u procesu rezanja na obe površine reznog klina alata razvijaju se pod specifičnim uslovima.

Habanje je jedna od krajnje negativnih pojava u obradnim procesima. Smatra se da relativno visoki pritisci i visoke temperature na kontaktnim površinama spregnutih parova (alata, strugotine i površine rezanja) kao i visoke relativne brzine spregnutih parova predstavljaju osnovne uslove za nastanak i intenzivni razvoj procesa habanja alata. Habanje radnih elemenata reznog klina alata odvija se neprekidno i u svim trenucima kontakta, a isto tako i pri svim tehnološkim uslovima i režimima obrade.

Uticaj procesa habanja alata na karakteristike, stanja i izlazne efekte obradnih procesa je velik i izuzetno nepovoljan. Prema tome, skup tehnoloških i ekonomskih efekata obradnih procesa determiniše, i to u velikoj meri, veličinu i intenzitet habanja alata.

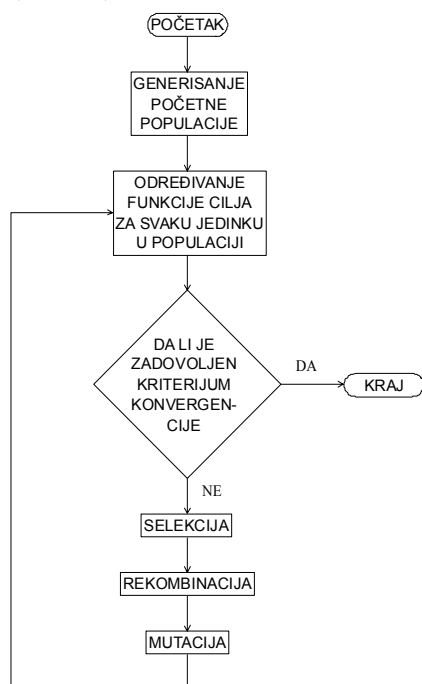
Negativna dejstva procesa habanja alata na pojedine karakteristike stanja i ekonomske efekte obradnih procesa posledice su uticaja jedne brojne grupe faktora na proces habanja alata. U ovu grupu, u prvom redu spadaju:

- vrsta i karakteristike materijala alata A i obratka O
- režim obrade R (brzina rezanja, pomak, ...)
- geometrija alata GA
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje SHP (vrste i karakteristike sredstva, sistem hlađenja)
- temperatura rezanja θ
- krutost obradnog sistema K_S
- ostali uslovi obrade UO .

Preko ovog skupa faktora može se uticati na veličinu, intenzitet i karakter habanja nekog alata, a time i na osnovne karakteristike stanja i ključne izlazne tehno-ekonomske efekte obradnih procesa[4].

Uzimajući u obzir prirodu problema i raspoložive podatke na početku identifikacije triboloških procesa za rešavanje navedenog problema u ovom radu izabran je genetski algoritam.

Genetski algoritam sastoji se iz nekoliko koraka čije izvršavanje dovodi do rešenja optimizacionog problema.(slika 4.)



Slika 4. Struktura genetskog algoritma

U ovom radu je za modelovanje funkcije L postojanosti jednozubog odvalnog glodala iskorišćen predefinisani model drugog reda

$$L = k_0 + k_1\gamma + k_2\alpha + k_3r + k_4\gamma\alpha + k_5\gamma r + k_6\alpha r + k_7\gamma\alpha r + k_8\gamma^2 + k_9\alpha^2 + k_{10}r^2 \quad (1)$$

Cilj optimizacije genetskim algoritmom jeste dobiti rešenja za vrednosti koeficijenata $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$ takvih da razlika između eksperimentalnih i vrednosti predviđenih modelom bude što manja.

Prilikom određivanja odgovarajućeg oblika modela metodom genetskog algoritma polazi se od inicijalne slučajno odabrane populacije $P(t)$. [5] Populacija $P(t)$ sastavljena je od organizama. Svaki organizam predstavlja jedno od mogućih rešenja problema i sastoji se od realnih konstanti (gena): $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$

Apsolutna devijacija $D(i,t)$ individualnog modela (organizma) i u toku generacije t smatra se merom uspešnosti i definiše kao:

$$D(i,t) = \sum_{j=1}^n |E(j) - P(i,j)|, \quad (2)$$

pri čemu je $E(j)$ eksperimentalna vrednost j -tog merenja, $P(i,j)$ očekivana vrednost dobijena uz pomoć individualnog modela i za j -to merenje, dok je n maksimalni broj merenja.

Jednačina (2) predstavlja stadardnu meru uspešnosti prilikom rešavanja regresionih problema koju je predložio Koza [6]. Svrha ovog optimizacionog zadatka je da obezbedi takav model pri kom bi jednačina (2) pokazala što je moguće manje apsolutno odstupanje.

Pošto nije neophodno da najmanje vrednosti jednačine (2) obezbeđuju i najmanju procentualnu razliku, potrebno je definisati prosečnu apsolutnu procentualnu devijaciju za sva merenja sprovedena za individualni model i , koja se može definisati kao:

$$\Delta(i) = \frac{D(i,t)}{|E(j)|n} \cdot 100\% \quad (3)$$

Nakon generisanja početne populacije sledi iterativni postupak primene genetskih operatora selekcije, rekombinacije (ukrštanja) i mutacije na jedinke populacije sve dok ne bude zadovoljen kriterijum konvergencije. Dva roditelja biraju se na slučajan način, oni dobijaju mogućnost da se ukrštaju i prenose svoj genetski materijal na sledeću generaciju. U ovom radu primenjeno je dekadno kodovanje i realna aritmetička rekombinacija. Ukrštanje se vrši između dva slučajno odabrana roditeljska gena sa identičnim indeksom. Ukrštanje

se odvija na principu aritmetičke rekombinacije prema izrazu:

$$POTOMAK1 = \frac{\lambda_1 RODITELJ1 + \lambda_2 RODITELJ2}{2} \quad (4)$$

$$POTOMAK2 = \frac{\lambda_2 RODITELJ1 + \lambda_1 RODITELJ2}{2} \quad (5)$$

Koeficijenti λ_1 i λ_2 biraju se na slučajan način iz intervala [0,1].

Nakon ukrštanja sledi operacija mutacije. Na slučajan način bira se jedinka, kao i njen gen koji će biti izmenjen. Mutacijom se uvodi potpuno nov genetski materijal u populaciju.

Prilikom odabira populacije na slučajan način generisano je 100 organizama. U početnoj generaciji slučajnim putem generisane su vrednosti koeficijenata $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$ iz intervala $[-10, 10]$.

Kako bi se ublažile negativne strane elitizma, a opet u dovoljnoj meri ubrzalo izvršavanje genetskog algoritma izabrano je da verovatnoća reprodukcije bude 0.1.

Verovatnoća rekombinacije je 0.3, pri čemu je odabir jedinki koje će dobiti priliku za razmenu genetskog materijala izvršen na osnovu turnir seleksije. Što znači da je na slučajan način iz populacije odabrano 7 jedinki od kojih je nakon međusobnog upoređivanja prilagođenosti odabran jedan roditelj koji će svoj genetski materijal ukrstiti sa pobednikom drugog turnira koji je definisan na identičan način. U okviru turnir selekcije je dozvoljena mogućnost da učesnici jednog turnira budu takođe učesnici drugog, što znači da je moguće da jedinka koja nije bila najbolja u jednom turniru izbori svoje mesto za rekombinaciju u nekom narednom, dok se ne odabere 30% populacije koja će ostaviti svoje potomstvo, premda je ova mogućnost izuzetno mala. Takođe, u okviru rekombinacije se rekombinacija samo na jednom genu ostvaruje između samo 10% parova dok se u ostalih 90% slučajeva ona dešava na više gena.

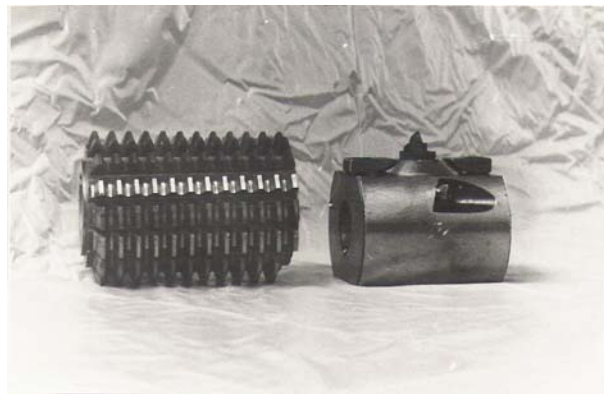
Mutacija se odvija sa verovatnoćom od 60%. Od ukupnog broja jedinki koje mutiraju kod 50% njih mutacija se odvija samo na jednom genu, dok se kod ostalih ona dešava na više gena.

Procedura generisanja svake civilizacije se odvijala do 5000-ite generacije kada bi se ona privremeno prekidala. U slučaju da je prosečno odstupanje $\Delta(i)$ jednog pretpostavljenog modela (organizma) u populaciji manje od 4% evolucija populacije bi bila nastavljena do 20000-ite generacije, u suprotnom proces bi se prekidao. Nakon svake faze treninga testira se tačnost najboljih modela uz pomoć početnih podataka.

Prilikom ovog modelovanja upotrebjeno je 15 nezavisnih civilizacija.

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

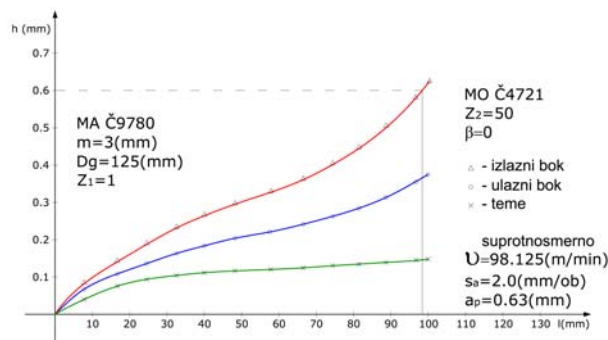
Istraživanja u okviru ovog rada izvršena su na glodalici MODUL-ZFWZ-250X5AVE od proizvođača STARKSTORM-Anlagenbau, KarlMarx, Nemačka. U okviru istraživanja korišćen je specijalno projektovan i konstruisan jednozubi alat proizveden na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu (slika 5.).



Slika 5. Jednozubo odvalno glodalo

Optimizaciji geometrijskih parametara alata za obradu rezanjem prethodi unutrašnja optimizacija, tj. optimizacija režima rezanja. Da bi se odredila optimalna rezna geometrija neophodno je obezbediti racionalne uslove rada, odnosno da bi se izvršila eksperimentalna istraživanja rezne geometrije alata potrebno je odrediti brzinu rezanja, pomak i aksijalni pomeraj.

Rezultati eksperimenta prikazani su u [2]. Za svaku eksperimentalnu tačku merenjem su dobijene izlazne vrednosti karakterističnih habanja (h_u, h_t, h_i) . Na osnovu analize kao kriterijum habanja jednozubog alata usvojena je širina pojasa habanja na izlaznom boku $h_i = 0.6 \text{ mm}$. Nakon toga, nacrtane su krive razvoja procesa habanja za sve eksperimentalne tačke. Na slici 6. data je kriva za eksperimentalnu tačku koja je na osnovu slučajnih brojeva izvedena četvrta po redu.



Slika 6. Krive habanja

4. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Primenom genetskog algoritma dobijeni su modeli koji zadovoljavaju kriterijume izbora. Stoga, oni predstavljaju potencijalna rešenja problema. Karakteristike jednog od ovih modela su:

Model funkcije postojanosti:

$$L_{opt} = 3.47514 + 4.84292\gamma + 0.00449625\alpha + 23.1512r - 0.195747\gamma\alpha - 5.9446\gamma r + 0.36683\alpha r + 0.323794\gamma\alpha r - 0.0495238\gamma^2 + 0.0859158\alpha^2 + 18.7778r^2 \quad (6)$$

Ukupna apsolutna razlika najbolje jedinke: 40.977

Procentualno odstupanje najbolje jedinke: 2.7318

Generacija sa najboljom jedinkom: 18885

U tabeli 1. su pored postojanosti dobijene eksperimentalnim putem i postojanosti predviđene na bazi modela date i apsolutne vrednosti i procentualne vrednosti razlike između rezultata dobijenih eksperimentalnim putem i rezultata koji su predviđeni modelom za koji je uzet najbolji organizam u generaciji.

Tabela 1. Eksperimentalne i predviđene vrednosti postojanosti alata

Redni broj merenja	Rezultati dobijeni eksperimentalnim putem	Rezultati predviđeni modelom	D(i)	$\Delta(i)$
1	73.000	71.360	1.640	2.247
2	29.000	29.037	-0.037	0.128
3	39.000	39.091	-0.091	0.234
4	99.000	80.146	18.854	19.045
5	52.000	52.025	-0.025	0.048
6	68.000	67.891	0.109	0.161
7	60.000	60.380	-0.380	0.633
8	41.000	41.140	-0.140	0.342
9	39.000	39.137	-0.137	0.350
10	60.000	59.985	0.015	0.025
11	53.000	52.942	0.058	0.109
12	48.000	45.124	2.876	5.991
13	81.000	88.396	-7.396	9.131
14	34.000	33.154	0.846	2.487
15	41.000	41.019	-0.019	0.047

Iz tabele se vidi da je za veličinu brojčane vrednosti mere uspešnosti $\Delta(i)$ najodgovornije neslaganje vrednosti dobijene u četvrtom merenju sa predviđenom vrednošću za to merenje. U svim ostalim merenjima ovo odstupanje je manje od 10% dok je kod nekih ono manje čak i od 1%. Zbog ovako signifikantne razlike između uspešnosti $\Delta(i)$ četvrtog merenja u odnosu na ostala, može se zaključiti da postoji mogućnost da su greške

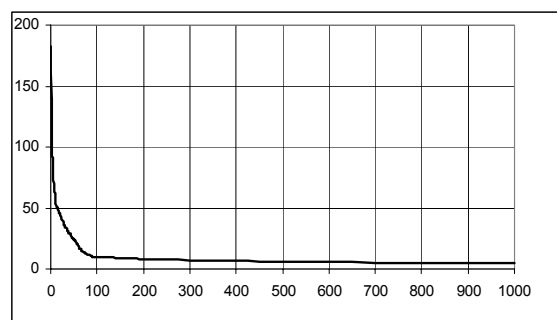
postojale pri samom merenju (manifestacije grešaka u materijalu alata kao i radnog predmeta, ljudski faktor, vibracije alata mašine, i razni drugi stohastički poremećaji). Takođe, na osnovu ove razlike između $\Delta(i)$ može se zaključiti da kvalitet rešenja dobijenog putem genetskog algoritma izuzetno zavisi od pouzdanosti podataka na osnovu kojih se vrši optimizacija.

Na slici 7 je dat dijagram koji prikazuje kakva je tendencija pri izvršenju evolucionih algoritama (kako su se organizmi poboljšavali sa svakom generacijom).

Na dijagramu se može uočiti da uspešnost najboljih organizama u početku vrlo brzo raste (tj. kvalitet rešenja raste), odnosno brojne vrednosti mere uspešnosti vrlo brzo opadaju da bi potom posle 1500 generacije ovaj trend počeo sve više da se smanjuje i prelazi u stagnaciju da bi konačno dosegao najveću uspešnost kod generacije 18885 u kojoj je dobijen organizam sa prosečnom procentnom devijacijom $\Delta(i, t) = 2.7318\%$. Nakon dostizanja najveće uspešnosti dolazi do njenog smanjenja da bi se ona sa identičnom vrednošću u kasnijim generacijama ponovo pojavila. Međutim, broj ovih pojavljivanja je skoro neznan uz stalnu tendenciju smanjenja uspešnosti, odnosno povećanja brojčane vrednosti $\Delta(i)$.

Tokom svih generacija raznolikost jedinki u populaciji bila je izuzetno visoka uz permanentno oscilovanje.

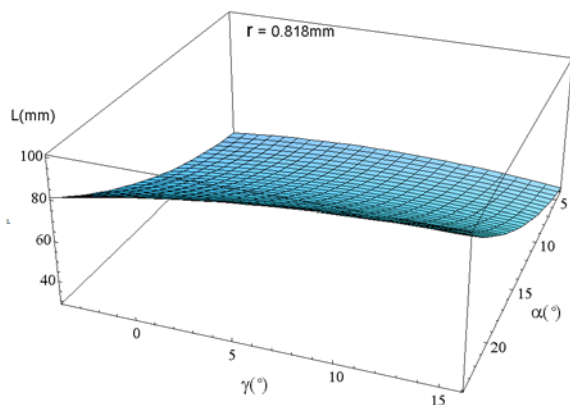
Na osnovu najboljeg modela izvršeno je određivanje maksimalne postojanosti alata i optimalnih geometrijskih parametara koji obezbeđuju tu postojanost.



Slika 7. Dijagram zavisnosti procentualne razlike između očekivane i eksperimentalno dobijene postojanosti za najbolju jedinku (date na ordinati) od generacije (datih na apscisi) za prvih 100 generacija civilizacije sa najuspešnijom jedinkom

Tokom svih generacija raznolikost jedinki u populaciji bila je izuzetno visoka uz permanentno oscilovanje.

Na osnovu najboljeg modela izvršeno je određivanje maksimalne postojanosti alata i optimalnih geometrijskih parametara koji obezbeđuju tu postojanost.



Slika 8. Zavisnost postojanosti alata od geometrijskih parametara odvalnog glodala

Primenom matematičkih metoda određena je maksimalna postojanost alata $L = 105,836 \text{ mm}$. Geometrijski parametri koji obezbeđuju globalni maksimum za dati model su $r = 0,818 \text{ mm}$, $\alpha = 24,092^\circ$, $\gamma = 16,092^\circ$.

5. ZAKLJUČAK

Na proces odvalnog glodanja utiče veliki broj kontrolisanih i nekontrolisanih faktora koji ovu vrstu obrade čine izuzetno složenom. Mnogobrojnost i kompleksnost ovih faktora otežava ispitivanja i matematičko definisanje odvalnog glodanja.

Istraživanje je pokazalo da se genetski algoritam može uspešno primeniti kod određivanja pouzdane funkcije stanja na osnovu koje se mogu odrediti optimalni geometrijski parametri.

Putem evolucijskih procesa dobijeno je više kvalitetnih rešenja, koja na različite načine omogućavaju postizanje zadovoljavajućeg približavanja cilju, od kojih je moguće odabrati reprezentativno.

LITERATURA

- [1] B. Ivković: *Produktivnost u industriji*, Međunarodna menadžerska akademija, Novi Sad, 2006.
- [2] Sovilj-Nikić: *Primena genetskog algoritma u optimizaciji geometrijskih parametara odvalnog glodala*, Diplomski-master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [3] K. Bouzakis: *Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Waeltzfraesen*, Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1981.
- [4] B. Sovilj; *Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1988.
- [5] M. Brezočnik: *Uporaba genetskoga programiranja v inteligentnih proizvodnih sistemih*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2000.
- [6] J.R. Koza, *Genetic programming*; The MIT Press: Massachusetts, 1992.[]

Rad je nastao u okviru projekta "Razvoj progresivne tehnologije za leđnu obradu profilnih alata na CNC mašinama", broj TR 14059 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Republike Srbije, 2009.

IDENTIFICATION OF TRIBOLOGICAL PROCESSES DURING THE PROFILE PROCESSING USING GENETIC ALGORITHM

Abstract: *The necessity to increase the work productivity and the business economy of production systems creates favorable conditions for the development of research in the field of tribology and larger application of tribological knowledge in the industrial practice.*

Nowadays, in the metal working processes the intensive introduction of automation procedures is presented. Hob milling cutters are set to the newer and harder requirements.

In this paper the analysis of influential parameters on the process of profile processing and the application of genetic algorithm to identify tribological processes for the profile processing are given.

Key words: *tribological processes, profile processing, productivity, economy, genetic algorithm*