Primena programskog paketa MATLAB za optimizaciju parametara obrade glodanjem

Zvonko Petrović^{1*}, Radovan Nikolić¹

¹Akademija strukovnih studija Šumadija, Trstenik (Serbia)

Parametari režima obrade utiču na ukupnu cenu proizvodnje jednog proizvoda a samim tim i na ukupnu dobit preduzeća. U radu je prikazan izbor optimalnih parametara režima obrade glodanjem metodom Particle Swarm Optimization (PSO). Cilj optimizacije iskazan je preko funkcije cilja (funkcije optimizacije ili kriterijuma optimizacije) a metodom optimizacije PSO dobijeni su minimalni troškovi obradnog procesa. Funkciju optimizacije predstavljena je i grafički radi jasnije analize u kom području se nalaze vrednosti režima obrade koji daju minimalne troškove obradnog procesa.

Keywords: Glodanje, Parametri rezanja, Optimizacija rojem čestica

1. UVOD

Optimizacija parametara režima obrade je metoda implementacije znanja pri projektiranju obradnih procesa s ciljem njihove analize, poboljšanja i doseganja više tehnoko-ekonomске analize. Osnovna pretpostavka je da će troškovi procesa obrade biti optimalni ako su optimalni troškovi procesa obrade u svim etapama. Matematički model funkcije cilja formirao je Stanić [1] a taj model funkcije je primenio Mečanin [2] na optimizaciji troškova procesa obrade struganjem osovinice. Matematički model funkcije se može primeniti za sve elementarne operacije uz odgovarajuća ograničenja koja su različita za različite zahvate. Funkcija cilja i ograničenja treba da sadrže dovoljno uticajnih faktora kako bi se ostvario objektivni uticaj na model obradnog procesa.

2. MATEMATIČKI MODEL FUNKCIJE TROŠKOVA ZAHVATA U ZAVISNOSTI OD REŽIMA OBRADE GLODANJEM

Funkcija troškova, kojom se, u zavisnosti od ulaza u obradni sistem i stanje obradnog sistema, matematički opisuju neposredni troškovi zahvata, predstavlja u trijedru OSVTz površinu lociranu u prvom oktantu i uvek konkavnu jer parametri režima obrade moraju imati vrednosti veće od nule. Njen oblik je:

$$T_z = A_{1i} + A_{2i} \cdot V_i^{-1} \cdot S_i^{-1} + A_{3i} \cdot V_i^{q_1} \cdot S_i^{q_2} \quad (1)$$

gde je $i=1,2,\dots,n$ broj operacija koji se optimizira. Geometrijsko mesto tačaka uslovnih maksimuma na površini funkcije troškova čini, u koordinatnoj ravni OSV, hiperbolu, čiji se kraci, zavisno od stanja ulaza u sistem, brže ili sporije asimptotski približavaju koordinatnim osama. Inače skupom tačaka uslovnih minimuma identifikuje se linija optimalnih troškova po kojoj valja upravljati proces obrade kako bi se postigli maksimalni efekti sistema u pogledu troškova obrade.

Optimalni nivoi troškova locirani su u području $\{S_{\max}, V_{\min}\}$ tj. najviši efekti obrade postizu se pri maksimalnim vrednostima koraka i minimalnim

vrednostima brzine rezanja. Obrnuto, područje $\{S_{\min}, V_{\max}\}$ karakteriše relativno visok nivo troškova obrade. Od ovog pravila odstupaju izuzetni slučajevi $q_2=1$ i $q_2>1$. Za $q_2=1$ postiže se isti nivo troškova za celo režimsko područje, dok se u slučaju $q_2>1$ maksimalni efekti obrade locirani u području $\{S_{\min}, V_{\max}\}$, a minimalni u režimskim tačkama $\{S_{\max}, V_{\min}\}$.

Obrada izvan krive optimalnih troškova, neopravdano česta u proizvodnoj praksi, uslovljava relativno velike gubitke ekonomičnosti naročito u režimskim područjima $\{S_{\max}, V_{\min}\}$ i $\{S_{\min}, V_{\max}\}$, jer se tada javljaju u procesu obrade visoki troškovi reprodukcije [1].

Član A_{1i} je uvek konstantan jer predstavlja osnovne troškove u preduzeću koji ne zavise od parametara obrade ali utiču na ukupnu cenu proizvodnje proizvoda. Članovi A_{2i} i A_{3i} zavise od režima obrade, utiču na ukupne troškove proizvodnje i time definišu položaj minimuma koji ne može biti manji od vrednosti A_{1i} .

3. ALGORITAM PSO

Otpimizaciju rojem čestica PSO predstavlja metaheurističku metodu optimizacije zasnovnu na populaciji agenata (čestica), koju su 1995 god. James Kennedy i Russell Eberhart slučajno otkrili proučavajući simulaciju društvenog ponašanja ptica u jatu [3].

Na slici 1. prikazan je algoritam ove metode. Kao i kod svih algoritama zasnovanim na populaciji, prvo se generiše početna populacija čestica. Pozicija čestice predstavlja vektor parametara koji se optimiziraju odnosno potencijalno rešenje:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

Svakoj čestici zadaje se slučajna pozicija u prostoru koji se pretražuje, kao i početne brzine. Nakon toga određuje se vrednost funkcije cilja svake čestice, i ta

vrednost joj se dodaje kao najbolja vrednost za tu česticu, a početna pozicija postaje najbolja pozicija čestice p_{best} .

Kada se odrede sve najbolje vrednosti čestica, traži se ona čestica sa najmanjom vrednošću, i njena pozicija postaje najbolja pozicija za ceo roj p_{gbest} . Zatim se proverava da li su zadovoljeni kriterijumi optimizacije, i ako jesu prikazuju se dobijeni rezultati. Ako kriterijumi nisu zadovoljeni vrši se računanje novih brzina i pozicija.

Slika.1: Algoritam metode optimizacije rojem čestica

Na slici 2 je grafički prikazano određivanje nove brzine i pozicije u dvodimenzijalnom prostoru pretraživanja.

Slika.2: Ažuriranje brzine i pozicije i-te čestice

Nova brzina svake čestice sastoji se od tri komponente:

1. komponente koja zavisi od trenutne brzine čestice,
2. komponente koja je proporcionalna razdaljini trenutne pozicije čestice i njene najbolje vrednosti, komponente koja je proporcionalna

razdaljini trenutne pozicije čestice i najbolje pozicije za ceo roj.

$$\mathbf{v}_{i+1} = w \cdot \mathbf{v}_i + c_1 \cdot \mathbf{r}_1 \odot (\mathbf{p}_{besti} - \mathbf{x}_i) + c_2 \cdot \mathbf{r}_2 \odot (\mathbf{p}_{gbesti} - \mathbf{x}_i) \quad (3)$$

gde w predstavlja koeficijent inercije, c_1, c_2 su koeficijenti ubrzanja ili korekcionni faktori, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ predstavljaju dva slučajna vektora dužine n u granicama $[0,1]$. Znak $\odot$ predstavlja Hadamardov proizvod:

$$(\mathbf{A} \odot \mathbf{B})_{i,j} = (\mathbf{A})_{i,j} \cdot (\mathbf{B})_{i,j} \quad (4)$$

Koeficijent inercije w utiče na prvu komponentu, i za vrednosti u granicama 0,9-1,2 [4] daje najbolje rezultate, odnosno algoritam ima veće šanse da pronađe globalni minimum za razuman broj iteracija. Za vrednosti koeficijenta manjim od 0,8, algoritam ako nađe globalni minimum nađe ga brzo. Čestice u ovom slučaju se brzo kreću i može se desiti “prelete” neke oblasti, tako da se može desiti da ne pronađu globalni minimum. Sa druge strane ako koeficijent inercije ima veću vrednost, onda čestice detaljnije pretražuju prostor rešenja i veće su šanse da pronađu globalni minimum.

Koeficijenti ubrzanja c_1 i c_2 pomnoženi sa slučajnim vektorima $\mathbf{r}_1$ i $\mathbf{r}_2$ stohastički upravljaju uticajem drugim dvema komponentama brzine. Obično se uzima da je njihova vrednost približno 2, kako bi srednja vrednost proizvoda koeficijenta ubrzanja i slučajnog vektora bila oko 1. Nova pozicija čestice određuje se jednostavnim sabiranjem trenutne pozicije $\mathbf{x}_i$ i nove brzine čestice $\mathbf{v}_{i+1}$:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{i+1} \quad (5)$$

Ponovo se ovređuju vrednosti funkcije cilja za nove pozicije čestica, i za svaku česticu se upoređuju nova i stara vrednost funkcije cilja, i ako je nova vrednost manja ona postaje nova najbolja vrednost, a trenutna pozicija postaje najbolja pozicija te čestice. Pozicija čestice sa najmanjom vrednošću postaje nova najbolja pozicija za ceo roj. Ponovo se proverava da li su zadovoljeni kriterijumi optimizacije, ako jesu prikazuju se rezultati, a ako nisu ponavlja se ceo postupak sve dok kriterijumi ne budu zadovoljeni.

Ovo je najjednostavnija varijanta algoritma optimizacije rojem čestica. Druge nemaju konstantne vrednosti za parametre w , c_1 i c_2 , već se oni u toku izvršavanja algoritma menjaju po određenim pravilima. Takođe drugi algoritmi PSO uključuju i različite topologije roja, odnosno način na koji čestice u roju komuniciraju.

4.

5. FUNKCIJA CILJA I OGRANIČENJA

U ovom radu se optimizira 25 operacija razvrtanja u kojima su parametri režima obrade korak $S[\text{mm/o}]$ i tehnološka brzina rezanja:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad (6)$$

u kojoj figuriše broj obrtaja n [o/min]. Oni su direktno povezani sa glavnim vremenom obrade pa za optimalne vrednosti ovih parametara imamo i optimalno vreme trajanje svake od operacije a samim tim i optimalno vreme obrade mašinskog dela. Parametri režima obrade koji daju minimalne troškove obradnog procesa moraju se naći u zadatim granicama jer smo ograničeni karakteristikama alata i karakteristikama mašine. Na slici 3 prikazan je 3D model kućišta ventila i jedan presek gde se nalazi najveći broj različitih otvora.

Slika 3: Kućište ventila-mašinski deo čije se operacije razvrtanja optimiziraju

Funkcija cilja koja se optimizira ima oblik:

$$f(S_i, V_i) = \sum_{i=1}^{25} T_i \quad (7)$$

$$= \sum_{i=1}^{25} A_{1i} + A_{2i} \cdot V_i^{-1} \cdot S_i^{-1} + A_{3i} \cdot V_i^{\frac{1}{q_1}-1} \cdot S_i^{\frac{q_2}{q_1}-1}$$

Vrednosti koeficijenata A_1, A_2, A_3 , za svaku od 25 funkcije cilja, dati su u Tabeli 1.

Gde koeficijenti A_1, A_2, A_3 imaju oblik:

$$A_{1i} = C_{LD2} \cdot t_{reg} + C_{M7} \cdot t_{ph} + C_{LD1} \cdot \frac{t_{pz}}{n_s \cdot z} + \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^5 C_{Mi} \right) \cdot (t_p + t_m + \sum t_i) \quad (8)$$

$$A_{1i} = 3 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot 480 \text{ min} + 1 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot 1,4 \text{ min} + 3 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot \frac{3 \text{ min}}{300 \cdot 25} + \left(3 \frac{\text{din}}{\text{min}} + 11,8 \frac{\text{din}}{\text{min}} \right) \cdot$$

$$\cdot (18 \text{ min}) = 1707,801 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right]$$

$$A_{11} = A_{12} = \dots = A_{125} = 1707,801 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right]$$

$$A_{2i} = \psi_i \cdot \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^6 C_{Mi} \right) = \psi_i \cdot 18,8 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot \text{m}^2 \right] \quad (9)$$

$$\psi_i = 10^{-6} \cdot \pi \cdot D_i \cdot i \cdot L_{0i} \left[\text{m}^2 \right]$$

$$A_{3i} = \psi_i \cdot (K_3 \cdot t_s + K_4) \cdot C_i^{\frac{1}{q_1}} \left[\frac{\text{din} \cdot \text{min}}{\text{m}^2} \right] \quad (10)$$

$$K_3 = \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^5 C_{Mi} \right) = 14,8 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right] \quad (11)$$

$$K_4 = 1400 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right]; C = Q \cdot D^{q_3} \cdot a^{-q_4} k_v \quad (12)$$

Tabela 1: Vrednosti koeficijenata A_1, A_2, A_3, a_i .

i	A_{1i} [min]	A_{2i} [$\frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot \text{m}^2$]	A_{3i} [$\frac{\text{din} \cdot \text{min}}{\text{m}^2}$]	a_i [mm]
1	1707,801	0,340	0,295	0,2
2	1707,801	0,378	0,547	0,2
3	1707,801	0,301	0,614	0,2
4	1707,801	0,240	0,578	0,2
5	1707,801	0,161	0,471	0,2
6	1707,801	0,123	0,421	0,2
7	1707,801	0,340	2,062	0,05
8	1707,801	0,378	2,188	0,05
9	1707,801	0,302	1,840	0,05
10	1707,801	0,161	0,942	0,05
11	1707,801	0,123	0,771	0,05
12	1707,801	0,007	0,227	0,2
13	1707,801	0,007	0,246	0,05
14	1707,801	0,003	0,063	0,2
15	1707,801	0,003	0,067	0,05
16	1707,801	0,040	1,244	0,2
17	1707,801	0,041	1,321	0,05
18	1707,801	0,020	0,278	0,05
19	1707,801	0,020	0,295	0,05
20	1707,801	0,005	0,115	0,2
21	1707,801	0,005	0,121	0,05
22	1707,801	0,001	0,015	0,05
23	1707,801	0,001	0,017	0,05
24	1707,801	0,003	0,106	0,2
25	1707,801	0,003	0,110	0,05

Veličina $Q=300$ kom je veličina serije koji se obradjuje, $k_v=1,1$ je faktor stanja mašine, $q_1 = 0,75$; $q_2 = 1$ su parametri obradljivosti, $t_s = 0,15$ min vreme smene alata. Vrednosti D_i, L_{0i}, ψ_i, C_i date su u tabeli 2 i 3.

Deo, od čelika Č0545, obradjuje se na petoosnom obradnom centru **Pinnacle LV85** (CONTROL SYSTEM: FANUC 0i - MC/18i-MB) čija je pogonska snaga 15 Kw. Na osnovu ovoga formiramo ograničenje koje prati ovu

funkciju cilja a odnosi se na pogonsku snagu mašine koja iznosi 15 kW i materijal dela.

$$0,345 \cdot S_i^{0,8} \cdot V_i < 15000 \quad (i = 1, 2, \dots, 17) \quad (13)$$

Tabela 2. Vrednosti veličina D_i , L_{0i} i ψ_i .

i	D_i [mm]	L_{0i} [mm]	ψ_i [mm ²]	C_i [mm ²]
1	30,95	186	18,076	186
2	35,95	178	20,093	178
3	37,95	134,5	16,027	134,5
4	42	97	12,792	97
5	42,95	63,5	8,564	63,5
6	43,95	47,5	6,555	47,5
7	31	186	18,105	186
8	36	178	20,121	178
9	38	134,5	16,049	134,5
10	43	63,5	8,574	63,5
11	44	47,5	6,563	47,5
12	12,65	10	0,397	10
13	12,7	10	0,399	10
14	20,55	2,6	0,168	2,6
15	20,6	2,6	0,168	2,6
16	15,95	43	2,154	43
17	16	43	2,160	43
18	34	9,95	1,062	9,95
19	34	10	1,068	10
20	25,95	3,5	0,285	3,5
21	26	3,5	0,286	3,5
22	40	0,45	0,057	0,45
23	40	0,5	0,063	0,5
24	21,75	2,6	0,178	2,6
25	21,8	2,6	0,178	2,6

Pored ovog ograničenja vrednosti koraka i tehnološke brzine rezanja moraju se naći u zadatim granicama koje su date u tabeli 3. Vrednosti koraka moraju biti veće od nule i manje od maksimalne preporučene vrednosti za alat kojim se izvode operacije razvrtanja. Vrednosti tehnološke brzine rezanja takodje moraju biti veće od nule i manje od maksimalne brzine koju mašina može da postigne za odgovarajući prečnik tj. za maksimalni broj obrtaja mašine $n_M = 10000$ [o/min] je:

$$V_i < \frac{\pi \cdot D_i \cdot n_M}{1000} \text{ [m/min]} \quad (14)$$

6. REZULTATI

Kao rezultata ovog procesa optimizacije dobijaju se 50 parametara režima obrade koji predstavljaju optimalne vrednosti tehnološke brzine rezanja i koraka za 25 operacija razvrtanja tako da troškovi ovih zahvata imaju minimalnu vrednost.

U Tabeli 4 date su optimalne vrednosti koraka, brzine i cene koštanja svih operacija pojedinačno i zbirno.

Tabela 3. Gornje i donje vrednosti granica koraka i brzine:

i	S_i [mm/o]		V_i [m/min]	
	Donja granica	Gornja granica	Donja granica	Gornja granica
1	0	0,08	0	971,83
2	0	0,08	0	1128,83
3	0	0,08	0	1191,63
4	0	0,08	0	1318,8
5	0	0,08	0	1348,63
6	0	0,08	0	1380,03
7	0	0,08	0	973,4
8	0	0,08	0	1130,4
9	0	0,08	0	1193,2
10	0	0,08	0	1350,2
11	0	0,08	0	1381,6
12	0	0,08	0	397,21
13	0	0,08	0	398,78
14	0	0,08	0	645,27
15	0	0,08	0	646,84
16	0	0,08	0	500,83
17	0	0,08	0	502,4
18	0	0,08	0	1067,6
19	0	0,08	0	1067,6
20	0	0,08	0	814,83
21	0	0,08	0	816,4
22	0	0,08	0	1256
23	0	0,08	0	1256
24	0	0,08	0	682,95
25	0	0,08	0	684,52

Sa dijagrama vidimo da je vrednost troškova za prvu operaciju jako blizu vrednost 1707,8 din koja predstavlja konstantni trošak što znači da smo došli do minimalnog troška i tako za svih 25 operacija a zbira svih ovih troškova daje nam ukupnu cenu proizvodnje ovog mašinskog dela koja će biti minimalna.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je urađena optimizacija troškova tehnološkog procesa jednog dela složene strukture metodom PSO. Na primer u optimizaciji fleksibilne tehnologije kada imamo slučaj da je realno vreme obrade manje od zadatog, pristupa se optimizaciji parametara obrade radi smanjenja troškova proizvodnje. U ovom slučaju možemo birati jeftinije alate nižeg nivoa reznih karakteristika [5], a metodom PSO za veoma kratko vreme možemo dobiti rezultate koji zahvat dozvoljava da se smanje režimi obrade a koji ne a sve to možemo

predstaviti u prostoru kao na slici radi provere dobijenih rezultata.

Tabela 4. Optimalne vrednosti koraka, brzine i cene koštanja svih operacija pojedinačno.

i	S_i [mm/o]	V_i [m/min]	T_i [din]
1	0,006	546,8	1708,35
2	0,778	19,3	1708,68
3	0,159	79,5	1708,70
4	0,002	415,7	1708,66
5	0,444	46,8	1708,48
6	0,009	109,2	1708,34
7	0,012	66,8	1710,14
8	0,001	1034	1710,29
9	0,001	402,8	1709,86
10	0,002	352	1708,86
11	0,026	23,9	1708,66
12	0,002	125,6	1707,97
13	0,021	8,1	1707,98
14	0,012	251,4	1707,89
15	0,057	11,7	1707,86
16	0,033	500	1708,73
17	0,044	501,19	1708,78
18	0,039	7,5	1708,05
19	0,066	72,2	1708,07
20	0,043	810,5	1707,90
21	0,037	645,4	1708,15
22	0,059	250	1707,84
23	0,085	193,3	1707,82
24	0,015	23,1	1707,89
0,015	307,04	0,178	1708,00
$\sum_{i=1}^{25} T_i$			42711,96

Broj iteracija : 143

Grafički prikaz jedne od 25 funkcija troškova:

Slika.4. Površina funkcija troškova prvog zahvata.

LITERATURA

- [1] Stanic, J., "Uvod u teoriju tehnoeкономске optimizacije procesa", Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1983)
- [2] Mecanin, V., "Optimizacija obradnih procesa u masinogradnji", Mašinski fakultet Kraljevo, Kraljevo, (1996)
- [3] Kenedy, J., Eberhart, R., "Particle swarm optimization". In IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, (1995)
- [4] Shi, Y., Eberhart, R., "A modified particle swarm optimizer", Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 69-73, (1998)
- [5] Lukić, Lj. "Fleksibilni tehnološki sistemi", Mašinski fakultet Kraljevo, Kraljevo, (2008)

Application of MATLAB Software Package for Optimization of Cutting Processing Parameters

Zvonko Petrović^{1*}, Radovan Nikolić¹

¹Academy of Professional Studies Šumadija, Trstenik (Serbia)

Optimally chosen parameters of the processing mode directly influence total costs of production of a single product and therefore the profit of the company as well. In this paper, the choice of optimum parameters of the milling processing mode by using the method of particle swarm optimization (PSO) is shown. The goal of optimization is represented through the goal function (optimization function or optimization criterion) and by using the method of optimization PSO, minimum costs of machining process are obtained. Optimization function is also represented graphically for the purpose of clearer analysis on the technological area in which the values of machining mode that give minimum costs of machining process are presented.

Keywords: Milling, Cutting processing parameters, Particle swarm optimization

1. INTRODUCTION

Optimization of parameters of the machining mode is the method of knowledge implementation in designing of machining process with the purpose of their analysis, improvement, and reaching a higher techno-economic analysis. A basic assumption is that the costs of machining process will be optimum if costs of machining process in all technological operations of production process are optimum as well. Mathematical model of the goal function is designed by Stanić [1] and that model of function was applied by Mečanin [2] on optimization of costs of machining process by scraping of the pin. Mathematical model of function can be applied to all elementary operations with appropriate limitations, which are different for different procedures. Goal and limitation functions should contain enough influencing factors in order to accomplish objective impact on the model of machining process.

2. MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTION OF PROCEDURE COSTS DEPENDING ON MILLING PROCESSING MODE

Function of costs, by which, depending on the entrance into the machining system and state (condition) of the machining system, direct procedure costs are described mathematically, represents in a trihedral OSVT, the area located in the first octane, and it is always concave because parameters of the machining mode must have values bigger than zero. Its form is:

$$T_z = A_{1i} + A_{2i} \cdot V_i^{-1} \cdot S_i^{-1} + A_{3i} \cdot V_i^{\frac{1}{q_1}-1} \cdot S_i^{\frac{q_2}{q_1}-1} \quad (1)$$

where $i = 1, 2, \dots, n$ is a number of operations that is optimized.

Geometric position of points of conditional maxima at the area of function of costs comprises in the coordinate plane OSV a hyperbole, whose arms, depending on the state(condition) of entrance into the system, asymptotically approach the coordinate axis at faster or slower rate. A set of points is used for identifying the line of optimum costs at which machining process should be managed in order to achieve maximum effects regarding the costs of machining.

Optimal levels of costs are located in the region $\{S_{\max}, V_{\min}\}$, that is, the highest levels of machining are achieved when the values of steps are maximum and when cutting speed values are minimum. Inversely, the region $\{S_{\min}, V_{\max}\}$ is characterized by relatively high level of machining costs. There are special cases $q_2 = 1$ и $q_2 > 1$. For $q_2 = 1$ the same level of costs is obtained for the entire mode area $\{S, V\}$, while in case of $q_2 > 1$ maximum effects of machining which are located in the region $\{S_{\min}, V_{\max}\}$, and minimum in the mode points $\{S_{\max}, V_{\min}\}$.

Machining beyond the curve of optimum costs, unjustifiably frequent in production practice, conditions relatively great efficiency losses, especially in mode areas $\{S_{\max}, V_{\min}\}$ and $\{S_{\min}, V_{\max}\}$, because it is under such circumstances that high costs of reproduction occur in machining process [1].

Coefficient (parameter) A_{1i} , is always constant since it represents basic costs in a company, which do not depend on machining parameters, but influence total price of production of products.

Coefficients (parameters) A_{2i} и A_{3i} depend on machining mode, influence total costs of production and thus define position of minimum which cannot be smaller than value A_{1i} .

3. ALGORITHM PSO

Particle swarm optimization PSO (Figure 1) represents metaheuristic method of optimization based on agents (particles) population, which was accidentally discovered by James Kennedy and Russell Eberhart in 1995, while studying the simulation of social behaviour of bird flocking [3]. Just as it is the case with all algorithms based on population, initial particle population is generated first. Position of the particle represents vector of parameters which are optimized or potential solution:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

Random position in space which is explored, as well as initial velocities, is given to each particle. After that, the value of goal function of each particle is determined, and that value is added to it as the best value for the particle in question, and the initial position becomes the best position of the particle p_{best} . When all the best values of particles are determined, the particle with the minimum value is searched, and its position becomes the best position for the entire swarm p_{gbest} . Afterwards, it needs to be checked whether the criteria of optimization are satisfied, and if they are, the obtained results are shown. If the criteria are not satisfied, new velocities and positions need to be calculated.

Figure 1: Algorithm of the method of particle swarm optimization

Figure 2 graphically shows how to determine new velocities and positions in two-dimensional space of search.

Figure 2: Updating of velocity and position of the particle

New velocity of each particle consists of three components:

1. the component which depends on instantaneous particle velocity,
2. the component which is proportional to the distance of instantaneous position of the particle and its best value,
3. the component which is proportional to the distance of instantaneous position of the particle and its best position for the entire swarm.

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_1 \cdot r_1 \odot (p_{besti} - x_i) + c_2 \cdot r_2 \odot (p_{gbesti} - x_i) \quad (3)$$

where w represents inertia weight, c_1, c_2 are acceleration coefficients or correction factors, r_1, r_2 represent two random vectors of the length n within the limits $[0,1]$. The symbol $\odot$ represents Hadamard product:

$$(A \odot B)_{i,j} = (A)_{i,j} \cdot (B)_{i,j} \quad (4)$$

Coefficient of inertia weight w impacts the first component, and for the values in the range of $0,9 - 1,2$ [4] it gives the best results, that is, the algorithm has greater chances of finding the global minimum for a reasonable number of iterations. For coefficient values which are smaller than $0,8$, if algorithm finds global minimum it will find it fast. Particles in this case move quickly and it can happen that they “fly over” some area, so it can happen that they do not find global minimum. On the other side, if inertia weight has bigger value, then particles search the solution space more thoroughly and the chances of finding global minimum are greater.

Acceleration coefficients c_1 and c_2 , when multiplied by random vectors r_1 and r_2 , stochastically manage the impact of the two other velocity components.

Usually, their assumed value is approximately 2, in order for the middle value of the product of acceleration coefficient and random vector to be approximately 1. New position of the particle is determined by simple adding of the current position $\mathbf{x}_i$ and new particle velocity $\mathbf{v}_{i+1}$.

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{i+1} \quad (5)$$

The values of the goal function for new positions of the particle are determined again, and for each particle new and old values of the goal function are compared. If the new value is smaller, then it becomes new best value and the current position becomes the best position of that particle.

The position of the particle with the smaller value becomes new best position for the entire swarm. Again, it needs to be checked whether the optimization criteria are satisfied; if they are, the results are shown, and if not, the entire procedure will be repeated until the criteria are satisfied. This is the simplest version of the algorithm of particle swarm optimization.

Other versions do not have constant values for the parameters w , c_1 and c_2 , but they alter by specific rules during the implementation of the algorithm. In addition, other PSO algorithms also include different swarm topologies, that is, the way in which particles in the swarm communicate.

4. GOAL AND LIMITATION FUNCTION

In this paper, 17 milling operations are optimized and in them, machining mode parameters are step S [mm/o] and technological cutting speed:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (6)$$

in which the number of rotations n [o/min] is.

They are directly related to the main processing time, so for optimum values of these parameters we have optimum time of duration of each operation, and therefore, the optimum processing time of machine part.

Machine mode parameters that give minimum costs of machining process must be found within given limitations because there is a limitation by characteristics of tools and machine.

Figure 3 shows 3D model of valve casing and section where the greatest number of different openings are located.

Figure 3: Valve casing – a machine part whose milling operations are optimized

Goal function which is optimized has the following form:

$$f(S_i, V_i) = \sum_{i=1}^{25} T_i \quad (7)$$

$$= \sum_{i=1}^{25} A_{1i} + A_{2i} \cdot V_i^{-1} \cdot S_i^{-1} + A_{3i} \cdot V_i^{\frac{1}{q_1}-1} \cdot S_i^{\frac{q_2}{q_1}-1}$$

Values of coefficients A_1, A_2, A_3 , for each of 17 goal functions, are given in table 1 :

Table 1: Coefficient values A_1, A_2, A_3, a_i

i	A_{1i} [min]	A_{2i} [$\frac{\text{din} \cdot \text{m}^2}{\text{min}}$]	A_{3i} [$\frac{\text{din} \cdot \text{min}}{\text{m}^2}$]	a_i [mm]
1	1707,801	828,8	0,748	0,2
2	1707,801	118,1	0,133	0,2
3	1707,801	14,76	0,019	0,2
4	1707,801	7,721	0,036	0,2
5	1707,801	1,505	0,007	0,2
6	1707,801	35,18	0,389	0,2
7	1707,801	1,535	0,010	0,05
8	1707,801	7,226	0,073	0,05
9	1707,801	46,33	0,486	0,05
10	1707,801	2,007	0,014	0,05
11	1707,801	81,46	0,713	0,05
12	1707,801	1,505	0,017	0,2
13	1707,801	19,48	0,671	0,05
14	1707,801	1,299	0,021	0,2
15	1707,801	137,0	1,157	0,05
16	1707,801	14,76	0,102	0,2
17	1707,801	1,612	0,252	0,05

where coefficients A_1, A_2, A_3 have the following form:

$$A_{li} = C_{LD2} \cdot t_{reg} + C_{M7} \cdot t_{ph} + C_{LD1} \cdot \frac{t_{pz}}{n_s \cdot z} + \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^5 C_{Mi} \right) \cdot (t_p + t_m + \sum t_i) \quad (8)$$

$$A_{li} = 3 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot 480 \text{ min} + 1 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot 1,4 \text{ min} + 3 \frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot \frac{3 \text{ min}}{300 \cdot 25} + \left(3 \frac{\text{din}}{\text{min}} + 11,8 \frac{\text{din}}{\text{min}} \right) \cdot (18 \text{ min}) = 1707,801 [\text{din}]$$

$$A_{11} = A_{12} = \dots = A_{25} = 1707,801 [\text{din}]$$

$$A_{2i} = \psi_i \cdot \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^6 C_{Mi} \right) = \psi_i \cdot 18,8 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \cdot \text{m}^2 \right]$$

$$\psi_i = 10^{-6} \cdot \pi \cdot D_i \cdot i \cdot L_{0i} [\text{m}^2] \quad (9)$$

$$A_{3i} = \psi_i \cdot (K_3 \cdot t_s + K_4) \cdot C_i^{\frac{1}{q_1}} \left[\frac{\text{din} \cdot \text{min}}{\text{m}^2} \right] \quad (10)$$

$$K_3 = \left(C_{LD1} + \sum_{i=1}^5 C_{Mi} \right) = 14,8 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right] \quad (11)$$

$$K_4 = 1400 \left[\frac{\text{din}}{\text{min}} \right]; C = Q \cdot D^{q_3} \cdot a^{-q_4} k_V \quad (12)$$

Size Q=300 is the size of the series which is machined, $k_v=1,1$ is the factor of the state of the machine, $q_1=0,75$; $q_2=1$ are the parameters of the machinability, $t_s=0,15 \text{ min}$ is the time of the change of the tools. Values D_i, L_{0i}, ψ_i, C_i are given in the Table 2 and 3.

Table 2: Values of sizes D_i, L_{0i}, ψ_i, C_i

i	D_i [mm]	L_{0i} [mm]	ψ_i [mm ²]	C_i [mm ²]
1	27	520	44,09	21922,3
2	40	50	6,280	17566,7
3	50	5	0,785	15307,1
4	21,8	6	0,411	4239,7
5	25,5	1	0,080	4093,8
6	14,9	40	1,871	1790,3
7	26	1	0,082	2993,1
8	20,4	6	0,384	1957,6
9	21,8	36	2,464	1884,3
10	34	1	0,107	2890,8
11	30	46	4,333	2261,5
12	25,5	1	0,080	1705,8
13	11	30	1,036	574,1
14	22	1	0,069	1224,7
15	40	58	7,285	2342,2
16	50	5	0,785	2870,1
17	3,9	7	0,086	126,5

A part made of steel S0545, is machined on five-axis machining center **Pinnacle LV85** (CONTROL SYSTEM: FANUC 0i-MC / 18i- MB)

which has motive power of 15 kW. Based on this fact we form the limitation which follows this goal function and refers to motive power machine, which is 15kW, and material of the part.

$$0,345 \cdot S_i^{0,8} \cdot V_i < 15000 \quad (i=1,2,\dots,17) \quad (13)$$

In addition to the limitation of the value of steps, technological cutting speeds must be found within boundaries given in the Table 3. Values of steps must be bigger than zero and smaller than maximum recommended values for the tool which is used in performance of milling operation. Values of technological cutting speed must also be bigger than zero and smaller than maximum velocity, which a machine is able to achieve for the appropriate diameter, that is, for the maximum number of rotations of the machine $n_M=10000 [\text{o/min}]$ is:

$$V_i < \frac{\pi \cdot D_i \cdot n_M}{1000} [\text{m/min}] \quad (14)$$

Table 3: Upper and lower boundary values of steps and velocity

i	S_i [mm/o]		V_i [m/min]	
	Lower boundary	Upper boundary	Lower boundary	Upper boundary
1	0	0,08	0	508,68
2	0	0,08	0	753,60
3	0	0,08	0	942,00
4	0	0,08	0	410,71
5	0	0,08	0	480,42
6	0	0,08	0	280,72
7	0	0,08	0	489,84
8	0	0,08	0	384,34
9	0	0,08	0	410,71
10	0	0,08	0	640,56
11	0	0,08	0	565,20
12	0	0,08	0	480,42
13	0	0,08	0	207,24
14	0	0,08	0	414,48
15	0	0,08	0	753,60
16	0	0,08	0	942,00
17	0	0,08	0	73,48

5. OPTIMIZATION RESULTS

All 17 parameters are obtained as the results of this optimization process which represent optimum values of technological cutting speed and steps for 17 milling operations, and so the costs of these procedures have minimum value.

Optimum values of the steps ,velocity and cost price of all operations individually and collectively are given in Table 4:

Table 4: Optimum values of the steps ,velocity and cost price of all operations individually

i	S_i [mm/o]	V_i [m/min]	T_i [din]
1	0,026	450,6	1708,29
2	0,238	625,3	1708,66
3	0,136	751,2	1708,57
4	0,012	325,3	1708,43
5	0,114	420,5	1708,21
6	0,023	240,5	1708,32
7	0,123	425,6	1710,47
8	0,030	350,4	1710,85
9	0,063	367,6	1709,96
10	0,026	560,8	1708,33
11	0,369	480,6	1708,87
12	0,119	375,4	1707,95
13	0,336	180,9	1707,88
14	0,887	350,6	1707,96
15	0,710	650,9	1707,97
16	0,600	850,6	1708,84
17	0,325	65,9	1708,94
$\sum_{i=1}^{25} T_i$			29048,5

Number of iterations : 183

Graph of one of the 17 function costs :

Figure 4: Area of the function costs of the first procedure

According to figure we can see that the value of costs for the first operation is very close to the value 1707,8 din which represents constant cost, which means that we have reached the minimum cost, and so for the entire 17 operations, and the sum of all this costs gives us the total production price of this machine part, which is going to be minimum.

6. CONCLUSION

In this paper, the optimization of the costs of technological process of a part of a complex structure is performed by using the method PSO. For instance,

in optimization of the flexible technology when real processing time is less than given, optimization of machining parameters is implemented in order to decrease costs of production. In this case, we can choose cheaper tools of lower level of cutting characteristics [5], and by using the method PSO, in a very short time, we can obtain results on which procedure allows decreasing of the machine mode and which does not, all of which can be presented in the space as in figure, for the purpose of checking of the obtained results.

REFERENCES

- [1] Stanic, J., "Uvod u teoriju tehnokonomske optimizacije procesa", Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1983)
- [2] Mecanin, V., "Optimizacija obradnih procesa u masinogradnji", Mašinski fakultet Kraljevo, Kraljevo, (1996)
- [3] Kenedy, J., Eberhart, R., "Particle swarm optimization". In IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948, (1995)
- [4] Shi, Y., Eberhart, R., "A modified particle swarm optimizer", Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 69-73, (1998)
- [5] Lukić, Lj. "Fleksibilni tehnološki sistemi", Mašinski fakultet Kraljevo, Kraljevo, (2008)