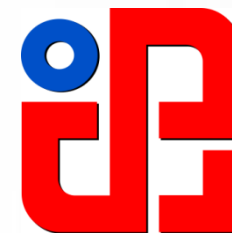




FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
Department za proizvodno mašinstvo
Projektovanje i optimizacija tehnoloških
procesa proizvodnje



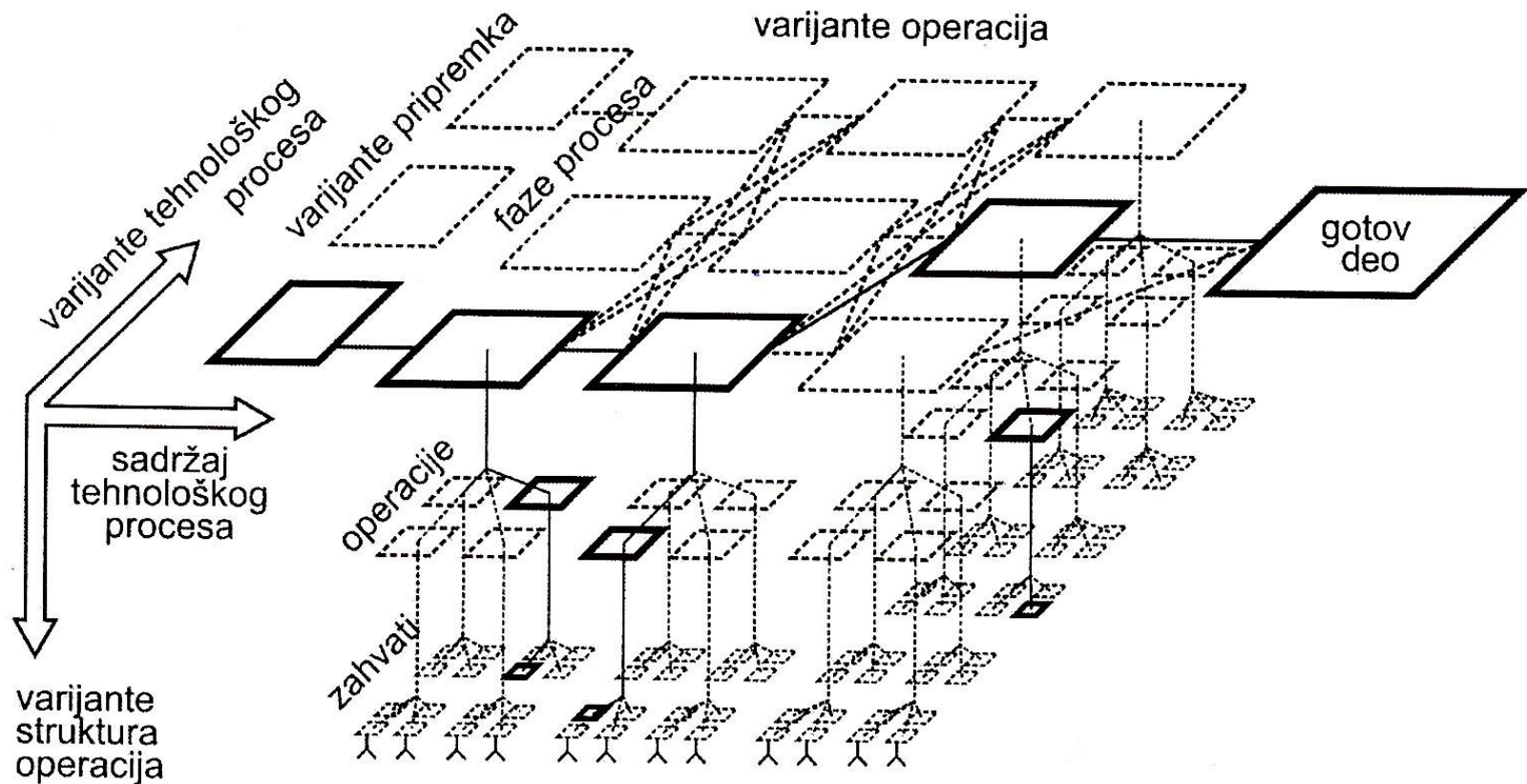
Predavanje 11:

**TEHNOEKONOMSKA OPTIMIZACIJA
TEHNOLOŠKIH PROCESA IZRADE
PROIZVODA**

Dr Dejan Lukić

Varijantnost tehnoloških procesa

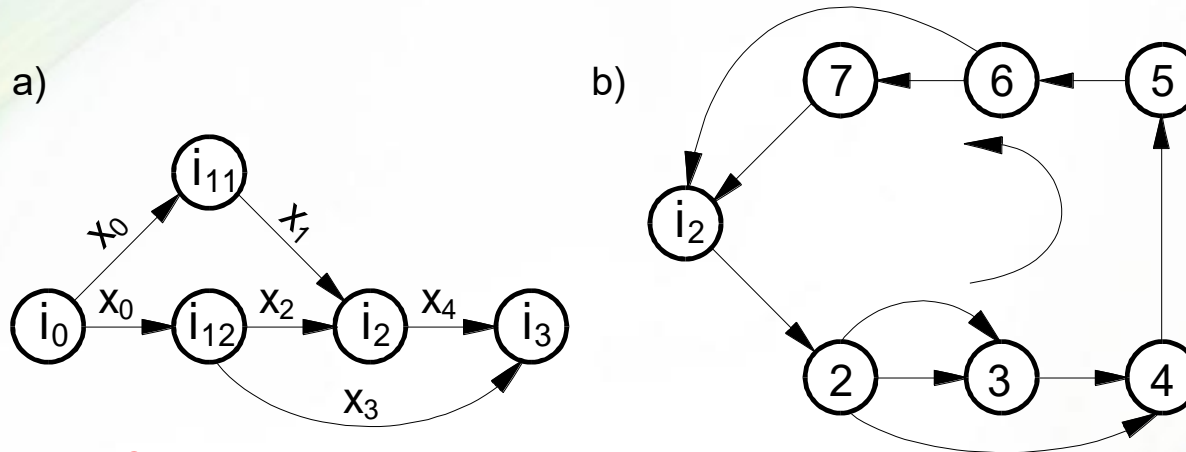
Tehnološki procesi izrade proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji, karakterišu se **varijantnošću rešenja**, najčešće u svim svojim fazama, odnosno delovima. Ovakve karakteristike uslovljene su **ulaznim podacima**, koji su obuhvaćeni **crtežom** i **obimom proizvodnje** proizvoda, raspoloživom **tehnološkom opremom** i **pripremcima**, kao i **tehnoekonomskim uslovima** i **subjektivnim opredeljenjem tehnologa**.



Varijantnost projektovanja tehnoloških procesa

Varijantnost tehnoloških procesa

Za iste ulazne podatke tehnološki proces izrade određenog proizvoda može se predstaviti u vidu **tehnološkog grafa** u kome njegovi čvorovi predstavljaju usvojena rešenja **varijanti operacija**, odnosno **varijanti zahvata**.



Graf tehnološkog procesa i operacije obrade

Graf tehnološkog procesa obrade pokazuje da za tehnološki proces obrade izabrane vrste pripreмка (i_0) postoje tri mogućnosti, za koje je Bulova promenljiva $x_i=1$, ($i=0, 1, 2, 3, 4$):

$$i_0 \rightarrow i_{11} \rightarrow i_2 \rightarrow i_3$$

$$i_0 \rightarrow i_{12} \rightarrow i_3$$

$$i_0 \rightarrow i_{12} \rightarrow i_2 \rightarrow i_3$$

Varijantnost tehnoloških procesa

Graf operacije (i_2) pokazuje da je dovođenje obratka u stepen obrađenosti koji određuje zahvat (4) posle zahvata (2) moguće postići na tri načina, a završni stepen obrađenosti obradka na nivou ove operacije moguće je posle zahvata (6) postići na dva načina.

Varijante tehnološkog procesa izrade posmatranog proizvoda mogu se predstaviti i u vidu **matrice** kod koje **vrste označavaju varijante tehnološkog procesa**, a kolone **varijante operacija**.

Prema tome, j -ta varijanta tehnološkog procesa izrade može se predstaviti kao **skup odgovarajućih operacija**, odnosno:

$$(TP)_j = \{ O_{j1}, O_{j2}, \dots, O_{ji}, \dots, O_{jp} \}$$

gde je p -broj operacija izrade posmatrane varijante tehnološkog procesa.

Uzimajući u obzir, isto tako, da svaka operacija čini logičan redosled i vrstu zahvata obrade, može se i **operacija definisati kao tehnološki skup zahvata** tako da se i operacija O_{ji} može predstaviti u vidu skupa odgovarajućih zahvata, odnosno:

$$O_{ji} = \{ Z_{ji1}, Z_{ji2}, \dots, Z_{jiq}, \dots, Z_{jir} \}$$

Dekomponovane operacije i zahvati omogućavaju da se njihovom **unutrašnjom i spoljašnjom optimizacijom** izvrši određivanje optimalne varijante tehnološkog procesa izrade na varijantnom principu.

O_{11}	O_{12}	\dots	O_{1i}	\dots	O_{1n}
O_{21}	O_{22}	\dots	O_{2i}	\dots	O_{2m}
\dots					
O_{j1}	O_{j2}	\dots	O_{ji}	\dots	O_{jp}
\dots					
O_{k1}	O_{k2}	\dots	O_{ki}	\dots	O_{kz}

Varijantnost tehnoloških procesa

Unutrašnjom optimizacijom vrši se određivanje optimalnih režima i uslova obrade za pojedine zahvate obradnog procesa.

Spoljašnja optimizacija, kao osnovni zadatak tehnoekonomske optimizacije tehnoloških procesa izrade proizvoda, može se uspešno rešiti primenom odgovarajućih matematičkih modela optimizacije obradnih procesa u okviru varijantnog modela optimizacije.

Spoljašnja i unutrašnja optimizacija obradnih i tehnoloških procesa može se izvršiti pomoću:

- *Metoda tehnoekonomske optimizacije,*
- *Metoda simulacije.*
- *Višekriterijumskog vrednovanja i rangiranja i,*
- *Metoda veštačke intelingencije.*

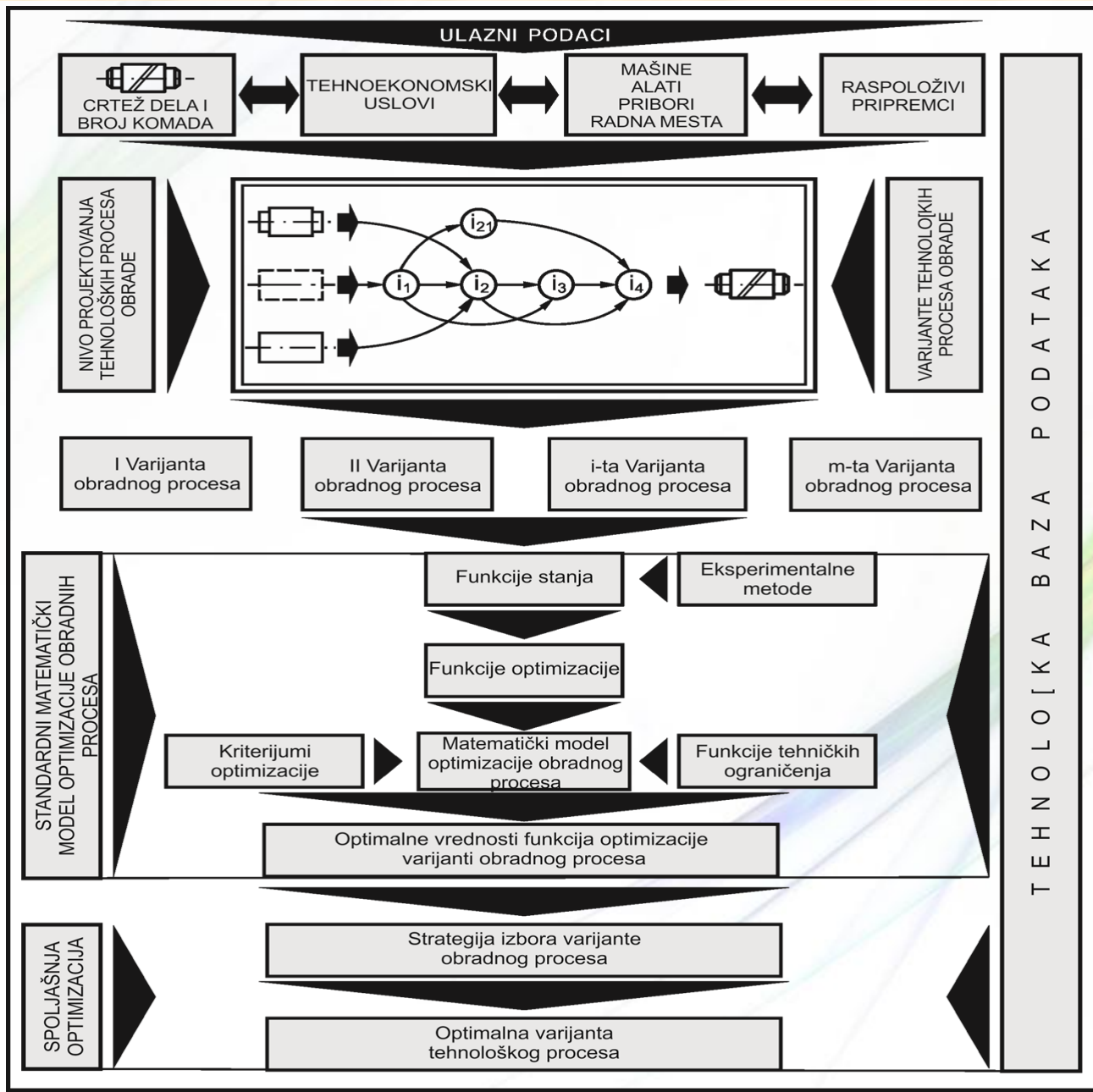
Varijantni model tehnoekonomske optimizacije

Varijantni model tehnoekonomske optimizacije osim ulaznih podataka, uključuje tri osnovna podsistema.

Prvi obuhvata **konceptualno projektovanje** tehnoloških procesa izrade u vidu varijanti, **drugi** određivanje **najpovoljnijih rešenja** obradnih procesa, a **treći** određivanje **optimalne varijante** tehnološkog procesa.

Postavljanje kvalitetnih varijanti tehnoloških procesa i odgovarajućih operacija obrade čini osnovni nivo optimizacije u predloženom modelu.

Varijantni model tehnoekonomske optimizacije

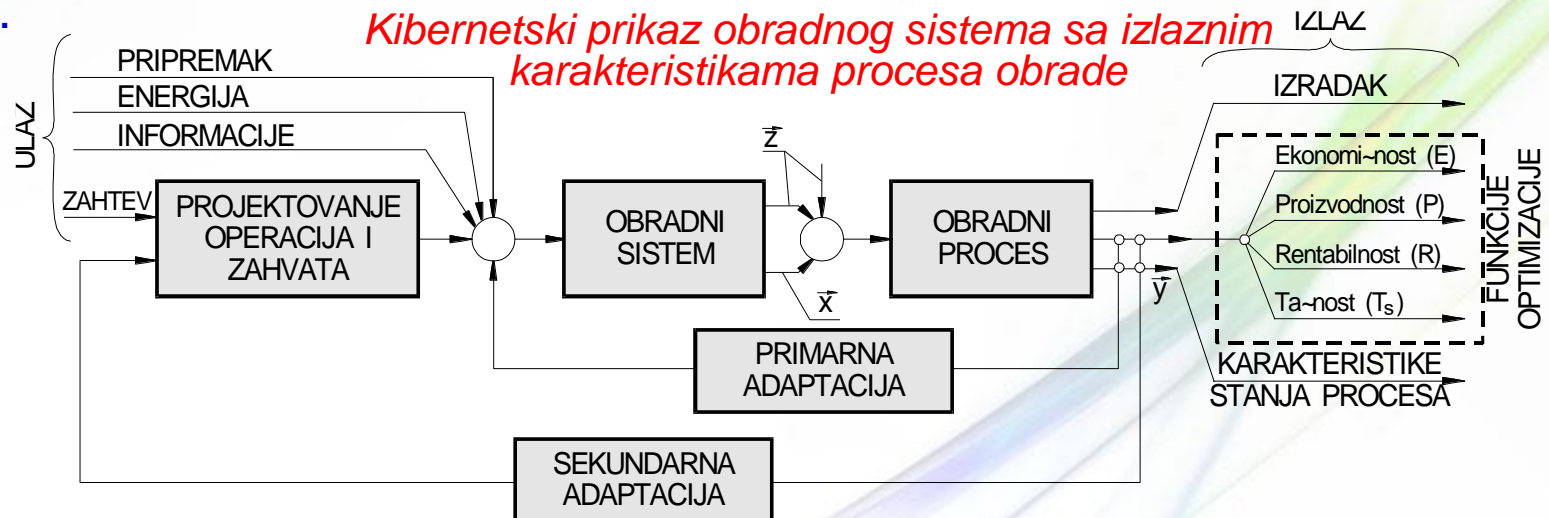


Optimizacija obradnih procesa

Sistem ulazno-izlaznih veličina obradnog procesa

Svaki obradni proces karakteriše se sistemom ulaznih (\vec{x}, \vec{z}) i izlaznih (\vec{y}) veličina, Vektorom karakteristika stanja procesa ili upravljanih veličina $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ opisuje se stanje i ponašanje obradnog procesa i sistema nastalo kao posledica dejstva ulaznih vektora.

Ovaj vektor obuhvata, pored **karakteristika ili funkcija obradljivosti**, kao što su **dinamika rezanja sa otporima i momentima rezanja, postojanost alata, efektivna snaga rezanja, temperatura rezanja, kvalitet obrađene površine i sl.**, i druge **fizičko-tehnološke karakteristike** bitne za odnosni aspekt analize stanja i ponašanja procesa.

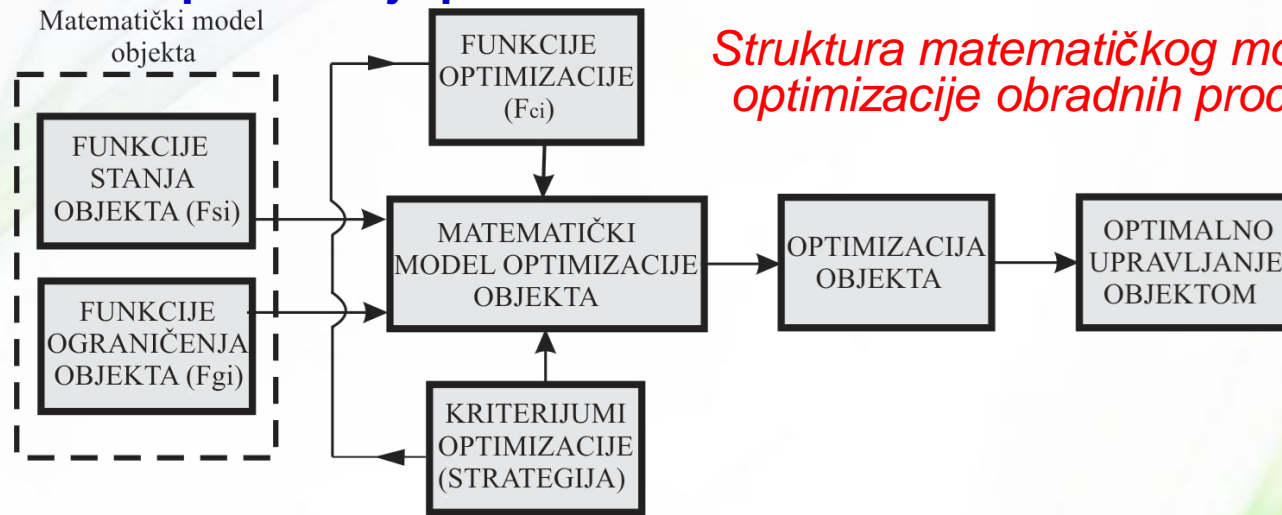


Ulazne veličine, kojih u jednom obradnom procesu ima nebrojeno mnogo, dele se na dve grupe, na kontrolisane-merljive (\vec{x}) i nekontrolisane (\vec{z}) veličine, odnosno vektore, dejstva procesa.

Poremećajna dejstva mogu se kompenzovati na dva načina: **primarnom** (promena režima) i **sekundarnom adaptacijom** (promena elemenata tehn. procesa).

Matematički model optimizacije obradnih procesa

Matematičku osnovu tehnoekonomske optimizacije obradnih procesa predstavlja **matematički model optimizacije procesa**.



Strukturu modela optimizacije procesa čine **tri komponente**:

- *Matematički model obradnog procesa,*
- *Kriterijumi optimizacije, odnosno strategija optimizacije i*
- *Funkcije optimizacije F_{ci} ($i=1,2,3,\dots$).*

Dok se prvim dvema komponentama, tj. funkcijama stanja ili jednačinama stanja i funkcijama ograničenja procesa definiše matematički model procesa, trećom komponentom, kriterijumom optimizacije, zajedno sa prvim dvema, postavljaju se okviri matematičkog modela optimizacije obradnog procesa, da bi se, zatim, definitivna formulacija matematičkog modela optimizacije, na osnovu ove tri komponente, okončala postavljanjem **konkretnog oblika funkcije optimizacije**:

$F_c = F_c(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ koja predstavlja formalni, matematički opis cilja optimalnog upravljanja obradnim procesom, identifikovanog kriterijumom optimizacije.

Kriterijumi optimizacije

U teoriji tehnoekonomske optimizacije obradnih procesa, kao dekomponovanih tipskih tehnoloških jedinica celovitog tehnološkog procesa, može se izdvojiti više kriterijuma optimizacije odnosno funkcija optimizacije (F_c) prema kojima se redovno optimiziraju obradni i tehnološki procesi. To su:

- *Troškovi izrade,*
- *Vreme izrade,*
- *Profit,*
- *Efikasnost procesa,*
- *Stepen iskorišćenja kapaciteta,*
- *Ekonomičnost,*
- *Proizvodnost i*
- *Rentabilnost.*

Ponekad se u analizi optimizacije obradnih procesa kao kriterijum optimizacije, odnosno funkcije optimizacije, uzimaju komponente vektora karakteristika stanja procesa (\vec{y}) kao, na primer, postojanost alata, odnosno funkcija postojanosti T i dr.

Dovođenjem funkcija optimizacije u funkcionalnu vezu sa skupom ulaznih upravljačkih i drugih navedenih veličina, u radnoj oblasti (D), može se postaviti matematički model optimizacije determinističkog obradnog procesa u obliku:

$$F_c = F_c(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{p-1}, x_p), \quad D \begin{cases} x_i = c_i, & i = k+1, k+2, \dots, p-1, p \\ a_r \leq x_i \leq b_r, & i, r = 1, 2, 3, \dots, k \\ F_{gj}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) \leq 0, & j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases}$$

$x \in D$

Kriterijumi optimizacije

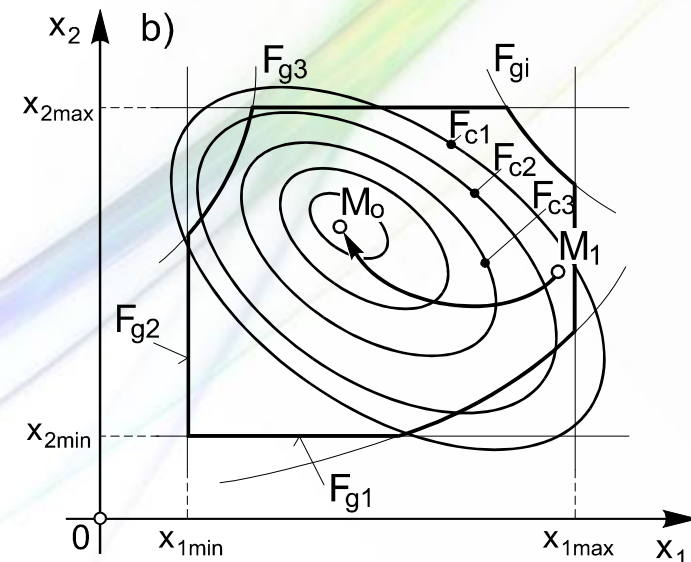
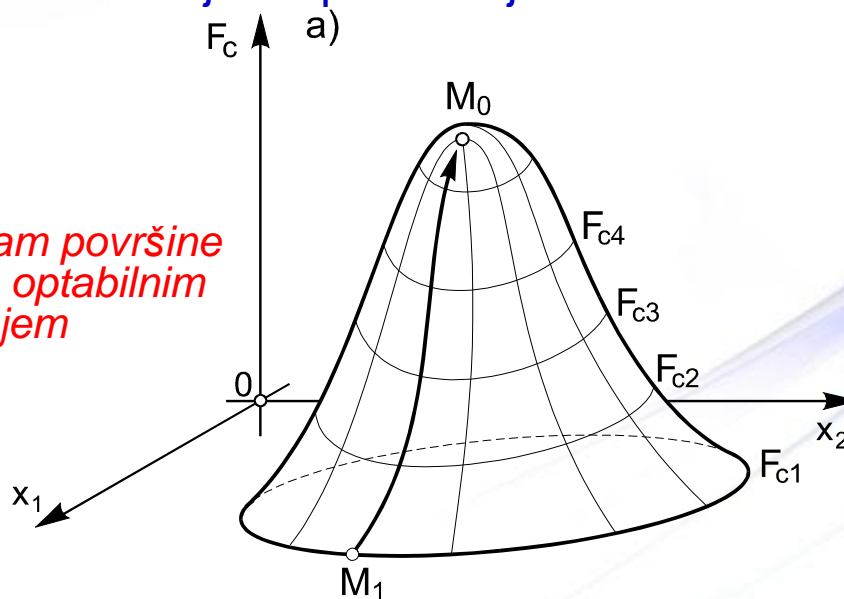
Radna oblast (D) u proizvodnoj praksi predstavlja radnu oblast izabranog obradnog sistema na kome se realizuje određeni obradni proces.

U strukturu predstavljenog modela može ući i **vreme** t kada je reč o **dinamičkim modelima procesa**, a takođe i **prostorne koordinate** vezane za objekat optimizacije.

Tehnoekonomska optimizacija obradnog procesa svodi se, sa matematičkog stanovišta, na **definisanje ekstrema, odnosno optimuma**, u ovom slučaju funkcije optimizacije i korespondentnih vrednosti upravljajućih veličina i karakteristika stanja procesa koje obezbeđuju ovaj optimum.

Optimalni nivo ili rešenje $\vec{x}_o = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0})$ funkcije optimizacije naziva se **lokalnim ekstremom**, a tačka M_o tačkom lokalnog ekstrema, ako je vrednost funkcije optimizacije F_c veća, odnosno manja od vrednosti u bilo kojoj tački δ -okoline tačke M_o . Funkcija F_c može imati **nekoliko lokalnih ekstrema** pa se ona tada naziva više ekstremnom funkcijom optimizacije.

Konturni dijagram površine reagovanja sa optimalnim područjem



Klasifikacija funkcija ograničenja

Da bi se tačno formulisao matematički model optimizacije nekog zahvata ili obradnog procesa potrebno je da se, pored matematičkog izraza funkcije optimizacije F_c , postave potpuni i tačni matematički izrazi svih potrebnih funkcija ograničenja F_{g_i} , $i=1,2,3,\dots$. Ovim funkcijama, koje se još nazivaju **funkcijama veze ili graničnim uslovima**, definišu se postojeća **tehnička, tehnološka, ekonomska** i druga ograničenja obradnog sistema i procesa, a time se u krajnjoj liniji definišu i granice dopuštenog ili optimalnog područja, radna oblast ili domen D .

Funkcije ograničenja mogu se klasifikovati **na osnovu više kriterijuma**.

Jedni polaze od **vrste ograničavajuće veličine**, tj. od toga da li se ograničava skup ulaznih veličina \vec{x} , skup karakteristika procesa \vec{y} ili skup onih funkcija optimizacije F_{c_i} koje prelaze u granične uslove, **drugi** od **izvora ograničenja**, tj. od **mašine, alata, pribora, obradka** i dr., a **treći** od **mogućnosti obradnog sistema** i zahteva obrade.

Sva ova i ostala navedena ograničenja mogu se izraziti u vidu **jednačina i nejednačina** u kojima se nalaze, pored drugih datih veličina, i skupovi ulaznih veličina x_i , $i=1,2,3,\dots,x_k,\dots,x_p$. **Treba imati u vidu da su za postavljanje analitičkog ili nekog drugog iskaza navedenih funkcija ograničenja potrebna, i to za većinu od njih, vrlo ozbiljna i obimna eksperimentalna ispitivanja, koja su često po pravilu dugotrajna i skupa.**

Na osnovu prikazane sistematizacije funkcija i parametara ograničenja obradnih procesa, mogu se, s obzirom na efikasnost primene u optimizaciji obradnih i tehnoloških procesa, ograničenja grupisati u **četiri grupe**:

- *Ograničenja za dubinu rezanja,*
- *Ograničenja za brzinu rezanja,*
- *Ograničenja za pomak i*
- *Složena ograničenja.*

Funkcije optimizacije obradnih i tehnoloških procesa

U optimizaciji obradnih, odnosno tehnoloških procesa, najčešće se kao kriterijumi, odnosno funkcije optimizacije, koriste **produktivnost, ekonomičnost i profit**.

Zbog efikasnije primene u matematičkim modelima optimizacije, umesto funkcija **produktivnosti i ekonomičnosti** primenjuju se **funkcije vremena i troškova obrade**, kao njihovi ekvivalenti.

Pošto se usvojene varijante operacija mogu dekomponovati na zahvate, odnosno odgovarajuće obradne procese, pogodno je pomenute funkcije optimizacije definisati za zahvate obrade, posebno i zbog toga što je zahvat deo operacije obrade koji se izvodi jednim alatom, u jednom ili više prolaza.

Vreme obrade

Vreme obrade, kao funkcija optimizacije, može se definisati za zahvate i obradne procese, odnosno operacije.

Za zahvate koji se izvode jednim alatom, odnosno diferencirano, vreme obrade određuje se izrazom:

$$t_z = t_g + t_a + \left(\frac{\Delta}{\delta} \right) t_{p1} + t_p + t_{me} + \frac{T_{pz}}{z_s n_z} + \sum t_i$$

a kod koncentrisane obrade, kod koje se određeni broj pojedinačnih zahvata izvodi istovremeno odgovarajućim brojem alata, vreme ovog složenog zahvata obrade određuje se izrazom:

$$t_z = t_{gm} + t_a + t_p + t_{me} + \frac{T_{pz}}{z_s n_z} + \sum t_i$$

Koncentrisana obrada se skoro uvek završava u jednom prolazu, pa je zbog toga u drugom izrazu **izostavljen deo pomoćnog vremena** koje se odnosi na vreme povratnih hodova klizača.

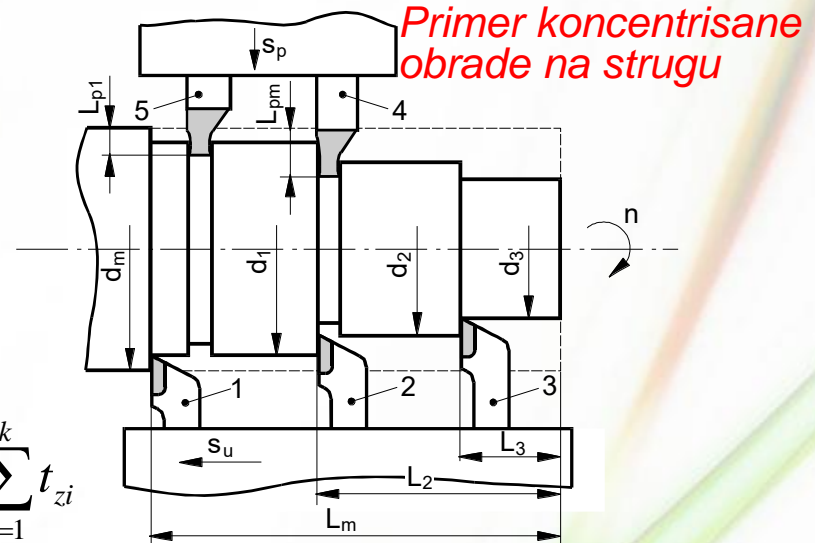
Vreme obrade

Vreme zamene i regulisanja alata u izrazu određuje se iz:

$$t_a = t_1 \frac{t_g}{T}$$

a kod koncentrisane obrade ovo vreme određuje se iz:

$$t_a = \sum_{i=1}^n t_1 \frac{t_{gi}}{T_i}$$



gde je n - broj pojedinačnih zahvata koji se izvode istovremeno odgovarajućim brojem alata. Vreme operacije obrade sa (k) zahvata sada će biti: $t_k = \sum_{i=1}^k t_{zi}$

Vreme tehnološkog procesa

izrade određenog proizvoda određuje se na osnovu vremena operacija i načina redosleda izvođenja operacija, koji može biti: **redni, rednoparalelni i paralelni.**

U primerima koncentrisane obrade, kada složeni zahvat čini operaciju obrade, treba uzeti da je $n_z=1$.

Stvarna proizvodnost operacije, u određenoj vremenskoj jedinici, na primer po času može se odrediti:

$$P_s = \frac{3600}{t_k}$$

R.BR.	OZNAKA	ZNAČENJE
1.	t_g, t_{gi}	Osnovno vreme obrade
2.	t_a	Vreme zamene i regulisanja alata na mašini
3.	Δ	Dodatak za obradu
4.	δ	Dubina rezanja u jednom prolazu
5.	t_{p1}	Vreme povratnog hoda alata
6.	t_p	Pomoćno vreme
7.	t_{me}	Vreme merenja koje zahteva zastoje u obradi
8.	T_{pz}	Pripremnosavršno vreme po seriji
9.	z_s	Veličina serije
10.	n_z	Broj zahvata operacije
11.	Σt_i	Izgubljeno vreme
12.	t_j	Vreme zamene i regulisanja alata po jednom sečivu
13.	T, T_i	Postojanost alata
14.	t_{gm}	Merodavno osnovno vreme obrade

Pregled oznaka korišćenih u izrazima za vreme obrade

Troškovi proizvodnje

Proizvođačka delatnost u savremenim industrijskim preduzećima izaziva raznovrsne troškove, koji se mogu posmatrati sa više stanovišta i razvrstati prema **različitim kriterijumima**, kao što su:

- *Troškovi elemenata proizvodnje,*
- *Troškovi prema mestu nastanka,*
- *Troškovi prema njihovoj vezanosti za nosioce,*
- *Troškovi prema vremenu nastanka,*
- *Troškovi uslovljeni dinamikom proizvodnje,*
- *Troškovi po poslovnim funkcijama i*
- *Ostale podele troškova.*

Troškovi zahvata i operacija

Za efikasno određivanje troškova tehnološkog procesa izrade proizvoda pogodno je odrediti troškove operacija na osnovu troškova zahvata. Troškovi operacija obrade obuhvataju bruto zarade poslužioca mašine i stručnog radnika R , amortizaciju mašine M , troškove alata A i ostale troškove B , tako da se i troškovi zahvata mogu definisati izrazom:

$$U_z = R_1 + M_1 + A_1 + B_1$$

Pomenuti elementi troškova obrade mogu se odrediti pomoću izraza:

$$R_1 = R_0 t_z$$

$$M_1 = M_0 t_z$$

$$A_1 = \left[(R_0 + M_0 + B_0) t_1 + A_0 \right] \frac{t_g}{T}$$

$$B_1 = \frac{U_{TP}}{Q n_z} + \frac{U_{PP}}{z_s n_z} + B_0 t_z + U_E$$

gde su usvojene sledeće oznake:

$$R_0 = \frac{S_P + S_R}{3600} \quad M_0 = \frac{C_M \cdot p}{F_M \cdot \eta_M \cdot 100}$$

Za alate sa izmenljivim reznim pločicama:

$$A_0 = \frac{C_P}{z_1} + \frac{C_D}{z_2} + \frac{Z_L}{z_3} + \frac{C_R}{z_4} + K_{ra} \cdot t_{ra}$$

Za alate koji se oštire:

$$A_0 = \frac{C_A}{i+1} + K_O \cdot t_O + K_{ra} \cdot t_{ra}$$

Jedinični troškovi (B_0) obuhvataju:

- Troškove specijalnog pribora:

$$B_{01} = \frac{U_{SP}}{F_{PR} \cdot \eta_{PR}}$$

- Troškove održavanja mašine:

$$B_{02} = \frac{U_{OD}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove otplate kamata:

$$B_{03} = \frac{U_{KA}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove površine radnog mesta:

$$B_{04} = \frac{U_{POV}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove pomoćnog materijala:

$$B_{05} = \frac{U_{PM}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove grejanja i klimatizacije:

$$B_{06} = \frac{U_{GK}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove probne serije, prototipa, dorade i škarta:

$$B_{06} = \frac{U_{GK}}{F_M \cdot \eta_M}$$

- Troškove merila:

$$B_{08} = \frac{U_{ME}}{F_{ME} \cdot \eta_{ME}}$$

Troškovi zahvata obrade, koji se izvode jednim alatom mogu se izraziti u obliku

$$U_z = \frac{U_{TP}}{Q \cdot n_z} + \frac{U_{PP}}{z_s \cdot n_z} + t_g \left[C_0 + C_1 + (C_0 \cdot t_1 + A_0) \cdot \frac{1}{T} \right] + C_0 \cdot t_{pm}$$

$$C_0 = R_0 + M_0 + B_0$$

$$C_1 = \frac{P_M \cdot c_E}{3600}$$

$$t_{pm} = \frac{\Delta}{\delta} t_{p1} + t_p + t_{me} + \frac{T_{pz}}{z_s \cdot n_z} + \sum t_i$$

R.B.	OZNAKA	ZNAČENJE
1.	U_{TP}	Troškovi tehnološke pripreme
2.	U_{PP}	Troškovi ponavljanja proizvodnje
3.	S_P, S_R	Bruto zarada poslužioaca mašine i stručnog radnika
4.	Q	Obim proizvodnje
5.	F_M	Godišnji efektivni vremenski kapacitet mašine
6.	C_M	Cena mašine
7.	η_M	Stepen iskorišćenja vremenskog kapaciteta mašine
8.	p	Amortizaciona stopa
9.	C_P, C_D, C_L, C_R	Cena pločice, držača, lomača strugotine i rezervnih delova
10.	z_1	Broj reznih sečiva pločice
11.	z_2, z_3, z_4	Vek držača, lomača strugotine i rezervnih delova izražen brojem istrošenih sečiva pločice
12.	K_{RA}	Troškovi regulisanja alata van mašine
13.	t_{RA}	Vreme regulisanja alata van mašine
14.	K_O	Troškovi oštrenja alata
15.	t_O	Vreme oštrenja alata
16.	C_A	Cena alata
17.	i	Broj oštrenja alata
18.	P_M	Snaga pogonskog motora mašine
19.	c_E	Cena električne energije
20.	U_{SP}	Godišnji troškovi specijalnog pribora
21.	U_{GO}	Godišnji troškovi održavanja mašine
22.	U_{KA}	Godišnji iznos kamata za otplatu mašine
23.	U_{POV}	Godišnji troškovi površine radnog mesta
24.	U_{PM}	Godišnji troškovi pomoćnog materijala radnog mesta
25.	U_{GK}	Godišnji troškovi grejanja i klimatizacije
26.	U_{SD}	Godišnji troškovi probne serije, prototipa, dorade i škarta
27.	U_{ME}	Godišnji troškovi merila
28.	F_{PR}, F_{ME}	Godišnji efektivni vremenski kapacitet rada pribora i merila

Profit

Profit se definiše kao razlika prodajne cene određenog proizvoda (C_{TP}) i cene priprema (C_P) i troškova izrade proizvoda (U_{TPO}), odnosno:

$$P = C_{TP} - (C_P + U_{TPO})$$

Očigledno je da se izborom adekvatnog materijala za izradu određenog proizvoda, koji određuje konstruktor, i optimalnim tehnološkim procesom njegove izrade, čini najveći doprinos u postizanju maksimalnog profita za određenu cenu proizvoda na koju utiču tržišni zakoni.

Na ovaj način još jednom se ukazuje na **značaj troškova obrade**, koji se koriste kao respektivna funkcija u optimizaciji tehnoloških procesa izrade proizvoda.

Postojanost alata

U matematičkim modelima optimizacije obradnih procesa postojanost alata predstavlja jednu od **najvažnijih funkcija stanja**.

Kao respektivna funkcija stanja u matematičkim modelima obradnih procesa, postojanost može biti poznata kao funkcija režima obrade, tj. brzine rezanja v , pomaka s i dubine rezanja δ , čiji se opšti funkcionalni oblik može dati u vidu:

Postojanost određuju sledeći uslovi:

- *Vrsta zahvata obrade,*
- *Vrsta alata,*
- *Materijal obradka,*
- *Uslovi obrade,*
- *Oblast režima obrade u kojoj je ispitana postojanost alata,*
- *Režimske tačke.*

$$T = T(C, v, s, \delta)$$

gde je C - konstanta

$$\begin{aligned} v_{Amin} &\leq v \leq v_{Amax} \\ s_{Amin} &\leq s \leq s_{Amax} \\ \delta_{Amin} &\leq \delta \leq \delta_{Amax} \end{aligned}$$

Ekonomski period rezanja i period maksimalne proizvodnosti

Ako se u izrazu za **troškove obrade** osnovno vreme (t_g) izrazi preko postojanosti (T) iz odgovarajuće funkcije postojanosti, tada se diferenciranjem funkcije troškova po postojanosti, odnosno:

$$\frac{\partial U_z}{\partial T} = 0$$

i rešavanjem po (T) dobija izraz za **ekonomski period rezanja**, odnosno postojanost alata pri **minimalnim troškovima** u obliku:

$$T_e = \frac{1-m}{m} \left(t_1 + \frac{A_0}{M_0 + R_0 + B_0} \right)$$

Ako se osnovno vreme (t_g) izrazi na isti način u izrazu za **vreme zahvata**, tada se iz uslova:

$$\frac{\partial t_z}{\partial T} = 0$$

dobija postojanost alata pri **maksimalnoj proizvodnosti** oblika:

$$T_Q = \frac{1-m}{m} t_1$$

gde je m - eksponent nad T u funkciji postojanosti alata.

Ako su podaci u prikazanim obrascima takvi da obezbeđuju izračunavanje pouzdanih vrednosti odgovarajućih postojanosti alata, tada se postojanost, kao izlazna karakteristika stanja obradnog procesa, može iskoristiti kao pokazatelj optimalnog procesa obrade, baziranog na minimalnim troškovima ili maksimalnoj proizvodnosti.

Sistematizacija funkcija i parametara ograničenja

Ograničenja za dubinu rezanja

U opštem slučaju, ovu grupu čine sledeća ograničenja:

- *Dodatak za obradu*

$$\delta \leq \Delta$$

- *Dužina reznog sečiva alata L_p*

$$\delta \leq 0,8 \cdot L_p$$

- *Oblast dubine rezanja u kojoj je ispitana postojanost alata*

$$\delta_{Amin} \leq \delta \leq \delta_{Amax}$$

Kod procesa obrade zabušivanjem, bušenjem, urezivanjem navoja ureznikom i brušenjem ograničenja za dubinu rezanja se **ne uzimaju** u obzir.

Ograničenja za brzinu rezanja

Ovu grupu ograničenja čine:

- *Granični brojevi obrtaja glavnog vretena mašine (n_{Mmin} , n_{Mmax}):*

$$\pi \cdot D \cdot n_{Mmin} \leq v \leq \pi \cdot D \cdot n_{Mmax}$$

- *Oblast brzine rezanja u kojoj je ispitana postojanost alata:*

$$v_{Amin} \leq v \leq v_{Amax}$$

gde je D - prečnik obratka, ili alata.

Ograničenja za pomak

U ovu grupu svrstana su ograničenja za pomak, koja su parametarskog oblika i koja zavise od **dubine rezanja**.

Pregled ovih ograničenja dat je u tabeli, u kojoj su definisana ograničenja koja se uzimaju u obzir u okviru procesa obrade struganjem, bušenjem, glodanjem i brušenjem:

R.Br.	VRSTA OGRANIČENJA	STRU- GANJE	BUŠENJE					GLODANJE			BRUŠENJE		
			B	U	P	R	N	OB	Č	OG	O	R	P
1.	<i>Napon na savijanje drške alata</i>	•											
2.	<i>Ugib obradka</i>	•									•		•
3.	<i>Opterećenje mehanizma za pomoćno kretanje</i>	•	•	•	•		•		•				
4.	<i>Hrapavost obrađene površine</i>	•			•	•		•	•	•	•	•	•
5.	<i>Vitkost strugotine</i>	•											
6.	<i>Raspoloživi pomaci mašine</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
7.	<i>Oblast ispitivosti postojanosti alata</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
8.	<i>Napon alata na pritisak</i>		•	•	•		•						
9.	<i>Dozvoljeni obrtni moment rezanja</i>		•	•	•	•	•						
10.	<i>Ugib vratila</i>							•	•		•		•
11.	<i>Širina tocila</i>										•	•	

B - bušenje, **U** - upuštanje, **P** - proširivanje, **R** - razvrtanje, **N** – urezivanje navoja, **OB** - obimno glodanje, **Č** - čeonno glodanje, **OG** - odvalno glodanje, **O** - okruglo brušenje, **R** - ravno brušenje, **P** - profilno brušenje.

Složena ograničenja

U ovu grupu spadaju ograničenja koja zavise od režima obrade, oblika $F_g = F_g(v, s, \delta)$, čiji je pregled dat u tabeli:

R. br.	VRSTA OGRANIČENJA	STRU- GANJE	BUŠENJE*					GLODANJE*			BRUŠENJE*		
			B	U	P	R	N	OB	Č	OG	O	R	P
1.	Raspoloživa snaga mašine	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2.	Postojanost alata	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
3.	Granične brzine stola mašine							•	•	•	•	•	•
4.	Hrapavost obrađene površine									•	•	•	•
5.	Temperatura rezanja										•	•	•
6.	Srednji otpor rezanja										•	•	•

Za ovu grupu ograničenja postoji **veliki broj različitih matematičkih izraza** za njihovo izračunavanje, a u primeni se uzimaju oni izrazi za koje postoje pouzdani podaci.

Postavljeni varijantni model tehnoekonomske optimizacije tehnoloških procesa obrade, predviđa **razvoj matematičkih modela optimizacije za pojedine obradne procese**, odnosno zahvate obrade.

Standardni matematički modeli optimizacije obradnih procesa

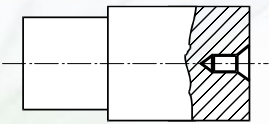
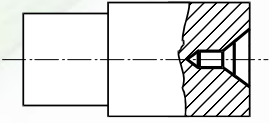
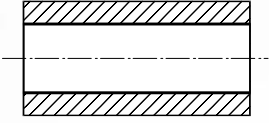
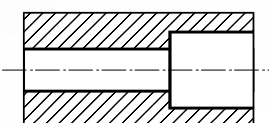

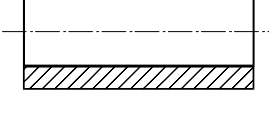
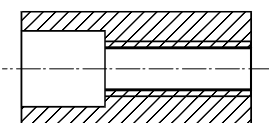
Imajući u vidu veliki broj zahvata koji se mogu pojaviti u okviru pojedinih obradnih procesa, za praktičnu primenu varijantnog modela tehnoeekonomske optimizacije potrebno je razviti sistem **standardnih matematičkih modela optimizacije** pojedinih obradnih procesa, kao što su:

- *Diferencirana obrada na strugu,*
- *Koncentrisana obrada na strugu,*
- *Diferencirana obrada bušenjem koja obuhvata zabušivanje, bušenje, upuštanje, proširivanje, razvrtanje i urezivanje navoja,*
- *Koncentrisana obrada bušenjem,*
- *Obimsko, čeono i odvalno glodanje,*
- *Ravno, okruglo i profilno brušenje,*
- *Brušenje na principima relativnog kretanja i*
- *Unutrašnje i spoljašnje provlačenje.*

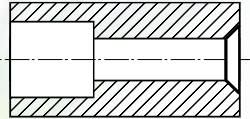
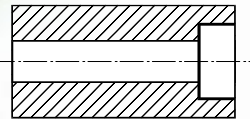
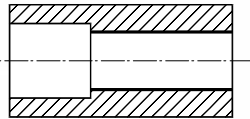
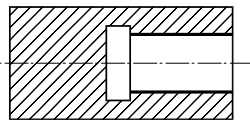
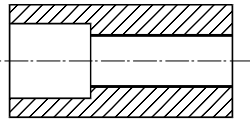
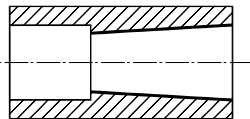
Standardni matematički modeli optimizacije razvijaju se na **osnovu opšteg matematičkog modela optimizacije** obradnih procesa.

Kao primer, prikazaće se razvoj standardnog matematičkog modela optimizacije procesa **diferencirane obrade bušenjem**, koja u ovom slučaju obuhvata tipske zahvate obrade zabušivanjem, bušenjem, urezivanje navoja ureznikom, upuštanjem, proširivanjem i razvrtanjem.

Tipski zahvati obrade zabušivanjem, bušenjem i urezivanjem navoja

SKICA ZAHVATA	NAZIV TIPSKOG ZAHVATA	Elementi geometrije	Kod
	Zabušivanje zabušivačem bez zaštitnog proširenja	/D,L,α,α ₁ /	BZ10
	Zabušivanje zabušivačem sa zaštitnim proširenjem		BZ11
	Bušenje spiralnom burgijom sa cilindričnom drškom	/D ₁ ,D ₂ ,L ₁ ,L ₂ /	BS10
	Bušenje spiralnom burgijom sa koničnom drškom		BS11
	Bušenje dvostepenih rupa		BS12
	Duboko bušenje topovskom burgijom Duboko bušenje pušćanom burgijom Duboko bušenje kašikastom burgijom Duboko bušenje jednosečnom burgijom sa unutrašnjim odvodom strugotine Duboko bušenje spiralnom burgijom sa unutrašnjim dovodom ras.sredstava Duboko bušenje spiralnom burgijom sa spoljašnjim dovodom ras.sredstava Duboko bušenje pljosnatom burgijom Duboko bušenje BTA glavama Duboko bušenje ejektor glavama	/D,L/	BD10 BD11 BD12 BD13 BD14 BD15 BD16 BD17 BD18
	Urezivanje milimetarskog navoja Urezivanje trapeznog navoja Urezivanje vitvortovog navoja Urezivanje kosog navoja Urezivanje oblog navoja	/D,L,h/	UN10 UN11 UN12 UN13 UN14

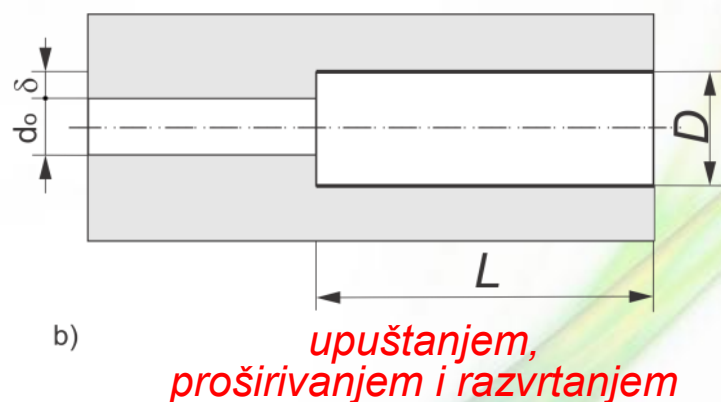
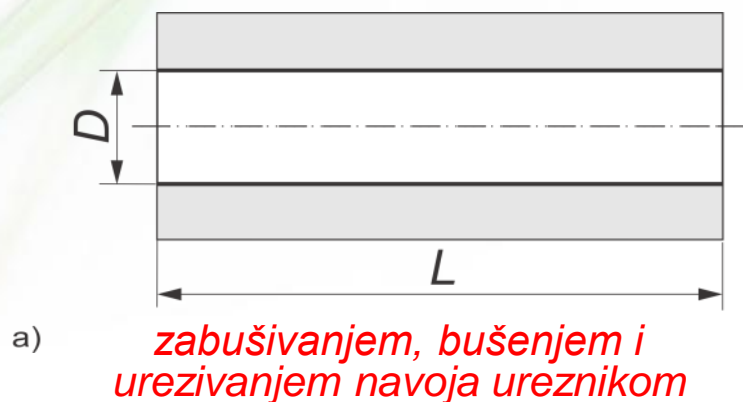
Tipski zahvati obrade upuštanjem, proširivanjem i razvrtanjem

SKICA ZAHVATA	NAZIV TIPSKOG ZAHVATA	Elementi geometrije	Kod
	Upuštanje koničnim upuštačem	/D,L,φ/	BU10
	Čeono upuštanje upuštačima sa čvrstom vođicom Čeono upuštanje upuštačima sa izmenljivom vođicom	/D,L/	BU11 BU12
	Proširivanje spiralnim proširivačem u prolaznom otvoru Proširivanje nasadnim proširivačem u prolaznom otvoru	/D,L/	BP10 BP11
	Proširivanje spiralnim proširivačem u neprolaznom otvoru Proširivanje nasadnim proširivačem u neprolaznom otvoru		BP12 BP13
	Razvrtanje cilindričnim razvrtačima	/D,L/	BR10
	Razvrtanje koničnim razvrtačima	/D,L,α/	BR11

Standardni matematički modeli optimizacije obradnih procesa

Pažljivom analizom se može zaključiti da se svi tipski zahvati obrade **zabušivanjem, bušenjem i urezivanjem navoja ureznikom** mogu predstaviti jednim zajedničkim **grafičkim modelom**, a tipski zahvati obrade **upuštanjem, proširivanjem i razvrtanjem**, drugim grafičkim modelom:

Grafički modeli tipskih zahvata obrade:



Zajednički elementi u prikazanim grafičkim modelima odnose se na nominalne prečnike (D) i dužine obrade (L), odnosno na nominalne prečnike (D), dužine (L) i dodatke za obradu (δ) kod tipskih zahvata grupe (b).

Ova analiza pokazuje da se za obe grupe pomenutih tipskih zahvata obrade može razviti **jedan standardni matematički model optimizacije**, razvojem funkcija optimizacije i matematičkih modela ovih obradnih procesa.

Funkcije optimizacije

Ako se u izrazima za vreme i troškove obrade, osnovno vreme (t_g) zameni izrazom:

$$t_g = \frac{D\pi L}{vS}$$

dobiće se izraz za ove funkcije optimizacije u obliku:

$$t_z = \frac{D\pi L}{vS} \left(1 + t_1 \frac{1}{T} \right) + t_{p1} + t_p + t_{me} + \frac{T_{pz}}{z_s n_z} + \sum t_i$$

$$U_z = \frac{U_{TP}}{Qn_z} + \frac{U_{PP}}{z_s n_z} + \frac{D\pi L}{vS} \left[C_0 + C_1 + (C_0 t_1 + A_0) \frac{1}{T} \right] + C_0 t_{pm}$$

Izrazi za **funkcije optimizacije** odnose se na sve pomenute tipske zahvate obrade bušenjem, stim što je za zahvat urezivanja navoja ureznikom

$$s = h.$$

Matematički model obradnog procesa

Kao što je već istaknuto, matematički model obradnog procesa čine **funkcije ograničenja i funkcije stanja**. Ograničenja čine ograničenja za **brzinu rezanja, pomak i složena ograničenja**, dok je najznačajnija funkcija stanja **postojanost alata**, koja može imati funkcionalni ili diskretni oblik.

Ograničenja za brzinu rezanja

$$\pi \cdot D \cdot n_{M \min} \leq v \leq \pi \cdot D \cdot n_{M \max}$$

$$v_{A \min} \leq v \leq v_{A \max}$$

Ograničenja za pomak

NAZIV OGRAIČENJA	VRSTA OBRADNOG PROCESA		
	Zabušivanje, Bušenje	Upuštanje, Proširivanje, Razvrtanje	Urezivanje navoja
Dozvoljeni napon alata na pritisak	$s \leq \left(\frac{K_c}{42C_m} \right)^{\frac{1}{y}} D^{\frac{3-x}{y}}$	-----	
Dozvoljeno opterećenje mašine usled aksijalne sile	$s \leq \left(\frac{F_{3D}}{C_F D^{x1}} \right)^{\frac{1}{y1}}$	$s \leq \left(\frac{F_{3D}}{C_F D^{x1} \delta^z} \right)^{\frac{1}{y1}}$	
Dozvoljeni obrtni momenti rezanja	$s \leq \left(\frac{M_D}{C_m D^x} \right)^{\frac{1}{y}}$	$s \leq \left(\frac{M_D}{C_m D^x \delta^z} \right)^{\frac{1}{y}}$	$s = h$
Zahtevani kvalitet obrade	-----	$s \leq CD^p$	
Granični pomaci mašine	$S_{M \min} \leq s \leq S_{M \max}$		
Granice pomaka s obzirom na mogućnost alata	$S_{A \min} \leq S_{A \max}$		

Složena ograničenja

Ova ograničenja čine ograničenja **snage pogonskog elektromotora** i **zahtevana postojanost alata**, kao izlazna karakteristika obradnog procesa.

Standardni matematički model optimizacije procesa diferencirane obrade bušenjem, koji obuhvata pomenute tipske zahvate obrade, omogućava rešavanje svih optimizacionih zadataka unutrašnje i spoljašnje optimizacije ovih obradnih procesa.

Složena ograničenja za procese obrade bušenjem

NAZIV OGRANIČENJA	VRSTA OBRADNOG PROCESA	
	Zabušivanje, Bušenje, Urezivanje navoja	Upuštanje, Proširivanje, Razvrtanje
Snaga pogonskog elektromotora	$\frac{2C_m D^{x-1} S^y v}{\eta} \leq P_M$	$\frac{2C_m D^{x-1} S^y \delta^z v}{\eta} \leq P_M$
Zahtevana postojanost alata	$\left(\frac{C_v D^{x_0} \mu_0}{v S^{y_0}} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{min}$	$\left(\frac{C_v D^{x_0}}{v S^{y_0} \delta^{z_0}} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{min}$

Pri razvoju varijantnog automatizovanog sistema optimizacije tehnoloških procesa, pogodno je ograničenja za pomak povezati sa **kodovima odgovarajućih tipskih zahvata**, odnosno obradnih procesa, čime se obezbeđuje veća racionalnost u razvoju sistema računarskih programa za pojedine standardne matematičke modele optimizacije.

Za efikasnu primenu prikazanog varijantnog modela optimizacije u proizvodnoj praksi neophodno je razviti **automatizovani sistem optimizacije**.

Granice primenljivosti varijanti tehnoloških rešenja

U proizvodnoj praksi, kako je već istaknuto, kao čest zadatak optimizacije postavlja se određivanje granice primenljivosti varijanti tehnoloških rešenja, koja se mogu odnositi na varijante priprema, tehnoloških procesa izrade, obradnih procesa, sadržaja operacija, mašina, pribora, alata, koncentracije i diferencijacije zahvata i operacija i drugih elemenata tehnologije.

Varijantni model optimizacije omogućuje rešavanje i ovih zadataka optimizacije, kako kod osvajanja tehnologije izrade novih proizvoda, tako i kod usavršavanja postojećih tehnoloških procesa.

Granice primenljivosti posmatranih varijanti elemenata tehnologije, koji su ranije pomenuti, mogu se odrediti na osnovu troškova ili vremena obrade.

Da bi se odredila granica primenljivosti varijanti elemenata tehnologije preko graničnog obima proizvodnje (Q_k), potrebno je izvršiti **transformaciju opštih izraza** za vreme i troškove operacija obrade na sledeći način:

$$U = \frac{U_{TP}}{Q} + \frac{U_{PP}}{z_s} + U_o \quad t = \frac{T_{PZ}}{z_s} + t_o$$

$$U_o = R + M + A + B + U_E$$

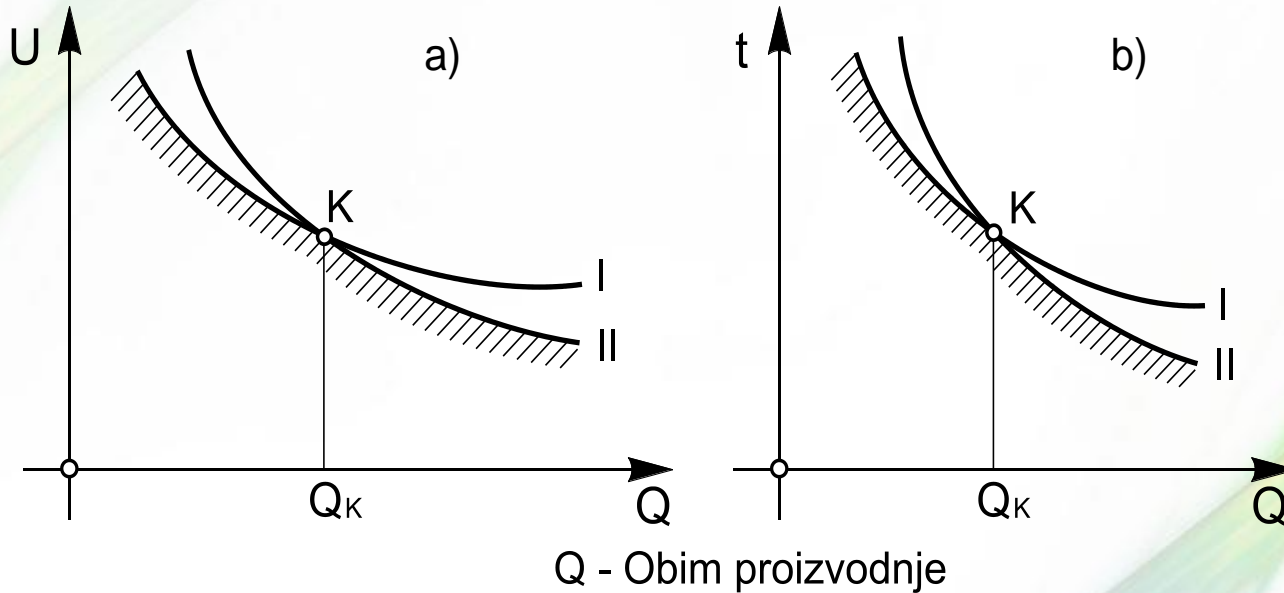
$$t_o = t_g + t_a + t_p + t_{me} + \sum t_i$$

Kod određivanja granice primenljivosti varijanti priprema troškove ili vreme obrade treba izraziti na nivou tehnoloških procesa izrade za obe varijante, s tim što se troškovima obrade dodaju i cene odgovarajućih **priprema**.

Pri određivanju granice primenljivosti varijanti zahvata, odnosno alata, troškovi ili vreme obrade izračunavaju se za zahvate, dok se za određivanje granica primenljivosti za varijante ostalih elemenata tehnologije vreme i troškovi obrade definišu na nivou odgovarajućih operacija.

Granice primenljivosti varijanti tehnoloških rešenja

Pošto za tačku K važi da je $U_I = U_{II}$ i $t_I = t_{II}$, granica primenljivosti posmatranih varijanti za odgovarajuće elemente tehnologije određena je graničnim obimom proizvodnje:



$$Q_K = \frac{(U_{TP})_I - (U_{TP})_{II}}{\left(\frac{U_{PP}}{z_s} + U_0\right)_{II} - \left(\frac{U_{PP}}{z_s} + U_0\right)_I}$$

ili na bazi vremena obrade:

$$Q_K = \frac{(T_{PZ})_I - (T_{PZ})_{II}}{to_{II} - to_I}$$

Tačnost određivanja graničnih količina, prema prikazanim izrazima, najviše zavisi od tačnosti podataka koji se odnose na U_{TP} , U_{PP} , U_{SP} i T_{pZ} .

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

S A D R Ž A J

P-1. OGRANIČENJA ZA POMAK -----	P-1
P-1.1. Ograničenja za pomak pri obradi na strugu --	P-1
P-1.2. Ograničenja za pomak pri obradi bušenjem i zabušivanjem -----	P-2
P-1.3. Ograničenja za pomak pri obradi proširiva- njem i razvrtanjem -----	P-3
P-1.4. Ograničenja za pomak pri obradi čeonim glodanjem -----	P-4
P-1.5. Ograničenja za pomak pri obradi obimskim glodanjem -----	P-4
P-1.6. Ograničenja za pomak pri odvalnom glodanju--	P-5
P-1.7. Ograničenja za pomak pri okruglom brušenju -	P-6
P-1.8. Ograničenja za pomak pri ravnom brušenju ---	P-6
 P-2. SLOŽENA OGRANIČENJA -----	 P-7
P-2.1. Složena ograničenja procesa obrade na strugu -----	 P-7
P-2.2. Složena ograničenja za bušenje i zabušivanje	P-7
P-2.3. Složena ograničenja za procese obrade proširivanjem i razvrtanjem -----	 P-7
P-2.4. Složena ograničenja za procese obrade obimskim glodanjem -----	 P-8
P-2.5. Složena ograničenja za procese obrade čeonim glodanjem -----	 P-8
P-2.6. Složena ograničenja za proces obrade odval- nim glodanjem -----	 P-9
P-2.7. Složena ograničenja za proces obrade okruglim brušenjem -----	 P-10
P-2.8. Složena ograničenja za proces obrade ravnim brušenjem -----	 P-12

P-1. OGRANIČENJA ZA POMAK

P-1.1. OGRANIČENJA ZA POMAK PRI OBRADI NA STRUGU

Ograničenja za pomak pri obradi na strugu sačinjavaju |148|:

- Dozvoljeni napon drške alata na savijanje

$$s \leq \left(\frac{K_f}{C_k \cdot C_o \cdot \delta} \right)^{\frac{1}{x_1}} \frac{1}{y_1} \quad (1)$$

gde je:

$$C_o = \frac{6 \frac{z}{h} + 1,2 \frac{h}{B} \frac{z}{h} - 0,8}{h \cdot b} \quad (2)$$

- Dozvoljeni ugib obradka

$$s \leq \left(\frac{f_{\max} E \pi D^4 s}{6,4 \mu C_k \cdot L_s^3 \delta} \right)^{\frac{1}{x_1}} \frac{1}{y_1} \quad (3)$$

- Dozvoljeno opterećenje mehanizma za pomoćno kretanje

$$s \leq \left(\frac{F_{3D}}{C_{k_3} \cdot \delta} \right)^{\frac{1}{x_1}} \frac{1}{y_1} \quad (4)$$

- Dozvoljeno opterećenje mehanizma za pomoćno kretanje usled sile prodiranja kod poprečne obrade

$$s \leq \left(\frac{F_{2D}}{C_{k_2} \cdot \delta} \right)^{\frac{1}{x_1}} \frac{1}{y_1} \quad (5)$$

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-2

- Dozvoljena hrapavost obradjene površine

$$s \leq (8 r H)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

- Granice vitkosti strugotine

$$\delta / g_{\min} \leq s \leq \delta / g_{\max} \quad (7)$$

- Granice raspoloživih pomaka mašina

$$s_{\text{MMIN}} \leq s \leq s_{\text{MMAX}} \quad (8)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti alata

$$s_{\text{AMIN}} \leq s \leq s_{\text{AMAX}} \quad (9)$$

P-1.2, OGRANIČENJA ZA POMAK PRI OBRADI ZABUŠIVANJEM I BUŠENJEM

Ograničenja za pomak ovih vrsta obrade čine

|134, 154|:

- Dozvoljeni napon na pritisak merodavnog preseka drške alata

$$s \leq \left(\frac{K_c}{42 C_m} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot D^{\frac{3-x}{y}} \quad (10)$$

- Dozvoljeno opterećenje elemenata mašine usled sile prodiranja

$$s \leq \left(\frac{F_{3D}}{C_F \cdot D^{x_1}} \right)^{\frac{1}{y_1}} \quad (11)$$

- Dozvoljeni obrtni moment bušenja

$$s \leq \left(\frac{M_D}{C_m \cdot D^x} \right)^{\frac{1}{y}} \quad (12)$$

P-3

- Granice raspoloživih pomaka mašine

$$s_{\text{MMIN}} \leq s \leq s_{\text{MMAX}} \quad (13)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti alata

$$s_{\text{AMIN}} \leq s \leq s_{\text{AMAX}} \quad (14)$$

P-1.3, OGRANIČENJA ZA POMAK PRI OBRADI PROŠIRIVANJEM I RAZVRTANJEM

Ograničenja za pomak kod ovih procesa obrade

čine |102, 154|:

- Dozvoljeno opterećenje elemenata mašine usled aksijalne sile

$$s \leq \left(\frac{F_{3D}}{C_F \cdot D^{x_1} \cdot z} \right)^{\frac{1}{y_1}} \quad (15)$$

- Dozvoljeni moment rezanja

$$s \leq \left(\frac{M_D}{C_m \cdot D^x \cdot z} \right)^{\frac{1}{y}} \quad (16)$$

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$s \leq C \cdot D^p \quad (17)$$

- Granice raspoloživih pomaka mašine

$$s_{\text{MMIN}} \leq s \leq s_{\text{MMAX}} \quad (18)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti alata

$$s_{\text{AMIN}} \leq s \leq s_{\text{AMAX}} \quad (19)$$

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-4

Ograničenja za pomak pri obradi upuštanjem obuhvataju sva ograničenja u tački P-1.3 osim ograničenja (17).

P-1.4. OGRANIČENJA ZA POMAK PRI OBRADI ČEONIM GLODANJEM

Ograničenja za pomak po zubu kod čeonog glodanja čine [24, 102]:

- Dozvoljena hrapavost obradjene površine

$$s_z \leq (2,7 H D)^{1/2} \quad (20)$$

- Dozvoljeni ugib vretena mašine

$$s_z \leq \left(\frac{39 E \pi d_v^4 f_d}{64 l_v^3 c_k} \right)^{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_k - 1}} \frac{2 D^{1/2}}{B \delta^{1/2}} \quad (21)$$

- Granice raspoloživih brzina stola mašine

$$\frac{s_{MMIN}}{\eta_{MMIN} \cdot z} \leq s_z \leq \frac{s_{MMAX}}{\eta_{MMAX} \cdot z} \quad (22)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti alata

$$s_{ZAMIN} \leq s_z \leq s_{ZAMAX} \quad (23)$$

P-1.5. OGRANIČENJA ZA POMAK PRI OBRADI OBIMSKIM GLODANJEM

Ograničenja za pomak po zubu pri obimskom glodanju sačinjavaju [134, 154]:

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$s_z \leq (2,7 H D)^{1/2} \quad (24)$$

P-5

- Dozvoljeni ugib vretena mašine

$$s_z \leq \left(\frac{39 E \pi d_v^4 f_d}{64 l_v^3 c_k} \right)^{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_k - 1}} \frac{2 D^{1/2}}{B \delta^{1/2}} \quad (25)$$

- Granice raspoloživih brzina stola mašine

$$\frac{v_{STMIN}}{\eta_{MMIN} \cdot z} \leq s_z \leq \frac{v_{STMAX}}{\eta_{MMAX} \cdot z} \quad (26)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti alata

$$s_{ZAMIN} \leq s_z \leq s_{ZAMAX} \quad (27)$$

P-1.6. OGRANIČENJA ZA POMAK PRI ODVALNOM GLODANJU

Ograničenja za aksijalni pomak pri odvalnom glodanju čine [24, 138]:

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$s_a \leq \left(\frac{4 D R_t}{\cos \alpha_o} \right)^{1/2} \quad (28)$$

- Granice raspoloživih pomaka mašine

$$s_{MMIN} \leq s_a \leq s_{MMAX} \quad (29)$$

- Granice oblasti ispitivosti funkcije postojanosti

$$s_{aamin} \leq s_a \leq s_{aamax} \quad (30)$$

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-6

P-1.7. OGRANIČENJA ZA AKSIJALNI POMAK PRI OKRUGLOM BRUŠENJU

Ograničenja za aksijalni pomak kod ove vrste obrade čine:

- širina tocila

$$\alpha_{\min}^{B_T} \leq s_a \leq \alpha_{\max}^{B_T} \quad (31)$$

- Granice oblasti postojanosti tocila

$$s_{a\min} \leq s_a \leq s_{a\max} \quad (32)$$

Kod okruglog brušenja usecanjem ograničenje za radijalni pomak čine ograničenja granicama oblasti ispitivosti tocila

$$s_{r\min} \leq s_p \leq s_{r\max} \quad (33)$$

P-1.8. OGRANIČENJA ZA POMAK PRI RAVNOM BRUŠENJU

Ograničenja za bočni pomak pri obradi ravnim brušenjem čine:

- širina tocila

$$\alpha_{\min}^{B_T} \leq s_B \leq \alpha_{\max}^{B_T} \quad (34)$$

- Granice oblasti ispitivosti postojanosti tocila

$$s_{B\min} \leq s_B \leq s_{B\max} \quad (35)$$

P-7

P-2. SLOŽENA OGRANIČENJA

P-2.1. SLOŽENA OGRANIČENJA PROCESA OBRADE NA STRUGU

Ova ograničenja čine |134|:

- Zahtevana minimalna postojanost alata (T_{\min})

$$\left(\frac{C_v}{v \cdot s \cdot \delta^x}\right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{\min} \quad (1)$$

- Raspoloživa snaga mašine (P_M)

$$\frac{C_k \cdot \delta^x \cdot s^y \cdot v}{\eta} \leq P_M \quad (2)$$

P-2.2. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA ZABUŠIVANJE I BUŠENJE

U ova ograničenja spadaju |134|:

- Zahtevana minimalna postojanost alata (T_{\min})

$$\left(\frac{C_v \cdot D^{x_0} \cdot \mu_0}{v \cdot s}\right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{\min} \quad (3)$$

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{2 \cdot C_m \cdot D^{x-1} \cdot s \cdot v}{\eta} \leq P_M \quad (4)$$

P-2.3. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCESA OBRADE PROŠIRIVANJEM I RAZVRTANJEM

Ova ograničenja čine |134|:

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-8

- Zahtevana minimalna postojanost alata (T_{MIN})

$$\left(\frac{C_v \cdot D^{x_0}}{v \cdot s_z \cdot \delta \cdot z_0} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{MIN} \quad (5)$$

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{2 C_m D^{x-1} s_z^y \delta^z v}{n} \leq P_M \quad (6)$$

P-2.4. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCES OBRADJE OBIMSKIM GLODANJEM

Ovu grupu ograničenja čine |134|:

- Zahtevana minimalna postojanost alata

$$\left(\frac{C_v D^{i_D}}{v s_z^y \delta^x B^q z^u \omega^w} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{MIN} \quad (7)$$

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{K_{sm} B \delta s_z v}{n \pi D} \leq P_M \quad (8)$$

P-2.5. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCES OBRADJE ČEONIM GLODANJEM

Ova ograničenja sačinjavaju |102|:

- Zahtevana minimalna postojanost alata

$$\frac{C_v D^{i_D}}{v s_z^y \delta^x B^q z^u} \geq T_{MIN} \quad (9)$$

P-9

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{C_P k_F v s_z^{y_0} \delta^{x_0} B^{q_0} z}{D^{i_D} n} \leq P_M \quad (10)$$

P-2.6. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCES OBRADJE ODVALNIM GLODANJEM

U ovu grupu ograničenja spadaju |24|:

- Zahtevani kvalitet površine boka zuba

$$C_{RA} v^{p_1} s_a^{q_1} a_p^{r_1} \leq R_a \quad (11)$$

- Dozvoljeno radijalno bacanje boka zuba

$$C_{RB} v^{p_2} s_a^{q_2} a_p^{r_2} \leq A_r \quad (12)$$

- Dozvoljeno odstupanje oblika boka zuba

$$C_{OB} v^{p_3} s_a^{q_3} a_p^{r_3} \leq A_f \quad (13)$$

- Dozvoljeno odstupanje pravca boka zuba

$$C_{PB} v^{p_4} s_a^{q_4} a_p^{r_4} \leq A_{PB} \quad (14)$$

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{C_m m_1^{q_5} s_a^{q_5} z_1^{w_1} v}{\pi n D_g} \leq P_M \quad (15)$$

- Zahtevana minimalna postojanost alata

$$C_T v^p s_a^q a_p^r \geq T_{MIN} \quad (16)$$

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-10

P-2.7. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCES OBRADJE OKRUGLIM BRUŠENJEM

Grupu složenih ograničenja za proces obrade okruglim brušenjem sa aksijalnim pomakom čine:

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{K_{sm} \pi D_{br} v_r s_a \delta}{n} \leq P_M \quad (17)$$

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$C_{RA} v_r^x s_a^y \delta^z \leq R_a \quad (18)$$

- Dozvoljena srednja temperatura rezanja

$$C_\theta v_T^u v_r^x s_a^y \delta^z \leq \theta \quad (19)$$

- Zahtevana minimalna postojanost tocila

$$\left(\frac{C_v D_{br} B_T^y}{v_r s_a^y \delta^x} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{MIN} \quad (20)$$

- Granice brzine stola mašine

$$v_{STMIN} \leq s_a \frac{v_r}{D_{br} \pi} \leq v_{STMAX} \quad (21)$$

- Dozvoljena srednja obimska sila tocila

$$\frac{K_{sm} \pi D_{br} v_r s_a \delta}{v_T} \leq F_{md} \quad (22)$$

- Dozvoljeni ugib obradka [131]

$$v_r s_a \delta \leq \left(\frac{10 E \pi D_{br}^4 v_T^{0,65}}{64 \mu L_s^3 300 (HB)^{0,17}} \right)^{1,54} \quad (23)$$

P-11

Grupu ograničenja za okruglo brušenje sa radialnim pomakom čine:

- Raspoloživa snaga mašine

$$\frac{K_{sm} \pi D_{br} v_r s_p L_{br}}{n} \leq P_M \quad (24)$$

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$C_{RA} v_r^x s_p^y \leq R_a \quad (25)$$

- Dozvoljena srednja temperatura brušenja

$$C_\theta v_T^u v_r^x s_p^y L_{br}^z \leq \theta \quad (26)$$

- Zahtevana minimalna postojanost tocila

$$\left(\frac{C_v D_{br}^{\frac{1}{m}}}{v_r s_p} \right) \geq T_{MIN} \quad (27)$$

- Granice brzine stola mašine

$$v_{RMIN} \leq s_p \frac{v_r}{\pi D_{br}} \leq v_{RMAX} \quad (28)$$

- Dozvoljena srednja obimska sila

$$\frac{K_{sm} \pi D_{br} v_r s_p L_{br}}{v_T} \leq F_{md} \quad (29)$$

- Dozvoljeni ugib obradka

$$v_r s_p L_{br} \leq \left(\frac{10 f_{max} E \pi D_s^4 v_T^{0,65}}{64 \mu K_r L_s^3 300 (HB)^{0,17}} \right)^{1,54} \quad (30)$$

Ograničenja za pomak i složena ograničenja

P-12

P-2.8. SLOŽENA OGRANIČENJA ZA PROCES OBRADJE RAVNIM BRUŠENJEM

Ovu grupu ograničenja čine:

- Raspoloživa snaga mašine [102]

$$\frac{C_S v s_B^y B_T^x \delta}{\eta} \leq P_M \quad (31)$$

- Zahtevani kvalitet obradjene površine

$$C_{RA} v^{x_a} s_B^{y_a} \delta^{z_a} \leq R_a \quad (32)$$

- Zahtevana minimalna postojanost tocila

$$\left(\frac{C_V}{v s_B^y \delta^x} \right)^{\frac{1}{m}} \geq T_{MIN} \quad (33)$$

Izložena ograničenja za pomak i složena ograničenja odnose se na osnovne procese koji su obuhvaćeni ovim sistemom optimizacije, na osnovu kojih je moguće razviti odgovarajuća ograničenja za složene procese kao što je koncentrisana obrada.