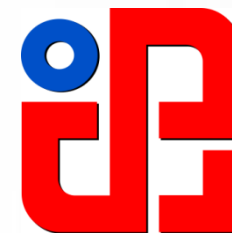




**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**  
**Department za proizvodno mašinstvo**



**OPTIMIZACIJA I LOGISTIKA PROIZVODNJE**

---

***Tema:***

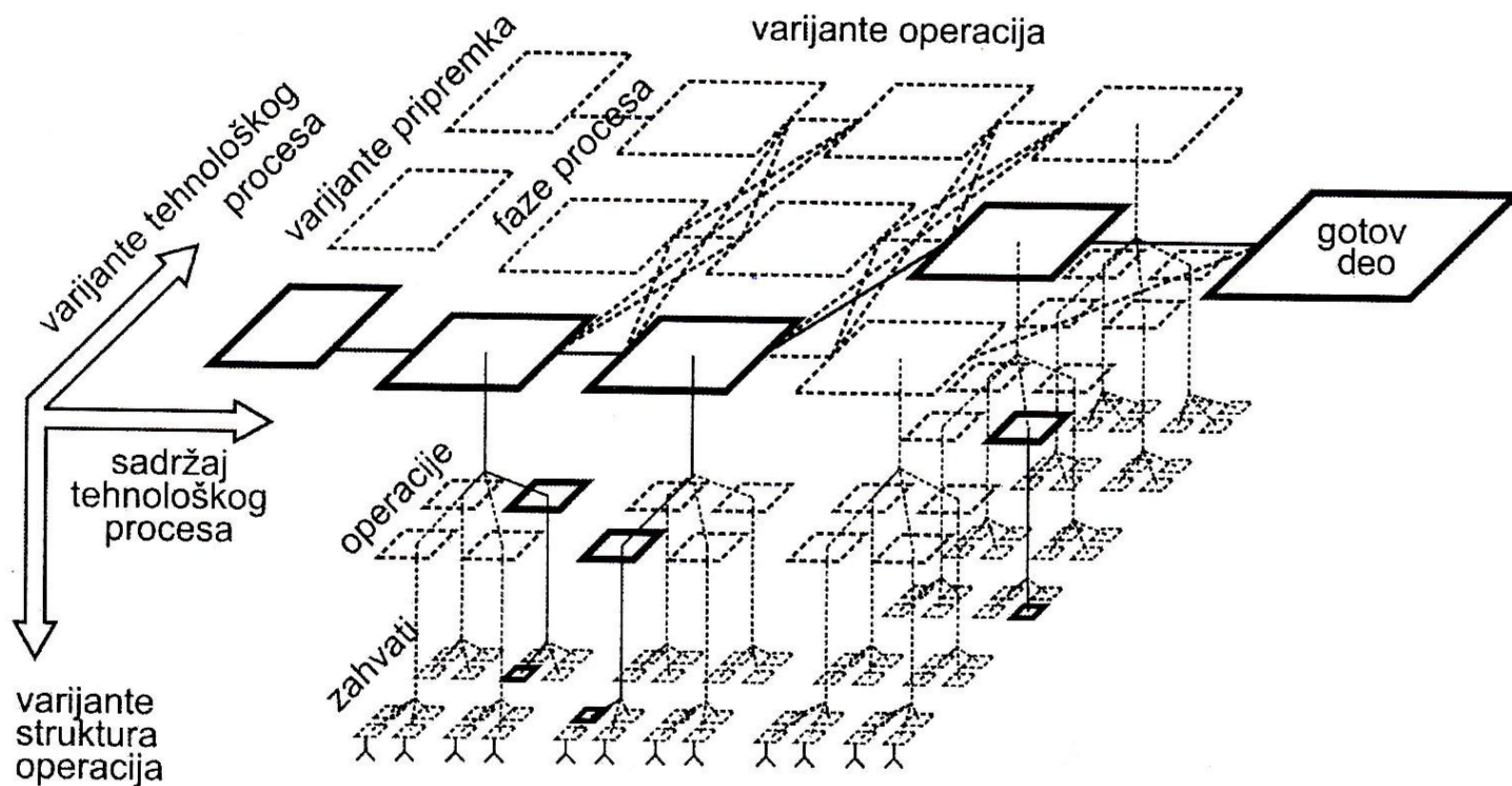
**OPTIMIZACIJA I VIŠEKRITERIJUMSKO  
VREDNOVANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA**

---

Prof. dr Dejan Lukić

# Varijantnost tehnoloških procesa

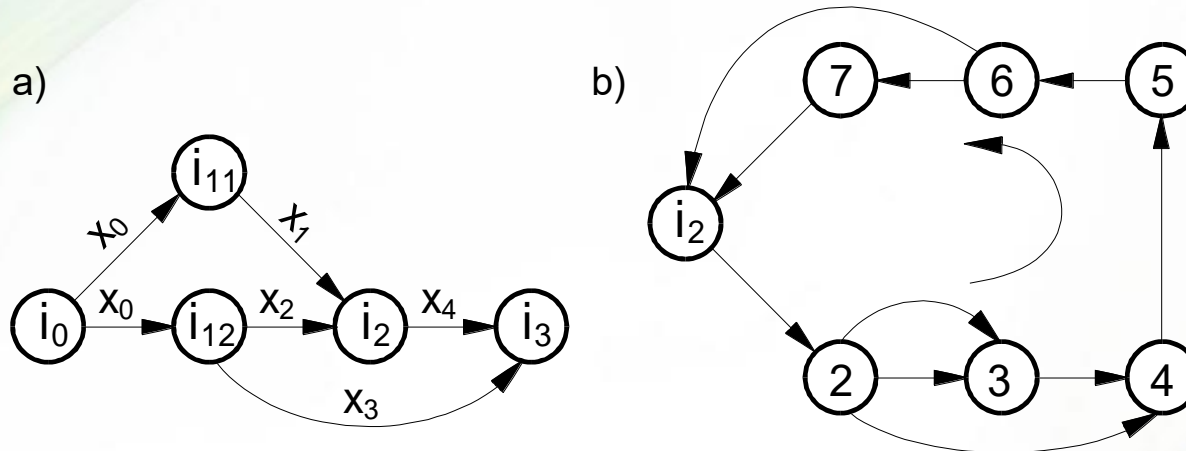
Tehnološki procesi izrade proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji, karakterišu se **varijantnošću rešenja**, najčešće u svim svojim fazama, odnosno delovima. Ovakve karakteristike uslovljene su **ulaznim podacima**, koji su obuhvaćeni **crtežom** i **obimom proizvodnje** proizvoda, raspoloživom **tehnološkom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

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

# Varijantnost tehnoloških procesa

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

**Spoljašnja optimizacijom se** vrši određivanje optimalne vrsta priprema, operacija i njihovog redosleda, zahvata i njihovog redosleda, resursa (mašina, alata, pribora, merila...).

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

- *Metoda tehnoekonomske optimizacije,*
- *Metoda simulacije.*
- *Višekriterijumskog odlučivanja (vrednovanja i rangiranja),*
- *Metoda veštačke inteligencije.*

## Varijantni model tehnoekonomske optimizacije

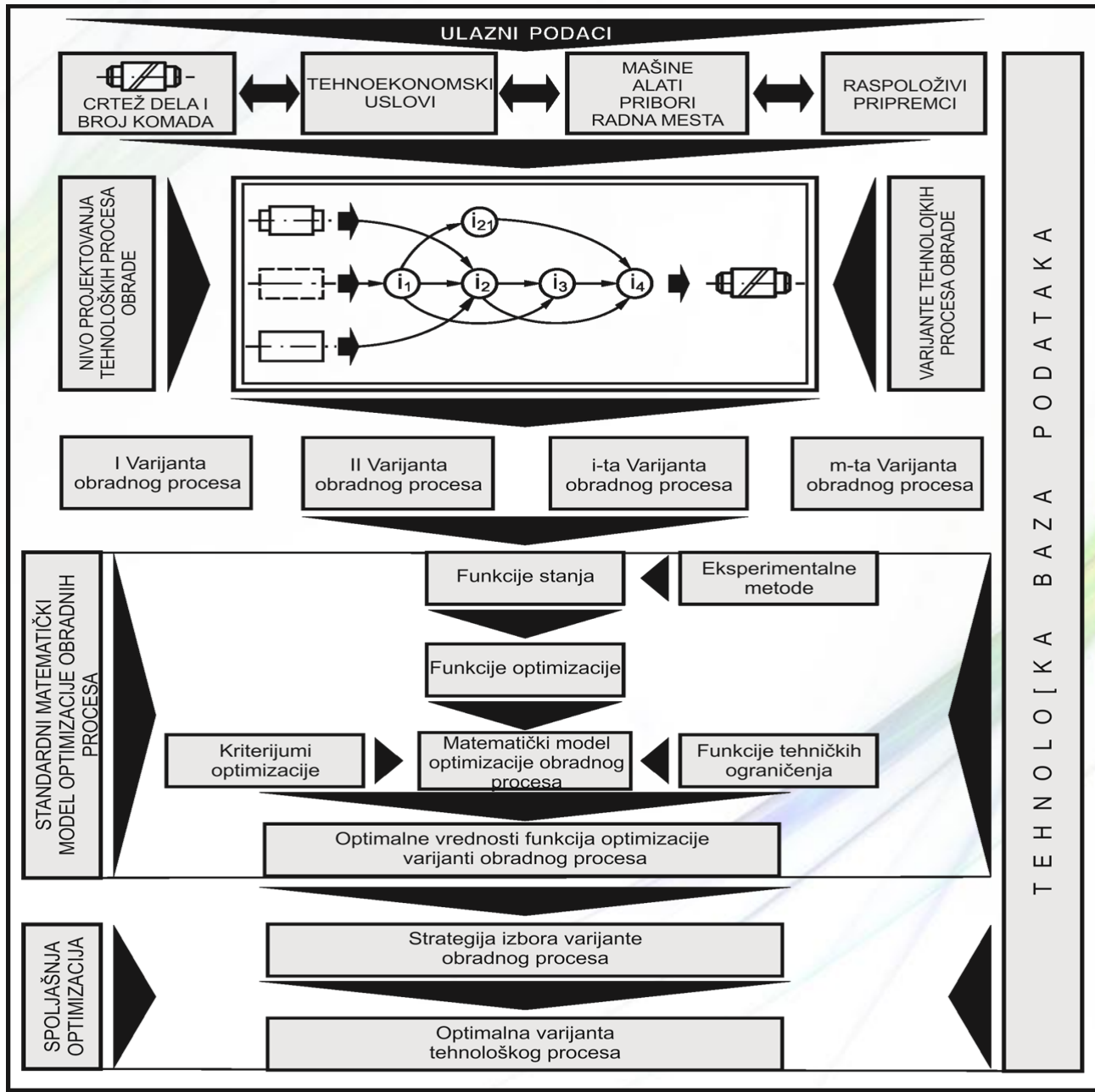
Varijantni model tehnoekonomske optimizacije osim ulaznih podataka, uključuje tri osnovna podsistema.

**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

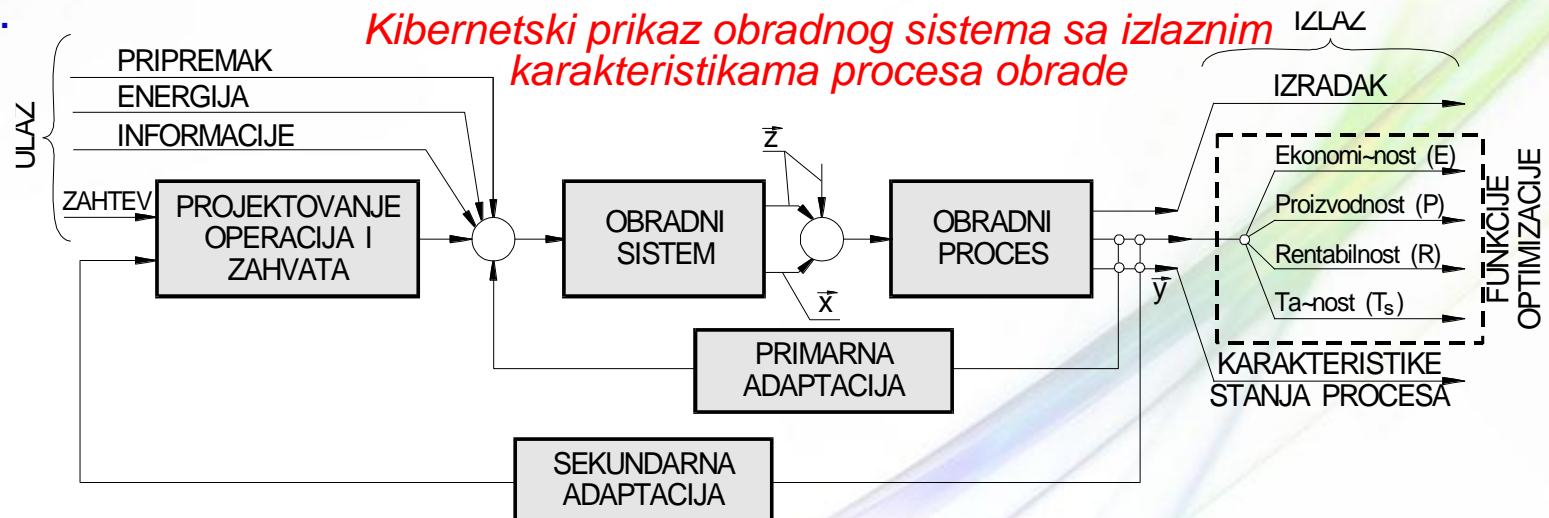


# Optimizacija obradnih procesa

## 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 tehnološkog procesa).

# Matematički model obradnog procesa

Matematički model obradnog procesa čini jednu od ključnih komponenata matematičkog modela optimizacije tog procesa.

Za postavljanje matematičkog modela nekog obradnog procesa stoje na raspolaganju tri koncepcije, tri metode - *analitička, eksperimentalna i kombinovana*.

Procedura formiranja matematičkog modela obradnog procesa sastoji se iz **tri osnovne faze**, tj. iz:

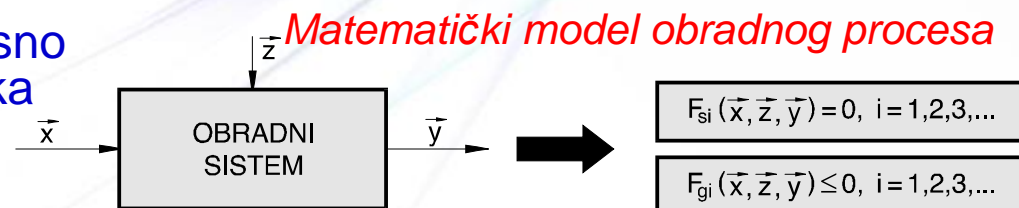
- *Formalizovanog opisivanja,*
- *Matematičkog opisivanja i*
- *Postavljanja algoritma.*

**Formalizovano opisivanje** realnog procesa obuhvata smisaoni i strukturni opis njegove fizičke i druge prirode. Ovaj opis, kojim počinje formiranje matematičkog modela datog procesa, kao primera realnog objekta, odvija se u nekoliko koraka: **Identifikacija** zahvata procesa u obradnom procesu, onih koji predstavljaju suštinu obradnog procesa i koji treba da se obuhvate i opišu matematičkim modelom obradnog procesa.

**Definisanje zakonitosti** koje opisuju pojedinačne zahvate obradnog procesa kao što su: habanje alata, karakteristike kvaliteta obrade, itd.

**Parametarizacija** dekomponovanih zahvata obradnog procesa, a to znači analiza ulaza i izlaza zahvata obrade i utvrđivanje skupova ulazno-izlaznih veličina  $x_i, z_i, y_i, i=1,2,3,\dots$ , za svaki zahvat obradnog procesa.

**Analiza** postojećih ograničenja, odnosno graničnih uslova faktora i karakteristika zahvata obradnog procesa.





# Matematičko opisivanje realnog objekta

**Matematičko opisivanje** realnog objekta predstavlja sadržaj druge faze procedure formiranja matematičkog modela objekta. Suština ovog opisivanja sastoji se u tome što se ono daje na matematičkom jeziku, u vidu određenog **skupa funkcija i jednačina**.

Procedura matematičkog opisivanja sadrži **određeni broj koraka** među kojima su najvažniji:

**Formiranje matematičkog modela** ili matematičkog opisa dekomponovanih zahvata obradnog procesa, iz prve faze. Ovaj model treba da sadrži matematičke iskaze fizičke suštine, stanja i ponašanja pojedinih "elementarnih" procesa, koji se realizuju na obradnom sistemu. Ovi iskazi se daju u vidu skupova funkcija i jednačina među koje spadaju:

- *Funkcije proizvodnosti, ekonomičnosti i dr.,*
- *Funkcije habanja alata,*
- *Funkcije temperature rezanja,*
- *Funkcije postojanosti alata,*
- *Funkcije otpora, momenata i snage rezanja,*
- *Funkcije kvaliteta obrade i*
- *Funkcije dinamičkog ponašanja obradnog sistema, odnosno funkcije interaktivnog dejstva dinamike obradnog sistema na kvalimetrijske karakteristike obratka i dr.*

**Sinteza** matematičkih modela pojedinih zahvata obradnog procesa u jedinstveni matematički model obradnog procesa. Pri tome sinteza obuhvata ne samo grupisanje pojedinih matematičkih modela zahvata obradnog procesa već i njihovo povezivanje putem novih, dopunskih funkcija, na primer, **postavljanje međusobne zavisnosti habanja alata i temperature rezanja**.

# Matematičko opisivanje realnog objekta

**Jednačine** koje izražavaju neke **opšte fizičke zakone procesa**, kao što su zakoni, na primer: zakoni održanja energije i mase, jednačine kontinuiteta i jednakosti zapremine, uslovi nastanka plastičnog deformisanja, odnosno smicanja u ravni smicanja i dr.

**Jednačine** koje opisuju pojedine zahvate obrade.

**Empirijske ili poluempirijske funkcije**, koje povezuju pojedine karakteristike procesa sa ulaznim faktorima i za koje ne postoje dovoljna teorijska znanja i zakonitosti o dejstvu ulaznih faktora na karakteristike, već se utvrđuju **eksperimentalnim metodom u vidu regresionih i korelacionih zavisnosti**, dakle, empirijskih funkcija.

**Definisanje ograničenja** matematičkog modela obradnog procesa koje se sastoji u postavljanju sistema jednačina i nejednačina za postojeće granične uslove. Krajnji rezultat ovog koraka jeste određivanje oblika i lokacije dopuštenog domena, odnosno oblast, radno područje  $D$  u kojem se jedino **dopuštaju** promene ulaznih, odnosno upravljajućih veličina.

**Analiza adekvatnosti i tačnosti** matematičkog modela predstavlja poslednji, **završni korak** u proceduri matematičkog opisivanja obradnog procesa.

Treba imati u vidu činjenicu da se nijednim, pa čak ni sveobuhvatnim i veoma detaljnim matematičkim modelom **ne može iscrpno matematički opisati neki realni objekat**. Jedino se može postići matematičko opisivanje do **željenog stepena tačnosti** putem detaljnijih i kompleksnijih analiza fizičkih i drugih priroda objekata modeliranja. Prema tome, kad je reč o analizi tačnosti i adekvatnosti, tj. o stepenu saglasnosti modela originalu, od presudnog je značaja primena metoda eksperimentalne analize, jer **od eksperimenta i merenja nema boljeg metoda za ocenu istraživačkog uverenja** o stepenu saglasnosti modela sa originalom.

# Postavljanje algoritma

**Postavljanje algoritma** postaje naročito značajno tada kada se istražuju, na osnovu formiranog matematičkog modela objekta, fizička, tehnološka i druga svojstva datog realnog objekta. Algoritmi ovakvih istraživanja sadrže: **ispitivanja toka funkcije modela u radnoj oblasti  $D$ , rešavanje sistema jednačina i nejednačina**, itd. Sa postavljanjem algoritma neodvojivo je povezan **računar**, jer se ni jedan složeniji zadatak matematičkog modeliranja i optimizacije ne može tačno i brzo rešiti bez upotrebe računara, budući da u procedurama rešavanja ima, pored vrlo složenih matematičkih relacija, i višestrukih ponavljanja pojedinih proračuna.

Primenjujući izloženu proceduru i strukturu, može se postaviti **matematički model bilo kog obradnog procesa**, sa i bez skidanja strugotine. Ovaj model čine skupovi funkcija stanja ili jednačina stanja procesa:

$$F_{si}(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

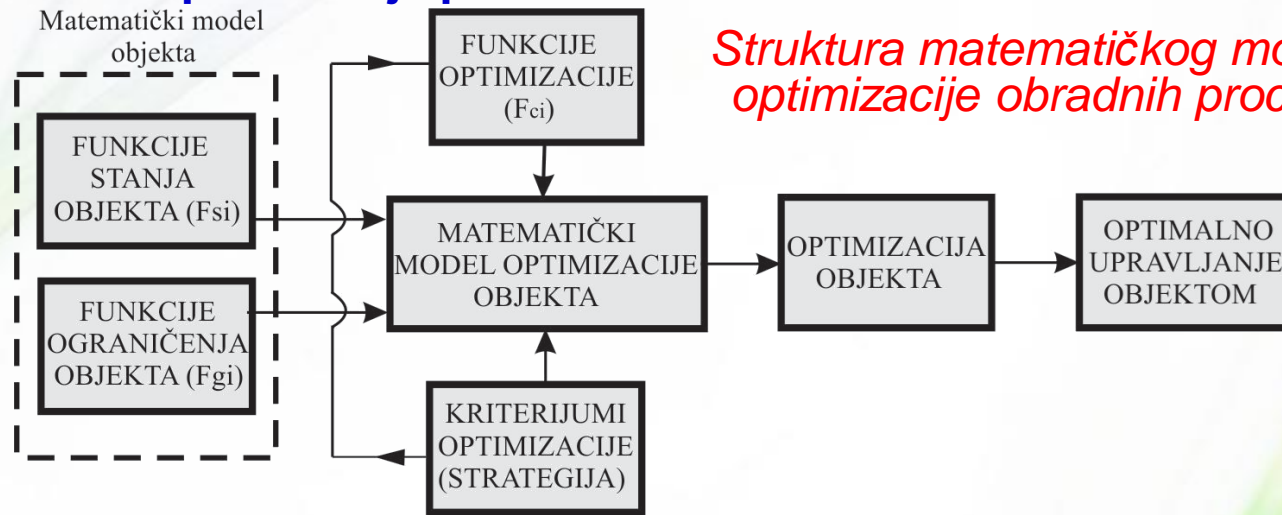
funkcija ograničenja, odnosno funkcija veze, graničnih uslova procesa:

$$F_{gi}(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Ovi obrasci predstavljaju **matematički model** ili matematički opis i iskazuju suštinske **fizičke, geometrijske, tehnološke, kvalimetrijske i ekonomske** zavisnosti odnosno zakonitosti unutar obradnog procesa i to u dopuštenom domenu, odnosno u radnoj oblasti  $D$  promena veličina  $\vec{x}$ .

# 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

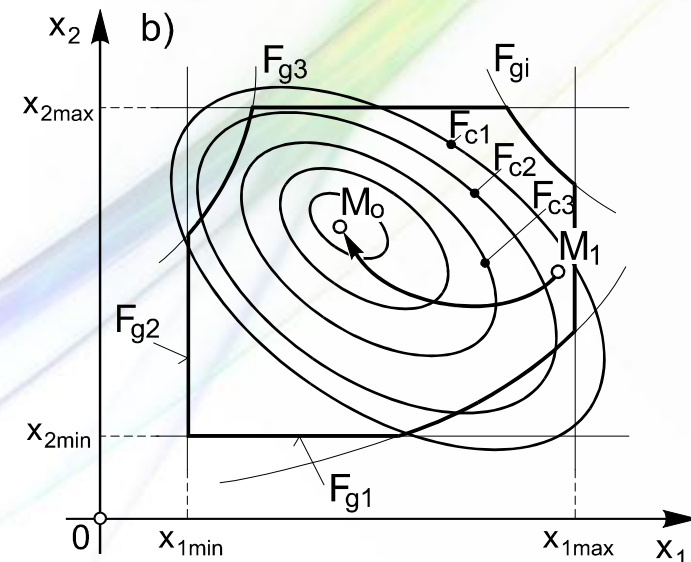
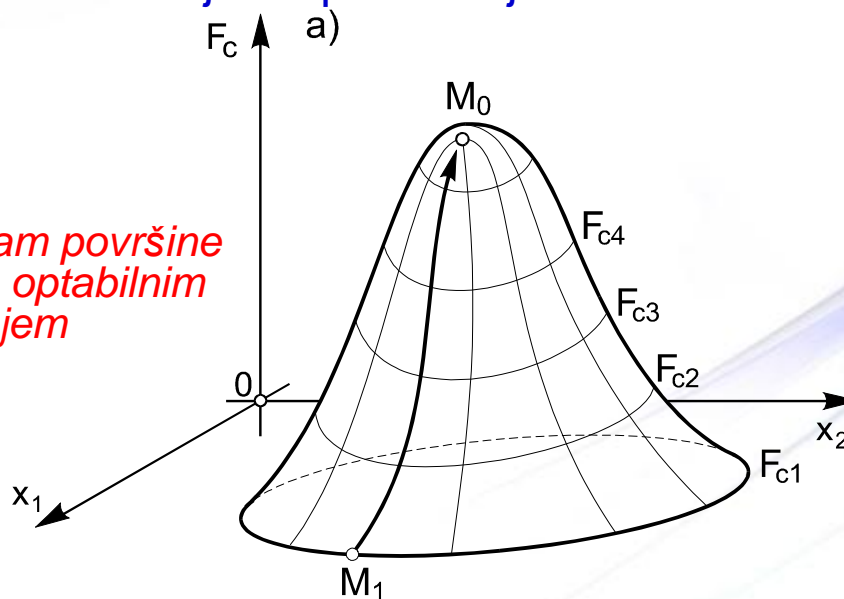
Radna oblast ( $D$ ) u proizvodnoj praksi predstavlja radnu oblast izabranog obradnog sistema na kome se realizuje određeni obradni proces.

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  $\delta$ -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.

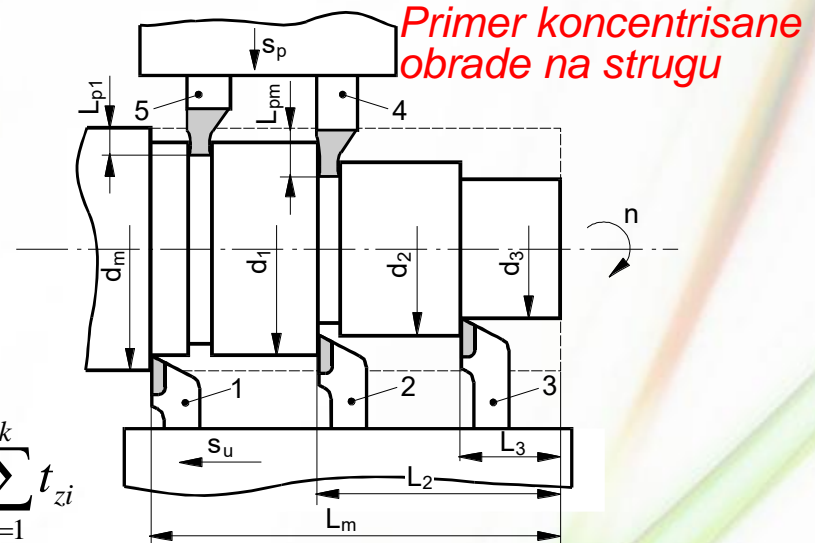
# Vreme obrade

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.	$\Delta$	Dodatak za obradu
4.	$\delta$	Dubina rezanja u jednom prolazu
5.	$t_{p1}$	Vreme povratnog hoda alata
6.	$t_p$	Pomoćno vreme
7.	$t_{me}$	Vreme merenja koje zahteva zastoj u obradi
8.	$T_{pz}$	Pripremnosavršno vreme po seriji
9.	$z_s$	Veličina serije
10.	$n_z$	Broj zahvata operacije
11.	$\Sigma t_i$	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 prema mestu nastanka

Osnovni cilj klasifikacije troškova prema mestu nastanka jeste u **utvrđivanju veze između troškova i učinaka, dinamike troškova i učinka, kao i kontrole troškova**, odnosno identifikovanje mesta gde nastaje prekomerno trošenje. U tom smislu, troškovi se dele na:

- *Troškove izrade i*
- *Režijske troškove.*

**Troškovi izrade** nastaju na poslovima **neposredne proizvodnje**, odnosno na tehnološkim radnim mestima, pa su **u direktnoj vezi sa obimom proizvodnje**. Zbog toga se ovi troškovi vrlo često u praksi nazivaju **proizvodnim troškovima**.



# Troškovi elemenata proizvodnje

- U troškove izrade spadaju:
- *Troškovi materijala za izradu,*
  - *Troškovi pomoćnog materijala za izradu,*
  - *Troškovi pogonske energije,*
  - *Troškovi sredstava za rad i*
  - *Troškovi rada izrade.*

Povećanje ili smanjenje obima proizvodnje direktno utiče na promenu troškova. Njihova **visina po jedinici proizvoda je konstanta**, bez obzira na dinamiku obima proizvodnje.

**Režijski troškovi** obuhvataju troškove koji nastaju u **pripremnoj i završnoj fazi** procesa proizvodnje. Uobičajena je podela ovih troškova na:

- *troškove pogonske režije i*
- *troškove uprave i prodaje.*

**Troškovi pogonske režije** obuhvataju troškove organizovanja procesa proizvodnje pa su, samim tim, vrlo usko povezani sa njegovim odvijanjem. U ove troškove spadaju: *troškovi materijala na organizacionim radnim mestima, troškovi tehnološke energije, troškovi sitnog inventara, troškovi rada na organizacionim radnim mestima, troškovi tehničke kontrole i slično.* U odnosu na promene obima proizvodnje ovi troškovi imaju relativno-fiksni karakter.

**Troškovi uprave i prodaje** javljaju se na pripremnim i završnim radnim mestima u procesu proizvodnje. Obzirom da su ovi troškovi uglavnom uslovljeni funkcionisanjem preduzeća u celini, oni, u odnosu na dinamiku obima proizvodnje, imaju fiksni karakter. U ovu grupu spadaju: *troškovi kancelarijskog materijala, PTT troškovi, troškovi reklame i propagadne, zakupine, zatim troškovi projektovanja, konstrukcije, nabavke i prodaje, troškovi amortizacije, rukovođenja i dr.*

# Troškovi prema njihovoj vezanosti za nosioce

Ovi troškovi se dele na:

- *Pojedinačne troškove i*
- *Zajedničke troškove.*

*Pojedinačni troškovi* predstavljaju ona trošenja koja su nastala kao neposredna posledica izrade određene jedinice proizvoda i, u okviru tehnološke pripreme mogu se predvideti kao normalna veličina. To su sledeći troškovi:

- *Troškovi materijala za izradu,*
- *Troškovi pomoćnog materijala za izradu,*
- *Troškovi rada izrade,*
- *Troškovi sredstava za rad pri funkcionalnoj amortizaciji koja se vezuje za određenu vrstu i količinu proizvoda*

Dok u zajedničke troškove spadaju:

- *Troškovi režijskog materijala (pogona i uprave),*
- *Troškovi pomoćnog materijala i usluga,*
- *Troškovi unutrašnjeg transporta i održavanja,*
- *Troškovi usluga drugih organizacija,*
- *Troškovi energije,*
- *Troškovi rada na režijskim poslovima i*
- *Troškovi sredstava za rad pri vremenskoj amortizaciji i sl.*

Osnovna karakteristika zajedničkih troškova je u tome da se **ne mogu precizno vezivati za pojedine proizvode** i što se ne mogu normirati po jedinici proizvoda.

# Troškovi uslovljeni dinamikom obima proizvodnje

Dinamika troškova podrazumeva promenu troškova u odnosu na različite stepene korišćenja proizvodnih kapaciteta, **uslovljene promenom**:

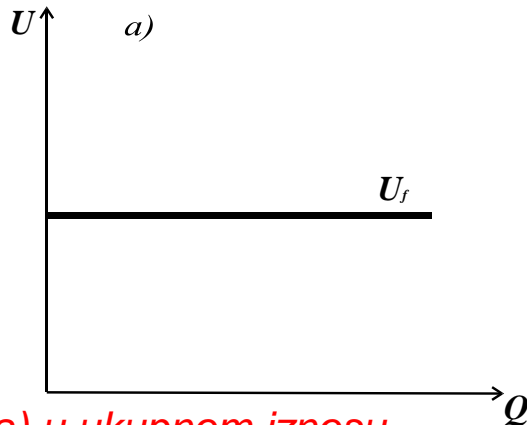
- *Obima proizvodnje,*
- *Utroška po jedinici proizvoda,*
- *Strukturi poslovanja i*
- *Cena elemenata proizvoda.*

Promene obima poslovanja različito utiču na pojedine vrste troškova, pa se oni dele na:

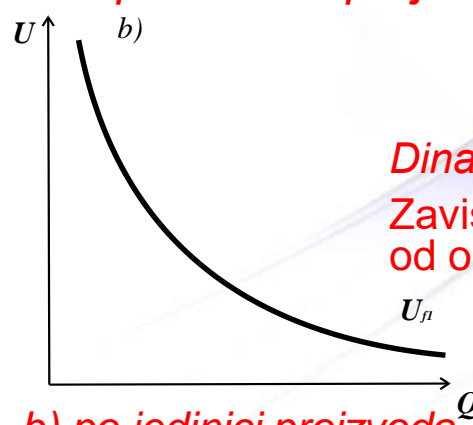
- *Fiksne i*
- *Varijabilne troškove.*

**Fiksni troškovi** se ne menjaju u ukupnom iznosu s promenama iskorišćenosti kapaciteta, odnosno obima proizvodnje. U ove troškove spadaju:

- *Troškovi sredstava za rad u uslovima vremenske amortizacije,*
- *Troškovi pripremno-završnih poslova,*
- *Troškovi rukovanja, finansijskih, kadrovskih, opštih i drugih poslova i*
- *Troškovi rada i materijala na poslovima projektovanja i probne proizvodnje.*



a) u ukupnom iznosu,



b) po jedinici proizvoda

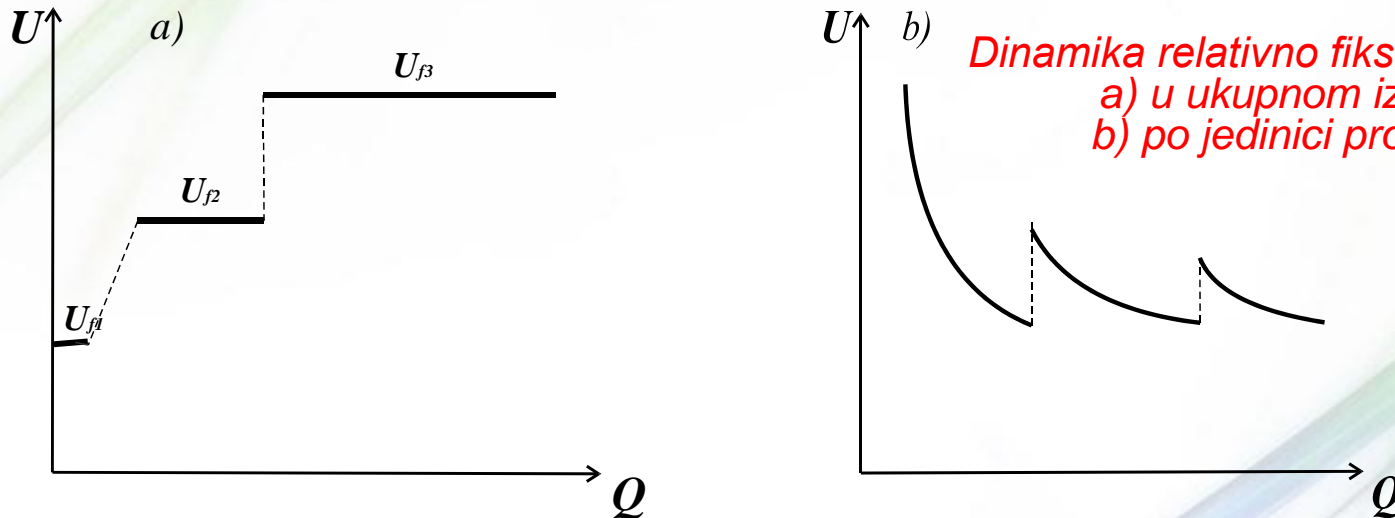
**Dinamika fiksnih troškova:**  
Zavisnost troškova ( $U_f$ ) i ( $U_{f1}$ )  
od obima proizvodnje ( $Q$ )

# Troškovi uslovljeni dinamikom obima proizvodnje

**Varijabilni troškovi** obuhvataju sve troškove koji se menjaju u zavisnosti od promene stepena korišćenja kapaciteta, odnosno obima proizvodnje. Svi varijabilni troškovi se ne menjaju u istoj srazmeri sa promenom obima proizvodnje. Oni se dele na:

- *Relativno fiksne i*
- *Proporcionalno fiksne.*

**Relativno fiksni** nastaju u vezi sa organizacijom procesa proizvodnje, odnosno korišćenja instalisanih kapaciteta. Oni zavise od obima izvršenih poslova pripreme i organizacije procesa rada u pojedinim zonama zaposlenosti.

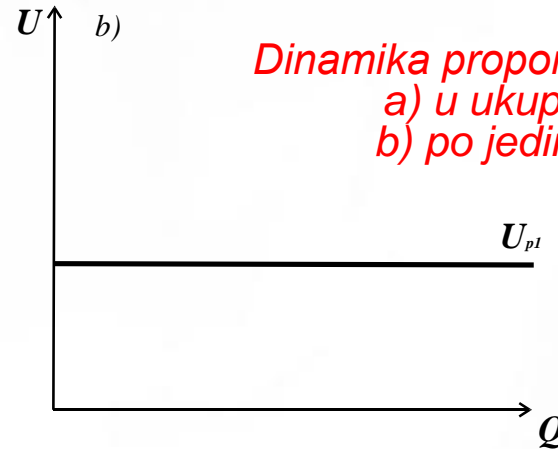
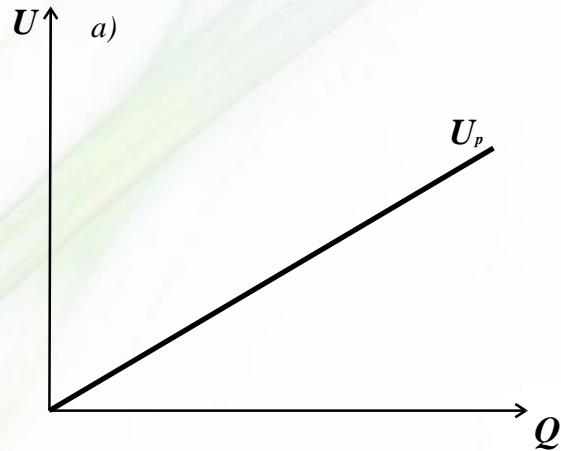


U grupu **relativno fiksnih troškova** spadaju:

- *Troškovi materijala i rada na organizacionim radnim mestima,*
- *Troškovi rada posrednih rukovodioca proizvodnje,*
- *Troškovi rada na određenim pomoćnim radnim mestima i*
- *Troškovi sredstava za rad u funkciji pripreme određene zone zaposlenosti (specijalni pribori, alati, i dr.).*

# Troškovi uslovljeni dinamikom obima proizvodnje

*Proporcionalni troškovi* u potpunosti zavise od dinamike proizvodnje i rastu u ukupnom iznosu direktno proporcionalno obimu proizvodnje.



*Dinamika proporcionalnih troškova:*  
a) u ukupnom iznosu,  
b) po jedinici proizvoda

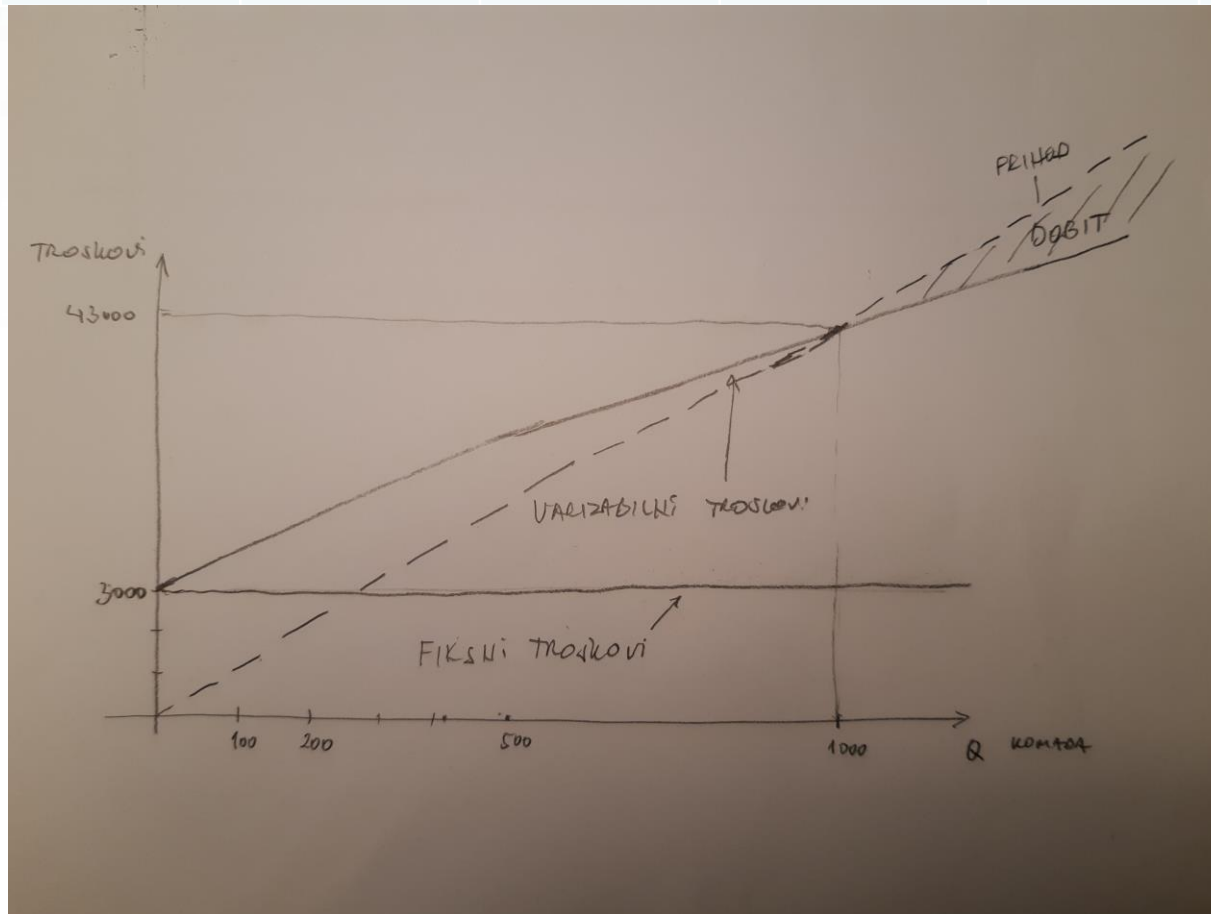
U grupu *proporcionalnih troškova* spadaju:

- *Troškovi materijala za izradu,*
- *Troškovi pomoćnog materijala za izradu,*
- *Troškovi rada i materijala u završnoj fazi proizvodnje,*
- *Troškovi rada izrade i*
- *Troškovi sredstava za rad u uslovima funkcionalne amortizacije.*



# FIKSNI I VARIJABILNI TROŠKOVI

A	B	C	D	E	F=C+E	G=B+D
<b>Broj proizvoda</b>	Fiksni troškovi- ukupni	Fiksni troškovi po jedinici proizvoda	Varijabilni troškovi-ukupni	Varijabilni troškovi po jedinici proizvoda	Ukupni troškovi po proizvodu	Ukupni troškovi
<b>10</b>	3000	300	400	40	340	3400
<b>100</b>	3000	30	4000	40	70	7000
<b>200</b>	3000	15	8000	40	55	11000
<b>500</b>	3000	6	20000	40	46	23000
<b>1000</b>	3000	3	40000	40	43	43000



# Određivanje troškova proizvodnje

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:

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

Nakon izvođenja konačna formula za određivanje troškova zahvata obrade ima sledeći oblik:

$$U_z = t_g \cdot \left[ C_o + C_1 (C_o \cdot t_1 + A_o) \cdot \frac{1}{T} \right] + C_o \cdot t_{pm} + C_2 \cdot t_{ph} + \frac{U_{TP}}{Q \cdot n_z} + \frac{U_{PS}}{z_s \cdot n_z}$$

Pri čemu su troškovi operacije obrade:  $U_K = \sum_{i=1}^K U_{z_i}$

Gde su:

- $t_g$  - glavno vreme obrade
- $C_o$  – deo troškova koji zavisi od radnika, mašine i drugih troškova

$$C_o = R_o + M_o + B_o$$

Troškovi poslužioca mašine i stručnog radnika:  $R_o [n.j / s]$

$$R_o = \frac{S_p + S_R}{F_M \cdot \eta_M \cdot 100} [n.j / s]$$

Troškovi amortizacije mašine:  $M_o [n.j / s]$

$$M_o = \frac{C_M \cdot P}{F_M \cdot \eta_M \cdot 100} [n.j / s]$$

Ostali troškovi (specijalnog pribora, održavanja mašine, otplata kamate, pomoćnog materijala, grejanja i klimatizacije... :  $B_o [n.j / s]$

Troškovi alata koji se oštiri:  $A_o [n.j / sečivo]$

$$A_o = \frac{C_A}{i+1} + K_o \cdot t_o + K_{RA} \cdot t_{RA}$$

Troškovi usled snage mašine:  $C_1 [n.j / s]$

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

Troškovi usled snage praznog hoda mašine:  $C_2 [n.j / s]$

$$C_2 = \frac{P_{MN} \cdot C_E}{3600}$$

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

R. br	VELIČINA	OZNAKA	Jedinica
1.	Jednostruka tehnološka priprema	$U_{TP}$	n.j./ser.
2.	Troškovi ponavljanja serije	$U_{PS}$	n.j./ser
3.	Pomoćno i izgubljeno vreme	$t_p + \Sigma t_i$	s/oper.
4.	Pripremno završno vreme	$T_{PZ}$	s/seriji
5.	Satnica poslužioca i stručnog radnika	$S_P + S_R$	n.j./h
6.	Cena mašine	$C_M$	n.j.
7.	Amortizaciona stopa	$p$	%
8.	Vremenski kapacitet mašine	$F_M$	s/god.
9.	Cena alata	$C_A$	n.j.
10.	Broj oštrenja	$i$	-
11.	Cena oštrenja	$K_o$	n.j./s
12.	Vreme oštrenja	$t_o$	s/post.
13.	Snaga mašine	$P_M$	kW
14.	Snaga praznog hoda	$P_{MN}$	kW
15.	Cena električne energije	$C_E$	n.j./kW
16.	Vreme praznog hoda	$t_{ph}$	s/oper.
17.	Vreme zamene i regulisanja alata	$t_1$	s
18.	Postojanost alata	$T$	s
19.	Vreme merenja u radnom prostoru mašine	$t_{me}$	s
20.	Broj komada u seriji	$z_s$	kom/ser
21.	Broj planiranih serija	$n_s$	ser/god
22.	Stepen iskorišćenja mašine	$\eta_M$	%
23.	Obim proizvodnje	$Q$	kom./god.
24.	Troškovi regulisanja alata van mašine	$K_{RA}$	n.j./s
25.	Vreme regulisanja alata van mašine	$t_{RA}$	s/post.
26.	Ostali troškovi	$t_z \cdot \Sigma B_i = B_o$	n.j./s
27.	Vreme povratnog hoda alata	$t_{p1}$	s/seč.

# 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  $\delta$ , 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:

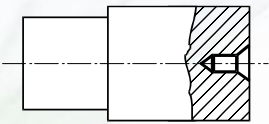
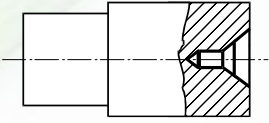
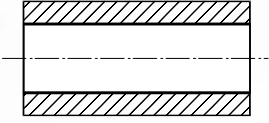
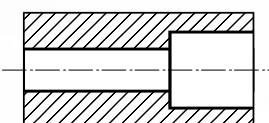

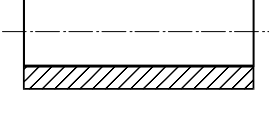
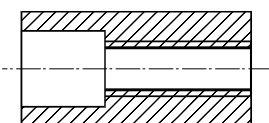
- *Diferencirana obrada na strugu,*
- *Koncentrisana obrada na strugu,*
- *Diferencirana obrada bušenjem koja obuhvata zabušivanje, bušenje, upuštanje, proširivanje, razvrtanje i urezivanje navoja,*
- *Koncentrisana obrada bušenjem,*
- *Obimsko, čeono i odvalno glodanje,*
- *Ravno, okruglo i profilno 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.

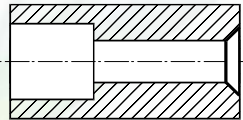
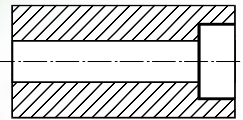
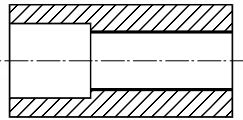
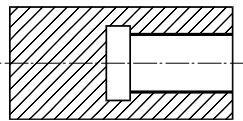
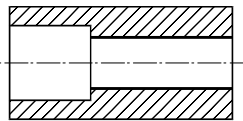
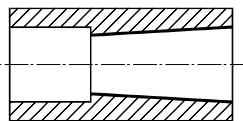
Kao primer, prikazaće se razvoj standardnog matematičkog modela optimizacije procesa **diferencirane obrade bušenjem**, koja u ovom slučaju obuhvata tipske zahvate obrade zabušivanjem, bušenjem, urezivanje navoja ureznikom, upuštanjem, proširivanjem i razvrtanjem.



# Tipski zahvati obrade zabušivanjem, bušenjem i urezivanjem navoja

SKICA ZAHVATA	NAZIV TIPSKOG ZAHVATA	Elementi geometrije	Kod
	Zabušivanje zabušivačem bez zaštitnog proširenja	/D,L,α,α₁/	BZ10
	Zabušivanje zabušivačem sa zaštitnim proširenjem		BZ11
	Bušenje spiralnom burgijom sa cilindričnom drškom	/D₁,D₂,L₁,L₂/	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

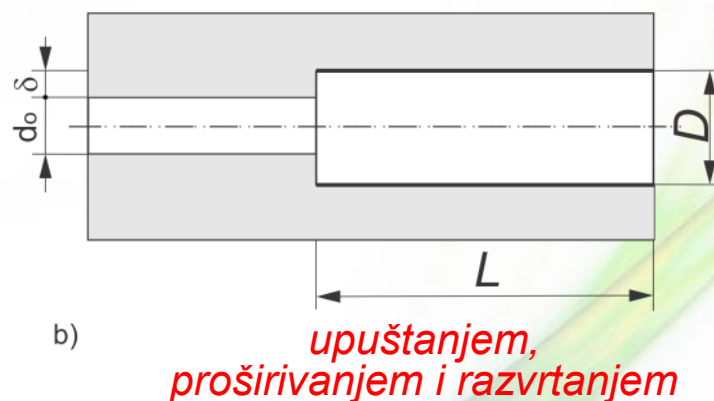
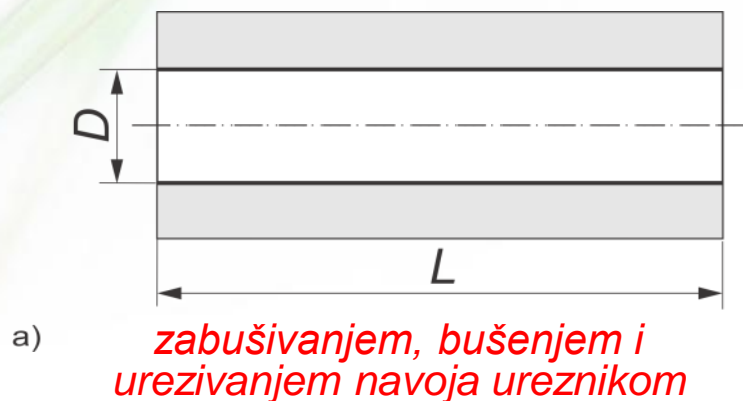
# Tipski zahvati obrade upuštanjem, proširivanjem i razvrtanjem

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 ( $\delta$ ) 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	$s \leq \left( \frac{K_c}{42C_m} \right)^{\frac{1}{D}} D^{\frac{3-x}{y}}$	-----	
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:

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

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

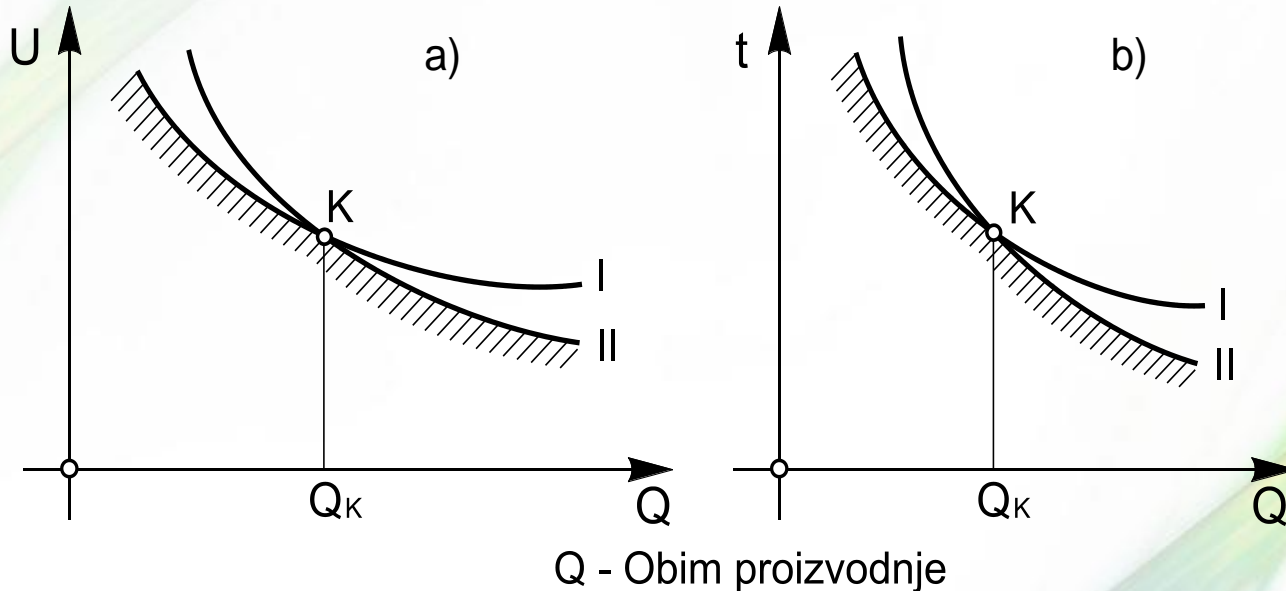
$$t_o = t_g + t_a + t_p + t_{me} + \sum t_i$$

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

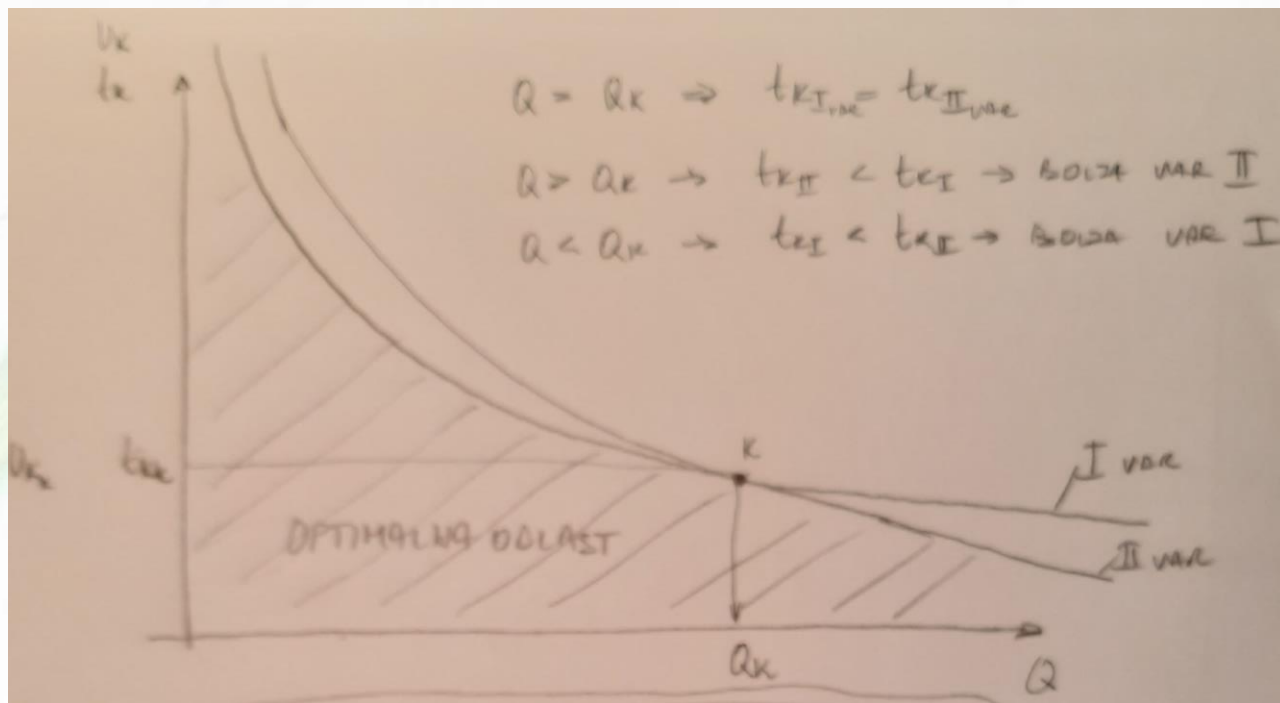
Pošto za tačku  $K$  važi da je  $U_I = U_{II}$  i  $t_I = t_{II}$ , granica primenljivosti posmatranih varijanti za odgovarajuće elemente tehnologije određena je graničnim obimom proizvodnje:



$$\Rightarrow Q_K = \frac{(U_{TP} + U_{PS} \cdot n_s)_I - (U_{TP} + U_{PS} \cdot n_s)_{II}}{U_{oII} - U_{oI}} \quad \text{ili na bazi vremena obrade:} \quad Q_K = \frac{(T_{PZ})_I - (T_{PZ})_{II}}{t_{oII} - t_{oI}}$$

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





$$t_k = \left( t_g + t_a + t_p + t_{mc} + \frac{TPz}{z_s \cdot n_s} \cdot n_s + \sum t_i \right) + t_0$$

$Q = z_s \cdot n_s \quad \text{сер/год} \quad \rightarrow z_s = \frac{Q}{n_s}$   
ком/год    ком/сек

$$t_k = \frac{TPz}{z_s} + t_0 = \frac{TPz \cdot n_s}{Q} + t_0$$

$Q = Q_K \quad t_{K I} = t_{K II}$

$$\left( \frac{TPz \cdot n_s}{Q} + t_0 \right)_I = \left( \frac{TPz \cdot n_s}{Q} + t_0 \right)_{II} \quad \begin{matrix} Q = Q_K \\ n_{sI} = n_{sII} \end{matrix}$$

$$\Rightarrow Q_K = \frac{(TPz_I - TPz_{II}) n_s}{t_{0I} - t_{0II}}$$

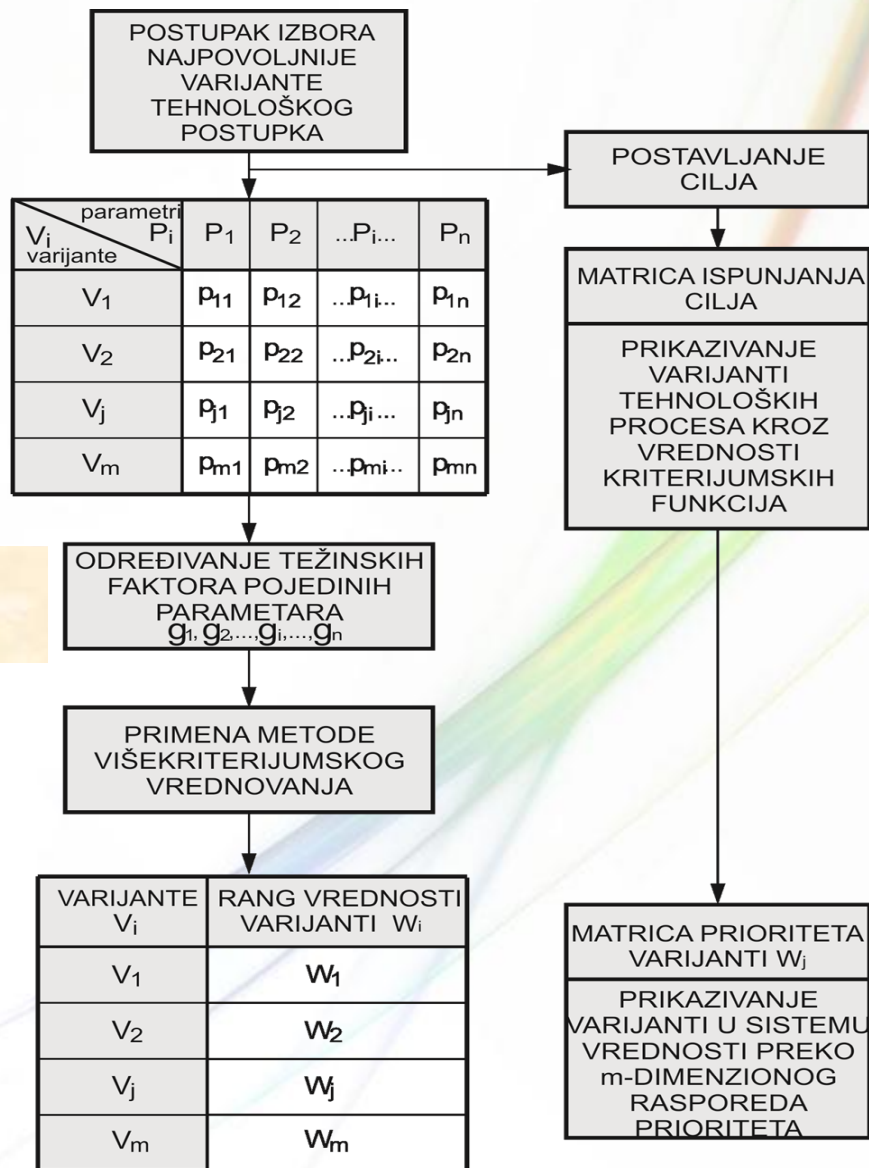
# Višekriterijumsko vrednovanje i rangiranje tehnoloških procesa

Ova metoda, koja je zasnovana na višekriterijumskom vrednovanju izabranih varijanti tehnoloških procesa, obuhvata tri faze. **Prva faza** obuhvata **usvajanje varijanti** tehnološkog procesa izrade određenog proizvoda za zadate uslove ( $V_i$ ) i kriterijuma, odnosno **parametara vrednosti** tehnološkog procesa ( $p_j$ ). Druga faza obuhvata određivanje **težinskih koeficijenata parametara vrednosti**, a treća utvrđivanje ranga vrednosti varijanti tehnološkog procesa.

## Parametri vrednosti tehnoloških procesa

Poznato je da osnovne kriterijume, odnosno parametre vrednosti tehnoloških procesa čine:

- *Proizvodnost,*
- *Troškovi izrade,*
- *Kvalitet,*
- *Tehnološki ciklus,*
- *Proizvodni ciklus,*
- *Fleksibilnost, itd.*



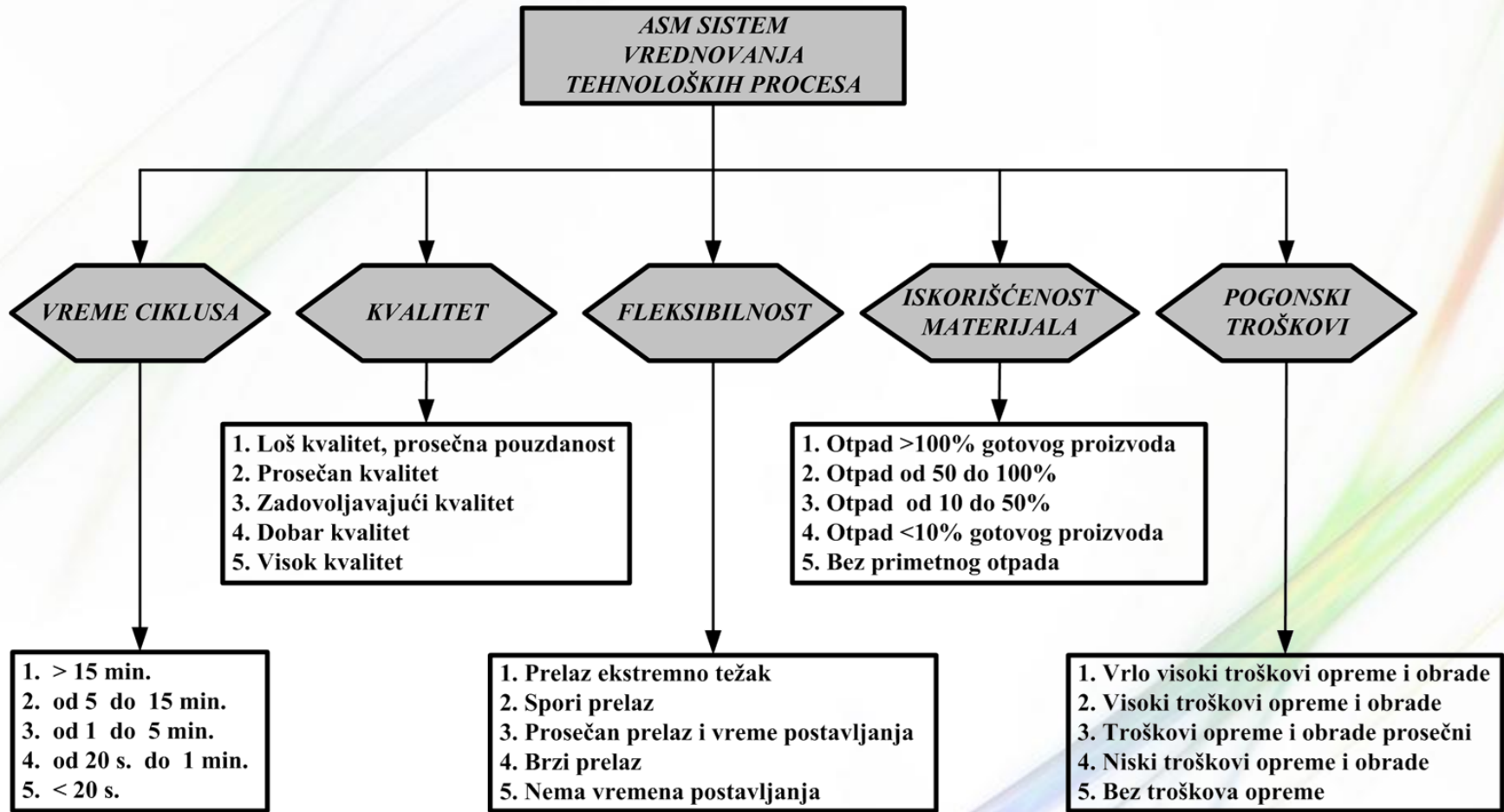
# Parametri vrednosti tehnoloških procesa

U literaturi se navode i drugi parametri vrednosti, kao **iskorišćenje materijala priprema**, itd. Određivanje vrednosti pomenutih parametara može se vršiti na osnovu odgovarajućih **analitičkih izraza**, ili pak, primenom neke od **metoda ekspertskeg ocenjivanja**, koje se ogledaju u dodeljivanju broja bodova pojedinim parametrima vrednosti. Za određivanje vrednosti pojedinih parametara eksperti-ocenjivači mogu koristiti razne **skale za procenjivanje**.

*Sistem za vrednovanje parametara vrednosti tehnoloških procesa prema VDI 2225*

DESETOBODOVNI SISTEM			ČETVOROBODOVNI SISTEM	
Vrednost		Značenje	VDI 2225	
Decimalna	Celobrojna		Vrednost	Značenje
0,0	0	apsolutno beskorisno rešenje	0	nezadovoljavajuće rešenje
0,1	1	izuzetno neadekvatno rešenje		
0,2	2	slabo rešenje	1	još podnošljivo rešenje
0,3	3	rešenje koje se još može tolerisati		
0,4	4	zadovoljavajuće rešenje	2	dovoljno rešenje
0,5	5	adekvatno rešenje		
0,6	6	dobro rešenje	3	dobro rešenje
0,7	7	bolje rešenje od dobrog		
0,8	8	vrlo dobro rešenje	4	vrlo dobro rešenje
0,9	9	Rešenje koje prevazilazi		
1,0	10	idealno rešenje		

# Parametri vrednosti tehnoloških procesa



## ASM sistem vrednovanja parametara vrednosti tehnoloških procesa

Druga faza ove metode obuhvata određivanje težinskih faktora ( $g_i$ ) pojedinih parametara vrednosti. Ovi faktori, koji predstavljaju procenu važnosti pojedinih parametara vrednosti tehnoloških procesa, mogu se odrediti na jedan od ranije prikazanih načina, ili pomoću *Fulerovog trougla*.

# Određivanje težinskih koeficijenata pomoću Fulerovog trougla

Ova metoda je zasnovana na **postepenom poređenju parova parametara vrednosti**, koje vrše ocenjivači, odnosno eksperti. Svi parametri se postavljaju u Fulerov trougao.

Pri upoređivanju parametara vrednosti po parovima u slučaju kada se ne može dati prednost nekom parametru, onda se za oba parametra u posmatranom paru dodeljuju vrednost 0.5.

1	1	1	1	...1	1
2	3	4	5	...(n-1)	n
	2	2	2	...2	2
	3	4	5	...(n-1)	n
.....					
.....					
					(n-1)
					n

Metoda višekriterijumskog vrednovanja i rangiranja tehnoloških procesa primenom težinskih faktora koji se određuju na osnovu Fulerovog trougla biće prikazana na izabranom primeru.

Posmatraće se dve varijante tehnološkog procesa izrade proizvoda, (A) i (B), sa parametrima vrednosti:

1. *Proizvodnost,*
2. *Troškovi izrade,*
3. *Tačnost,*
4. *Fleksibilnost i*
5. *Iskorišćenost materijala.*

Vrednovanje parametara vrednosti upoređivanjem u parovima izvršeno je u Fulerovom trouglu, zaokruživanjem onog parametra kojem se u posmatranom paru upoređivanjem dodeljuje prednost.



# Određivanje težinskih koeficijenata pomoću Fulerovog trougla

**Proizvodnost** kao, parametar 1 zaokružen je dva puta, **troškovi** izrade kao parametar 2 zaokružen je 1.5 puta, **tačnost** 3 puta, **fleksibilnost je** zaokružena 2 puta, a **iskorišćenost materijala** kao parametar 5 zaokružen je 1.5 puta.

Na osnovu prikazanog vrednovanja parametara vrednosti u parovima mogu se odrediti **težinski faktori parametara**, a time i njihov **redosled značajnosti**.



BROJ PARAMETARA	TEŽINSKI FAKTOR	RANG PARAMETARA VREDNOSTI
1	2	2
2	1.5	4
3	3	1
4	2	3
5	1.5	5
$\frac{n(n-1)}{2} = \frac{5(5-1)}{2} = 10$	$\sum = 10$	-----

**Rangiranje varijanti tehnološkog procesa**, koje pripada trećoj fazi metode višekriterijumskog vrednovanja i rangiranja, vrši se na osnovu ukupnih vrednosti posmatranih varijanti, koje se određuju na osnovu izraza:

$$W = \sum_{i=1}^m p_i \cdot q_i \quad \text{gde su:}$$

- $m$  – broj parametara vrednosti,
- $p_i$  – parametri vrednosti izraženi dodeljenim brojem bodova,
- $q_i$  – težinski faktori parametara.

## Rangiranje varijanti tehnološkog procesa

Rezultati višekriterijumskog vrednovanja dve pomenute varijante tehnološkog procesa (*A*) i (*B*) prikazani su u tabeli.

<i>BROJ PARAMETARA</i>	<i>TEŽINSKI FAKTOR</i>	<i>OCENE PARAMETARA VREDNOVANJA TEHNOLOŠKIH PROCESA</i>		<i>VREDNOST TEHNOLOŠKIH PROCESA</i>	
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>4</i>
<i>2</i>	<i>1.5</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4.5</i>
<i>3</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>12</i>	<i>12</i>
<i>4</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>2</i>	<i>8</i>
<i>5</i>	<i>1.5</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>6</i>	<i>4.5</i>
<i>UKUPNA VREDNOST TEHNOLOŠKOG PROCESA:</i>				<i>27</i>	<i>33</i>

*Višekriterijumsko vrednovanje i rangiranje posmatranih varijanti tehnološkog procesa*

Ukupna vrednost tehnološkog procesa varijante *B* je veća od ukupne vrednosti tehnološkog procesa varijante *A*, na osnovu čega se zaključuje da je varijanta *B* povoljnija od varijante *A*.

# Simulacija proizvodnih, tehnoloških i obradnih procesa

Razvojem računara i informacionih tehnologija, uopšte, razvijeni su i brojni programski sistemi za simulaciju, koji su danas u primeni i u metaloprerađivačkoj industriji.

## Simulacija proizvodnih procesa

Simulacija proizvodnih procesa primenom odgovarajućeg programskog sistema za simulaciju, kao pažljivo i usmereno eksperimentisanje na računaru, vrši se, u opštem slučaju kada se:

- *Projektuje proizvodni sistem,*
- *Unapređuje proizvodni procesu postojećem proizvodnom sistemu,*
- *Postavlja cilj simulacije i razvoj simulacionog modela,*
- *Izvodi simulaciono eksperimentisanje na računaru i*
- *Vrši interpolacija i primena rezultata simulacije.*

Pri definisanju zadatka i ciljeva simulacije proizvodnih procesa u središtu su najvažnija sledeća pitanja:

- *Kolika se tehnološka prohodnost očekuje,*
- *Koji je najpovoljniji broj i raspored tehnoloških resursa,*
- *Gde su najpovoljnije lokacije međuskladišta,*
- *Koliki je optimalni obim proizvodnje,*
- *Koje su najpovoljnije strategije organizacije i realizacije procesa proizvodnje, itd.*

# Simulacija proizvodnih procesa

Razvoj simulacionog modela u delu koji se odnosi na modeliranje proizvodnog procesa, rešava se u **nekoliko iteracija**, od **konceptualnog modela** pa do **konačnog modela** koji daje optimalne rezultate simulacije. Tako razvijeni model predstavlja najpovoljnije rešenje proizvodnog procesa, koji se uz dodatne analize usvaja, ili, po potrebi kasnije koriguje.

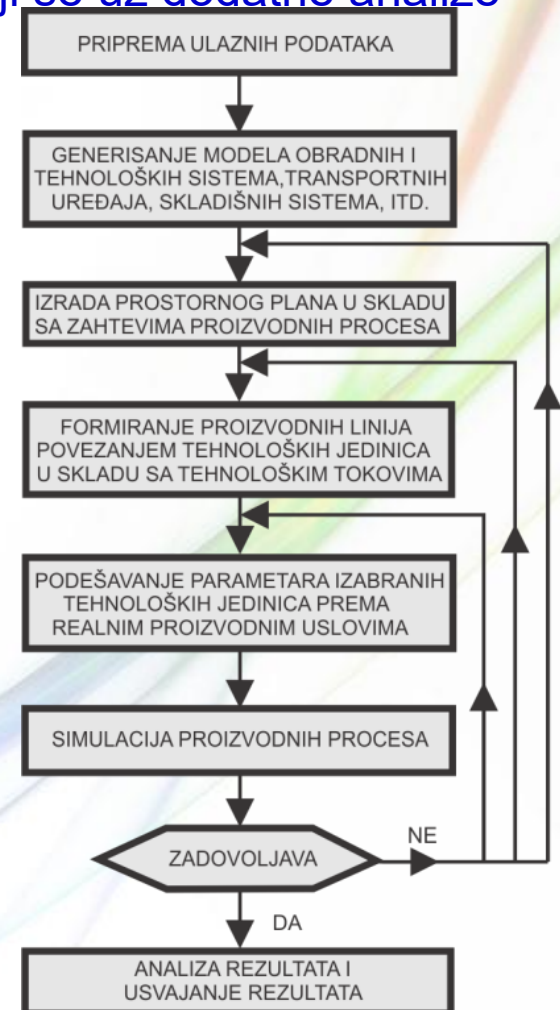
## Modeliranje proizvodnih procesa

U okviru modeliranja proizvodnih procesa potrebno je definisati **konture proizvodnog prostora** u kome su smešteni proizvodni pogoni i drugi delovi proizvodnog sistema.

Modeliranje proizvodnih procesa u posmatranom proizvodnom sistemu obuhvata prvu fazu razvoja simulacionog modela koji omogućuje simulaciju procesa proizvodnje primenom odgovarajućih programskih sistema.

Za razvoj modela proizvodnog procesa potrebni su sledeći **osnovni podaci**:

- **Tehnološki procesi izrade,**
- **redosled operacija**
- **vremena operacija (osnovna, pomoćna, izgubljena)**
- **pripremno-završna vremena po operacijama**
- **pregled obradnih i tehnoloških sistema i uređaja**
- **Obim proizvodnje**



**Osnovne faze razvoja simulacionog modela proizvodnog procesa**

# Modeliranje proizvodnih procesa

Za simulaciju proizvodnog procesa primenom programskih sistema za simulaciju, **model procesa proizvodnje** mora da obuhvati sledeće najvažnije podatke:

- *Prostorni raspored obradnih i tehnoloških sistema,*
- *Rastojanje između obradnih i tehnoloških sistema i drugih resursa,*
- *Definisane tehnološke tokove izrade,*
- *Definisana vremena operacija,*
- *Definisani način izvođenja redosleda operacija,*
- *Definisane objekte za praćenje i evidentiranje rezultata simulacije,*
- *Analiza rezultata simulacije.*

Modeliranje proizvodnih procesa u okviru razvoja simulacionog modela primenom savremenih programskih sistema za simulaciju, može se izvršiti u **2D i 3D** okruženju.

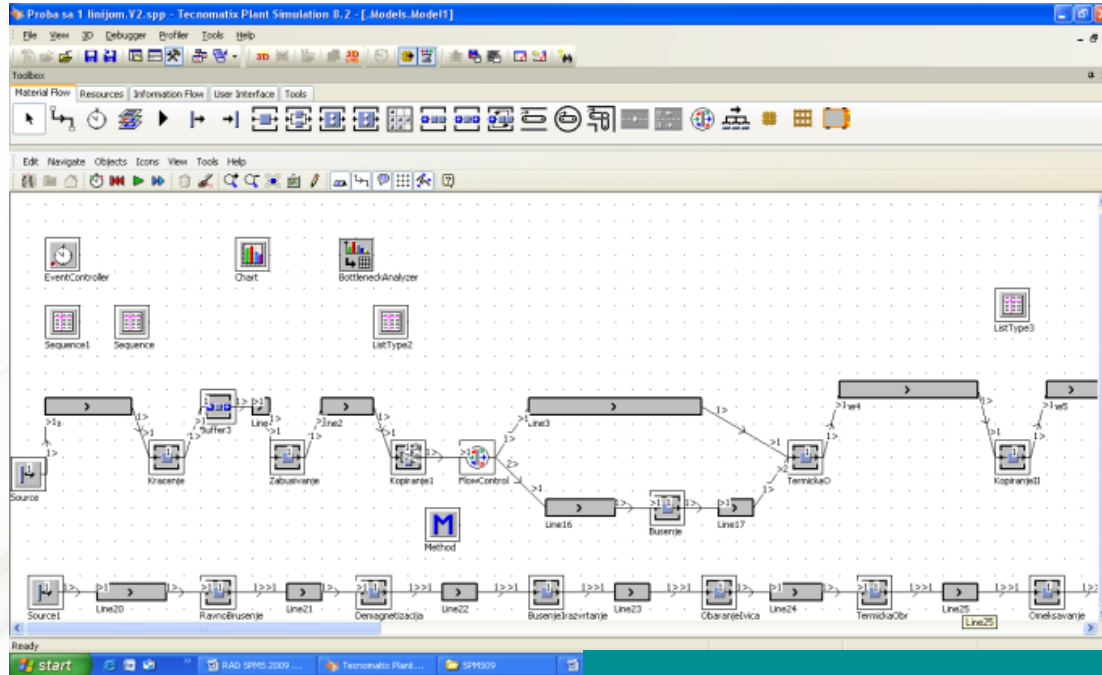
Modeliranje u 2D okruženju, najčešće se koristi kod rešavanja zadataka **utvrđivanja tehnoloških, proizvodnih i obradnih ciklusa i vremena koja utiču na pomenute cikluse**, kao i kod rešavanja zadataka uravnoteženja operacija, otklanjanja uskih grla i utvrđivanja najpovoljnijih transportnih puteva materijala.

Modeliranje u 3D okruženju, najčešće se koristi za prikaz rasporeda obradnih i tehnoloških sistema i uređaja, koji se prostorno raspoređuju u postojećem proizvodnom sistemu, ili, pak, prostorno raspoređuju u novom prostornom sistemu.

Savremeni programski sistemi za simulaciju proizvodnih procesa omogućuju **automatizovano generisanje** 2D modela na osnovu 3D modela proizvodnog procesa.

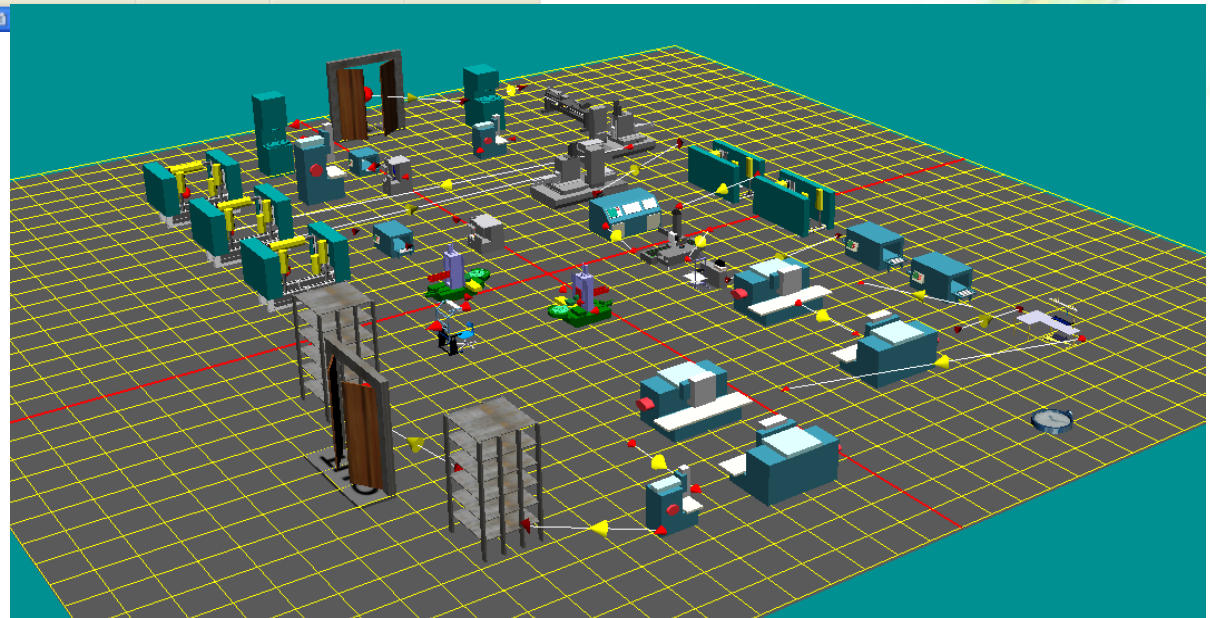


# Modeliranje proizvodnih procesa



*Modeliranje proizvodnih procesa u 2D okruženju primenom programskog sistema za simulaciju*

*Modeliranje proizvodnih procesa u 3D okruženju primenom programskog sistema za simulaciju*



# Simulacija tehnoloških procesa

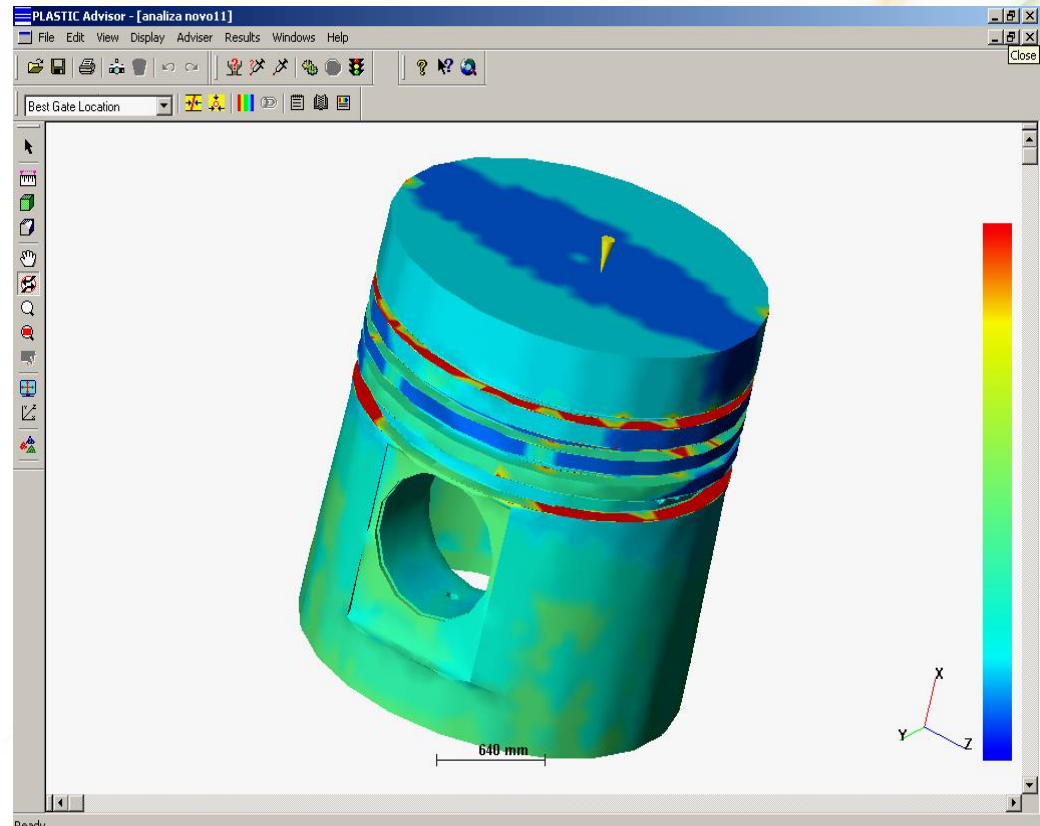
Među najznačajnije programske sisteme za simulaciju tehnoloških procesa spadaju sistemi za simulaciju **procesa izade odlivaka, procesa izrade proizvoda plastičnom deformacijom** kao što je **kovanje, savijanje, duboko izvlačenje i presovanje**, kao i simulacija procesa izrade proizvoda **brizganjem plastičnih masa**.

U zavisnosti od vrste pomenutih tehnoloških procesa, programski sistemi za njihovu simulaciju zahtevaju odgovarajuće ulazne podatke, kao i različite mogućnosti praćenja parametara tehnoloških procesa.

Tako, na primer, programski sistem za simulaciju procesa izrade odlivaka od legura aluminijuma u metalnim kalupima, **MagmaSoft**, zahteva pripremu i unos sledećih ulaznih podataka:

- *Materijal odlivka,*
- *Materijal kokile,*
- *Materijal jezgra,*
- *Temperatura kokile,*
- *Vreme livenja.*

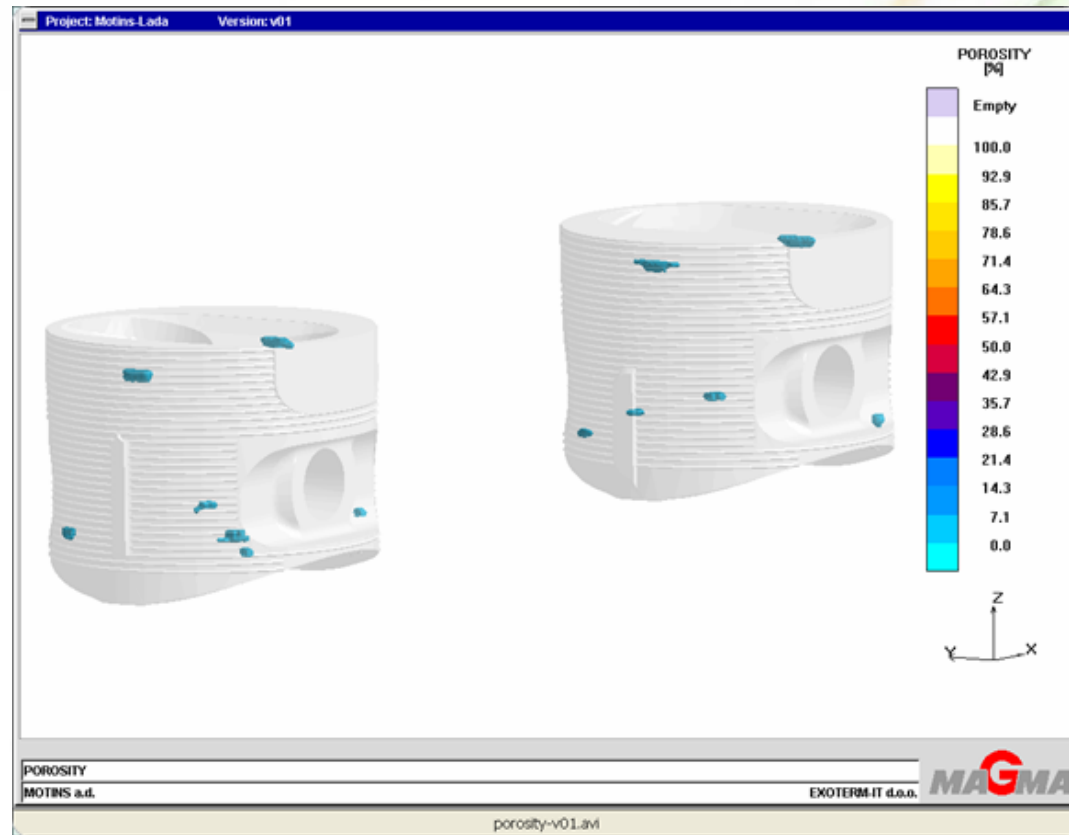
*Proces očvršćavanja odlivka klipa*



# Simulacija tehnoloških procesa

Ovaj programski sistem omogućuje praćenje:

- Rasporeda brzine kretanja metala u toku punjenja kalupa,
- Rasporeda temperatura metala u toku punjenja kalupa,
- Rasporeda pritiska metala u kalupu,
- Toka metala u toku punjenja kalupa,
- Procesu očvršćavanja odlivka,
- Vreme očvršćavanja odlivka,
- Porozna mesta u odlivku.

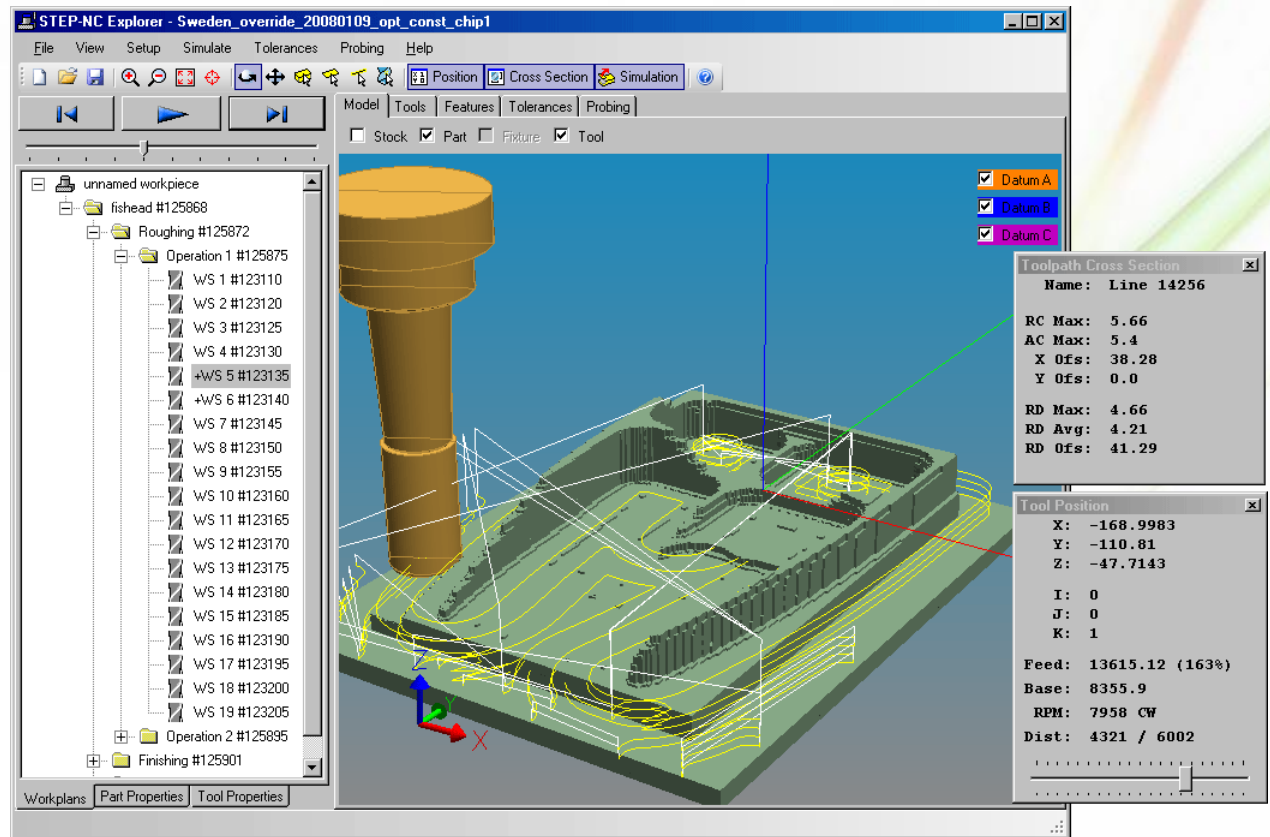


*Porozna mesta odlivka klipa*

# Simulacija obradnih procesa

Savremeni programski sistemi CAD/CAM, koji omogućavaju simulaciju tehnoloških, odnosno obradnih procesa, od posebnog su značaja pri projektovanju tehnoloških procesa za realizaciju na tehnološkim sistemima sa poznatim tehničko-tehnološkim performansama, a isto tako, i kod postavljanja koncepta razvoja novih fleksibilnih tehnoloških i obradnih sistema.

U okviru simulacije obradnih procesa moguće je primenom matematičkih modela optimizacije odrediti i **optimalnu putanju alata**, odnosno **optimalni redosled i vrstu zahvata** koji čine sadržaj posmatrane operacije.



*Simulacija procesa obrade na glodalici sa NC upravljanjem*