

# Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava

---

**Jurković, Zoran**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2007**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:181229>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET**

621.941.01:004.8 > (043.3)  
621.941.01.519.2 > (043.3)

**MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA  
PARAMETARA OBRADNE PRIMJENOM  
EVOLUCIJSKIH ALGORITAMA KOD  
INTELIGENTNIH OBRADNIH SUSTAVA**

Doktorska disertacija

Zoran Jurković

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, dipl. ing.

Komentor: Red. prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing.

Komentor: Red. prof. dr. sc. Jože Balič, dipl. ing.

Rijeka, 2007.

11119041



DCD 178  
2007

DUF-687

**Obitelji**

Sveučilište u Rijeci  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
-Znanstveno-nastavno vijeće-  
Klasa: 602-04/04-02/21  
Ur.br.: 2170-57-43-04-09  
Rijeka, 24. lipnja 2004.

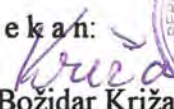
Znanstveno-nastavno vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 21. sjednici u akad.god. 2002./03./04, održanoj 24. lipnja donijelo je sljedeću

### ODLUKU

Prihvća se izvješće Stručnog povjerenstva, a kojim se utvrđuje da mr.sc. Zoran Jurković, dipl.ing. ispunjava uvjete čl. 51. Zakona o visokim učilištima za izradu doktorske disertacije izvan dokorskog studija, pod naslovom: "Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava".

Mentorom se imenuje doc.dr.sc. Mirana Brezočnika, dipl.ing., sa Fakulteta za strojništvo u Mariboru, a komentorima red.prof.dr.sc. Jožu Baliča, dipl.ing., sa Fakulteta za strojništvo u Mariboru i izv.prof.dr.sc. Gorana Cukora, dipl.ing.

Dekan:

  
Red. prof. dr.sc. Božidar Križan, dipl.ing.



Dostaviti:

- 1.) Mr.sc. Zoran Jurković, dipl. ing.
- 2.) Mentor
- 3.) Komentori (2x)
- 4.) Evidencija studija
- 5.) Opća i kadrovska služba
- 6.) Pismohrana ZNV



## SAŽETAK

Modeliranje i optimizacija metode su implementiranja znanja pri projektiranju obradnih procesa s ciljem njihove analize, poboljšanja i doseganja više tehnološke razine. U radu se analizira proces uzdužnog tokarenja (gruba i fina obrada) temeljem podataka prikupljenih eksperimentalnim istraživanjem za tri izlazne veličine procesa: glavnu silu rezanja ( $F_c$ ), hrapavost obrađene površine ( $Ra$ ) i postojanost alata ( $T$ ). Dobiveni eksperimentalni podaci koriste se za razvoj matematičkih modela uporabom evolucijskih algoritama (genetski algoritam i genetsko programiranje) i matematičko-statističke metode. Optimalne vrijednosti parametara obrade, tj. brzine rezanja ( $v_c$ ), posmaka ( $f$ ) i dubine rezanja ( $a_p$ ), dobivene su primjenom Taguchijeve metode i uporabom genetskog algoritma. Temeljem postavljenih funkcija cilja i ograničenja razvijen je program za modeliranje i optimizaciju procesa uzdužnog tokarenja (*ModOpT*). Optimizacija tehnoloških pokazatelja procesa izvršena je primjenom sljedećih kriterija: minimalnog jediničnog vremena, minimalnog jediničnog troška, maksimalnog jediničnog profita i obradivosti materijala kao temelja višekriterijske optimizacije. Dobiveni matematički modeli i optimalni rezultati procesa, prezentirane različite metode modeliranja i optimizacije, kao i uporaba višekriterijskih modela optimizacije potpomognuti razvijenim programom daju cjelovito rješenje za industrijsku primjenu.

## SUMMARY

Modeling and optimization are methods of knowledge implementation during the design of machining processes with the purpose of the process analysis, improvement and achievement of higher technological level and cost efficiency. A longitudinal turning process (multi-pass rough and finish) was analyzed using an experimentally obtained data for three output process parameters: the cutting force ( $F_c$ ), the surface roughness ( $Ra$ ) and the tool life ( $T$ ). Experimentally acquired data were used for development of mathematical models by evolutionary algorithms (genetic algorithm and genetic programming) and mathematical-statistical method. The optimal values of cutting parameters, namely the cutting speed  $v_c$ , the feed  $f$  and the depth of cut  $a_p$ , were obtained with Taguchi method and genetic algorithm. On the basis of proposed objective and constraint functions the software for modeling and optimization of the longitudinal turning process (*ModOpT*) was developed. Optimization of technological and economical indicators of machining process was achieved by using the following criteria: minimum production time per unit, minimum production costs per unit, maximum profit rate and machinability of materials as fundamental for the multi-objective optimization. Obtained mathematical models and optimal process parameters, presented different methods of modeling and optimization as well as an application of the multi-objective optimization models along with the developed software provide a complete solution for industrial application.

## PREDGOVOR

Projektiranje i razvoj modernih obradnih sustava nije moguće danas zamisliti bez primjene novih znanja poglavito iz područja umjetne inteligencije. Primjena takvih metoda u modeliranju i optimizaciji obradnih procesa i sustava omogućavaju pouzdano i kvalitetno upravljanje te stabilnost sustava unutar domene modeliranog područja rada.

Cilj je doktorske disertacije *Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava* prvo utvrditi relevantne utjecajne parametre na proces obrade odvajanjem čestica i to za grubu i finu obradu tokarenjem te njihove interakcije, a zatim na temelju eksperimentalnih istraživanja dobivene podatke izlaznih veličina definirati kao matematičke modele, koje primjenom matematičko-statističke metode i evolucijskih algoritama treba koristiti s ciljem definiranja funkcija cilja i ograničenja procesa obrade uzdužnog tokarenja.

Ovom prilikom najtoplije zahvaljujem mentoru *izv. prof. dr. sc. Miranu Brezočniku* na pruženoj potpori i savjetima tijekom izrade doktorske disertacije, te na susretljivosti, otvorenosti i vremenu provedenom u diskusijama s jedinim ciljem i željom da ovaj rad bude što bolji.

Također, koristim ovu prigodu da se zahvalim komentoru *red. prof. dr. sc. Goranu Cukoru* na dragocjenoj pruženoj pomoći i potpori pri izradi ove disertacije, kao i na uloženom velikom trudu prilikom čitanja ovoga rada.

Najiskrenije se zahvaljujem djelatnicima *Instituta za proizvodno strojništvo, Fakulteta za strojništvo Univerza v Mariboru* na čelu s komentrom *red. prof. dr. sc. Jožom Baličem*, i to posebice članovima *Laboratorija za odrezovanje dr. sc. Matjažu Milfelneru* i *dr. sc. Urošu Župerlu* na nesebičnoj pomoći prilikom pripreme i izvođenja eksperimenata. Također, izraze moje zahvale dijelim *red. prof. dr. sc. Franci Čušu* i *izv. prof. dr. sc. Ivu Pahole* na pruženim savjetima i potpori bez čega bi izrada disertacije bila daleko teža.

Izražavam neizmjernu zahvalnost članovima povjerenstva *red. prof. dr. sc. Juraju Ljubetiću* i *izv. prof. dr. sc. Draženu Bajiću* na korisnim savjetima i sugestijama nakon čitanja i pregleda rada.

Zahvalnost dugujem i *Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske* budući je doktorska disertacija rađena u okviru znanstvenoistraživačkog projekta (0069021) *Modeliranje i simulacija procesa primjenom genetskog i stohastičkog algoritma*.

Autor



**SADRŽAJ**

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Svrha i cilj istraživanja</b>	<b>2</b>
<b>2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b>	<b>7</b>
<b>3. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE I ANALIZA PROCESA I PARAMETARA OBRADE</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Analiza procesa obrade</b>	<b>11</b>
<b>3.2. Osnovni parametri procesa obrade</b>	<b>12</b>
3.2.1. Sile u postupku obrade uzdužnim tokarenjem	14
3.2.2. Postojanost alata	16
3.2.3. Mikrogeometrija obrađene površine	19
3.2.4. Učinak skidanja materijala procesa obrade ( <i>MRR</i> )	22
3.2.5. Proizvodnost procesa rezanja – jedinično vrijeme izrade	23
<b>3.3. Metode definiranja parametara obrade</b>	<b>24</b>
3.3.1. Tablično i nomogramsko određivanje parametara obrade	26
3.3.2. Analitičko određivanje parametara obrade	26
3.3.3. Određivanje parametara obrade primjenom modeliranja	28
3.3.4. Metoda minimalnog jediničnog vremena izrade	29
3.3.5. Metoda minimalnih jediničnih troškova izrade	30
3.3.6. Metoda funkcija ograničenja	33
3.3.7. Metoda baze tehnoloških podataka	34
<b>3.4. Optimizacija parametara obrade</b>	<b>35</b>
3.4.1. Osnove i procedura optimizacije	35
3.4.2. Blok-shema optimizacije parametara obrade	37
3.4.3. Kriteriji optimizacije	37
3.4.3.1. Kriterij minimalnoga jediničnog vremena izrade – maksimalne produktivnosti	38
3.4.3.2. Kriterij minimalnih jediničnih troškova izrade	39
3.4.3.3. Kriterij maksimalnog profita	39
3.4.4. Optimizacija parametara obrade primjenom funkcija ograničenja	41
<b>4. INTELIGENTNI OBRADNI SUSTAVI</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Osnove moderne proizvodnje i nova proizvodna filozofija</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Evolucija razvoja obradnih sustava</b>	<b>52</b>
<b>4.3. Zahtjevi suvremenog tržišta i složenost proizvodnje</b>	<b>53</b>
<b>4.4. Klasifikacija obradnih sustava</b>	<b>53</b>

<b>4.5. Osnove umjetne inteligencije</b>	<b>56</b>
4.5.1. Sustav baza znanja	56
<b>4.6. Definicija i osnove inteligentnog upravljanja</b>	<b>57</b>
4.6.1. Sustavi inteligentnog upravljanja utemeljeni na umjetnoj i računalnoj inteligenciji	58
<b>4.7. Struktura inteligentnoga obradnog sustava</b>	<b>59</b>
4.7.1. Upravljanje inteligentnim sustavima	62
4.7.1.1. Ekspertno upravljanje (Expert Control)	63
4.7.1.2. Neizrazito upravljanje (Fuzzy Control)	64
4.7.1.3. Upravljanje živčevno-neizrazito (Neural-Fuzzy Control)	64
4.7.1.4. CNC upravljačka jedinica s mogućnošću učenja	65
<b>5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE</b>	<b>69</b>
<b>5.1. Planiranje eksperimenta</b>	<b>69</b>
5.1.1. Potpuni faktorni plan ( <i>Full Factorial Experimental Design</i> )	72
5.1.2. Robusni plan ( <i>Robust Parameter Design</i> )	73
<b>5.2. Izvođenje eksperimenta</b>	<b>75</b>
5.2.1. Uvjeti izvođenja eksperimenta	75
5.2.2. Eksperimentalni rezultati	79
5.2.2.1. Gruba obrada tokarenjem	79
5.2.2.2. Fina obrada tokarenjem	81
<b>6. MODELIRANJE PROCESA OBRADE</b>	<b>83</b>
<b>6.1. Modeliranje – metode, svrha i cilj</b>	<b>83</b>
<b>6.2. Matematičko-statističko modeliranje</b>	<b>86</b>
6.2.1. Matematički modeli za grubu obradu tokarenjem	92
6.2.2. Matematički modeli za finu obradu tokarenjem	99
<b>6.3. Evolucijski algoritmi</b>	<b>107</b>
6.3.1. Genetski algoritam (GA)	107
6.3.1.1. Primjena GA pri modeliranju	109
6.3.2. Genetsko programiranje (GP)	112
6.3.2.1. GP modul	112
6.3.2.2. Modeli dobiveni GP modulom	116
<b>7. OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADE</b>	<b>119</b>
<b>7.1. Optimizacijske metode</b>	<b>120</b>
<b>7.2. Taguchijeva metoda (pristup)</b>	<b>122</b>
7.2.1. Optimizacija parametara za grubu obradu – rezultati	126
7.2.2. Optimizacija parametara za finu obradu – rezultati	128
<b>7.3. GA optimizacija parametara obrade</b>	<b>130</b>
7.3.1. Rezultati optimizacije za grubu obradu	131

7.3.2. Rezultati optimizacije za finu obradu	131
<b>7.4. GA optimizacija tehno-ekonomskih parametara</b>	<b>132</b>
7.4.1. Jednokriterijska optimizacija	134
7.4.1.1. Definiranje funkcija cilja	134
7.4.2. Višekriterijska optimizacija	136
7.4.2.1. Definiranje funkcije cilja za dvokriterijsku optimizaciju	136
7.4.2.2. Definiranje funkcije cilja za višekriterijsku optimizaciju	138
7.4.3. Rezultati tehno-ekonomske optimizacije	139
<b>8. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA</b>	<b>145</b>
<b>8.1. Analiza i usporedba matematičkih modela procesa obrade</b>	<b>145</b>
8.1.1. Gruba obrada	146
8.1.2. Fina obrada	148
<b>8.2. Analiza i usporedba rezultata optimalnih parametara obrade</b>	<b>150</b>
8.2.1. Gruba obrada	150
8.2.2. Fina obrada	151
<b>8.3. Analiza i usporedba rezultata tehno-ekonomske optimizacije</b>	<b>152</b>
<b>9. ZAKLJUČAK</b>	<b>153</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>159</b>
<b>POPIS OZNAKA</b>	<b>167</b>
<b>POPIS KRATICA I SIMBOLA</b>	<b>171</b>
<b>POPIS SLIKA</b>	<b>172</b>
<b>POPIS TABLICA</b>	<b>175</b>
<b>PRILOG A:</b>	<b>176</b>
<b>PRILOG B:</b>	<b>177</b>



## 1. UVOD

Modernu proizvodnju danas nemoguće je zamisliti bez stalne težnje za poboljšanjem produktivnosti, fleksibilnosti i kvalitete, te za smanjenjem cijene proizvoda u uvjetima globalne konkurentnosti. Inteligentni proizvodni sustavi (IMS – *Intelligent Manufacturing Systems*) takvi su proizvodni sustavi koji upravo mogu odgovoriti na ove i druge sve veće izazove i zahtjeve koje pred njih postavljaju moderna proizvodnja i suvremeno turbulentno tržište. Uvođenje umjetne inteligencije u planiranje i upravljanje proizvodnih procesa, bez izravne intervencije čovjeka s ciljem postizanja optimalnih tehnološko-ekonomskih rezultata našlo je svoju konkretnu primjenu u različitim vidovima obradnih procesa kao što su: obrada odvajanjem čestica, obrada deformiranjem, injekcijsko prešanje, lijevanje, brza izrada proizvoda itd.

Prema podacima CIRP-a (*College International pour la Recherche en Productique*), Pariz, 50% ukupne proizvodnje odnosi se na obradu odvajanjem čestica gdje je primjena različitih tehnika umjetne inteligencije, od umjetnih živčevnih mreža preko neizravne logike, ekspertnih sustava, genetskih algoritama i genetskog programiranja, simuliranog hlađenja, naprednih tehnika modeliranja, itd., našla pogodno područje za konkretnu implementaciju i valorizaciju te primjene u odnosu na postojeće konvencionalne tehnike upravljanja procesima i optimizacije parametara obrade.

U ovom se istraživanju želi pokazati primjena genetskog programiranja i genetskog algoritma u uvjetima obrade tokarenjem u više prolaza (gruba i fina obrada) kao najraširenijeg procesa obrade odvajanjem čestica, i time najreprezentativnijeg.



Stalna je i neiscrpna težnja da se procesi obrade unaprijede primjenom znanja iz naprednih tehnika modeliranja i simulacije, a u novije doba i umjetne inteligencije kako bi se dobili dovoljno pouzdani modeli, potrebni za analizu, upravljanje i izbor optimalnih parametara obrade čemu teži i ovaj rad. Dobiveni matematički modeli koji predstavljaju sliku složenih odnosa između ulaznih i izlaznih parametara procesa tokarenja mogu se s dovoljnom točnošću iskoristiti u adaptivnom vođenju i nadgledanju procesa i donošenju rješenja u realnom vremenu što je od velike važnosti u eksploataciji IMS. Optimizacija parametara obrade (brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja) na temelju postavljenih ograničenja obrade (karakteristike stroja, kvaliteta i točnost obrađene površine, vijek alata), a s ciljem ostvarenja jedne ili više funkcija cilja kao što su minimizacija troškova obrade i/ili minimizacija vremena obrade kao i kriterij obradivosti materijala, s ekonomskog stajališta imaju i najveću praktičnu vrijednost i značenje.

## 1.1. SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA

Od najranijih početaka sistematskog pristupa rješavanju problema procesa obrade (F. W. Taylor "On the Art of Cutting metals" iz 1907.) postavljalo se pitanje adekvatnog upravljanja procesom obrade, a u cilju predviđanja i valorizacije stanja i mehanizama utjecaja pojedinih parametara obrade na kontroliranu vrijednost procesa.

Kako je u praksi izbor ulaznih parametara procesa gotovo isključivo temeljen na iskustvima tehnologa, teorijskom znanju ili tabličnim podacima proizvođača alata, ali bez spoznaja o njihovoj optimalnoj vrijednosti, a time i utjecaju na ekonomske rezultate i opravdanost realizacije tako projektiranog procesa, nametnula se potreba modeliranja i optimizacije ulaznih parametara procesa u cilju zadovoljavanja određenih funkcija cilja kao izlaznih učinaka procesa obrade. Klasične determinističke metode modeliranja i optimiranja procesa, kao npr. linearno i nelinearno programiranje, ne zadovoljavaju u cijelosti poglavito kod traženja optimuma u višemodalnom prostoru, jer su ovisne o početnoj točki u postupku pretraživanja, kao i nemogućnosti da se za dobiveni rezultat potvrdi da je riječ o globalnom minimumu ili maksimumu, a ne lokalnom. Evolucijske metode zahvaljujući svojoj stohastičkoj prirodi ne mogu dati rezultate s apsolutnom sigurnošću. Za razliku od determinističkih metoda one su ovisne o procesu ponavljanja, a time se i točnost dobivenih rješenja povećava.

Stohastička priroda procesa obrade iziskuje i adekvatnu metodu za njegovo rješavanje, a upravo se ovim istraživanjem želi ispitati učinkovitost evolucijskih metoda na konkretnom primjeru procesa obrade.

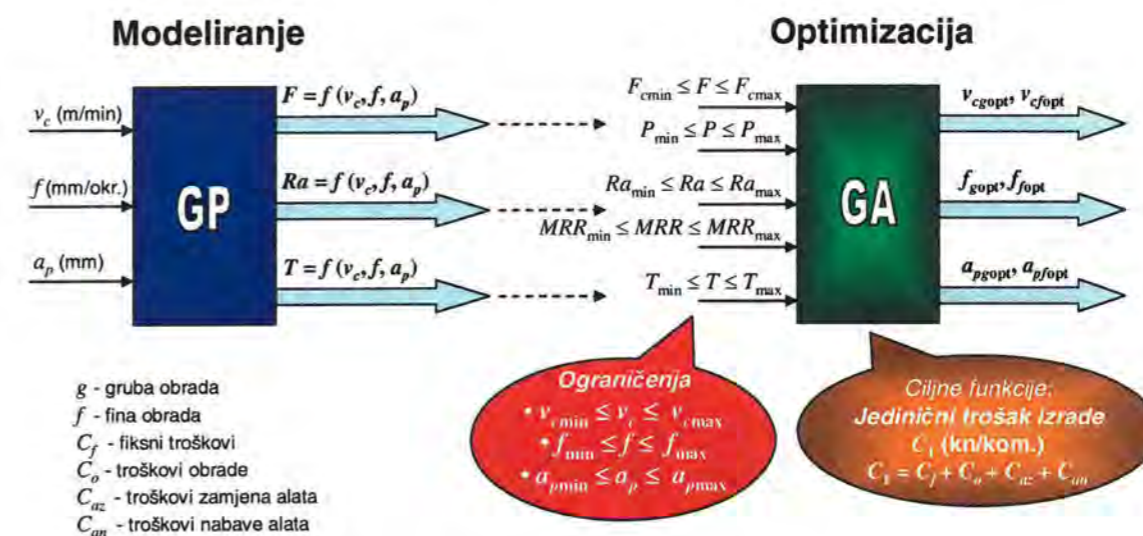
### ✚ Cilj istraživanja

Cilj je istraživanja dobiti dovoljno pouzdane matematičke modele za glavnu silu tokarenja  $F_c$ , hrapavost obrađene površine  $Ra$  i vijek alata  $T$  za unaprijed definirano istrošenje stražnje površine alata  $VB$  u ovisnosti o parametrima obrade: brzini rezanja  $v_c$ , posmaku  $f$  i dubini rezanja  $a_p$ . Tako dobiveni matematički modeli bit će iskorišteni za optimizaciju parametara

obrade tokarenjem u više prolaza, tj. za grubu obradu ( $v_{cg}, f_g, a_{pg}$ ) i finu obradu ( $v_{cf}, f_f, a_{pf}$ ), a za različite funkcije ograničenja ovisno o tehničkim, tehnološkim i konstrukcijskim karakteristikama stroja, kao i stanju alata i obratka u procesu obrade, a prema kriterijima minimalne cijene jediničnog proizvoda (kn/kom.), minimalnoga jediničnog vremena izrade (min/kom.), maksimalnog profita (kn/min), kao i uporabom višekriterijske funkcije cilja temeljene na obradivosti materijala.

### Hipoteza:

Optimizacija procesa temelji se na hipotezi da je proces obrade u cjelini vođen optimalno ako su definirani optimalni parametri svih faza obrade. Stoga je definiranje optimalnih parametara obrade ( $v_c, f, a_p$ ) rezultat dobivenih, dovoljno pouzdanih modela i njihove simulacije u cilju mogućeg minimiziranja izlaznih tehnološko-ekonomskih parametara (jedinični trošak obrade, jedinično vrijeme obrade), a za postavljene funkcije ograničenja procesa i obradnog sustava u cjelini (slika 1.1.).



Slika 1.1. Faze istraživanja

### ✚ Metodologija istraživanja

Za istraživanje procesa bit će primijenjene sljedeće metode:

- eksperimentalne metode,
- metoda matematičkog planiranja eksperimenta,
- matematičko-statističke metode,
- Taguchijeva metoda,
- evolucijsko-optimizacijske metode i
- evolucijske metode modeliranja.

U fazi eksperimentalnog istraživanja primijenit će se metoda matematičkog planiranja eksperimenta uz metode snimanja i obrade rezultata eksperimenta, te Taguchijeva metoda za planiranje eksperimenta i optimizaciju parametara obrade bazirana na ortogonalnim nizovima.



Modeliranje procesa uzdužnog tokarenja ostvarit će se na temelju rezultata planiranog i izvedenog eksperimentalnog istraživanja, a primjenom matematičko-statističke metode kao konvencionalnog pristupa rješavanju problema, te primjenom evolucijskih algoritama u vidu genetskog programiranja i genetskog algoritma kao novih metoda u modeliranju procesa obrade.

Optimizacija parametara obrade uzdužnim tokarenjem u više prolaza bit će izvedena genetskim algoritmima, i to temeljem dobivenih modela matematičko-statističkom metodom kao i evolucijskim metodama oponašanja prirodnih evolucijskih procesa.

Upravo će evolucijske metode za modeliranje i optimizaciju, genetsko programiranje i genetski algoritmi, ovdje iskoristiti svoju prirodnu stohastičnost koja je pogodna za takve višefunkcijske, višekriterijske optimizacijske probleme unutar pretraživanog prostora mogućih rješenja.

#### ✦ *Područje istraživanja i očekivana struktura rada*

U ovom se istraživanju planira obaviti modeliranje i optimizacija parametara obrade tokarenjem u više prolaza primjenom metoda genetskog programiranja (modeliranje) i genetskog algoritma (optimizacija).

Zbog toga će se u radu pristupiti analiziranju procesa tokarenja teorijskim i eksperimentalnim istraživanjem. U teorijskom će se dijelu izvršiti:

- analiza načina djelovanja evolucijskih metoda u rješavanju problema modeliranja i optimizacije parametara obrade,
- analiza primjene naprednih evolucijskih metoda kod upravljanja IMS,
- analiza postojećih empirijskih modela koji bi se mogli koristiti kao funkcije ograničenja,
- definiranje algoritama za konkretni primjer modeliranja i optimizacije parametara obrade tokarenjem u više prolaza,
- definiranje računalnog programa i ocjena njegove učinkovitosti.

Eksperimentalnim istraživanjem žele se temeljem plana eksperimenta, a za definirano područje i uvjete obrade, alat i materijal obratka dobiti vrijednosti mjerenja za sljedeće izlazne veličine:

- silu rezanja  $F_c$ ,
- hrapavost obrađene površine  $Ra$ ,
- vijek alata  $T$  za definirano istrošenje stražnje površine alata  $VB$ .

**Struktura rada** podijeljena je u sljedeća poglavlja:

1. *Uvod* (definicija problema, cilj, hipoteza).
2. *Pregled dosadašnjih istraživanja* (osvrt na trenutačno stanje u ovom području).
3. *Teorijsko istraživanje i analiza* (osvrt na teorijska razmatranja o ovom problemu i mogućim modelima za funkcije ograničenja).
4. *Inteligentni obradni sustavi* (teorijski osvrt, pojam inteligencije i inteligentni strojevi).

5. *Eksperimentalno istraživanje* (planiranje i izvođenje eksperimenta, rezultati mjerenih veličina, mjerna oprema, alati, materijal).
6. *Modeliranje procesa obrade* (formiranje matematičkih modela izlaznih veličina matematičko-statističkom metodom i genetskim programiranjem, te struktura modula računalnog programa za GP).
7. *Optimizacija parametara obrade* (optimizacija parametara obrade za grubo i fino uzdužno tokarenje korištenjem dobivenih matematičkih modela i funkcija cilja, a uz pomoć genetskog algoritma, kao i primjena Taguchijeve metode u optimiranju parametara, te struktura modula računalnog programa za GA).
8. *Analiza dobivenih rezultata* (obrada dobivenih rezultata, analiza i usporedba rezultata).
9. *Zaključak* (postignuti ciljevi rada, moguća daljnja industrijska primjena i smjernice za budući rad u ovom području).

#### ✦ *Očekivani rezultati i znanstveni doprinos istraživanja*

U okviru ovog rada bit će izvedena teorijska i eksperimentalna istraživanja kojima se želi pokazati učinkovitost novih metoda u području primjene na obradni proces – tokarenje. Primjenom modeliranja i optimizacije parametara obrade žele se postići rezultati koji će omogućiti predviđanje utjecaja pojedinih ulaznih parametara za dana ograničenja i funkciju cilja i to još u početnoj fazi projektiranja i simuliranja procesa, a kasnije u fazi adaptivnog upravljanja procesom. Upravo jedan takav modul koji će povezivati GP i GA u jednu cjelinu može imati i praktičnu primjenu u industriji. Tako bi rezultati istraživanja bili još značajniji, odnosno mogli bi se integrirati u cjeloviti CAPP (*Computer Aided Process Planning*) sustav.

Očekuje se znanstveni doprinos u dijelu modeliranja istraživanog procesa na temelju originalnih eksperimentalnih rezultata te primjene genetskog programiranja i genetskog algoritma u definiranju originalnih matematičkih modela. Također, očekuje se doprinos u određivanju globalnog optimuma ili užega područja globalnog optimuma za definirane tehnološke parametre i dobivene modele, a pomoću izvorno projektiranoga programskog modula koji će objediniti svojstva GP+GA za probleme uzdužnog tokarenja u više prolaza.



## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Prvi značajniji počeci identifikacije bitnih parametara procesa obrade rezanjem (tokarenjem), kao i ispitivanje njihova utjecaja na izlazne vrijednosti procesa vezani su za dugotrajna istraživanja (1880.-1906.) koja je izveo F. W. Taylor. Također, za ta istraživanja po prvi put vezan je i sistematičan pristup razvoju baze podataka obradivosti materijala iz koje je proizašla i danas korištena formula, kao i njezine modifikacije, o postojanosti alata. Suvremeni počeci primjene optimizacije u procesima obrade također su vezani za tada izvedena eksperimentalna istraživanja, a s ciljem izračuna životnog vijeka alata s obzirom na ekonomske parametre. Stoga se F. W. Taylora s pravom može smatrati pionikom modernog pristupa u obradi rezanjem (primjena modeliranja procesa temeljem eksperimentalno-statističkih metoda) i utemeljiteljem ekonomskog pristupa optimizaciji parametara obrade. I pored značajnih rezultata u to doba, daljnji impuls razvoju tehnika optimizacije kao i njihove praktične primjene dolazi tek u drugoj polovici prošloga stoljeća s radom W. W. Gilberta [1] o ekonomičnosti u obradi rezanjem temeljem kriterija maksimalne proizvodnosti i minimalnog troška izrade, kao i optimalnim vrijednostima brzine rezanja ovisno o korištenom kriteriju.

Kako kvalitetna optimizacija parametara procesa ovisi u prvom redu o adekvatnom/im i pouzdanom/im modelu/ima cijeli se proces optimizacije može podijeliti u dvije faze: identifikacija značajnih parametara procesa i njihov utjecaj na izlaznu veličinu procesa, kao i određivanje optimalne/ih vrijednosti procesa ili njihovih bliskih rješenja.



Modeliranje zahtijeva dobro poznavanje svih utjecajnih parametara procesa i njihovih međudjelovanja kao i odgovarajućih tehnika modeliranja. Jedna od najčešće korištenih, primijenjena i u ovom radu, je statistička metoda modeliranja temeljena na teoriji planiranja eksperimenta i statističkoj obradi rezultata. Iz ovoga područja treba navesti Montgomeryjevu knjigu [2] kao referentnu za područje modeliranja procesa uporabom statističke regresije, ali i za optimizacijsku metodu temeljenu na odzivnoj površini (engl. *Response Surface Methodology*), te rad Boxa i Huntera [3] u kojem je predložen centralni kompozicijski plan eksperimenta za polinomske modele drugoga reda, također primijenjene u ovom radu. Lambert [4] primjenjuje navedene metode na parametre i procese obrade rezanjem i razvija matematički model sile rezanja kod tokarenja pri obradi hladno valjane čelične šipke alatom od tvrdog metala koristeći brzinu rezanja, posmak i dubinu rezanja kao ulazne parametre za optimizaciju, a temeljem kriterija maksimalnog učinka skinute strugotine u jedinici vremena imajući u vidu ograničenje u obliku modela sile rezanja. Hassan [5] prezentira polinomske modele drugoga reda za predviđanje hrapavosti obrađene površine, vibracije alata, snage stroja i vremena obrade kod tokarenja ugljičnog čelika pomoću alata od tvrdog metala bez sredstva za hlađenje i podmazivanje. El Baradie [6] također definira model hrapavosti površine kod obrade sivog lijeva tokarenjem pri jednakoj dubini rezanja, a promjenjivim parametrima brzine, posmaka i radijusa zaobljenja oštice noža s ciljem definiranja optimalne kombinacije parametara po kriteriju maksimalno dopuštenog učinka bez žrtvovanja kvalitete obrađene površine. Također i radovi Choudhuryja [7, 8] obrađuju temu modeliranja hrapavosti površine kao i definiranje obradivosti materijala glede sile rezanja, hrapavosti površine i postojanosti alata. I drugi radovi dokazuju učinkovitost metode modeliranja temeljene na eksperimentalno-statističkoj obradi u kojima se definiraju-predviđaju izlazne veličine procesa obrade tokarenjem kao što su: hrapavost površine [9, 10, 11, 12], postojanost alata [13, 14, 15, 16, 17], sile rezanja [18, 19, 20, 21, 22] ili geometrija alata [23]. U zadnje se vrijeme sve više koriste metode umjetne inteligencije za modeliranje, a u radovima [24, 25, 26, 27] pravi se usporedba s rezultatima dobivenim statističkom metodom čime je potvrđena njezina uspješnost u definiranju i predviđanju tijeka procesa obrade bitnog za stabilnost obradnog sustava.

Druga metoda korištena u ovom radu je Taguchijeva metoda [28] koja temeljem ortogonalnih nizova znatno skraćuje proces prikupljanja i obrade eksperimentalnih podataka te se stoga koristi u procesima planiranja i izvođenja eksperimenta, a u cilju optimizacije postavljenih parametara. Prednosti ove optimizacijske metode [29, 30], koja se značajnije koristi u industriji i znanosti posljednjih 20 godina, vidljive su u sve većem broju praktičnih primjena. Radovi [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40] koji koriste Taguchijevu metodu za optimizaciju parametara različitih procesa obrade također prezentiraju uspješnost takvog pristupa.

Razvoj računalne tehnike omogućio je novi pristup rješavanju problema modeliranja, simulacije i optimizacije. Pored navedenih metoda u radu se primjenjuju i metode evolucijskih algoritama (genetsko programiranje i genetski algoritam) koji su svoju primjenu

našli ne samo u modeliranju i optimizaciji procesa rezanja nego i u procesima planiranja, transportnim problemima, montaži, itd.

Iako je teorijska postavka genetskih algoritama, odnosno primjena oponašanja prirodnog evolucijskog procesa postavljena još u ranim sedamdesetima od strane Hollanda [41], tek u posljednjem desetljeću našla je svoju opće prihvaćenu primjenu u svim područjima ljudskog stvaranja, uključujući posebice tehniku i područje strojarstva. Upravo u tom razdoblju ranih devedesetih, kako je uporaba genetskog algoritma (GA) ili općenito genetskih metoda poprimala sve veću praktičnu primjenu, usporedo je tekao i proces njihova usavršavanja koji je doveo i do pojave genetskog programiranja čije je teorijske postavke u svojim knjigama dao Koza [42, 43]. Među čitavim nizom autora koji su dali značajan teorijski doprinos razvoju evolucijskog algoritma treba istaknuti svakako najcitiranijeg (prema *CitySeer*) među njima Goldberga [44], zatim knjige Michalewicza [45], Gena [46] i autorice Mitchell [47].

Usporedo s teorijskim postavkama genetskog algoritma i genetskog programiranja išla je i praktična primjena, a u slučaju ovog istraživanja analizira se područje obradnih procesa s težištem na parametre obrade tokarenjem i njihovo unapređenje primjenom naprednih metoda modeliranja, simulacije i optimizacije. Među autorima čije radove iz ovoga područja treba svakako navesti, a i njihov značajan doprinos uvođenju novih stohastičkih metoda, poglavito genetskog algoritma, u području optimizacije parametara obrade su Reddy [48], Chen [49, 50], Balič [51], Čuš [52, 53] i Khan [54]. U navedenim je radovima funkcija cilja definirana kao minimum troškova obrade ili kao višekriterijska funkcija kvalitete obrađene površine, troškova obrade i vremena obrade. Kombinacija genetskog algoritma i neuronskih mreža korištena je u području adaptivnog optimizacijskog upravljanja procesom tokarenja, Ko [55] i Chien [56], kao i kod predviđanja mogućeg modela i optimizacije istog u cilju dobivanja optimalnih parametara obrade. Zanimljivu kombinaciju genetskog algoritma i Taguchijeve metode u cilju optimiranja vrijednosti genetskih parametara predstavio je Hsieh [57].

Genetsko programiranje (GP), kao stohastička metoda modeliranja, znatno je manje zastupljena u radovima od genetskog algoritma, ali primjeri dobrog sinergijskog učinka ovih metoda mogu se naći u radovima Brezočnika [58, 59, 60]. Upravo integriranje ove dvije evolucijske metode u cilju pronalaženja adekvatnog matematičkog modela i optimiranja istog prikazano je na primjerima definiranja modela kvalitete obrađene površine. Također kao referencu iz područja GP i GA, s konkretnim primjerima mogućnosti uporabe navedenih metoda, treba navesti knjigu istoga autora [61].

Uporaba ovdje navedenih metoda modeliranja i optimizacije koristit će se u rješavanju problema obrade u više prolaza kod uzdužnog tokarenja, što je poglavito značajno kod izvođenja CAPP-a u uvjetima CNC obrade. Značajan doprinos rješavanju problema modeliranja i optimizacije uporabom genetskog algoritma za obradu u više prolaza dali su u svojim radovima Onwubolu [62, 63], Saravanan [64] i Wang [65].

Također i klasične metode optimizacije: dinamičko programiranje [66], cjelobrojno programiranje [67], kombinacija geometrijskog i linearnog programiranja [68, 69, 70],



nelinearno programiranje [71, 72] itd., korištene su za definiranje optimalnih parametara obrade prema nekim od tehno-ekonomskih kriterija.

Kako je analizom literaturnih podataka utvrđena nedovoljna istraženost kombinacije metoda GP+GA u problemima modeliranja i optimizacije obrade rezanjem u više prolaza (uglavnom je zastupljena kombinacija neuronske mreže i genetskog algoritma ili samo genetski algoritam), to će se u ovom radu upravo korištenjem ovih metoda pristupiti rješavanju problema optimizacije parametara obrade uzdužnim tokarenjem u više prolaza.

### 3. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE I ANALIZA PROCESA I PARAMETARA OBRADE

#### 3.1. ANALIZA PROCESA OBRADE

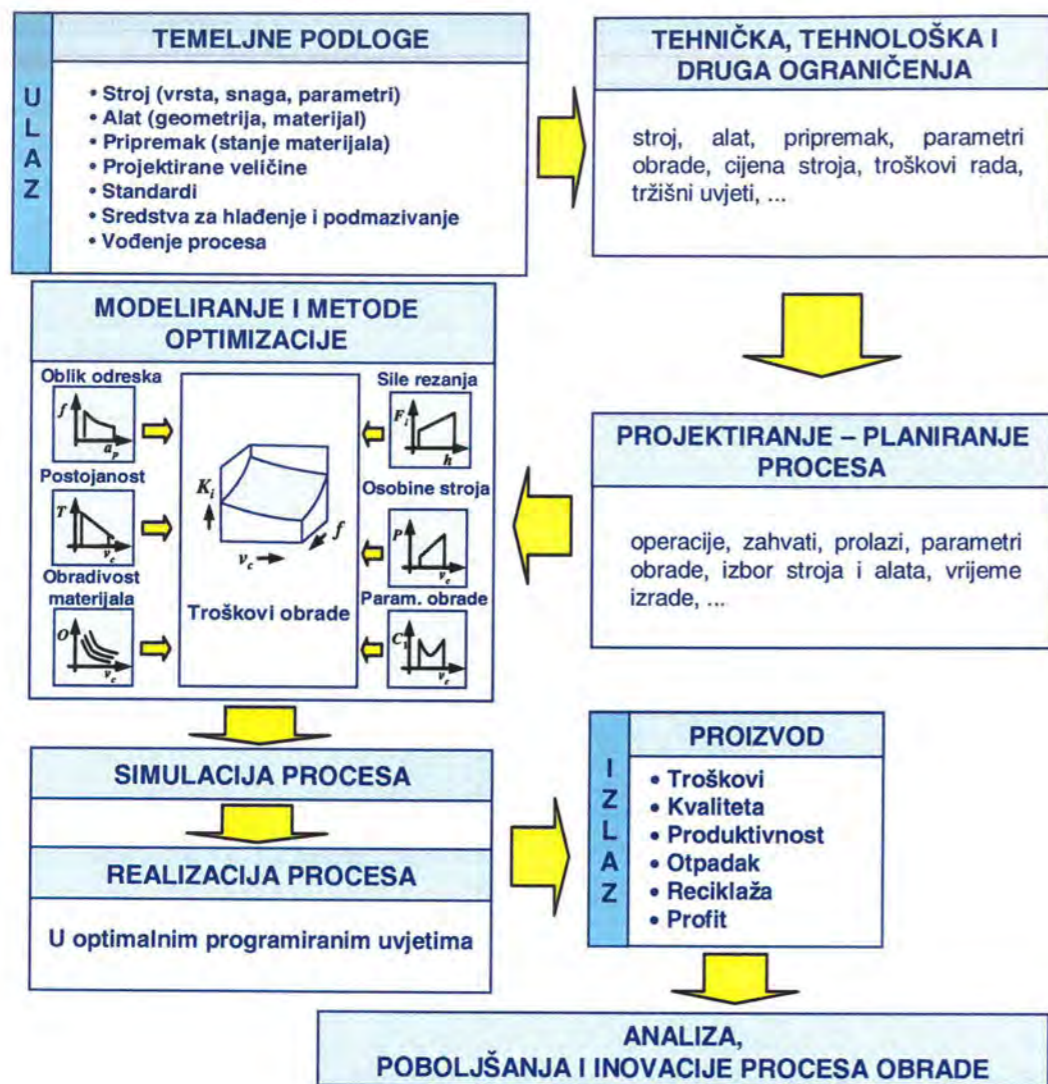
Analiza procesa obrade (slika 3.1.) izvodi se s jedne strane zbog postignuća optimalnosti:

- tehničkih parametara (točnost mjera i oblika, kvaliteta obrađene površine, potrebna energija i sila opterećenja obradnog sustava, itd.),
- tehnoloških parametara (postupak obrade, parametri obrade, izbor stroja i alata, vrijeme izrade, geometrija oštrice i materijal alata, postojanost alata, oblik i vrsta priprema, tehnološke bazne površine oslanjanja i stezanja, oblik odvojene čestice materijala, sredstvo za hlađenje i podmazivanje, itd.) i
- ekonomskih parametara (troškovi izrade po jednom komadu, ukupni troškovi, ukupni prihod, profit, obujam proizvodnje, serija obradaka, itd.),

te s druge strane zbog:

- planiranja procesa izrade (operacije, zahvati i prolazi, tehnološki slijed postupaka obrade, ciklus obrade, koncentracija zahvata, itd.) i
- identifikacije procesa obrade kako bi se izvelo matematičko modeliranje, optimiranje i simuliranje procesa.





Slika 3.1. Analiza procesa obrade uz tehnička, tehnološka i druga ograničenja

### 3.2. OSNOVNI PARAMETRI PROCESA OBRADNE

Parametri procesa obrade detaljnije determiniraju proces koji svojim intenzitetom i utjecajem manje ili više proces obrade približavaju optimalnim vrijednostima [16, 18, 31, 32, 73-80].

Neki su od osnovnih parametara procesa obrade:

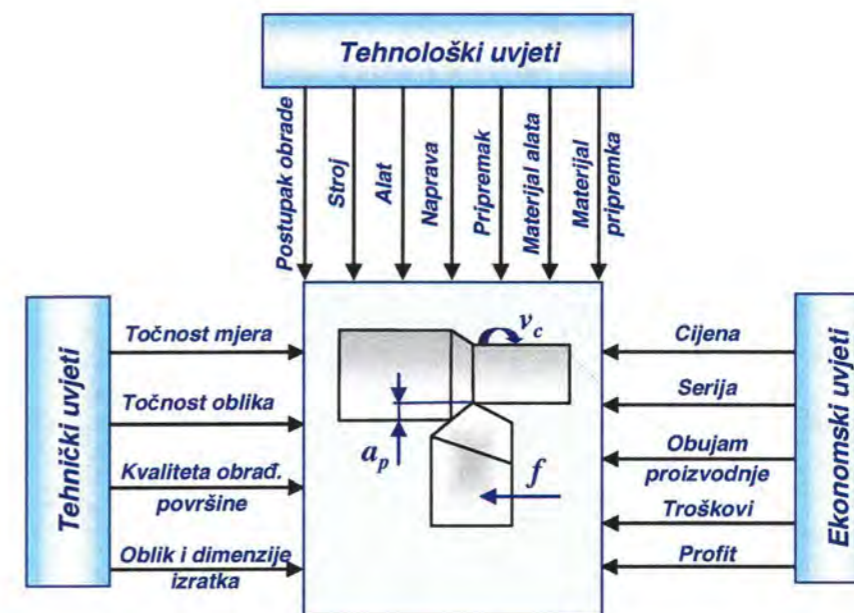
- *alatni stroj* → snaga ( $P$ ), frekvencija vrtnje ( $n$ ), krutost stroja ( $K$ ) i točnost ( $\Delta\sigma$ ),
- *reznici alati* → geometrija ( $G_a$ ), postojanost ( $T$ ), materijal alata,
- *parametri obrade* → brzina rezanja ( $v_c$ ), posmak ( $f$ ), dubina rezanja ( $a_p$ ), sredstvo za hlađenje i podmazivanje ( $SHIP$ ),

- *kvaliteta i kvantiteta procesa* → učinak ( $MRR$ ), ukupni troškovi izrade ( $C_u$ ), kvaliteta obrađene površine ( $R_a$ ), sile procesa ( $F_i$ ), količina izradaka ( $Q$ ), jedinično vrijeme izrade ( $t_1$ ),
- *pripremak* → vrsta i stanje materijala, mehaničke i kemijske osobine, način izrade priprema (otpresak, otkivak, odljevak, itd.), oblik i dimenzije, stupanj iskoristivosti, obradivost materijala.

Pri projektiranju tehnološkog procesa obrade, pored ostalih elemenata procesa, određuju se parametri obrade za svaki zahvat. Oni ovise o postupku obrade, materijalu obratka, kategoriji obrade (gruba ili fina obrada), odabranom reznom alatu, obradnom sustavu, itd. Svaki postupak obrade odvajanjem čestica ima osnovne parametre obrade:

- brzina rezanja  $v_c$ , m/min,
- posmak  $f$ , mm,
- dubina rezanja  $a_p$ , mm.

Određivanje parametara obrade rezanjem ovisi o velikom broju faktora, koji se mogu grupirati prema tehničkim, tehnološkim i ekonomskim utjecajima na proces obrade (slika 3.2.) [77, 79].



Slika 3.2. Utjecajni faktori na parametre obrade rezanjem

Parametri obrade određuju se temeljem preporuka proizvođača alata ili detaljnom analizom uz primjenu funkcija obradivosti. Povećanje učinka parametara obrade može se ostvariti povećanjem brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja pojedinačno ili povećanjem svih parametara istodobno. Povećanje parametara obrade utječe na postojanost alata, utrošak energije stroja, glavno vrijeme obrade, kvalitetu i kvantitetu obrade.



### 3.2.1. Sile u postupku obrade uzdužnim tokarenjem

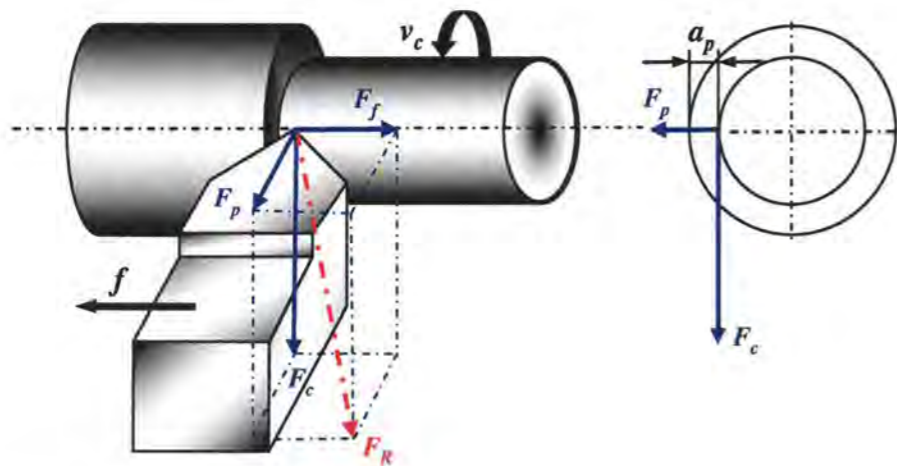
Poznavanjem sile rezanja moguće je definirati:

- potreban rad i snagu pogonskih motora stroja,
- proračun prijenosnog mehanizma od motora do glavnoga radnog vretena,
- dimenzije reznog alata i provjeru stabilnosti alata,
- uvjete obrade (parametre obrade),
- točnost i provjeru mogućnosti obrade na određenom stroju.

#### Metode određivanja sile rezanja

Postoji više metoda za određivanje sile rezanja:

- analitička metoda, koja polazi od modela plastične deformacije u zoni odvajanja čestica materijala, daje vrlo složene i samo približno točne modele zbog usvojenih aproksimacija, pa je potrebna i eksperimentalna provjera [75, 76];
- regresijska metoda temelji se na matematičkoj teoriji plana eksperimenta i statističko-stohastičkom modeliranju procesa [16, 18, 22, 23, 33, 74, 81];
- modeliranje primjenom teorije dimenzionalnosti i eksperimenta [74, 82, 83];
- eksperimentalna metoda (mjerenje pomoću odgovarajućih senzora) predstavlja mjerenje sile u realnom procesu obrade ili laboratorijskim uvjetima [74, 84];
- numerička metoda (metoda konačnih elemenata) omogućuje definiranje sile uz primjenu odgovarajućih softvera i računala [74, 85].



Slika 3.3. Sile kod postupka obrade tokarenjem:  $F_c$  - glavna sila rezanja,  $F_f$  - posmična sila,  $F_p$  - sila prodiranja

Rezultantna sila rezanja i njezine komponente kao na slici 3.3. mogu se izračunati na temelju izraza

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}, \quad (3.1)$$

$$F_c = A \cdot f_c, \quad (3.2)$$

$$F_f = A \cdot f_f, \quad (3.3)$$

$$F_p = A \cdot f_p, \quad (3.4)$$

ili pomoću parametara obrade ( $a_p, f, n$ )

$$F_i = C_i \cdot a_p^x \cdot f^y \cdot n^z, \quad (3.5)$$

$$F_i = C_i \cdot a_p^x \cdot f^y, \quad (3.6)$$

gdje su:  $C_i$  - konstanta ovisna o vrsti materijala obratka,  $N/mm^2$ ,

$x, y, z$  - eksponenti ovisni o materijalu obratka i uvjetima obrade,

$A$  - površina presjeka odvojene strugotine,  $mm^2$ ,

$f_c$  - jedinična glavna sila rezanja,  $N/mm^2$ ,

$f_f$  - jedinična posmična sila rezanja,  $N/mm^2$ ,

$f_p$  - jedinična sila prodiranja pri rezanju,  $N/mm^2$ ,

$F_i$  - komponente rezultantne sile rezanja ( $i = 1, 2, 3$ , odnosno  $F_1 = F_c, F_2 = F_f$  i  $F_3 = F_p$ ),  $N$ .

Neki su od empirijskih izraza:

$$\text{- Taylor (1920.) [75]} \quad F_i = C_{ki} \cdot a_p^x \cdot f^y, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.7)$$

$$\text{- Hippler (1925.)} \quad F = K \cdot A^f, \quad (3.8)$$

$$\text{- Kronenberg (1927.)} \quad F_i = k_s \cdot A = \frac{C_{ks} \cdot A}{A^{f_s}} = C_{ks} \cdot A^{(1-f_s)}, \quad (3.9)$$

$$\text{ili (1966.) [86]} \quad F_i = \frac{C_k \cdot A}{\varepsilon_k \sqrt{A}} = C_k \cdot A^{1-\frac{1}{\varepsilon_k}}, \quad (3.10)$$

Veza između Taylorovih koeficijenata i Kronenbergova koeficijenta je [73]:

$$\frac{1}{\varepsilon_k} = 0,5 \cdot (x + y), \quad (3.11)$$

- Kienzle i Vector (1952.) [87] predložili su specifičnu silu rezanja u obliku

$$f_s = f_{s(1 \times 1)} \cdot h^{-z}, \quad (3.12)$$

te je glavna sila rezanja

$$F_c = a_p \cdot f \cdot f_s = b \cdot h \cdot f_s = b \cdot h^{1-z} \cdot f_{s(1 \times 1)}, \quad (3.13)$$

gdje su:  $f_{s(1 \times 1)}$  - specifična sila rezanja za  $A = 1 \text{ mm}^2$ , odnosno za širinu čestice  $b = 1 \text{ mm}$  i debljinu  $h = 1 \text{ mm}$ ,  $N/mm^2$ ,

$z$  - eksponent Kienzleova izraza ( $z = 0,13 - 0,35$ ).



Promjene širine i debljine odvojene čestice materijala u ovisnosti o kutu namještanja alata prikazane su na slici 3.4. Vrijedi:

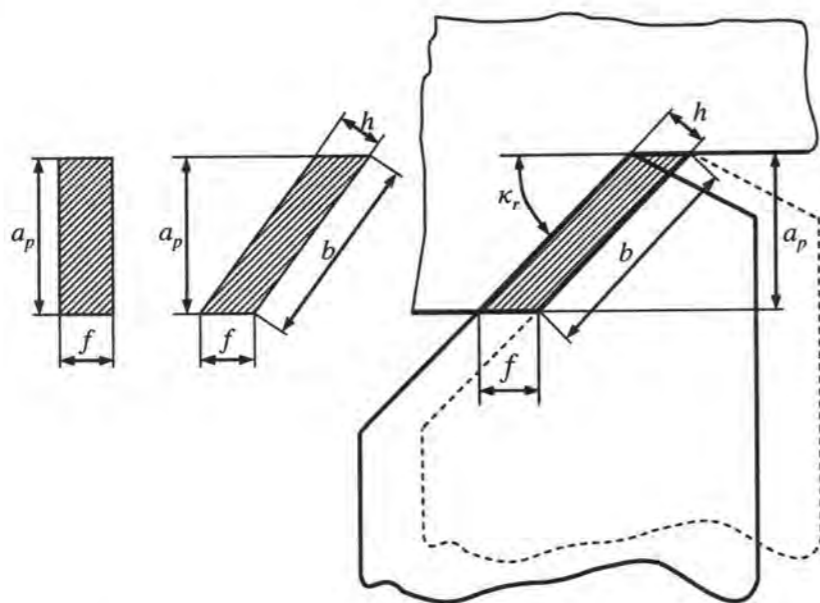
$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ i } h = f \cdot \sin \kappa_r, \quad (3.14)$$

- König i Essel analogno su definirali druge dvije komponente, posmičnu silu i silu prodiranja, u obliku:

$$F_f = b \cdot h^{1-y} \cdot f_{f(1 \times 1)}, \quad (3.15)$$

$$F_p = b \cdot h^{1-x} \cdot f_{p(1 \times 1)}, \quad (3.16)$$

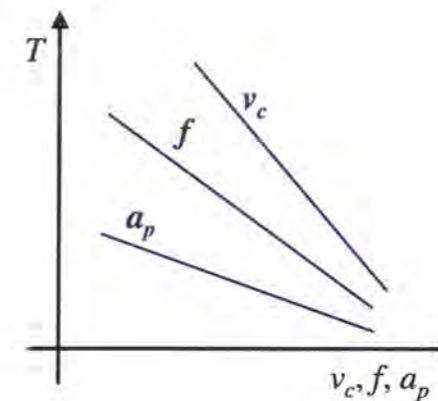
Vrijednosti za čelične materijale [87] iznose:  $1 - x = 0,20 - 0,40$  i  $1 - y = 0,37 - 0,60$  odnosno  $f_{s(1 \times 1)} = 1800 - 2600 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{f(1 \times 1)} = 230 - 330 \text{ N/mm}^2$  i  $f_{p(1 \times 1)} = 290 - 400 \text{ N/mm}^2$ .



Slika 3.4. Geometrija presjeka čestice materijala

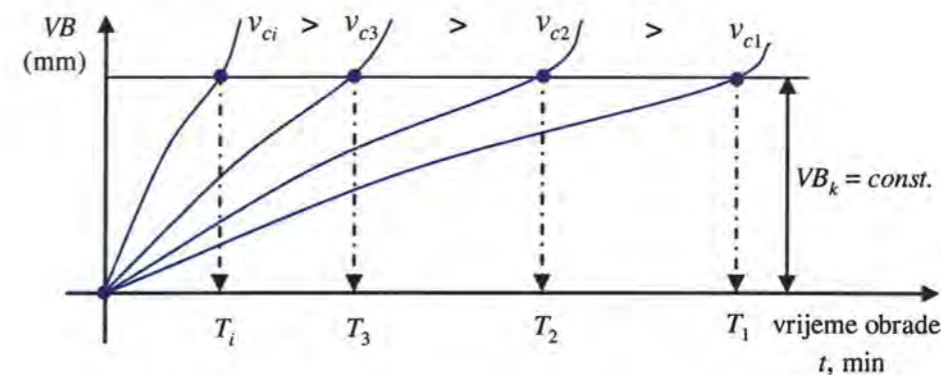
### 3.2.2. Postojanost alata

Postojanost alata predstavlja stvarno vrijeme obrade do postizanja kriterija istrošenja alata, a ovisi o više parametara od kojih su neki: parametri obrade ( $v_c, f, a_p$ ), geometrija alata ( $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, r_e, \kappa_r$ ), materijal alata i obratka, način hlađenja i sredstvo za hlađenje i podmazivanje, vibracije u procesu rezanja, te sile procesa obrade. Opća ovisnost postojanosti alata o parametrima obrade prikazana je na slici 3.5. [15, 73, 79, 88-94].



Slika 3.5. Ovisnost postojanosti alata o parametrima obrade

Da bi se odredila postojanost alata u ovisnosti o brzini rezanja potrebno je usvojiti kriterij pojasa istrošenosti stražnje površine alata  $VB_k$ , slika 3.6.



Slika 3.6. Krivulje istrošenosti alata za različite brzine rezanja  $v_{ci}$

Kriteriji istrošenosti su linijski parametri  $VB_i$  od kojih je srednja vrijednost širine pojasa trošenja na stražnjoj površini alata  $VB$  i maksimalna širina pojasa trošenja  $VB_{max}$ . Kod procesa tokarenja vrijednosti su [75, 84]:

- za alate od brzoreznog čelika pri obradi čelika  $VB = 0,8 - 1,0 \text{ mm}$ ,  $VB_{max} = 2,5 \text{ mm}$ ;
- za alate od brzoreznog čelika pri obradi sivog lijeva  $VB = 1,4 - 1,7 \text{ mm}$  pri  $f < 0,3 \text{ mm/okr.}$  i  $VB = 0,8 - 1,0 \text{ mm}$  pri  $f > 0,3 \text{ mm/okr.}$ ;
- za alate od tvrdog metala  $VB = 0,4 \text{ mm}$ ,  $VB_{max} = 0,8 \text{ mm}$ ;
- za alate od keramike  $VB_{max} = 0,6 \text{ mm}$ .

#### ✚ Osnovni modeli postojanosti alata [73, 75, 86]

Taylorova jednadžba postojanosti alata definira ovisnost postojanosti alata  $T$  o brzini rezanja  $v_c$  (1907.) [75]:

$$v_c \cdot T^m = C_v, \quad (3.17)$$



Proširena jednadžba Taylora osim utjecaja brzine rezanja  $v_c$  na postojanost alata  $T$  uzima u obzir i utjecaje posmaka  $f$  i dubine rezanja  $a_p$ , pa ima oblik:

$$- \text{Gilbert (1950.)} \quad v_c \cdot T^m = \frac{C}{f^{x_1} \cdot a_p^{y_1}}, \quad (3.18)$$

$$- \text{Kronenberg (1968.)} \quad (v_c + k) \cdot T^m = C_r, \quad (3.19)$$

$$- \text{König i Depiereux (1969.)} \quad T = e^{\left(\frac{k_c \cdot v_c^m}{m} - \frac{1}{n} f^n + C\right)}, \quad (3.20)$$

$$- \text{Berger (1970.)} \quad v_c = C_e \cdot T^a \cdot D^b \cdot f^e, \quad (3.21)$$

$$- \text{Draghici/Paltanea (1974.)} \quad T = \frac{K^{\frac{1}{\alpha}} \cdot D^{\frac{\gamma}{\alpha}}}{v_c^{\frac{1}{\alpha}} \cdot f^{\frac{\beta}{\alpha}}}, \quad (3.22)$$

$$- \text{EXAPT (simbolički jezik)} \quad v_c \cdot T^m \cdot f^x \cdot a_p^y = C_1. \quad (3.23)$$

Izraz (3.23) može se transformirati u oblik

$$T = \frac{k_T}{v_c^{a_T} \cdot f^{\beta_T} \cdot a_p^{\gamma_T}}, \quad (3.24)$$

odnosno model koji može poslužiti za matematičko modeliranje postojanosti alata

$$T = C_t \cdot v_c^x \cdot f^y \cdot a_p^z. \quad (3.25)$$

U gornjim su izrazima:

$C_t, k_T, C_1$  - konstante ovisne o vrsti materijala obratka i alata, geometriji odvojene čestice i uvjetima obrade, a određuju se nizom eksperimenata,

$x, y, z, k_v, a_T, \beta_T, \gamma_T$  - eksponenti ovisni o materijalu obratka i alata te uvjetima obrade, a određuju se eksperimentima,

$m$  - Taylorov eksponent ovisan o materijalu obratka, alata i uvjetima obrade.

### ✚ Modeli postojanosti alata dobiveni modeliranjem

Modeli dobiveni matematičkim modeliranjem imaju sve veću primjenu u znanstvenim istraživanjima i inženjerskoj praksi zbog svoje točnosti i pouzdanosti. Tako su nastali i modeli koje navodimo u nastavku.

Kuljanić [90] je definirao jednadžbu postojanosti alata za glodanje nehrđajućeg čelika alatom od tvrdog metala u obliku

$$T = C \cdot v_c^{k_v} \cdot s_z^{k_s} \cdot z^{k_z} \cdot S^{k_S}, \quad (3.26)$$

gdje su:  $C$  - konstanta,

$v_c$  - brzina rezanja,

$s_z$  - posmak po zubu,

$z$  - broj zubi glodala,

$S$  - krutost obradnog sustava.

Cukor [16] je definirao jednadžbu postojanosti alata od tvrdog metala za postupke tokarenja i glodanja, a pri obradi različitih čeličnih materijala u obliku

$$T = e^{b_0} \cdot v_c^{b_1+b_2 \cdot \ln v_c} \cdot f^{b_3+b_4 \cdot \ln f} \cdot a_p^{b_5+b_6 \cdot \ln a_p}, \quad (3.27)$$

gdje su:  $b_i$  - koeficijenti modela dobiveni eksperimentalnim putem,

$v_c$  - brzina rezanja,

$f$  - posmak po okretaju ili zubu,

$a_p$  - dubina rezanja.

U radu [23] prikazani su stohastičko modeliranje i optimizacija rezne geometrije alata za tokarenje na temelju modeliranja maksimalne postojanosti alata. U eksperimentalnom istraživanju uporabljen je materijal obratka Č1730 poboljšan na 260 HB. Eksperimentalni rezultati obrađeni su višestrukom regresijskom analizom koja je potvrdila adekvatnost i točnost definirana matematičkog modela

$$T = T_{\max} = f(\alpha, \varepsilon_r, \kappa_r)_{\text{opt}},$$

gdje su:  $\alpha$  - stražnji kut (kodirana veličina  $X_{1j}$ ),

$\varepsilon_r$  - čeonni kut (kodirana veličina  $X_{2j}$ ),

$\kappa_r$  - kut namještanja (kodirana veličina  $X_{3j}$ ).

Na osnovi izraza  $T = f(\alpha, \varepsilon_r, \kappa_r) = f(X_1, X_2, X_3)$  matematički model polinomne funkcije pomoću regresijskih koeficijenata  $b_i, b_{ii}, b_{ij}, b_{ijm}$  imao je oblik:

$$Y = \sum_{i=0}^k b_i \cdot X_i + \sum_{1 \leq i < j}^k b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j < m}^k b_{ijm} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_m.$$

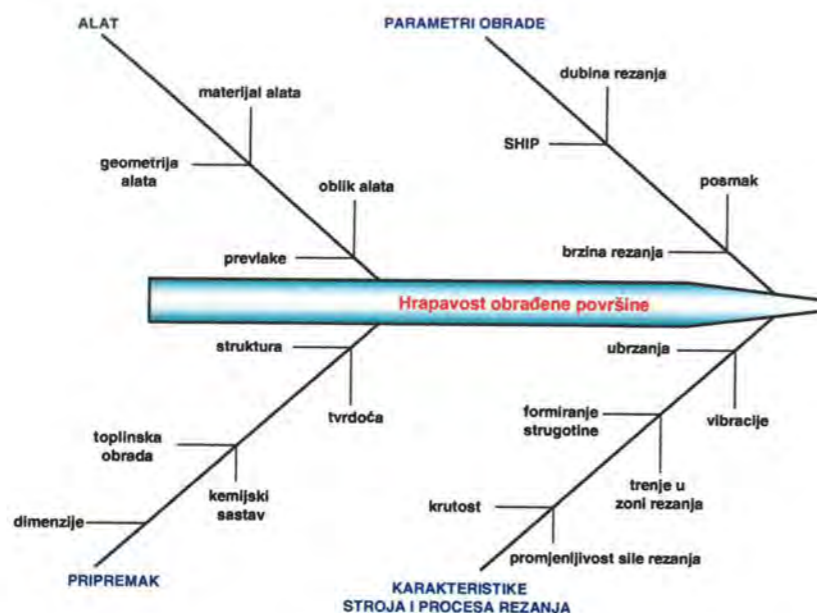
Nakon izvedenog postupka matematičkog modeliranja dobiven je model postojanosti alata za uzdužno tokarenje u obliku:

$$T = -91,77 + 1,79 \cdot \alpha + 1,827 \cdot \varepsilon_r + 0,857 \cdot \kappa_r - 0,12 \cdot \alpha^2 - 0,009 \cdot \varepsilon_r^2 - 0,0073 \cdot \kappa_r^2. \quad (3.28)$$

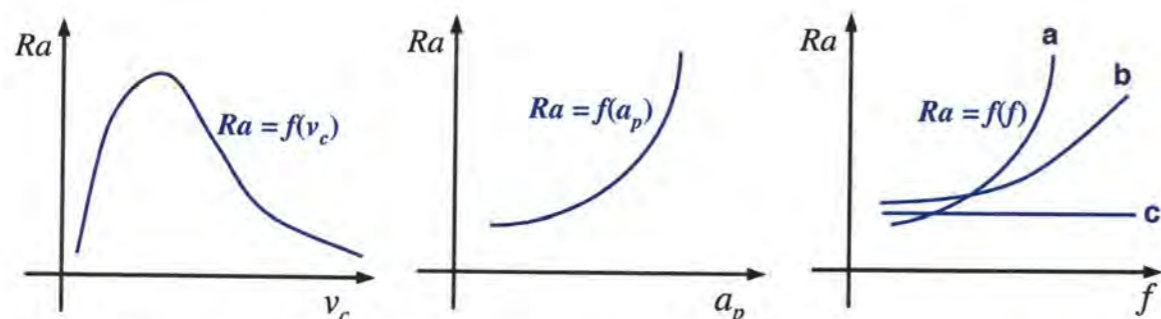
### 3.2.3. Mikrogeometrija obrađene površine

Velik broj signifikantnih parametara utječe na hrapavost obrađene površine, slika 3.7. Njihovim upravljanjem moguće je dobiti potrebne vrijednosti hrapavosti ( $R_a, R_z, R_y, R_q, \dots$ ) [73, 75, 95, 96]. Stvarna površina oslanjanja ovisi o hrapavosti i postupku obrade, pa tako npr. za visinu mikroneravnina od 2,5 - 8  $\mu\text{m}$  (brušenje) dodirna površina iznosi 10%, pri visini od 0,8 - 2,5  $\mu\text{m}$  površina oslanjanja iznosi 40%, dok za finu obradu (fino brušenje, superfiniš) površina oslanjanja dosegne i do 90%.



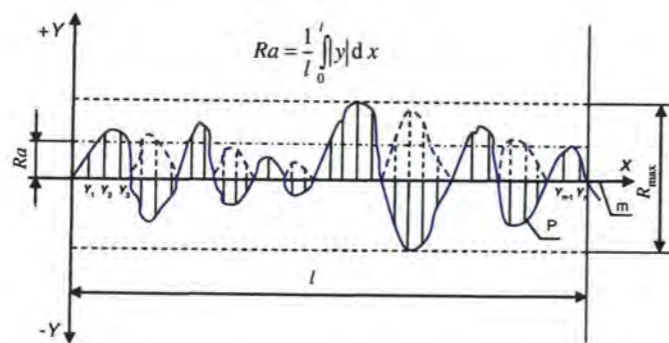


Slika 3.7. Skupina utjecajnih parametara na hrapavost obrađene površine



Slika 3.8. Utjecaj brzine, dubine i posmaka na parametar hrapavosti  $Ra$ : a) tokarenje  $r_\epsilon = 2$  mm i  $\kappa_r = 45^\circ$ , b) bušenje i glodanje, c) tokarenje sa širokom reznom oštricom [84]

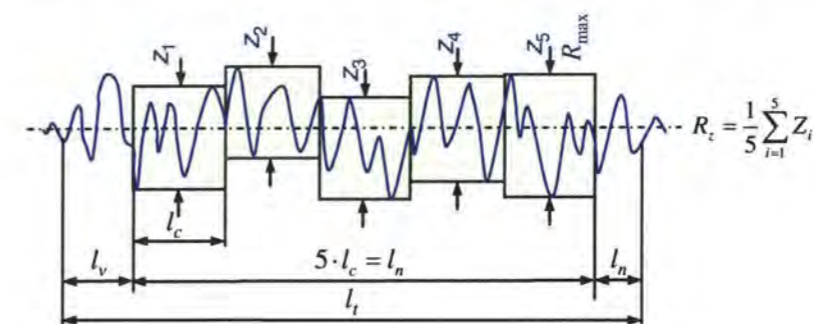
Srednje prosječno odstupanje profila  $Ra$  je srednja aritmetička apsolutna vrijednost odstojanja svih točaka efektivnog profila od srednje linije (m) u granicama referentne dužine, slika 3.9.



Slika 3.9. Srednje prosječno odstupanje profila  $Ra$

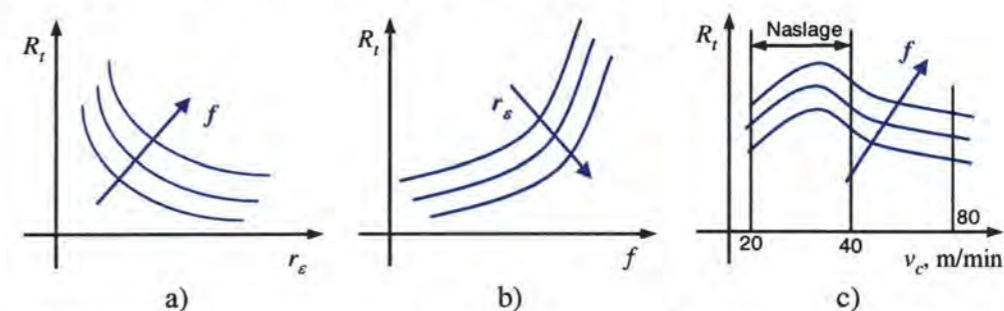
Maksimalna vrijednost neravnina  $R_{max}$  je razmak između dvaju pravaca paralelnih sa srednjom linijom, tako povučenih da u granicama referentne dužine dodiruju najvišu, odnosno najnižu točku profila, slika 3.9.

Srednja visina neravnina u 10 točaka  $R_z$  je razlika između srednje aritmetičke vrijednosti 5 najviših i 5 najnižih točaka profila u granicama referentne dužine, slika 3.10.



Slika 3.10. Srednja visina neravnina u 10 točaka

Osnovni utjecajni parametri na hrapavost obrađene površine su: radijus zaobljenja vrha oštrice alata  $r_\epsilon$ , posmak  $f$  i brzina rezanja  $v_c$ , slika 3.11.



Slika 3.11. Utjecajni parametri na teorijsku hrapavost obrađene površine  $R_t$ : a) posmak, b) radijus zaobljenja vrha oštrice alata, c) brzina rezanja

Dubina rezanja  $a_p$  utječe na promjenu visine neravnina obrađene površine preko promjene temperature, nastajanja naslage na oštrici alata, deformiranja čestice materijala obratka te krutosti obradnog sustava.

#### Matematički modeli hrapavosti obrađene površine

Matematički su modeli za određivanje hrapavosti obrađene površine [39, 74, 95]

$$Ra = K_s \cdot v_c^a \cdot f^b \cdot a_p^c, \quad (3.29)$$

$$Ra = C_R \cdot v_c^x \cdot f^y \cdot r_\epsilon^z, \quad (3.30)$$

gdje su:  $r_\epsilon$  - radijus zaobljenja vrha oštrice noža,

$K_s, C_R$  - konstante ovisne o materijalu obratka, materijalu alata i vrsti sredstva za hlađenje i podmazivanje,



- $\alpha$  - stražnji kut reznoga klina alata, °,  
 $\beta$  - kut reznoga klina alata, °,  
 $\gamma$  - prednji kut alata, °.

Temeljem teorije plana eksperimenata i multiregresijske analize postoje modeli hrapavosti obrađenih površina s dvije varijable

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y, \quad (3.31)$$

s tri varijable

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y \cdot v_c^z, \quad (3.32)$$

$$Ra = C \cdot f^x \cdot a_p^u \cdot v_c^z, \quad (3.33)$$

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y \cdot t^m, \quad (3.34)$$

s četiri varijable

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y \cdot v_c^z \cdot a_p^u, \quad (3.35)$$

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y \cdot v_c^z \cdot t^m, \quad (3.36)$$

ili s pet varijabli

$$Ra = C \cdot f^x \cdot r_e^y \cdot v_c^z \cdot a_p^u \cdot t^m, \quad (3.37)$$

gdje je:  $t$  - vrijeme rezanja.

S relativno malo eksperimenata moguće je doći do konkretnih i uporabljivih modela koji pokazuju ovisnost hrapavosti obrađene površine o parametrima režima obrade.

### 3.2.4. Učinak skidanja materijala procesa obrade (MRR)

Učinak se obično mjeri ukupnim vremenom koje je potrebno za izradu jednog izratka  $t_i$  ili količinom skinutog materijala [96]. Pri uzdužnom tokarenju učinak skidanja materijala *MRR* (engl. *Material Removal Rate*) u  $\text{cm}^3/\text{min}$  iznosi:

$$MRR = \pi \cdot D_{sr} \cdot a_p \cdot f \cdot n = a_p \cdot f \cdot v_{csr}, \quad (3.38)$$

$$D_{sr} = \frac{D_0 + D_1}{2} \text{ i } v_{csr} = \pi \cdot D_{sr} \cdot n, \quad (3.39)$$

gdje su:  $v_{csr}$  - srednja brzina rezanja, m/min,

$n$  - frekvencija vrtnje obratka,  $\text{min}^{-1}$ ,

$D_{sr}$  - srednji promjer rezanja, mm,

$D_0, D_1$  - promjer priprema i promjer obrađene površine, mm.

### 3.2.5. Proizvodnost procesa rezanja – jedinično vrijeme izrade

Prema [16, 75] izraz za jedinično vrijeme izrade je

$$t_1 = t_g + t_a + t_n = t_g + t_a + (t_{ps}/N_s) + t_{ss} + t_p + t_{ph}, \quad (3.40)$$

gdje su:  $t_g$  - glavno strojno vrijeme obrade (čisto vrijeme obrade), min,

$t_a$  - vrijeme zamjene i postavljanja alata svedeno na jedan izradak (komadno alatno vrijeme), min,

$t_n$  - vrijeme podešavanja neovisno o parametrima obrade, min,

$t_{ps}$  - ukupno vrijeme pripreme alatnog stroja, min,

$t_{ss}$  - vrijeme stavljanja i skidanja obratka, min,

$t_p$  - vrijeme pozicioniranja (vrijeme do zahvata alata i obratka), min,

$t_{ph}$  - vrijeme povratnog hoda, min,

$N_s$  - broj izradaka u seriji.

Izraz za glavno strojno vrijeme obrade u općem obliku za vanjsko uzdužno tokarenje je

$$t_g = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{L_v}{v_c} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{v_c \cdot f}, \quad (3.41)$$

ili za  $j$  prolaza

$$t_g = \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cj} \cdot f_j}, \quad j = 1, 2, \dots, i, \quad (3.42)$$

$$D_j = D_{j-1} - 2a_{pj},$$

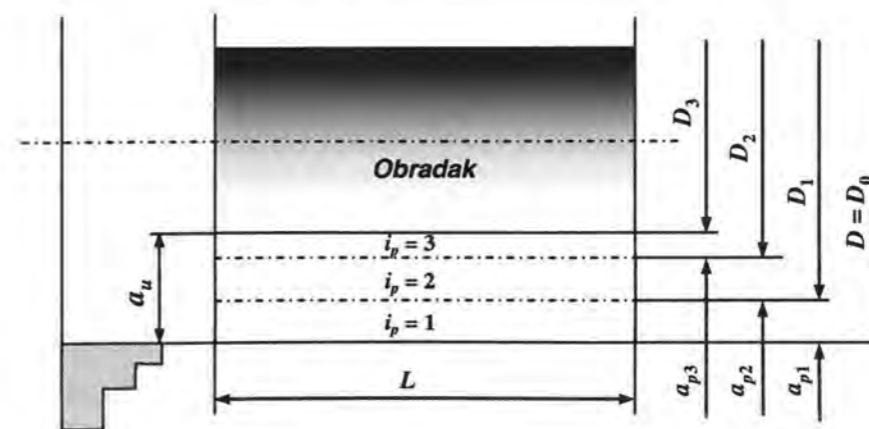
gdje su:  $D_j$  - promjer dobiven nakon svakog prolaza ( $j = 1, 2, \dots, i$ ), mm,

$D = D_0$  - početni promjer obratka, mm,

$a_{pj}$  - dubina rezanja po  $j$ -tom prolazu, mm,

$L$  - dužina prolaza obrade, mm (slika 3.12.),

$L_v$  - dužina u smjeru glavnoga gibanja obratka, mm.



Slika 3.12. Promjeri obratka po svakom od prolaza



Vrijeme izmjene alata svedeno na jedan komad je

$$t_a = \frac{t_{al}}{Z_T} = \frac{t_{al}}{T} \cdot t_g = \frac{t_{al}}{T} \cdot \frac{L_v}{v_c} = \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cj} \cdot f_j} \cdot \frac{t_{al}}{T_j}, \quad (3.43)$$

gdje je:  $T_j$  - postojanost alata u j-tom prolazu, min.

Vrijeme neovisno o parametrima obrade:

$$t_n = \frac{t_{ps}}{N_s} + t_{ss} + t_p + t_{ph}, \quad (3.44)$$

$$t_{ph} = \frac{L_{ph}}{v_{ph}} \cdot i_p. \quad (3.45)$$

Temeljem izraza (3.40 - 3.45) dobiva se jedinično vrijeme izrade pri uzdužnom tokarenju

$$t_1 = t_g + t_a + t_n = \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cj} \cdot f_j} + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cj} \cdot f_j} \cdot \frac{t_{al}}{T_j} + \frac{t_{ps}}{N_s} + t_{ss} + \left(t_p + \frac{L_{ph}}{v_{ph}}\right) \cdot i_p, \quad (3.46)$$

ili u sređenom obliku

$$t_1 = \frac{t_{ps}}{N_s} + t_{ss} + \left(t_p + \frac{L_{ph}}{v_{ph}}\right) \cdot i_p + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cj} \cdot f_j} \cdot \left(1 + \frac{t_{al}}{T_j}\right), \quad (3.47)$$

gdje su:  $t_{al}$  - vrijeme jednokratne zamjene i postavljanja alata, min,

$Z_T$  - broj obrađenih komada između dviju zamjena alata ili za vrijeme postojanosti alata  $T$ ,

$L_{ph}$  - ukupni put alata u smjeru povratnog hoda, mm,

$v_{ph}$  - programirana brzina povratnog hoda, mm/min,

$i_p$  - ukupan broj prolaza.

### 3.3. METODE DEFINIRANJA PARAMETARA OBRADNE

Prema zahtjevima moderne proizvodnje i tehno-ekonomske analize operacija obrade, u fazi projektiranja procesa potrebno je definirati optimalne parametre obrade kako bi se ostvarili minimalni troškovi ili minimalno vrijeme izrade [23, 73].

Pri određivanju parametara obrade potrebno je osigurati definiranu kvalitetu i ekonomičnost procesa. Pri tome se često polazi od tehnoloških i tehničkih zahtjeva kada se parametri obrade određuju s obzirom na krutost ili iskoristivost instalirane snage obradnog sustava.

Postoji više poznatih metoda za određivanja parametara obrade od kojih su neke:

1. tablične i nomogramске metode;

2. analitička metoda;
3. metoda modeliranja pomoću planova eksperimenta;
4. metoda troškova;
5. metoda funkcija ograničenja;
6. metoda baza tehnoloških podataka.

Optimalni parametri obrade mogu se odrediti na temelju kriterija:

- minimalnog vremena izrade, odnosno maksimalne produktivnosti,
- minimalnih troškova izrade po jednom komadu, odnosno maksimalne ekonomičnosti, te
- maksimalnog profita.

Također, kriterij maksimalne snage rezanja dolazi u obzir kada treba povećati proizvodnost neke od operacija koja može biti usko grlo proizvodnje (maksimalna snaga bez obzira na troškove).

#### ✚ Izbor dubine rezanja

Dubina rezanja ovisna je o kategoriji obrade, a mora biti dovoljna za postizanje traženih točnosti za dotični prolaz (zahvat). Kod grube obrade treba po potrebi ostaviti dodatak za završnu obradu.

Veća dubina reza ima za posljedicu:

- bolju iskoristivost cijele dužine rezne oštrice alata,
- pri konstantnoj površini strugotine manju debljinu odreska, tj. opterećenje je raspoređeno na veću dužinu rezne oštrice alata pa je veća postojanost,
- manji broj prolaza, pa je kraće pomoćno vrijeme za postavljanje alata.

Veća dubina rezanja ima ograničenja:

- veće su sile rezanja,
- veće su deformacije elemenata obradnog sustava i
- veće su vibracije obradnog sustava.

#### ✚ Izbor posmaka

Tehnološka su ograničenja za izbor posmaka:

- sila rezanja je određena oblikom i veličinom površine poprečnog presjeka strugotine i mora biti:
  - manja od dopuštene sile s obzirom na čvrstoću alata,
  - manja od dopuštene sile s obzirom na krutost obradnog sustava,
  - u skladu s dopuštenom silom stezanja obratka,
- treba uzeti u obzir dopuštenu hrapavost obrađene površine za dotični prolaz alata,
- odnos  $(a_p/f)$  držati u preporučenim granicama.

#### ✚ Izbor brzine rezanja

Brzina rezanja određuje se nakon izbora dubine rezanja i posmaka. Kriterij za izbor brzine rezanja može biti maksimalna ekonomičnost, što se ostvaruje ekonomskim procesom rezanja



$$v_{ce} = \frac{C_v}{T_e^m \cdot a_p^x \cdot f^y}, \quad (3.48)$$

gdje su:  $T_e$  - ekonomska postojanost alata, min,  
 $v_{ce}$  - ekonomska brzina rezanja, m/min.

Kad izabrani obradni sustav ne može raditi u ekonomičnom procesu rezanja zbog nedovoljne snage pogonskog elektromotora  $P_S$ , tada treba korigirati parametre obrade tako da se smanjuje brzina rezanja do vrijednosti pune iskoristivosti stroja (dubina rezanja i posmak obično se ne smanjuju), pa vrijedi

$$v_{cS} = \frac{P_S \cdot \eta}{F_c} = \frac{P_S \cdot \eta}{C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1}}, \quad (3.49)$$

gdje su:  $v_{cS}$  - brzina rezanja pri punoj iskoristivosti snage alatnog stroja, m/min,  
 $C_{F_c}$ ,  $x_1$ ,  $y_1$  - veličine ovisne o materijalu alata, obratka i uvjetima obrade,  
 $P_S$  - instalirana snaga glavnog pogona, kW,  
 $\eta$  - koeficijent iskoristivosti prijenosa energije stroja.

Kada se ovako određena brzina rezanja nalazi u nepovoljnom području što se tiče naslaga na alatu ili vibracija, tada se smanjuje posmak  $f$ , a po potrebi i dubina rezanja po prolazu  $a_p$ .

Brzina rezanja ograničena je najmanjim i najvećim brojem okretaja alatnog stroja u ovisnosti o dimenzijama izratka. Kod grube obrade parametri obrade podešavaju se na što veću iskoristivost snage stroja, dok kod fine obrade treba ostvariti potrebnu kvalitetu obrade te su parametri obrade uvjetovani kvalitetom površine. Dakle, važnije je ostvariti potrebnu kvalitetu obrade nego maksimalno iskoristiti snagu stroja.

### 3.3.1. Tablično i nomogramsko određivanje parametara obrade

Tablice za određivanje parametara obrade vrlo se često koriste u proizvodnji. Optimalna brzina rezanja, posmak i dubina rezanja ovisni su o konfiguraciji i traženoj točnosti izratka, kategoriji obrade, materijalu obratka i alata te geometriji alata [76, 97]. Postupak određivanja parametara obrade pomoću tabličnih podataka dan je na slici 3.13. Također, koriste se i nomogramski prikazi za približno određivanje parametara obrade.

### 3.3.2. Analitičko određivanje parametara obrade

#### 🔧 Analitičko određivanje optimalnog broja prolaza

Optimalni broj prolaza definira se na temelju stajališta da je u pogledu postojanosti alata najbolje raditi s najvećom dubinom rezanja. Jednako tako optimalni broj prolaza zahtijeva potpunu iskoristivost alata i stroja (slika 3.14.) tj.:

$$v_{ca} = v_{cS},$$

$$v_{ca} = \frac{C_v}{T^m \cdot a_p^x \cdot f^y}, \quad (3.50)$$

$$v_{cS} = \frac{P_S \cdot \eta}{F_c}, \quad (3.51)$$

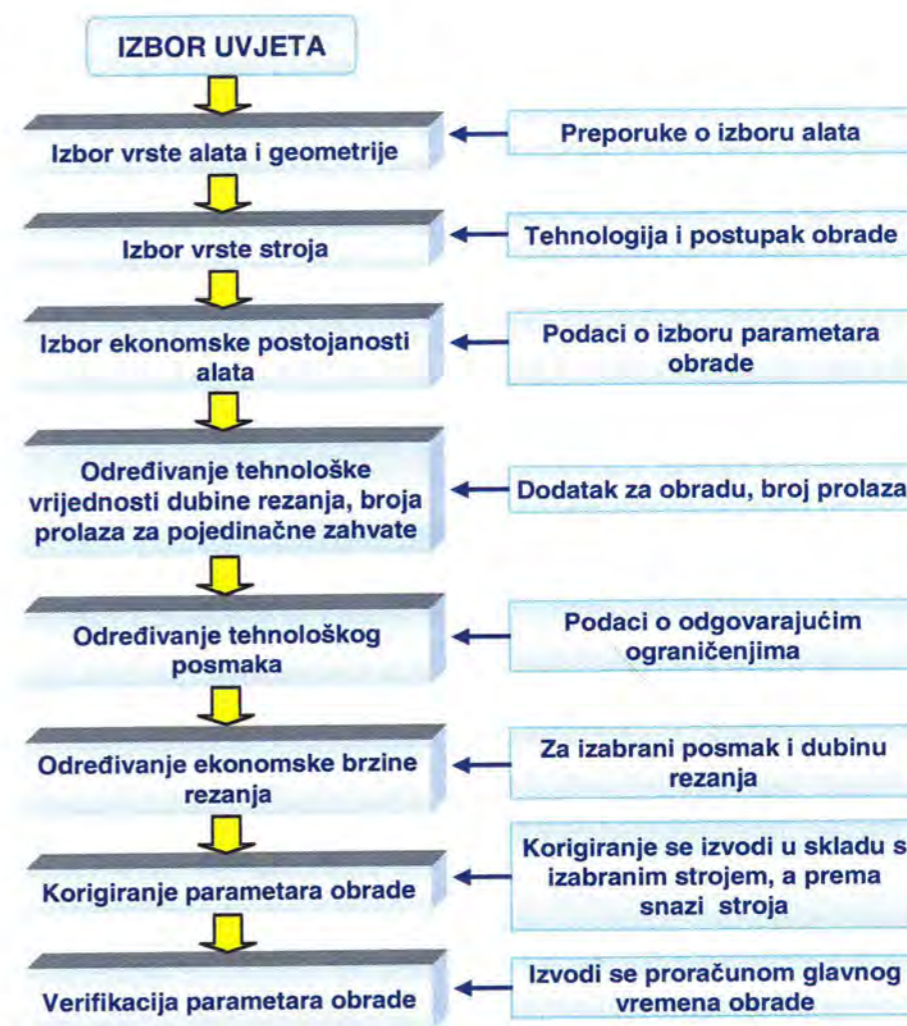
$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1}, \quad (3.52)$$

$$\frac{C_v}{T^m \cdot a_p^x \cdot f^y} = \frac{P_S \cdot \eta}{C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1}} \Rightarrow a_{pi} = \left( \frac{T^m \cdot P_S \cdot \eta}{C_v \cdot C_{F_c} \cdot f^{y_1-y}} \right)^{\frac{1}{x_1-x}}, \quad (3.53)$$

odnosno ukupan broj prolaza

$$i_p = \frac{\delta}{2 \cdot a_{pi}}, \quad (3.54)$$

gdje je:  $\delta$  - dodatak za obradu u promjeru, mm.



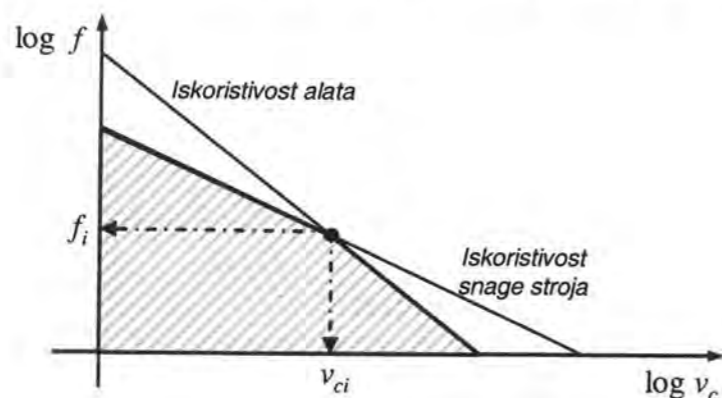
Slika 3.13. Blok-shema određivanja parametara obrade

#### 🔧 Analitičko određivanje posmaka i brzine rezanja

Poslije definiranja dubine rezanja određuju se posmak i brzina rezanja. Na temelju osnovnih zakona rezanja treba izabrati što veći posmak, koji mora biti u skladu s traženom hrapavosti i ograničenjima koja proizlaze iz tehnoloških i tehničkih uvjeta procesa: čvrstoće



alata, krutosti i točnosti obratka te čvrstoće mehanizma pomoćnoga gibanja. Posmak se određuje uz jednaku iskoristivost stroja i alata, tzv. idealni posmak (slika 3.14):



Slika 3.14. Analitičko određivanje posmaka i brzine rezanja

$$v_{ca} = v_{cs},$$

$$\frac{C_v}{T^m \cdot a_p^x \cdot f^y} = \frac{P_s \cdot \eta}{C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1}},$$

$$f_i = \left( \frac{T^m \cdot P_s \cdot \eta}{C_v \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_1 - x}} \right)^{\frac{1}{y_1 - y}}. \quad (3.55)$$

#### ➤ Izbor parametara obrade pomoću 4 jednadžbe

Parametri obrade mogu se izračunati rješavanjem jednadžbi: za ekonomsku brzinu rezanja, korisnu snagu, frekvenciju vrtnje i glavno vrijeme rezanja uz konstantnu dužinu rezanja:

$$v_{ce} = \frac{C_v}{T_e^m \cdot a_p^x \cdot f^y},$$

$$P_s = \frac{1}{\eta} \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot v_{ce}, \quad (3.56)$$

$$n = \frac{v_{ce}}{D \cdot \pi}, \quad (3.57)$$

$$t_g = \frac{L}{n \cdot f},$$

#### 3.3.3. Određivanje parametara obrade primjenom modeliranja

Primjenom suvremenih metoda parcijalnih ili potpunih ortogonalnih planova eksperimenta mogu se dobiti vrlo točni i pouzdani modeli: postojanosti alata, komponenti sile rezanja i parametara obrade [16, 74, 98].

Ukupan broj eksperimenata za model prvog reda s tri varijable ( $v_c, f, a_p$ ):

$$N = 2^k + n_0 = 2^3 + 4 = 12 \text{ eksperimenata.} \quad (3.58)$$

Optimizacijski model višeg reda

$$N = 2^k + n_0 + n_a = 2^3 + 6 + 2 \times 3 = 20 \text{ eksperimenata,} \quad (3.59)$$

ili za parcijalni plan

$$N = 2^{k-1} + n_0 = 4 + 2 = 6 \text{ eksperimenata,} \quad (3.60)$$

gdje su:  $k$  - broj varijabli u eksperimentu,

$N$  - ukupan broj eksperimenata,

$n_0$  - broj ponavljanja eksperimenata u centralnoj točki plana,

$n_a$  - broj eksperimenata za plan višeg reda.

Tako postojanost alata ima model u funkciji parametara obrade, npr.:

$$T = C_t \cdot v_c^x \cdot f^y \cdot a_p^z = 32,5 \cdot v_c^{-2,34} \cdot f^{-1,3} \cdot a_p^{-0,075}. \quad (3.61)$$

#### 3.3.4. Metoda minimalnog jediničnog vremena izrade

##### ➤ Produktivna brzina rezanja i minimalno jedinično vrijeme izrade

U masovnoj i serijskoj proizvodnji tehnološka se proizvodnost mjeri količinom dijelova obrađenih u danj operaciji i jedinici vremena [75]

$$Q = \frac{1}{t_1} = \frac{1}{t_n + t_g + t_a}, \quad (3.62)$$

gdje je:  $Q$  - tehnološka proizvodnost, kom./min.

Glavno tehnološko – strojno vrijeme:

$$t_g = \frac{L}{n \cdot f} = L_v \cdot v_c^{-1} = \frac{D \cdot \pi \cdot L}{v_c \cdot f}. \quad (3.63)$$

Vrijeme zamjene i postavljanja alata svedeno na jedan izradak (komadno alatno vrijeme, min/kom.) računa se prema izrazu

$$t_a = \frac{t_{al}}{Z_T}, \quad (3.64)$$

gdje je:  $t_{al}$  - vrijeme jednokratne zamjene i postavljanja alata, min.

Broj obrađenih komada  $Z_T$  određuje se iz postojanosti alata  $T$  i glavnog vremena obrade  $t_g$ , odnosno:

$$Z_T = \frac{T}{t_g}. \quad (3.65)$$

Prema Tayloru je

$$T = \left( \frac{C_v}{v_c} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (3.66)$$



pa slijedi:

$$t_a = t_{al} \cdot \frac{t_g}{T} = t_{al} \cdot L_v \cdot C_v^{\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-1} \quad (3.67)$$

Vrijeme za obradu jednog izratka:

$$t_1 = t_n + t_g + t_a = t_n + L_v \cdot v_c^{-1} + t_{al} \cdot L_v \cdot C_v^{\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-1} \quad (3.68)$$

Minimalno vrijeme za izradu dobiva se deriviranjem prethodne jednadžbe:

$$\frac{dt_1}{dv_c} = -L_v \cdot v_c^{-2} + \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot t_{al} \cdot L_v \cdot C_v^{\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-2} = 0 \quad (3.69)$$

Iz jednadžbe (3.69) dobiva se optimalna brzina rezanja pri kojoj je maksimalna proizvodnost  $Q = \max(Q)$ , slika 3.21. Ta se brzina rezanja naziva **produktivnom** i iznosi:

$$v_{c\text{opt}} = v_{cp} = \frac{C_v}{\left[\left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot t_{al}\right]^m} \quad (3.70)$$

Kada se  $v_{c\text{opt}}$  uvrsti u Taylorovu jednadžbu  $v_c \cdot T^m = C_v$  dobiva se postojanost alata pri maksimalnoj proizvodnosti

$$T_{\text{opt}} = T_p = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot t_{al} \quad (3.71)$$

Prema Schlesingeru  $m = 0,125 - 0,23$ , pa je  $T_p = (3,35 - 7) \cdot t_{al}$ .

Jednadžbe (3.70) i (3.71) dobivene su na temelju kriterija maksimalne proizvodnosti, što se vidi iz dijagrama na slici 3.21.

### 3.3.5. Metoda minimalnih jediničnih troškova izrade

#### Ekonomska brzina rezanja i minimalni jedinični troškovi izrade

Da bi se pratila ekonomičnost tehnoloških operacija ili obradnih sustava, potrebno je analizirati troškove. Također, da bi se odredio ekonomski vijek alata  $T_e$  potrebno je poznavati ekonomsku brzinu rezanja  $v_{ce}$  jer brzina rezanja najviše utječe na postojanost alata.

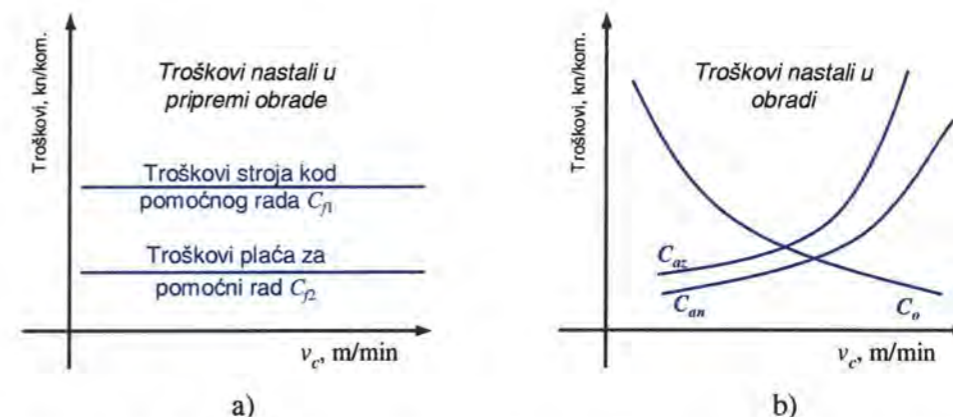
Troškovi obrade određuju se pomoću matematičkih modela. Ukupni jedinični troškovi izrade (slika 3.15.) sastoje se od troškova materijala, te troškova procesa obrade (plaće djelatnika, troškovi obradnog stroja, energije, alata i naprava)

$$C_1 = C_f + C_o + C_a, \quad (3.72)$$

gdje su:  $C_f$  - fiksni troškovi neovisni o brzini rezanja (troškovi stroja i osobnih dohodaka radnika na pripremi stroja i naprava), kn/kom.,

$C_o$  - troškovi izrade ovisni o glavnom strojnom vremenu obrade (troškovi radnog mjesta i ostali opći troškovi), kn/kom.,

$C_a = C_{an} + C_{az}$  - ukupni troškovi alata, troškovi nabave alata po jednom komadu i troškovi zamjene i postavljanja alata, kn/kom.



**Slika 3.15.** Grafički prikaz troškova: a) troškovi stroja i osobnih dohodaka pri pomoćnim poslovima neovisni o brzini rezanja  $v_c$ , b) ovisnost troškova zamjene alata  $C_{az}$ , troškova nabave i održavanja alata  $C_{an}$  i troškova obrade  $C_o$  o brzini rezanja  $v_c$

Troškovi  $C_o$  i  $C_a$  po jedinici proizvoda značajno ovise o parametrima obrade. Troškovi materijala i sredstva za hlađenje i podmazivanje obično su fiksni za određeni proizvod, tako da se ne uzimaju u obzir jer ne ovise o promjeni parametara obrade. Dakle, ti troškovi predstavljaju stavku u ukupnoj cijeni proizvoda, ali nisu varijabilni te nemaju utjecaja na jedinične troškove izrade koji su bitni za izbor brzine rezanja.

#### Troškovi po mjestu nastajanja

- Fiksni troškovi

$$C_f = C_{f1} + C_{f2}, \quad (3.73)$$

gdje su:  $C_{f1}$  - troškovi stroja kod obavljanja pomoćnih poslova, kn/kom.,

$C_{f2}$  - troškovi plaće osoblja kod pomoćnih poslova, kn/kom.

- Troškovi procesa obrade

$$C_o = (D_b + R_{tr}) \cdot t_g = (D_b + R_{tr}) \cdot L_v \cdot v_c^{-1}, \quad (3.74)$$

gdje su:  $D_b$  - bruto dohodak operatera na radnom mjestu, kn/min,

$R_{tr}$  - ostali opći troškovi za radno mjesto, kn/min,

- Troškovi zamjene alata

$$\begin{aligned} C_{az} &= (D_b + R_{tr}) \cdot t_a = (D_b + R_{tr}) \cdot \frac{t_{al}}{Z_T} = \frac{(D_b + R_{tr}) \cdot t_{al} \cdot t_g}{T} = \\ &= (D_b + R_{tr}) \cdot (t_{al} \cdot L_v \cdot C_v^{\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-1}). \end{aligned} \quad (3.75)$$



▪ Troškovi nabave alata

Ti su troškovi jednaki nabavnoj cijeni alata raspoređeni na broj obrađenih komada dok se alat ne istroši, pa je

$$C_{an} = \frac{C_N \cdot t_g}{Z_{pl} \cdot T} = \frac{C_N}{Z_{pl}} \cdot L_v \cdot C_v^{-\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-1}, \quad (3.76)$$

gdje su:  $C_N$  - nabavna cijena pločice alata, kn,  
 $Z_{pl}$  - broj oštrica pločice alata.

**Proračun ukupnih jediničnih troškova**

Ukupni su troškovi (osim troškova materijala i energije):

$$C_1 = C_{f1} + C_{f2} + C_o + C_{an} + C_{az}. \quad (3.77)$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza za troškove u jednadžbu (3.77) slijedi:

$$C_1 = C_{f1} + C_{f2} + (D_b + R_{tr}) \cdot L_v \cdot v_c^{-1} + \left[ (D_b + R_{tr}) \cdot t_{al} + \frac{C_N}{Z_{pl}} \right] \cdot L_v \cdot C_v^{-\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-1}. \quad (3.78)$$

Minimalni se ukupni troškovi zatim dobivaju deriviranjem jednadžbe (3.78):

$$\frac{dC_1}{dv_c} = -(D_b + R_{tr}) \cdot L_v \cdot v_c^{-2} + \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \left[ (D_b + R_{tr}) \cdot t_{al} + \frac{C_N}{Z_{pl}} \right] \cdot L_v \cdot C_v^{-\frac{1}{m}} \cdot v_c^{\frac{1}{m}-2} = 0. \quad (3.79)$$

Iz jednadžbe (3.79) dobiva se optimalna brzina rezanja pri kojoj su minimalni ukupni troškovi izrade, slike 3.21. i 3.22. Ta se brzina rezanja naziva **ekonomskom** i iznosi:

$$v_{c\ opt} = v_{ce} = \frac{C_v}{\left\{ \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \left[ t_{al} + \frac{C_N}{Z_{pl} \cdot (D_b + R_{tr})} \right] \right\}^m}. \quad (3.80)$$

Nakon uvrštavanja  $v_{ce}$  u Taylorovu jednadžbu  $v_c \cdot T^m = C_v$  dobiva se postojanost alata pri minimalnim troškovima izrade:

$$T_e = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \left[ t_{al} + \frac{C_N}{Z_{pl} \cdot (D_b + R_{tr})} \right]. \quad (3.81)$$

Kako su troškovi po jednoj oštrici pločice

$$C_{al} = \frac{C_N}{Z_{pl}}, \quad (3.82)$$

onda je ekonomska postojanost alata:

$$T_e = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \left[ t_{al} + \frac{C_{al}}{D_b + R_{tr}} \right]. \quad (3.83)$$

Usporedbom izraza (3.71) i (3.83) dobiva se odnos  $T_e > T_p$ , gdje se ekonomska postojanost alata razlikuje od produktivne za član

$$\frac{C_N}{Z_{pl} \cdot (D_b + R_{tr})} = \frac{C_{al}}{D_b + R_{tr}},$$

odnosno

$$T_e = T_p \cdot \left[ 1 + \frac{C_{al}}{(D_b + R_{tr}) \cdot t_{al}} \right]. \quad (3.84)$$

Također, usporedbom jednadžbi (3.70) i (3.80) dobiva se  $v_{cp} > v_{ce}$  jer je:

$$v_{cp} = v_{ce} \cdot \left[ 1 + \frac{C_{al}}{(D_b + R_{tr}) \cdot t_{al}} \right]^m. \quad (3.85)$$

### 3.3.6. Metoda funkcija ograničenja

**Značajke stroja:**

1. snaga rezanja  $\leq$  korisnoj snazi motora;
2. okretni moment rezanja  $\leq$  maksimalnome dopuštenom momentu na radnom vretenu koje pogoni motor;
3. okretni moment sile rezanja  $\leq$  okretnome momentu koji može prenijeti mehanizam stroja s obzirom na čvrstoću;
4. glavna sila rezanja  $F_c \leq$  sili koju ima stroj na glavnom gibanju;
5. sila prodiranja  $F_p \leq$  vučnoj sili koju može prenijeti mehanizam pomoćnoga gibanja;
6. sila pomoćnoga kretanja  $F_f \leq$  sili koju može prenijeti mehanizam pomoćnoga gibanja;
7. frekvencija vrtnje i posmak mogu biti izabrani samo u području radnih mogućnosti stroja.

**Značajke alata:**

1. komponente rezne sile koje djeluju na alat  $\leq$  sili dopuštenoj s obzirom na krutost, čvrstoću alata ili u odnosu na pojavu vibracija pri obradi;
2. izabrana brzina rezanja  $\leq$  brzini koja odgovara izabranoj postojanosti alata.

**Značajke obratka:**

1. sila rezanja dobivena za izabrane parametre obrade  $\leq$  sili koja neće deformirati obradni sustav više od dopuštenog s obzirom na propisanu kvalitetu;
2. stvarni parametri obrade trebaju biti u granicama koje osiguravaju propisanu točnost karakteristika kvalitete;



3. parametri obrade trebaju biti takvi da sila i krutost obradnog sustava ne dovode do vibracija iznad dopuštene granice;
4. dimenzije, dodaci za obradu i točnost obrađene površine.

### 3.3.7. Metoda baze tehnoloških podataka

Svaka proizvodna tehnologija ima osnovne ciljeve [73, 99]:

- osigurati potrebnu kvalitetu proizvoda,
- dosegnuti maksimalne tehno-ekonomske učinke, što zahtijeva primjenu optimalnih parametara i uvjeta procesa obrade,
- dosegnuti konkurentnost proizvoda,
- dosegnuti minimalno moguće troškove obrade.

Nije moguće upravljati suvremenim procesima proizvodnje, niti ih unapređivati, bez odgovarajuće sveobuhvatne tehnološke baze podataka.

To se posebno odnosi na automatizirani sustav projektiranja i optimizacije obradnih i tehnoloških procesa, gdje je tehnološka baza podataka temelj moderne pripreme i suvremene proizvodnje, posebice u okruženju računalom integrirane proizvodnje.

Zadatak je baza tehnoloških podataka da projektantu tehnologije i tehnoloških procesa osigura:

- potrebne tehničko-tehnološke podatke sadržane u bazi podataka,
- potrebne metode za projektiranje i optimizaciju procesa sadržane u bazi metoda,
- programe za projektiranje i optimizaciju tehnoloških procesa sadržane u bazi programa.

Tehnološki su podaci:

- parametri obradivosti,
- karakteristike alatnih strojeva,
- karakteristike pomoćnih naprava,
- karakteristike mjernih naprava,
- karakteristika materijala obratka,
- parametri obrade,
- standardna vremena obrade,
- normativi i elementi troškova obrade.

Tehnološka baza podataka omogućuje:

- optimizaciju obradnih i tehnoloških procesa na temelju relevantnih kriterija (proizvodnosti, ekonomičnosti, postojanosti alata, itd.);
- automatsko određivanje parametara obrade u fazi projektiranja tehnoloških procesa za konvencionalne, CNC, FMS i druge obradne sustave;
- kvalitetne temelje za CAPP, CAM i/ili integrirani sustav CAD/CAPP/CAM, odnosno sustav CIM.

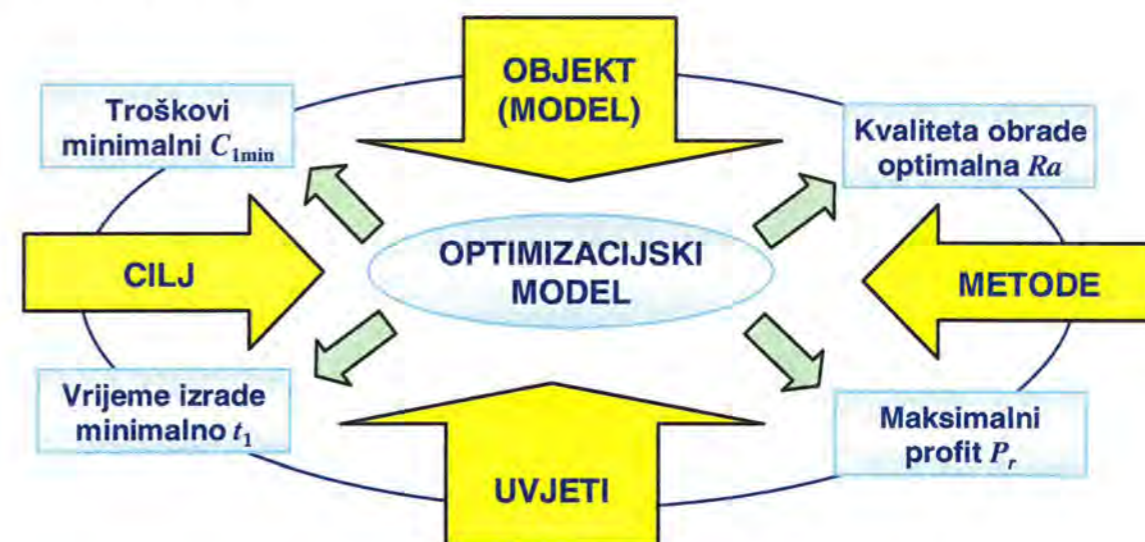
## 3.4. OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADE

### 3.4.1. Osnove i procedura optimizacije

Teorija optimizacije je znanstvena disciplina koja izučava metode optimizacije i njihovu aplikaciju na rješavanje konkretnih problema iz područja tehničkih sustava, procesa, inženjerske prakse (projektiranje, konstruiranje, upravljanje itd.).

Primjenom metoda optimizacije žele se ostvariti maksimalni tehno-ekonomski rezultati koji ovisno o području primjene mogu biti vrlo različiti. Ipak, kod svih je postupaka optimizacije glavno postignuće je definiranje najpovoljnijega mogućeg rješenja za određene uvjete procesa.

Potpuno definiranje optimizacije određeno je četirima osnovnim elementima (slika 3.16.): objektom optimizacije, ciljem optimizacije, metodama optimizacije i uvjetima u kojima se optimizacija izvodi.

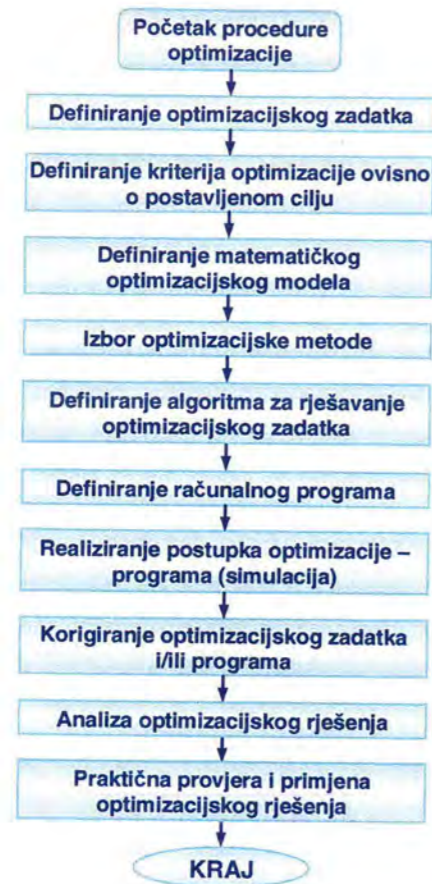


Slika 3.16. Osnovni elementi i zahtjevi postupka optimizacije

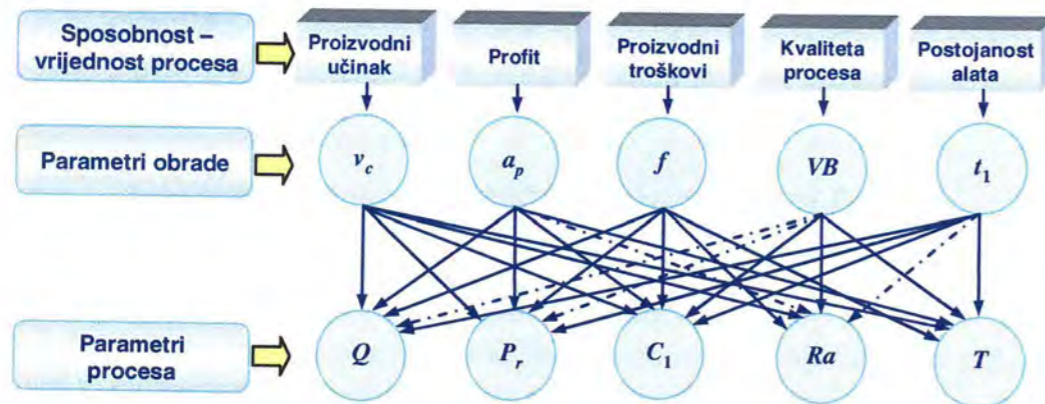
Cilj optimizacije iskazuje se pomoću kriterija optimizacije (modela optimizacije i funkcije cilja), dok se odgovarajućom metodom optimizacije ostvaruje zadani cilj optimizacije na određenom objektu optimizacije (proces, stroj, proizvod, naprava, tehnologija, konstruiranje, upravljanje, itd.). Procedura optimizacije izvodi se u određenom slijedu osnovnih koraka prikazanih na slici 3.17.

Postupak optimizacije procesa obrade omogućuje transformiranje procesa niže tehno-ekonomske razine u proces više razine, što podrazumijeva primjenu određene procedure. Hijerarhijska struktura vrijednosti procesa, parametara procesa i parametara obrade prikazana je na slici 3.18.





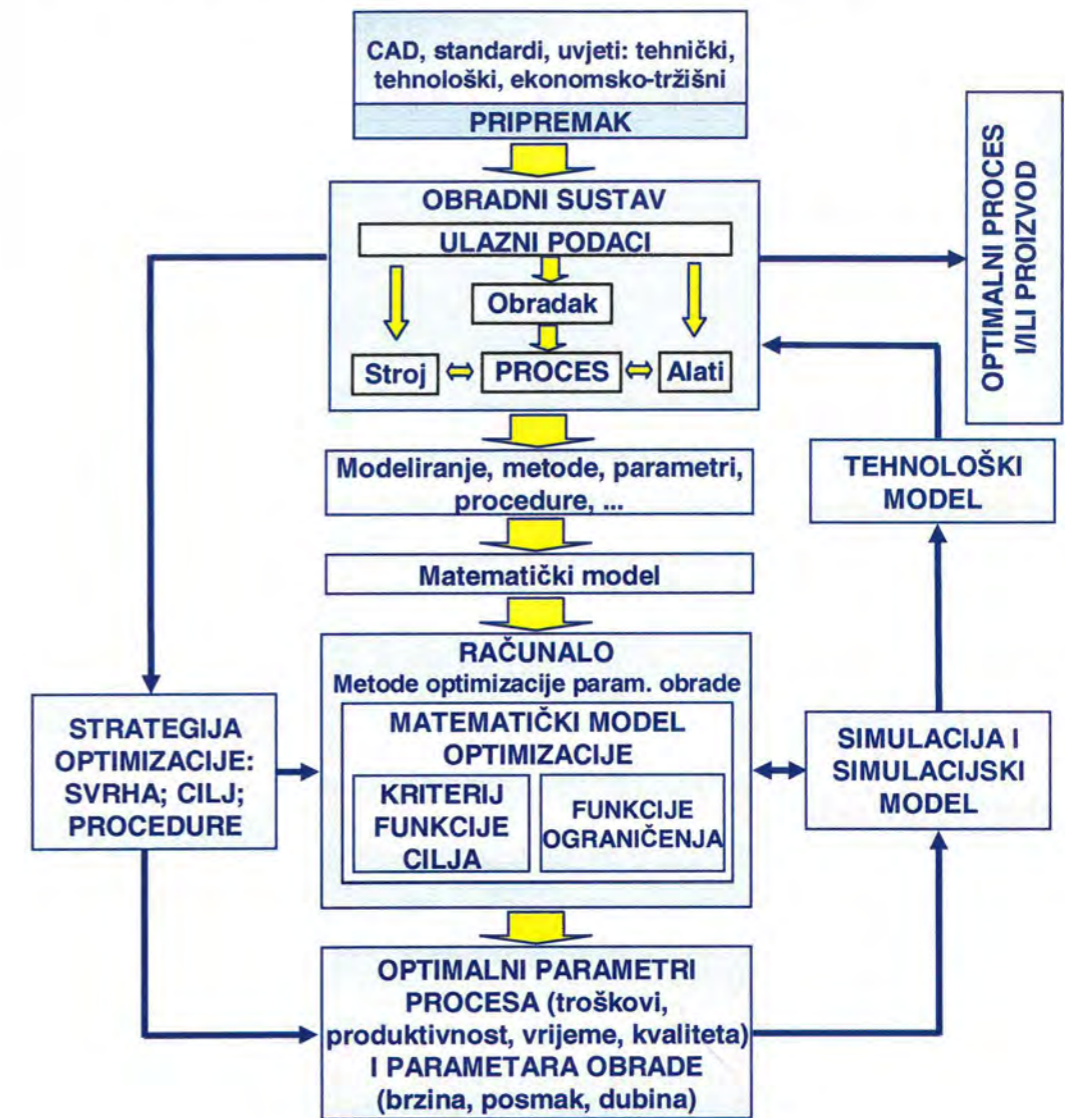
Slika 3.17. Osnovni koraci procedure optimizacije



Slika 3.18. Hijerarhijska struktura vrijednosti parametara obrade i parametara procesa:  
 $Q$  - proizvodni učinak (učinak skidanja materijala),  $P_r$  - profit,  $C_1$  - jedinični troškovi izrade,  $Ra$  - srednja hrapavost profila obrađene površine,  $T$  - postojanost alata

Parametri procesa određuju kvalitetu procesa ( $Ra$ ), kvantitetu ( $Q$ ,  $T$ ) i ekonomske parametre ( $P_r$ ,  $C_1$ ).

### 3.4.2. Blok-shema optimizacije parametara obrade



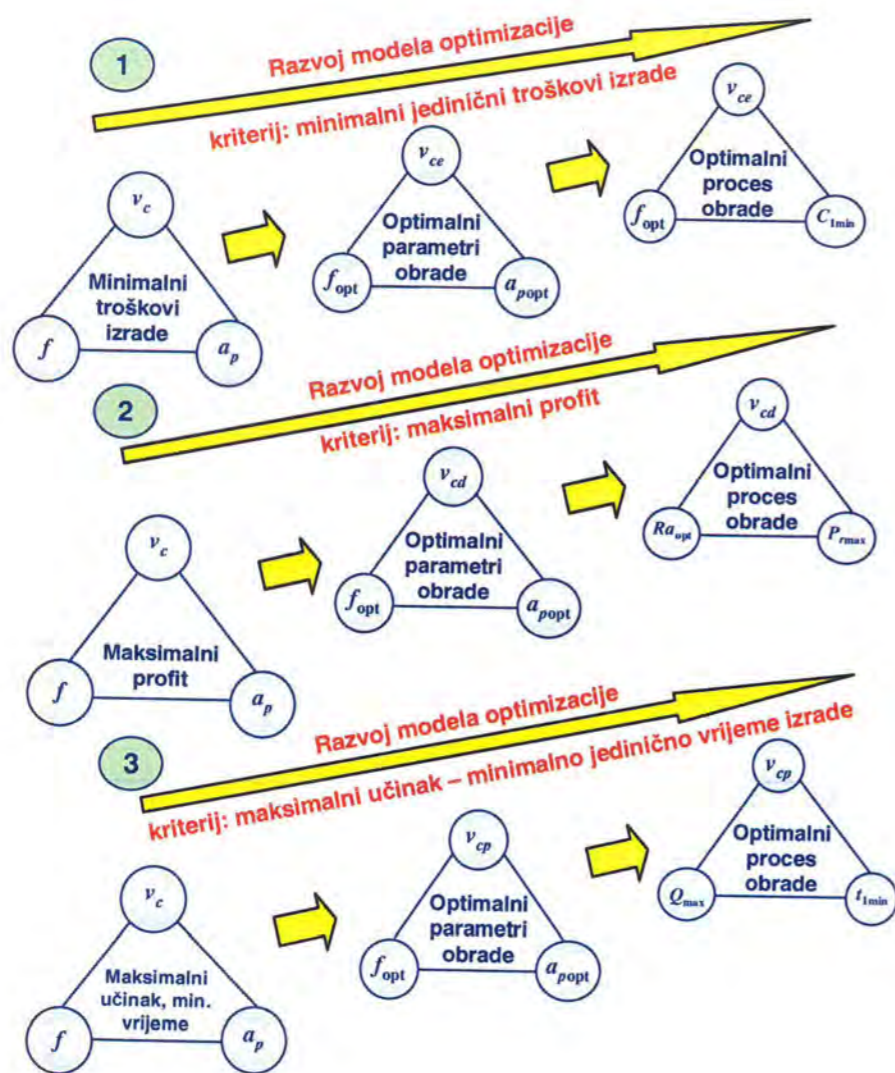
Slika 3.19. Osnovni sljed optimizacije parametara obrade

### 3.4.3. Kriteriji optimizacije

Osnovni su kriteriji za izbor optimalnih parametara obrade (slika 3.20.):

- kriterij minimalnih jediničnih troškova izrade:  $v_c \rightarrow v_{ce}$ ,  $C_1 \rightarrow \min(C_1)$ ;
- kriterij visoke iskoristivosti područja obrade s ciljem postizanja maksimalnog profita (maksimalna dobit)  $v_c \rightarrow v_{cd}$ , odnosno  $P_r \rightarrow \max(P_r)$  [16, 96, 100, 101].
- kriterij maksimalnog učinka (maksimalna produktivnost), tj. kriterij minimalnoga jediničnog vremena izrade  $v_c \rightarrow v_{cp}$ , odnosno  $Q \rightarrow \max(Q)$  ili  $t_1 \rightarrow \min(t_1)$ ;



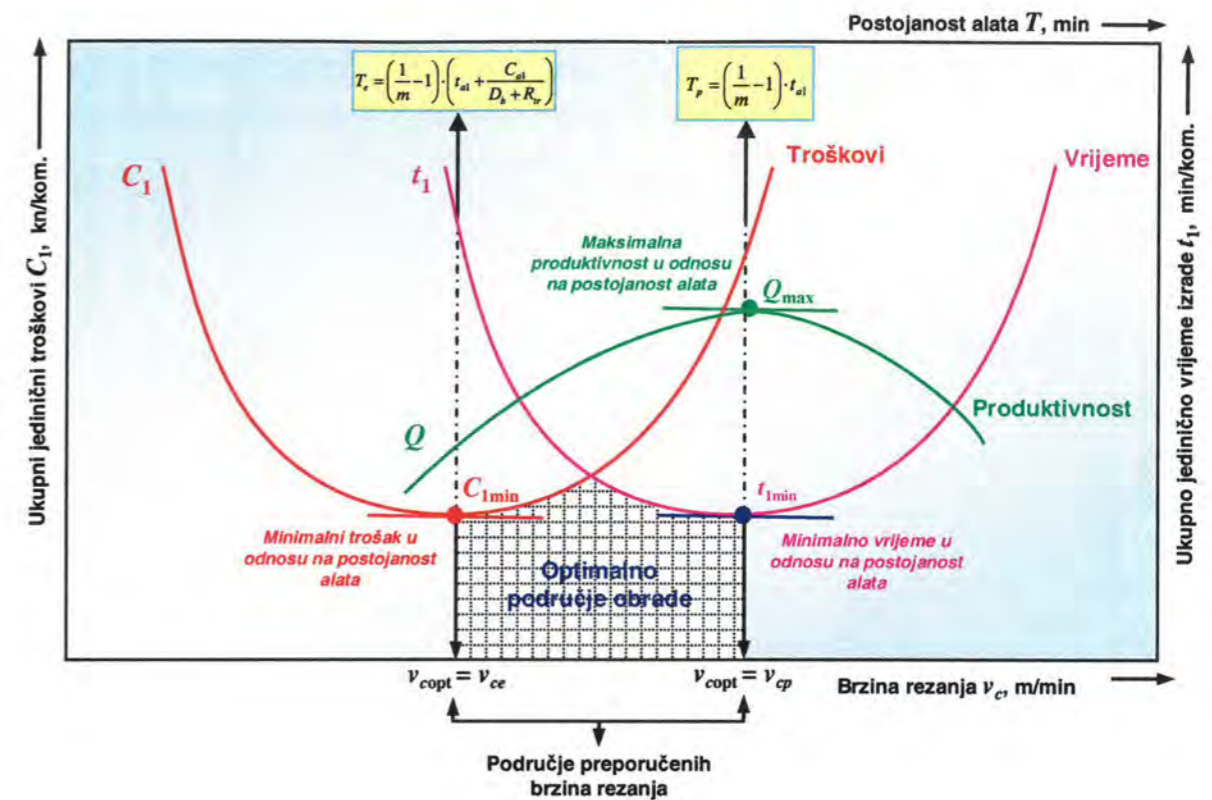


Slika 3.20. Kriteriji za definiranje optimalnog procesa obrade:  $Ra$  - srednji profil hrapavosti obrađene površine,  $C_{1min}$  - minimalni jedinični troškovi izrade,  $t_{1min}$  - minimalno jedinično vrijeme izrade,  $Q_{max}$  - maksimalna količina,  $P_{rmax}$  - maksimalni profit

### 3.4.3.1. Kriterij minimalnoga jediničnog vremena izrade – maksimalne produktivnosti

Produktivnost kao mjera tehničke sposobnosti obradnog sustava izražava se količinom izradaka obrađenih u danoj operaciji i jedinici vremena. Slijedi da će produktivnost biti najveća kada je jedinično vrijeme izrade najmanje. Za takav se slučaj brzina rezanja naziva produktivnom i označava s  $v_{cp}$ , slika 3.21. Ta se brzina rezanja redovito primjenjuje kada su zadani rokovi ili kod uskih grla u proizvodnji.

Za izračunavanje produktivne brzine rezanja  $v_{cp}$  koristi se izraz (3.70), a za izračunavanje pripadne postojanosti alata  $T_p$  koristi se izraz (3.71).



Slika 3.21. Ovisnost troškova, vremena izrade i produktivnosti procesa o brzini rezanja

### 3.4.3.2. Kriterij minimalnih jediničnih troškova izrade

Brzina rezanja za koju su jedinični troškovi izrade najmanji naziva se ekonomičnom i označava s  $v_{ce}$ . Odnos brzina  $v_{ce}$  i  $v_{cp}$  prikazan je na slici 3.21.

Za izračunavanje ekonomske brzine rezanja  $v_{ce}$  koristi se izraz (3.80), a za izračunavanje pripadne postojanosti alata  $T_p$  koristi se izraz (3.83).

### 3.4.3.3. Kriterij maksimalnog profita

Kada se radi s brzinom rezanja većom od ekonomične, povećava se produktivnost i smanjuje se glavno strojno vrijeme, pa se prema tome smanjuje i vezani trošak  $C_o$ . Međutim, zbog bržeg trošenja oštrice reznog alata istovremeno se povećava i trošak alata zbog zamjene  $C_a$ . Također, ekstremi krivulja jediničnog troška i jediničnog vremena izrade, odnosno produktivnosti, ograničavaju preporučeno područje odabira parametara obrade. To se područje označava s Hi-E (engl. *High Efficiency*) i predstavlja područje visoke učinkovitosti obrade, slika 3.22. Naime, upravo se u tom području nalazi i brzina rezanja  $v_{cd}$  kojom se ostvaruje maksimalni profit. Pri tome uvijek vrijedi odnos:

$$v_{ce} < v_{cd} < v_{cp} \quad (3.86)$$

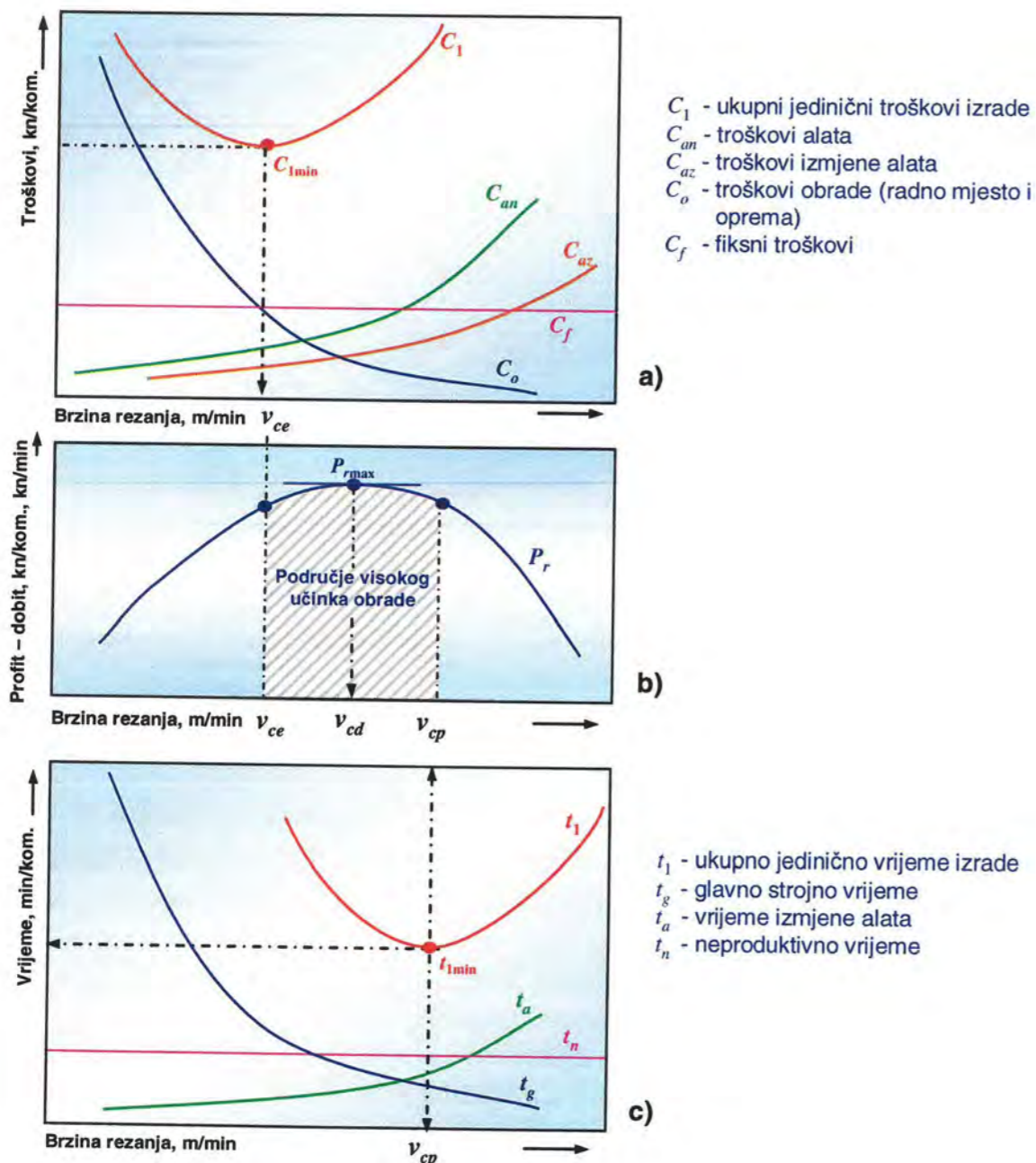
Profit je razlika između ukupnog prihoda  $U_p$  i ukupnog troška  $C_u$  [16, 31, 100, 101, 102], kao što je pokazano na slici 3.23.:



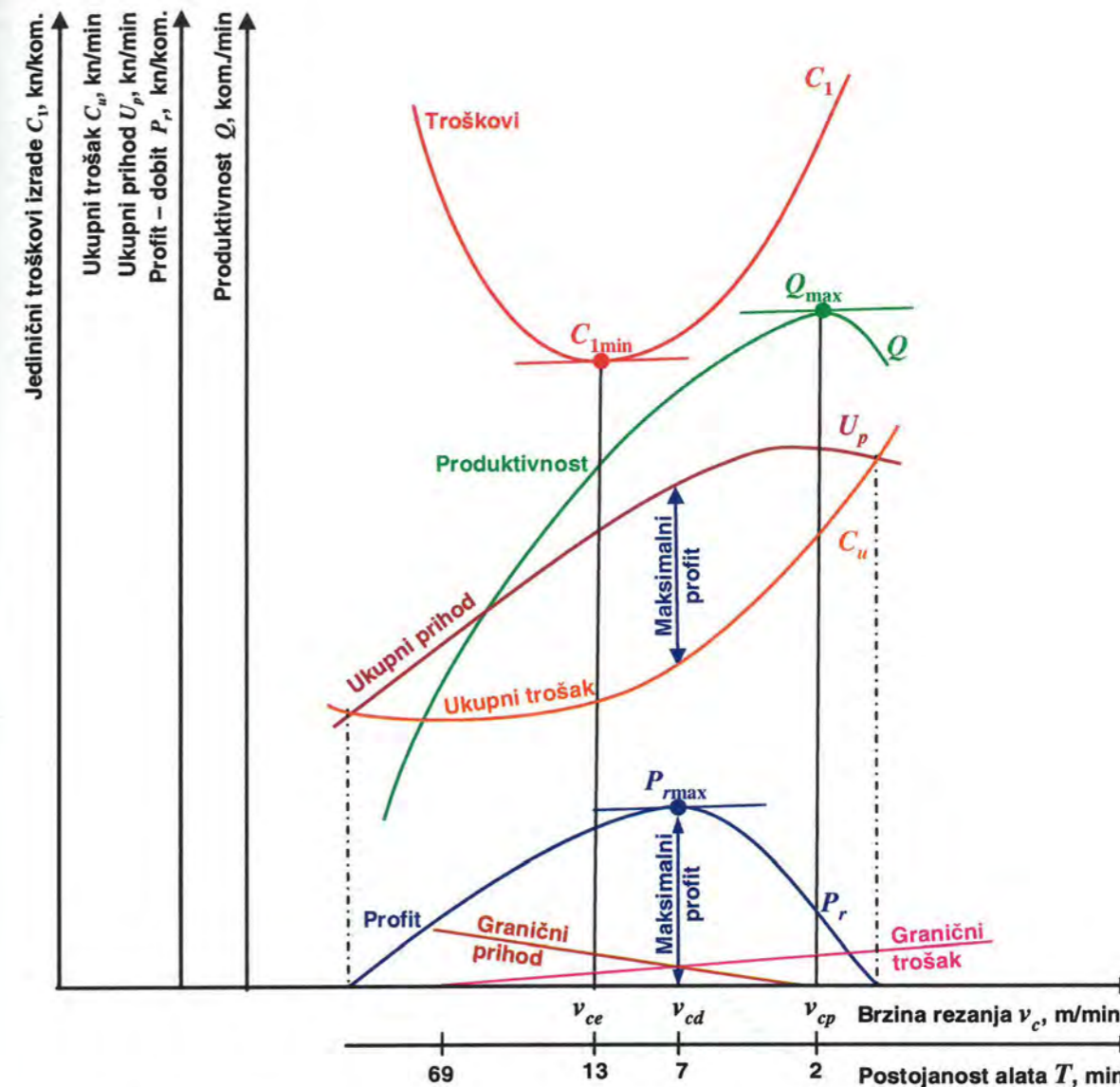
$$P_r = U_p - C_u$$

Kako su ukupan prihod i ukupan trošak izravno ovisni o produktivnosti i jediničnim prihodima odnosno jediničnim troškovima, to se navedeni izraz može transformirati u oblik:

$$P_r = U_p - C_u = Q(U_1 - C_1) = \frac{U_1 - C_1}{t_1} \quad (3.87)$$



Slika 3.22. Ekonomičnost procesa obrade – kriterij visoke iskoristivosti procesa obrade: a) troškovi, b) profit, c) vrijeme procesa



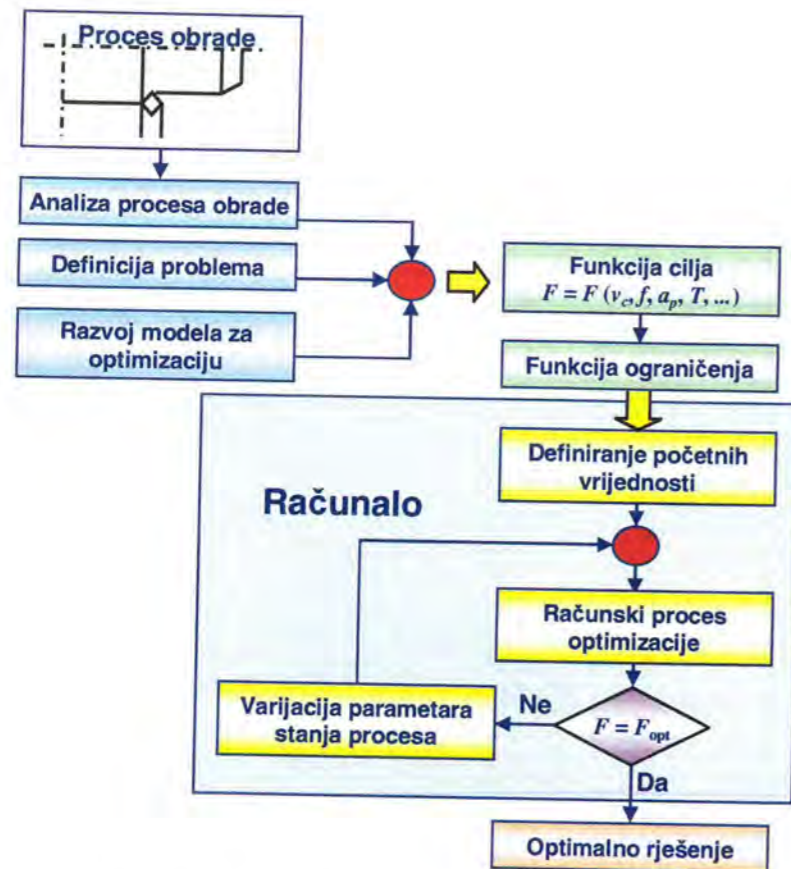
Slika 3.23. Ovisnost produktivnosti, troškova, prihoda i profita o brzini rezanja

#### 3.4.4. Optimizacija parametara obrade primjenom funkcija ograničenja

Jedna od metoda definiranja optimalnih parametara obrade je metoda funkcija ograničenja, koja polazi od spoznaje da je optimalno područje ograničeno tehničkim i tehnološkim mogućnostima stroja i alata, te kvalitetnim zahtjevima točnosti dimenzija i oblika obrađene površine.

Dakle, funkcije ograničenja su matematički opisi veza između mogućnosti obradnog sustava u kojem treba realizirati optimalne parametre obrade i varijabli uvjeta obrade [16, 74, 79]. Tijek postupka optimizacije prikazan je na slici 3.24.





Slika 3.24. Tijek optimizacije parametara obrade na računalu

### Matematički modeli ograničenja pri grubom uzdužnom tokarenju

#### 1. Ograničenja s obzirom na rezne mogućnosti alata

Brzina rezanja određuje se nakon određivanja dubine rezanja i posmaka. Osnovni je kriterij za izbor brzine rezanja maksimalna iskoristivost postojanosti alata

$$v_c = \frac{C_v}{T^m \cdot a_p^{x_p} \cdot f^{y_p}}, \quad (3.88)$$

pa uz primjenu izraza za brzinu rezanja

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \leq \frac{C_v}{T^m \cdot a_p^{x_p} \cdot f^{y_p}}, \quad (3.89)$$

slijedi funkcija ograničenja

$$n \cdot a_p^{x_p} \cdot f^{y_p} \leq \frac{318 \cdot C_v}{T^m \cdot D}, \quad (3.90)$$

gdje je postojanost alata određena modelom iz plana eksperimenta realiziranog u odgovarajućem području brzina rezanja.

#### 2. Ograničenje s obzirom na snagu glavnog vretena stroja

Snaga glavnog vretena stroja treba biti veća ili jednaka potrebnoj snazi rezanja

$$P_s \cdot \eta \geq F_c \cdot v_c, \quad (3.91)$$

$$P_s \cdot \eta \geq \frac{C_{F_c} \cdot a_p^{x_p} \cdot f^{y_p} \cdot \pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 10^6}, \quad (3.92)$$

$$n \cdot a_p^{x_p} \cdot f^{y_p} \leq \frac{60000 \cdot 318 \cdot P_s \cdot \eta}{C_{F_c} \cdot D}, \quad (3.93)$$

gdje su:  $\eta$  - energetska stupanj iskoristivosti prijenosa snage od pogonskog elektromotora do glavnoga radnog vretena stroja,

$x_g, y_g$  - eksponenti ovisni o materijalu obratka i uvjetima obrade.

#### 3. Ograničenja s obzirom na zahtijevanu kvalitetu obrađene površine

Zahtijevana (zadana) kvaliteta obrađene površine određena je tehničkom dokumentacijom. Stoga postoji ograničenje vrijednosti posmaka s obzirom na zadanu hrapavost obrađene površine:

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \leq 4 \cdot Ra, \quad (3.94)$$

odnosno

$$f \leq \sqrt{32 \cdot r_e \cdot Ra}. \quad (3.95)$$

#### 4. Ograničenje s obzirom na maksimalnu silu na nosaču alata

Za slučaj uzdužnog tokarenja (slika 3.25.) određivanje posmaka s obzirom na opterećenje nosača alata na savijanje izvodi se temeljem analize sila u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini s uzimanjem u obzir dopuštenog naprezanja na savijanje materijala nosača alata.

Moment savijanja u horizontalnoj ravnini, prema slici 3.25. je

$$M_y = F_f \cdot l_n, \quad (3.96)$$

odnosno u vertikalnoj ravnini

$$M_z = F_c \cdot l_n - F_p \cdot \frac{h}{2}. \quad (3.97)$$

Naprezanja na savijanje su tada:

$$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y} = \frac{6 \cdot M_y}{b^2 \cdot h}, \quad (3.98)$$

odnosno

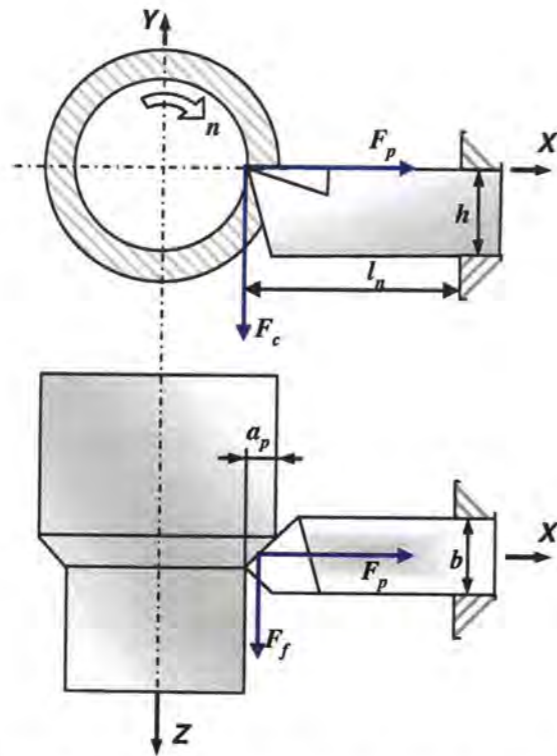
$$\sigma_z = \frac{M_z}{W_z} = \frac{6 \cdot M_z}{b \cdot h^2}, \quad (3.99)$$

gdje su:  $W_y, W_z$  - momenti otpora poprečnog presjeka nosača alata,  $\text{mm}^3$ .



Sila prodiranja  $F_p$  opterećuje nosač alata na tlak:

$$\sigma_x = \frac{F_p}{b \cdot h} \quad (3.100)$$



Slika 3.25. Analiza opterećenja tokarskog noža

Za približne odnose  $F_p = 0,4 \cdot F_c$  i  $F_f = 0,2 \cdot F_c$  dobiva se dopušteno naprezanje savijanja nosača:

$$\sigma_{dop} \geq |\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z| = F_c \cdot C_{CA} \quad (3.101)$$

Konstanta stezanja, ovisna o poprečnom presjeku i geometriji noža, iznosi

$$C_{CA} = \frac{6 \cdot \frac{l_n}{h} + 1,2 \cdot \frac{l_n}{b} - 0,8}{b \cdot h} \quad (3.102)$$

pa za

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_s} \cdot f^{y_s} \quad (3.103)$$

slijedi veličina dopuštenog posmaka s obzirom na opterećenje nosača alata:

$$f \leq \sqrt[3]{\frac{\sigma_{dop}}{C_{CA} \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_s}}} \quad (3.104)$$

odnosno

$$a_p^{x_s} \cdot f^{y_s} \leq \frac{\sigma_{dop}}{C_{CA} \cdot C_{F_c}} \quad (3.105)$$

#### 5. Ograničenje s obzirom na minimalni posmak stroja

Najmanji posmak uvjetovan je kinematikom stroja (najmanji raspoloživi posmak na stroju):

$$f \geq f_{\min} \quad (3.106)$$

#### 6. Ograničenje s obzirom na maksimalni posmak stroja

Analogno prethodnom, najveći je posmak uvjetovan najvećim raspoloživim posmakom na stroju:

$$f \leq f_{\max} \quad (3.107)$$

#### 7. Ograničenje posmaka s obzirom na lomljenje strugotine

Oblik strugotine osobito je važan za učinkovitu iskoristivost obradnih sustava upravljanih računalom (CNC, DNC, ACC, itd.). Često nepovoljna strugotina stvara posebne teškoće, kao što su zaustavljanje stroja, lom alata i sl. Tekuća strugotina najnepovoljnija je, jer dolazi do njezina namotavanja na obradak ili "zatrpavanja" alatnog stroja u vrlo kratkom vremenu, posebno kod visokih brzina rezanja, dok su kovrčasto isprekidana, spiralno isprekidana i ostale isprekidane strugotine povoljnije za obradu. Na oblik strugotine i njezino lomljenje može se utjecati prikladnim odabirom kombinacije dubine rezanja i posmaka.

Područje mogućih kombinacija dubine rezanja i posmaka koje će osigurati lomljenu strugotinu može se prikazati  $a_p$ - $f$  dijagramom. Takve dijagrame daju proizvođači alata u katalogima ovisno o kombinaciji materijala alata i obratka, a mogu se koristiti za određivanje područja mogućih rješenja iz kojega se vrši izbor [16, 103], slika 3.26. S gornje strane to je područje ograničeno najutjecajnijom funkcijom ograničenja koja presijeca dijagram i tako ukupno područje mogućih kombinacija dubine rezanja i posmaka (ABCD) dijeli na dopušteno  $ABA_1B_1$  i nedopušteno.

Iz slike 3.26 može se vidjeti da su donja i gornja granica posmaka određene izrazom

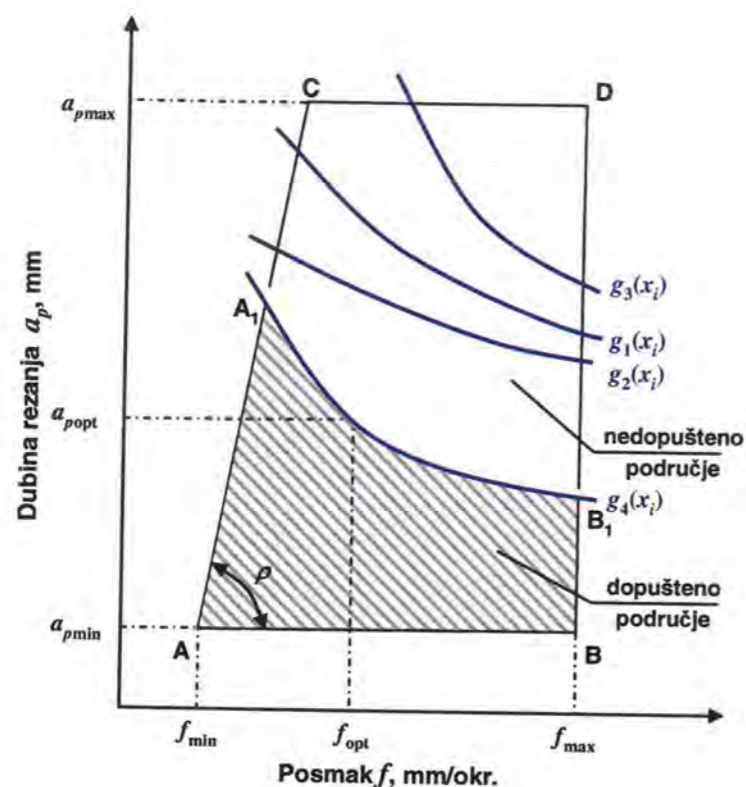
$$f_{\min} + \frac{a_p - a_{p\min}}{\tan \rho} \leq f \leq f_{\max} \quad (3.108)$$

gdje su:  $f_{\min}, f_{\max}$  - minimalni i maksimalni dopušteni posmak s obzirom na lomljenje strugotine, mm,

$a_{p\min}$  - minimalna dopuštena dubina rezanja s obzirom na lomljenje strugotine, mm,

$\rho$  - kut nagiba pravca u dijagramu  $a_p$ - $f$  koji određuje minimalni posmak u funkciji dubine rezanja, °.



Slika 3.26. Dijagram  $a_p$ - $f$  za izbor posmaka  $f$  i dubine rezanja  $a_p$ 

Funkcije ograničenja su:

$$f \geq f_{\min} + \frac{a_p - a_{p\min}}{\tan \rho}, \quad (3.109)$$

$$f \leq f_{\max}. \quad (3.110)$$

#### 8. Ograničenje s obzirom na minimalnu frekvenciju vrtnje stroja

Najmanja frekvencija vrtnje može biti ograničena uvjetom oblika strugotine ili frekvencijom vrtnje stroja. Ograničenje ima oblik:

$$n \geq n_{\min} = \frac{318 \cdot v_{c\min}}{D}, \quad (3.111)$$

#### 9. Ograničenje s obzirom na maksimalnu frekvenciju vrtnje stroja

Analogno prethodnom, frekvencija vrtnje obratka mora zadovoljiti uvjet:

$$n \leq n_{\max} = \frac{318 \cdot v_{c\max}}{D}. \quad (3.112)$$

#### 10. Ograničenje s obzirom na minimalnu dubinu rezanja za zadani alat

Određuje se prema preporuci proizvođača alata:

$$a_p \geq a_{p\min}^*. \quad (3.113)$$

#### 11. Ograničenje s obzirom na maksimalnu dubinu rezanja

Ovo ograničenje uvjetovano je dodatkom za obradu  $\delta$ , tako da maksimalna dubina rezanja ne može biti veća od polovine dodatka za obradu:

$$a_p \leq \frac{\delta}{2}. \quad (3.114)$$

#### 12. Ograničenje dubine rezanja s obzirom na lomljenje strugotine

Dopuštena dubina rezanja s obzirom na lomljenje strugotine nalazi se u dopuštenom području kako je prikazano na slici 3.26.

Funkcije ograničenja su:

$$a_p \geq a_{p\min}, \quad (3.115)$$

$$a_p \leq a_{p\max}. \quad (3.116)$$

#### 13. Ograničenje maksimalnog posmaka s obzirom na krutost obratka

Određivanje posmaka s obzirom na krutost obratka (slika 3.27.) [79] temelji se na uvjetu najvećeg posmaka

$$\frac{\delta_2}{2} \geq \frac{0,4 \cdot \mu \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_s} \cdot f^{y_s} \cdot l^3}{E \cdot I} + \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} + C, \quad (3.117)$$

gdje su:  $\delta_2$  - dodatak za finu (završnu) obradu, mm,

$\mu$  - koeficijent ovisan o načinu stezanja obratka, pa je za konzolno stezanje  $\mu = 1/3$ ,  $I = 0,05 \cdot D^4$ , za stezanje između dvaju šiljaka  $\mu = 1/48$ ,  $I = 0,05 \cdot D^4$ , te za stezanje između stezne glave i šiljka  $\mu = 1/110$ ,  $I = 0,05 \cdot D^4$ ,

$I$  - moment inercije poprečnog presjeka obratka,  $\text{mm}^4$ ,

$C$  - dubina defektne površinske sloja materijala obratka, mm,

$l$  - slobodna duljina obratka izvan čeljusti stezne glave, mm,

$E$  - modul elastičnosti materijala obratka,  $E = (2 - 2,2) \cdot 10^5$  MPa za čelik,

Na temelju izraza (3.117) uvjet za najveći posmak ima oblik:

$$f \leq \sqrt[3]{\frac{\delta_2 \cdot E \cdot I}{0,8 \cdot \mu \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_s} \cdot l^3}}, \quad (3.118)$$

odnosno

$$a_p^{x_s} \cdot f^{y_s} \leq \frac{\delta_2 \cdot E \cdot I}{0,8 \cdot \mu \cdot C_{F_c} \cdot l^3}. \quad (3.119)$$

U slučaju da je gruba obrada ujedno i završna (slika 3.27., detalj A1), tada se za kriterij uzima točnost obratka i točnost obrade, pa se posmak određuje prema izrazu:

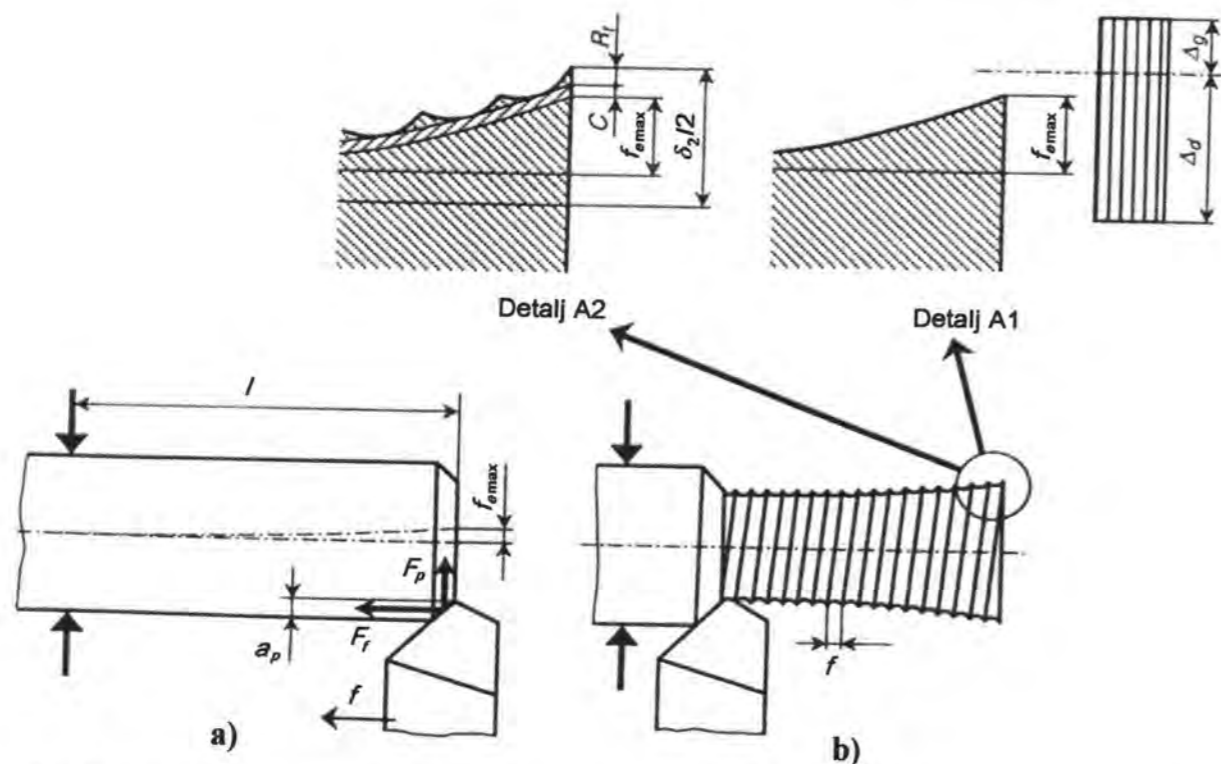
$$f \leq \sqrt[3]{\frac{f_{e\max} \cdot E \cdot I}{0,4 \cdot \mu \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_s} \cdot l^3}}. \quad (3.120)$$



Za maksimalni se progib obratka uzima vrijednost:

$$f_{e\max} = \frac{\Delta_d}{6}, \quad (3.121)$$

gdje je:  $\Delta_d$  - donja dopuštena granica tolerantnog polja za postojeće dimenzije obratka, mm.



Slika 3.27. Modeli za određivanje posmaka s obzirom na krutost obratka, kvalitetu obrađene površine i točnost obrade: a) početak tokarenja, b) završetak tokarenja, A1 - gruba obrada je i završna, A2 - poslije grubog zahvata slijedi zahvat fine obrade [79]

### Matematički modeli ograničenja pri finoj obradi tokarenjem

#### 1. Ograničenje s obzirom na dubinu rezanja

Kod fine je obrade broj prolaza  $i_p = 1$ , pa dodatak za završnu obradu  $\delta$  određuje dubinu rezanja:

$$a_p = \frac{\delta}{2}. \quad (3.122)$$

#### 2. Ograničenje posmaka s obzirom na kvalitetu obrađene površine

Pri finoj je obradi posmak ograničen veličinom hrapavosti obrađene površine. Srednja aritmetička hrapavost obrađene površine izražena u funkciji parametara obrade i geometrije alata je

$$Ra = C_R \cdot r_e^{x_a} \cdot f^{y_a} \cdot v_c^{z_a}, \quad (3.123)$$

pa slijedi

$$f \leq \left( \frac{Ra}{C_R \cdot r_e^{x_a} \cdot v_c^{z_a}} \right)^{\frac{1}{y_a}}. \quad (3.124)$$

Pri finoj obradi dubina je rezanja poznata te se brzina rezanja  $v_c$  ili frekvencija vrtnje  $n$  određuju na temelju izraza

$$v_c = \frac{C_v}{T^m \cdot a_p^x \cdot f^y}, \quad (3.125)$$

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot D}, \quad (3.126)$$

uzimajući pri tome ograničenja:  $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$  i  $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$ .

#### 3. Ograničenje posmaka s obzirom na progib obratka

Posmak se određuje na osnovi izraza (3.120), slika 3.27.

#### 4. Ograničenje frekvencije vrtnje u odnosu na postojanost alata i snagu stroja

Pri finoj obradi frekvencija vrtnje određuje se u odnosu na iskoristivost postojanosti alata i snage stroja. Frekvencija vrtnje u odnosu na iskoristivost postojanosti alata određuje se pomoću izraza

$$n_a = \frac{320 \cdot C_v}{D \cdot T^m \cdot a_p^x \cdot f^y}, \quad (3.127)$$

gdje su:  $n_a$  - frekvencija vrtnje u odnosu na iskoristivost postojanosti alata,  $\text{min}^{-1}$ ,

$D$  - promjer obratka koji se obrađuje, mm.

Frekvencija vrtnje s obzirom na iskoristivost snage stroja određuje se pomoću izraza:

$$n_s = \frac{1,91 \cdot 10^7 \cdot P_s \cdot \eta}{D \cdot C_{F_c} \cdot a_p^{x_1} \cdot f^{y_1}}. \quad (3.128)$$

Kada je  $n_a < n_s$ , tada se glavno vrijeme obrade određuje prema poznatom izrazu (3.41):

$$t_g = \frac{L}{n \cdot f}.$$

Usvojena frekvencija vrtnje  $n$ ,  $\text{min}^{-1}$ , prva je manja cjelobrojna vrijednost prijenosnika s kontinuiranom promjenom frekvencije vrtnje kod NC strojeva, dok se za prijenosnike sa stupnjevitom promjenom frekvencije vrtnje određuje odgovarajuća vrijednost  $n \cdot f$ , primjerice  $n \cdot f = \max(n_m f_0; n_{m+1} f_{m+1})$ , gdje su  $n_m$  i  $n_{m+1}$  susjedni standardni brojevi okretaja, dok je:

$$f_{m+1} = f_0 \cdot \left( \frac{n_a}{n_{m+1}} \right)^{\frac{1}{y}}. \quad (3.129)$$



Kada je  $n_S < n_a$ , tada se prethodno određuje broj prolaza prema izrazu

$$i_p = \left( \frac{f_{\max}}{f_0} \right)^{\frac{y_1}{x_1}}, \quad (3.130)$$

gdje je:  $f_{\max}$  - najveći preporučeni posmak za odgovarajući postupak obrade, materijal obratka i alata te kvalitetu obrađivane površine, mm.

Pri tome su novi parametri obrade:

$$a_p' = \frac{a_p}{i_p}; f_0' = f_0 \cdot i_p^{y_1}; n_S' = n_S. \quad (3.131)$$

Vrijednost  $n \cdot f$  određuje se kao i u prethodnom slučaju, odnosno

$$f_{m+1} = f_0' \cdot \left( \frac{n_S}{n_{m+1}} \right)^{\frac{1}{y_1}}, \quad (3.132)$$

pa je tada glavno vrijeme obrade

$$t_g = i_p \cdot \frac{L}{n \cdot f}. \quad (3.133)$$

## 4. INTELIGENTNI OBRADNI SUSTAVI

### 4.1. OSNOVE MODERNE PROIZVODNJE I NOVA PROIZVODNA FILOZOFIJA

Po strukturi i problemima upravljanja nova proizvodnja ima malo sličnosti s proizvodnjom iz 50-ih godina prošlog stoljeća kada je važio klasičan Taylorov model oblikovanja strukture i funkcije proizvodnje. Danas su temelji razvoja moderne proizvodnje: *zahtjevi tržišta, nova proizvodna filozofija utemeljena na znanju, napredne proizvodne i informacijske tehnologije i tehnike, novi materijali i suvremeni obradni i proizvodni sustavi.*

Nastale promjene su uvjetovane trećom tehnološkom revolucijom koja je iz temelja izmijenila dosadašnja shvaćanja i odnose u industrijskoj proizvodnji, te željom i potrebom razvijenih zemalja da jačaju konkurentske sposobnosti na tržištu u cilju postizanja većeg profita [105, 106, 107].

Informacijske tehnologije i nove upravljačke jedinice su u obradnim i proizvodnim sustavima ostvarile najznačajniji utjecaj, tako da je višestruko povećana proizvodnost rada, ekonomski rezultat i tržišna sposobnost. Najveće promjene u tehničko-tehnološkom razvoju u povijesti čovječanstva odigrale su se u posljednjih pedeset godina zahvaljujući brzom razvoju tehnike i pojavi računala. Promjene na tržištu uzrokovale su napuštanje klasične proizvodnje standardnih proizvoda za skladište i okretanje zahtjevima tržišta.

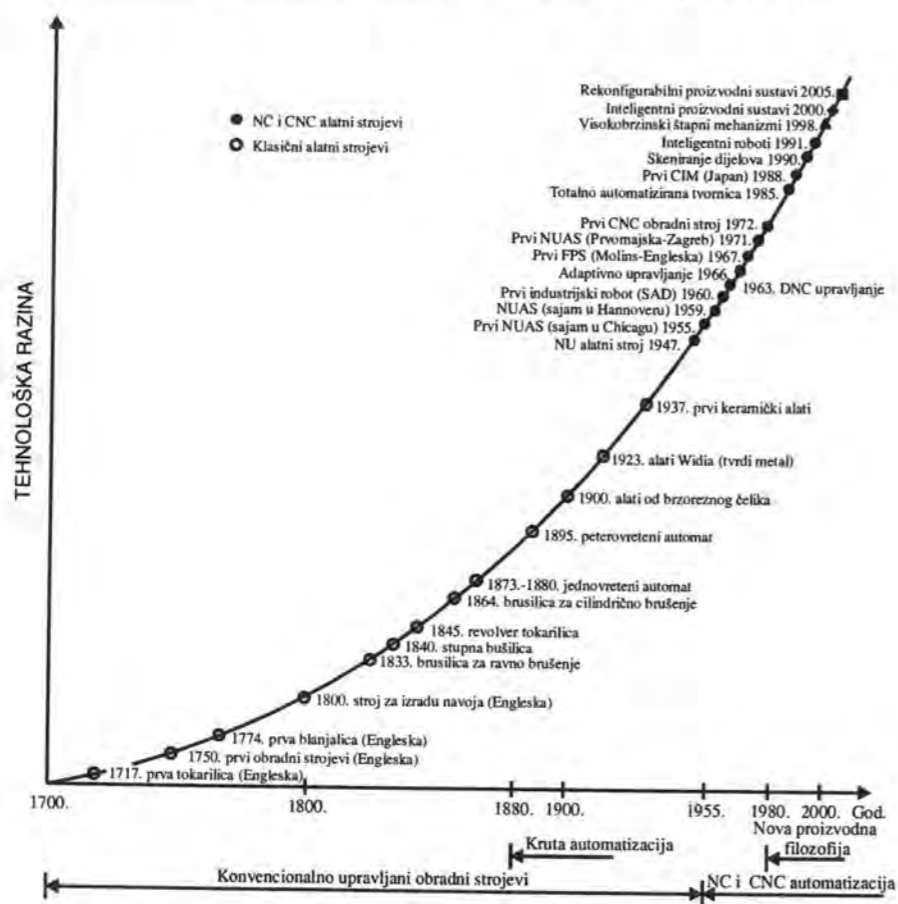
Dinamično i turbulentno stanje tržišta, sve veća konkurentnost, eksplozija noviteta i roba kojih ranije nije bilo te profinjenost potrošača doveli su do velikih promjena. Ovim



zahtjevima najbolje je odgovarala fleksibilna proizvodnja širokog asortimana proizvoda. Tako je fleksibilnost postala jedna od najvažnijih osobina nove proizvodne filozofije koja je determinirala tehničku i tehnološku strukturu proizvodnje. Fleksibilni obradni i proizvodni sustavi, kao tipični predstavnici nove proizvodne filozofije, sintetizirali su dvije odlike moderne proizvodnje – produktivnost i fleksibilnost koje su u klasičnoj proizvodnji bile nepomirljive. Prema tome, nova je proizvodna filozofija utemeljena na znanju, novim tehnologijama, novim materijalima, posebno na primjeni informacijskih tehnologija u svim fazama pripreme i procesa proizvodnje, gdje dominiraju računala.

## 4.2. EVOLUCIJA RAZVOJA OBRADNIH SUSTAVA

Prvi razvoj obradnih strojeva počinje 1717. u V. Britaniji. Početak razvoja modernih obradnih strojeva počinje 1947. na Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA. Razvoj fleksibilnih obradnih sustava započinje sedamdesetih godina prošlog stoljeća, a već krajem 20. stoljeća slijedi razvoj visokobrzinskih obradnih sustava s kinematikom štapnog mehanizma [108, 109], inteligentnih obradnih sustava [61, 110, 117], brzi razvoj i izrada prototipova (engl. *Rapid Prototyping*) [112, 113] te početak razvoja najnovijih rekonfigurabilnih obradnih i proizvodnih sustava, [114, 115, 116], slika 4.1.



Slika 4.1. Razvoj obradnih i proizvodnih sustava

## 4.3. ZAHTJEVI SUVREMENOG TRŽIŠTA I SLOŽENOST PROIZVODNJE

Zbog sve većih zahtjeva suvremenog tržišta u pogledu asortimana, kvalitete, cijena, rokova isporuke i dizajna, proizvodnja je bio temeljni zadatak prilagoditi se novim uvjetima globalnog tržišta ili propasti. Dakako, zbog porasta konkurencije proizvodnja je morala jačati vlastitu konkurentnost, a što moderna proizvodnja ostvaruje:

- povećanjem iskoristivosti proizvodnih sustava,
- stalnim snižavanjem vlastitih troškova,
- stalnim promatranjem tržišta i sve većom prilagodbom tržištu,
- povećanjem kvalitete proizvoda ovisno o zahtjevima kupaca,
- većom ugradnjom znanja u proizvod, obradne i proizvodne procese, ali i u sveukupnu pripremu proizvodnje,
- osvajanjem procesa i proizvoda više tehnološke razine i sve veće složenosti proizvoda, koji po pravilu mogu troškovno prihvatiti skupe, moderne i inteligentne obradne sustave.

To su neki od razloga da se proizvodnja u posljednjih dvadeset godina znatno promijenila, modernizirala i više okrenula tržištu. Proizvodnja je postala vrlo složena s visokim tehničkim, tehnološkim i ekonomskim zahtjevima u svim fazama pripreme i neposredne proizvodnje, te upravljanja i zahtjeva za ugradnjom znanja u proizvode, jer samo takvi proizvodi mogu koristiti skupe i suvremene obradne sustave.

Prema tome, sve veći i stalno novi zahtjevi tržišta traže od proizvodnje da im se brzo prilagođava, da uvodi nove tehnike i tehnologije i da se tako osuvremeni kako bi bila konkurentna i uspješna na globalnom tržištu.

## 4.4. KLASIFIKACIJA OBRADNIH SUSTAVA

Postoje različite klasifikacije obradnih sustava, a jedna od njih je evolucijska klasifikacija koja pokazuje vremenski slijed nastanka:

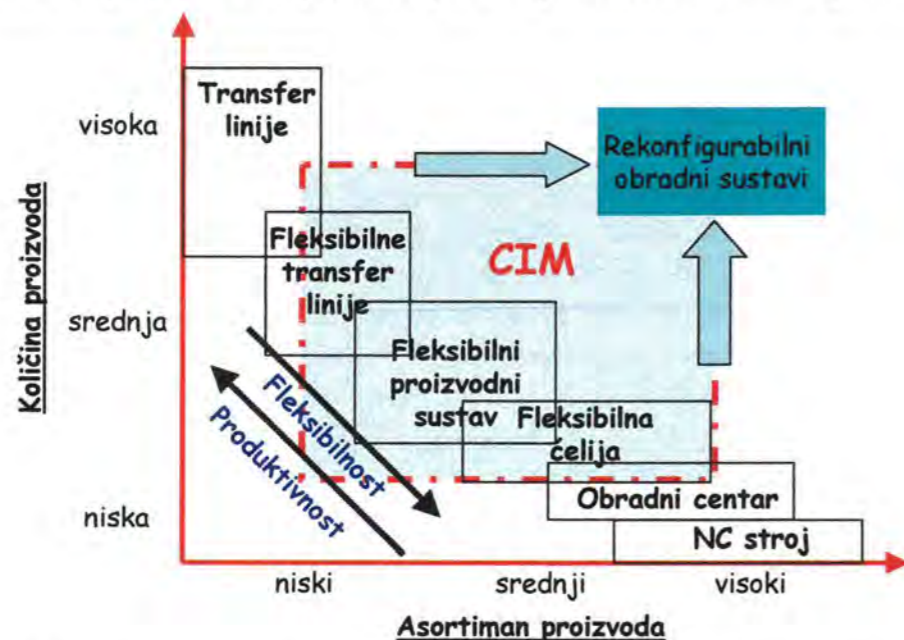
- konvencionalni obradni sustavi s ručnim upravljanjem,
- konvencionalni obradni sustavi s krutom automatizacijom,
- obradni sustavi s numeričkim (NC) i upravljanjem računalom (CNC),
- obradni sustavi s adaptivnim upravljanjem,
- visokobrzinski obradni sustavi s kinematikom štapnog mehanizma,
- inteligentni obradni sustavi, te
- rekonfigurabilni obradni sustavi s prilagodljivim hardverom i softverom.

Obradni sustavi novije generacije su visokobrzinski obradni sustavi, inteligentni i rekonfigurabilni. U serijskoj proizvodnji sve su veći zahtjevi za brzom promjenom asortimana proizvoda. Da bi se to postiglo razvijaju se rekonfigurabilni obradni i proizvodni sustavi.



Osnovne komponente ovih sustava su rekonfigurabilni alatni strojevi ili obradni moduli i rekonfigurabilni upravljački sustavi.

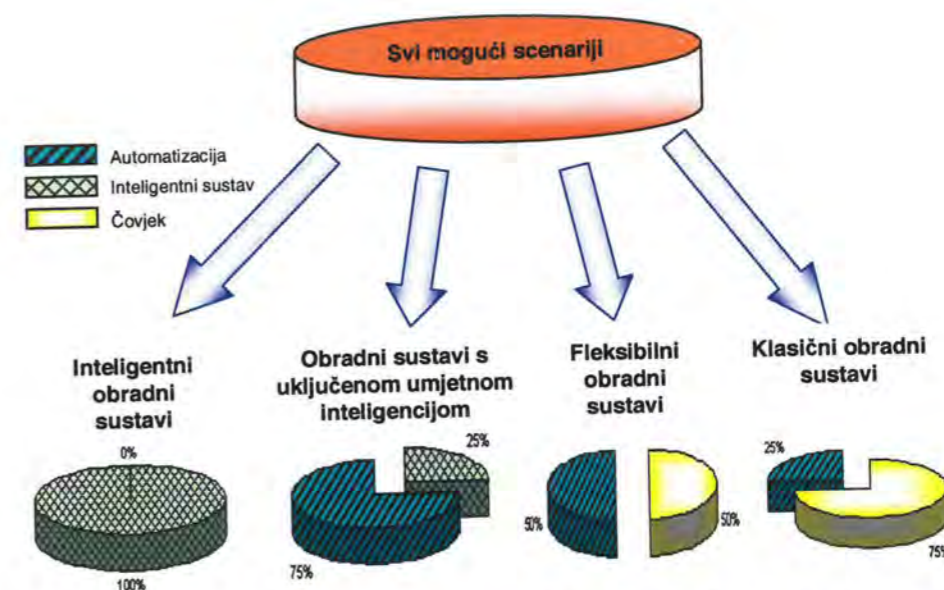
Rekonfigurabilni obradni sustavi trebaju odgovoriti brzim promjenama zahtjeva tržišta bez velikih troškova, koje po pravilu svaka promjena asortimana ima. Oni ne samo da trebaju imati veliku produktivnost, koja je odlika transfer obradnih sustava i transfer linija, već i proizvodnju širokog asortimana proizvoda što je odlika fleksibilnih proizvodnih sustava, slika 4.2. Ovdje se proizvodna linija mijenja dodavanjem obradnih modula ili izmjenom obradnih strojeva i izmjenom upravljačkih programa obradnih modula (dodavanje novih vretena ili izmjena spremnika alata i integriranje naprednijih kontrolera). Dok su transfer linije projektirane za proizvodnju određenih dijelova u velikim količinama, fleksibilni su proizvodni sustavi projektirani za proizvodnju širokog asortimana dijelova, a rekonfigurabilni obradni sustavi su projektirani za proizvodnju familija tehnološki sličnih dijelova.



Slika 4.2. Prikaz lokacije rekonfigurabilnih obradnih sustava u funkciji količine (broj istih dijelova) i asortimana proizvoda (veličina serije)

Rekonfigurabilni alatni stroj (RAS) je modularni stroj s promjenjivom strukturom, moguće je na primjer dodati novo radno vreteno. Rekonfigurabilni alatni strojevi zahtijevaju i rekonfigurabilne upravljačke module, koji se mogu brzo mijenjati u upravljačke sustave s otvorenom arhitekturom. Jedna od glavnih osobina RAS-a je modularnost, što znači da su sve glavne komponente modularne.

Osnovna je prednost automatiziranih konvencionalnih obradnih sustava njihova točnost i pouzdanost upravljanja ponavljajućih operacija bez umanjenja kvalitete. Najveći je nedostatak takvih strojeva u tome što su nesposobni inteligentno prepoznati nepredvidive događaje. Na slici 4.3. prikazan je stupanj automatizacije od konvencionalnih do inteligentnih obradnih sustava [117].

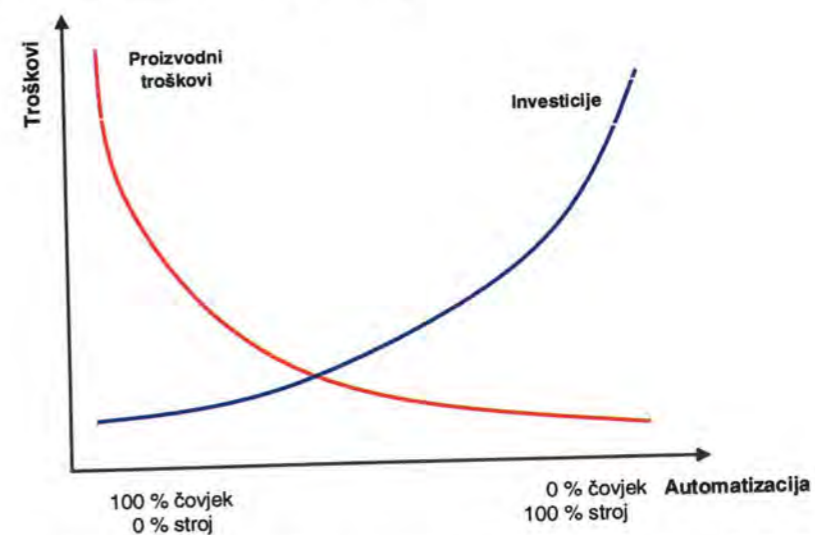


Slika 4.3. Mogući scenariji u pogledu upotrebe obradnih sustava

Glavni razlog za gradnju inteligentnih obradnih sustava je prepoznavanje događaja koje je teško unaprijed predvidjeti [118]. Kao i kod drugih sustava tako i kod inteligentnih proizvodnih sustava glavno mjerilo primjene je njihova ekonomska opravdanost, te u kolikoj će mjeri umjetne inteligencije biti ugrađeno u obradni sustav. Inteligentni obradni sustav je sustav sposoban dosegnuti cilj u uvjetima neodređenosti. Neodređenost se javlja kao posljedica:

- nepredviđenih događaja koji mogu biti unutar sustava (kvar komponenti) i izvan sustava u neočekivanim promjenama stanja okruženja,
- nepotpunih i netočnih informacija koje prima mjerni sustav.

Na slici 4.4. je prikazan odnos između stupnja automatizacije i troškova koji nastaju kao rezultat primjene automatizacije inteligentnih proizvodnih sustava.



Slika 4.4. Troškovi u ovisnosti o stupnju automatizacije [117]



Konvencionalni obradni sustavi nisu u mogućnosti reagirati na smetnje koje su rezultat slučajnih procesa, kao što je poremećaj sile ili temperature, pa je za rad u neodređenom okruženju potrebno primijeniti inteligentne obradne sustave. Zbog toga, ovi sustavi moraju biti sposobni prilagođavanju, donošenju odluka i zaključivanju na osnovu određenih znanja koja moraju uključivati [118]:

- znanje o cilju i zadatku,
- znanje o vlastitim mogućnostima i sposobnostima i
- znanje o okruženju u kojem djeluju.

Ovi obradni sustavi su utemeljeni na ekspertnim sustavima te se lako prilagođavaju sustavu znanja čovjeka, koristeći pri tome slična pravila pohranjena u bazi znanja.

#### 4.5. OSNOVE UMJETNE INTELIGENCIJE

U današnje vrijeme računalna tehnologija prisutna je u svakom dijelu suvremenog proizvodnog procesa. Posebnu važnost u automatizaciji i poboljšanju proizvodnih procesa ima primjena umjetne inteligencije. Vječita čovjekova težnja za što većom automatizacijom proizvodnog procesa, odnosno što manjim učešćem živog rada, prešla je u stvarnost. Danas je u upotrebi sve više takozvanih inteligentnih strojeva koji se odlikuju lakom adaptacijom na promjene u okruženju, radom bez neophodnog nadzora čovjeka, te interakcijom s čovjekom samo u trenutku vršenja servisiranja, iako je i to u nekim slučajevima automatizirano. Najvažniji dio inteligentnih sustava je njihov upravljački sustav i mogućnost prilagođavanja neodređenim stanjima.

Upravljački sustavi koji podrazumijevaju posjedovanje sposobnosti učenja i adaptacije na neodređenosti u radnom okruženju su sve prisutniji u inteligentnim proizvodnim tehnologijama.

Da bi se ovakav vid inteligentnog upravljanja ostvario, neophodno je da inteligentni obradni sustav sadrži: adaptivno procesiranje senzorom dobivenih informacija, ocjenjivanje stanja sustava, evolutivno-empirijsko odlučivanje i generiranje autonomnog ponašanja.

Osnovne karakteristike inteligentnih sustava su: mogućnost prikupljanja informacija i njihova paralelna obrada, donošenje odluka simultanim ispitivanjem prikupljenih podataka iz različitih izvora i baza znanja te shodno tomu upravljanje procesom.

##### 4.5.1. Sustav baza znanja

Koncept inteligentne proizvodnje utemeljen je na korištenju baza znanja. Baza znanja se sastoji od znanja iz nekog područja koje je potrebno za uspješan rad ekspertnog sustava. Ona predstavlja središnji dio ekspertnog sustava i obično sadrži podatke iz određene domene, pravila koja opisuju relacije među određenim aktivnostima, metode, heuristička načela te ideje za rješavanje problema u toj domeni.

Općenito, znanje se može prikazati na više načina:

- činjenicama,
- proceduralnim pravilima i

- heurističkim pravilima.

Činjenice predstavljaju izjave iz problemskog područja koje opisuju znanje aksiomatskog tipa. Proceduralna pravila su pravila koja opisuju osnovne dijelove radnji i odnosa, dok heuristička pravila, ili heuristika, predstavljaju pravila za koje bi se prije moglo reći da su sugestije jer ih se ne može dovoljno čvrsto obrazložiti, odnosno ekspert ih stječe svojim višegodišnjim iskustvom. U primjenu se uvode u slučajevima kada zbog nepotpunih ili nepouzdanih informacija nema odgovarajućih proceduralnih pravila.

Kako bi sustav nesmetano funkcionirao pored baza znanja potrebno je osigurati i sustav zaključivanja, koji se može predstaviti i kao mehanizam za rad s bazom podataka. Kada ne bi postojao ovakav mehanizam, sustav baza znanja bi bio samo skup pravila oblika "ako-onda" (engl. *if-then*), koja bi u takvom obliku bila neupotrebljiva. Nadalje je neophodno osigurati mehanizam zaključivanja odnosno donošenja odluka. Ovaj sustav se oslanja na nekoliko poznatih metoda za donošenje odluka, odnosno obradu podataka, a to su [119, 120]:

- živčevne mreže,
- evolucijske metode i
- ekspertni sustavi.

I na kraju najvažniji dio predstavlja korisničko sučelje putem kojeg se vrši interakcija korisnik – sustav. Ovo sučelje mora biti tako koncipirano da sustav od korisnika dobije dovoljno ulaznih podataka, korisniku osigura zadovoljavajuće izlazne podatke, i to uz što jednostavnije algoritme rukovanja.

#### 4.6. DEFINICIJA I OSNOVE INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA

Postoji više definicija za inteligentni sustav od kojih su neke [121]:

- Sustav je inteligentan ukoliko inteligentno vođenje obavlja svoju funkciju u nepoznatoj i nedovoljno strukturiranoj okolini, zbog čega sustav treba imati sposobnost razumijevanja, zaključivanja i učenja o sustavu koji vodi. Dakle, osnovni je cilj optimiranje ponašanja sustava.
- Sustav je inteligentan ako u dijelu spremanja informacija (uključujući i znanje) i u postupku odlučivanja primjenjuje metode adekvatne primjerima iz biološkog svijeta, za koje se može kazati da su inteligentne.
- Sustav je inteligentan ukoliko može djelovati u nestandardnim situacijama koje nisu u potpunosti unaprijed predviđene.

Treća definicija je najrealnija s obzirom da prema prvoj definiciji danas još ne postoje adekvatni sustavi, dok je druga definicija previše ograničavajuća.

Metode inteligentnog vođenja su razvijene u području umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence*) i u području računalne inteligencije (engl. *Computational Intelligence*). Danas se postupci računalne inteligencije smatraju manje inteligentnim jer su im znanja spremljena u simboličkom obliku [122].



Računalna inteligencija je ovisna o numeričkim podacima koje je pripremio proizvođač, tako da se pri radu ne temelje na znanju. Znanje se koristi pri postavljanju algoritma te nije izravno prisutno pri radu sustava računalne inteligencije.

Prema tome, sustav je sustav umjetne inteligencije kada mu se implementira, odnosno doda znanje u simboličkom obliku kojim se on potpuno služi u svom daljnjem radu. Primjer sustava računalne inteligencije jesu umjetne živčevne mreže (engl. *Artificial Neural Networks*) koje treba u fazi učenja opskrbiti s dovoljno numeričkih podataka kako bi se formirala struktura mreže, nakon čega se rad mreže sastoji u jednostavnim numeričkim proračunima.

Tipičan primjer sustava umjetne inteligencije je sustav ekspertnog upravljanja (engl. *Expert Control*), gdje je znanje o upravljanju spremljeno u obliku semantičkih mreža, određenih pravila i procedura.

Također, neizrazito upravljanje (engl. *Fuzzy Control*) predstavlja sustav umjetne inteligencije. Ako bi inteligencije klasificirali prema njihovoj razini tada bi na vrhu piramide bila prirodna, biološka ili organska inteligencija koja čini kombinaciju umovanja, pamćenja i djelovanja. Dakle, ima sve atribute kojima istraživači inteligentnih sustava teže.

Na dnu piramide je računalna inteligencija koja sadrži algoritme koji donose zaključke na temelju matematičkih postupaka. U sredini ove piramide je umjetna inteligencija koja nastaje integracijom računalne inteligencije i simboličkih znanja. Ipak, sustavi računalne inteligencije nisu manje važni, iako su "manje inteligentni", jer je njihova praktična važnost i veća u odnosu na tzv. prave sustave umjetne inteligencije.

Razvoj novih postupaka vođenja-upravljanja je rezultat realnih potreba za automatskim upravljanjem kod sustava koji imaju složenu dinamiku te zadovoljavanjem posebno zahtjevnih ciljeva upravljanja – automatsko vođenje nedovoljno ili manje poznatih sustava ili procesa.

Inteligentno upravljanje ima sve veću primjenu kod sustava gdje postojeće metode klasičnog i naprednog-modernog upravljanja nisu dale očekivane i potrebne rezultate.

#### 4.6.1. Sustavi inteligentnog upravljanja utemeljeni na umjetnoj i računalnoj inteligenciji

##### Inteligentno upravljanje pomoću umjetne inteligencije

- Upravljanje ekspertno ili bazama znanja (engl. *Expert or Knowledge-Based Control*) ima praktičnu primjenu u inteligentnom upravljanju jer je primjena određenih zakona automatskog upravljanja nadopunjena heurističkom logikom [123, 124].
- Upravljanje s kvalitativnim zaključivanjem (engl. *Qualitative Reasoning Control*) je utemeljeno na teoriji kvalitativnog zaključivanja gdje se upravljani sustav opisuje postupkom kvalitativnog modeliranja [125].
- Neizrazito upravljanje (engl. *Fuzzy Control*) je u području nelinearnih, složenih sustava nepoznate dinamike utemeljeno na postavljanju pravila upravljanja u obliku AKO-ONDA (AKO je pogreška pozitivno mala i brzina pogreške negativno velika, ONDA primjeni upravljanje negativno srednje) [126, 127].

##### Inteligentno upravljanje pomoću računalne inteligencije

- Upravljanje živčevnom mrežom (engl. *Neural Network*) se temelji na živčevnoj mreži strukture složene od čvorova slične neuronima koji su organizirani u grupama zvanim slojevima, od kojih je najpopularniji algoritam natražne propagacije (engl. *back propagation*).
- Upravljanje pomoću evolucijskih algoritama se temelji na teoriji evolucijskih računalnih postupaka koji čine genetski algoritmi (engl. *genetic algorithms*) i strukture podataka.
- Upravljanje metodom diskretnih intervala ima primjenu kod upravljanja procesa složene dinamike i varijabilnih vrijednosti parametara, pri čemu su matematički modeli vrlo složeni.
- Upravljanje s promjenljivom strukturom se često ubraja u prilagodljivo (adaptivno) upravljanje iako nema mogućnosti izravnog učenja o sustavu.
- Adaptivno upravljanje se često temelji na matematički opisanom modelu i matematičkom algoritmu adaptacije te mjerenju parametara realnog stanja procesa.

##### Kombinirani postupci upravljanja

- Upravljanje neizrazito-živčevnim mrežama (engl. *Fuzzy-Neural Networks*) se temelji na neizrazito-živčevnim mrežama sastavljenim od neizrazitih živca (engl. *fuzzy-neuron*) [127].
- Upravljanje živčevno-neizrazito (engl. *Neural-Fuzzy Control*) koristi umjetne živčevne mreže kod definiranja neizrazitih skupova kojima se definiraju pravci upravljanja [131].

## 4.7. STRUKTURA INTELIGENTNOGA OBRADNOG SUSTAVA

Inteligentni sustavi u mogućnosti su potpuno autonomno u nepoznatom okolišu uz čovjekovo neznatno sudjelovanje izvršavati zadatke. Uređaji uključeni u inteligentni sustav organizirani su na hijerarhijskom principu, te se od klasičnih sustava razlikuju po fenomenu pojave inteligencije.

Važna je značajka inteligentnih sustava da paralelno prikupljaju i obrađuju informacije. Na osnovi prikupljenih informacija i analize podataka iz prethodno organiziranih i postavljenih baza znanja sustav donosi odluke o aktivnostima koje će poduzeti.

Inteligencija sustava povezuje se s učenjem, adaptacijom, samoorganizacijom, reagiranjem odnosno odzivom na djelovanje iz okoliša. Inteligencija je unutarnja karakteristika sustava, koja povećava njegove mogućnosti, te izbor najpovoljnije odluke i alternativnih scenarija iz dostupne baze znanja.

Inteligentni sustavi odlikuju se mogućnošću učenja koje se dijeli na [117]:

- učenje pod nadzorom, pri kojem sustav uči na osnovi podataka u ulazno-izlaznim informacijama;



- pojačano učenje, gdje sustav samostalno uči po načelu "pokušaj, popravi pogrešku" pri čemu pamti pravilne aktivnosti, pogreške i načine njihovih zaobilaženja;
- učenje bez nadzora, koje radi na principu samoorganiziranja bez vanjskih uputa.

Inteligentni sustavi često istodobno upotrebljavaju više algoritama i različitih strategija učenja te tako postižu veću prilagodljivost i veći učinak učenja. Sposobnost sustava da se prilagođava predstavlja sposobnost sustava da prilagodi parametre i strukturu sustava pri promjeni okoliša.

Sve veći porast kompleksnosti industrijske proizvodnje, te potreba za većim iskorištenjem kapaciteta i većom prilagodljivošću, nižom cijenom gotovih proizvoda i boljom kvalitetom u potpunosti je izmijenila do sada poznate i zastupljene organizacijske koncepte.

Od razvoja klasične teorije upravljanja do danas neprestano se radilo na razvoju novih metoda za analiziranje i upravljanje sustavima, te su razvijene [117]:

- metode modeliranja utemeljene na diferencijalnim jednadžbama;
- metode koje prate ponašanje sustava;
- metode nadzora procesa i sustava.

Zbog kompleksnosti današnjih obradnih sustava navedene metode ne pružaju mogućnost za potpunu optimizaciju proizvodnje. Naime, nemoguće je izvršiti matematičku optimizaciju zbog [133]:

- nestabilnosti procesa;
- nepotpunosti ili velikog broja informacija;
- neidentificiranih procesa;
- ostalih poteškoća koje su rezultat slučajnih varijabli.

Današnja su znanja o proizvodnji su multidisciplinarna i obogaćena znanjima iz drugih područja, kao što su računalno upravljanje, teorija sustava, marketing, itd.

Tržište je proizvodnom procesu nametnulo zahtjeve u pogledu kvalitete i plasiranja novih proizvoda. Tako je novi proizvod potrebno razviti u što kraćem roku i jednako ga tako plasirati na tržište u optimalnom trenutku. Zbog toga, nadzor nad proizvodnjom ne obuhvaća samo obradne sustave, već i radnu snagu. U zadnje vrijeme težnje su usmjerene na izgradnju nadzornog sustava cijeloga poslovnog sustava, čiji je cilj prikupljanje što više informacija o proizvodnom procesu kako bi one zatim bile korištene pri planiranju procesa.

U proizvodnom procesu upotreba umjetne inteligencije ima važno mjesto. U posljednjih se deset godina upotreba umjetne inteligencije u proizvodnji znatno povećala, što je učinak razvoja računalne tehnike te dostupnosti računala širem krugu ljudi.

Od pojave umjetne inteligencije razvijen je određeni broj njezinih aplikacija, a koje su se uglavnom temeljile na upotrebi baza znanja. Danas se umjetna inteligencija koristi za rješavanje kompleksnih proizvodnih problema, pri čemu se koristi različitim metodama koje su prethodno navedene.

U procesu razvoja inteligentnih sustava predstavljen je pojam inteligentnog stroja, kao dijela inteligentnog sustava.

Najvažnija je odlika inteligentnih strojeva ovladavanje nepredvidivim situacijama. Naime, klasični obradni strojevi bili su u mogućnosti izvoditi ponavljajuće obradne procese uz

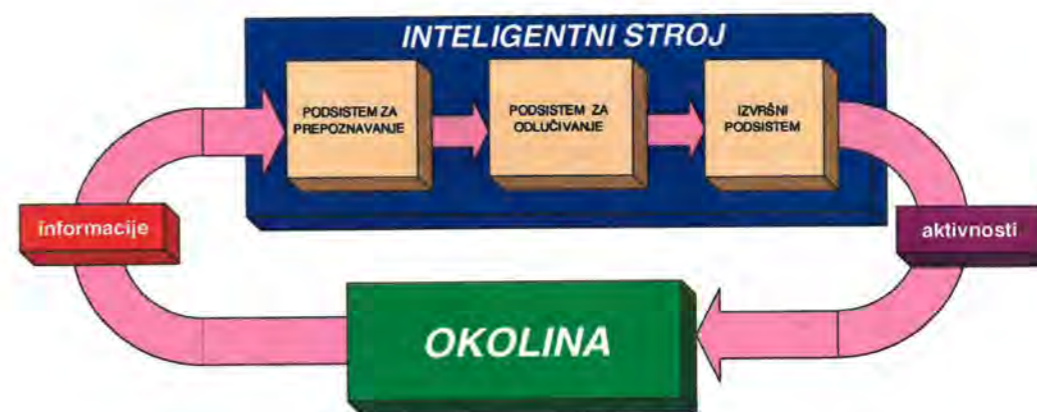
zadovoljavajuću kvalitetu obrade, međutim kod pojave neodređenih okolnosti nisu bili u mogućnosti savladati ih.

Tako npr. u automobilske industriji roboti koji su bili programirani za izvođenje operacije zavarivanja na automobilske karoseriji, tu su operaciju mogli raditi 24 sata dnevno, sedam dana u tjednu. Međutim, u slučaju kada bi karoserija pristupila na mjesto zavarivanja pogrešno orijentirana, robot bi svejedno pokušao izvršiti zavarivanje iako se ono moglo odvijati u zraku.

Inteligentni su strojevi spremni na takve događaje, jer su za to pripremljeni odgovarajući scenariji. Tako, stroj pri pojavi takve pogreške zna slijed operacija koje je potrebno poduzeti da bi se pogreška otklonila.

Arhitektura inteligentnog stroja podijeljena je na tri dijela, slika 4.5. [117]:

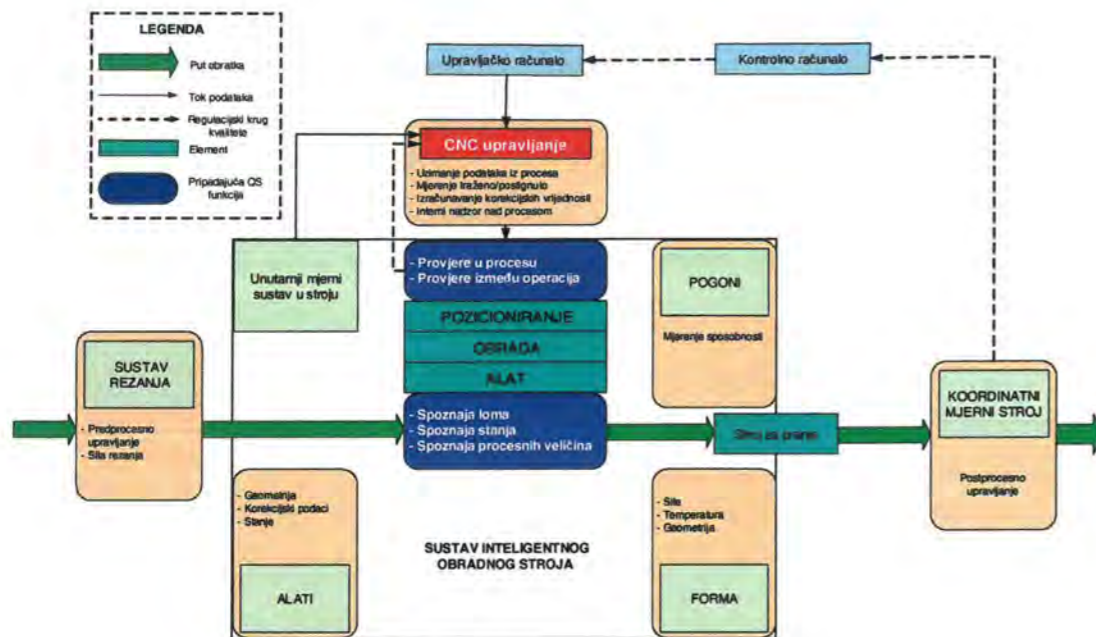
1. **Podsustav za prepoznavanje** zadužen je za praćenje informacija o stanju stroja i okoliša, a sastoji se od skupine senzora, jedinice za obradu signala i modula za obradu informacija.
2. **Podsustav za odlučivanje** na osnovi dobivenih informacija donosi odluke o ponašanju sustava prema promjenama iz okoliša. Glavne aktivnosti toga podsustava svode se na strateško planiranje i učenje.
3. **Izvršni podsustav** u osnovi se ne razlikuje od klasičnog stroja budući da je zadužen za izvođenje aktivnosti na temelju informacija dobivenih od prethodnih modula.



Slika 4.5. Struktura inteligentnog stroja

Na slici 4.6. prikazana je koncepcija inteligentnog stroja koja je u odnosu na klasični stroj znatno složenija jer mora imati puno različitih senzora koji su povezani u podsistem odlučivanja. Uporabom integrirane mjerne tehnike omogućena je realizacija koncepcije inteligentnog obradnog stroja. Cilj je inteligentnog stroja da se pomoću senzora i procesiranja informacija djeluje optimalno.





Slika 4.6. Koncept inteligentnog stroja [130]

U osnovi se razlika između klasičnog i inteligentnog stroja ogleda u tome što klasični stroj izvodi aktivnosti na temelju informacija o istima, dok inteligentni stroj na temelju istih informacija, informacija o stanju stroja i okoliša, te sam odlučuje o aktivnostima i parametrima.

#### 4.7.1. Upravljanje inteligentnim sustavima

Moderni fleksibilni proizvodni sustavi sastoje se od standardnih komponenti kao što su:

- obradni strojevi ili moduli,
- automatski vođena kolica,
- roboti manipulatori,
- automatska skladišta,
- računala i programska oprema.

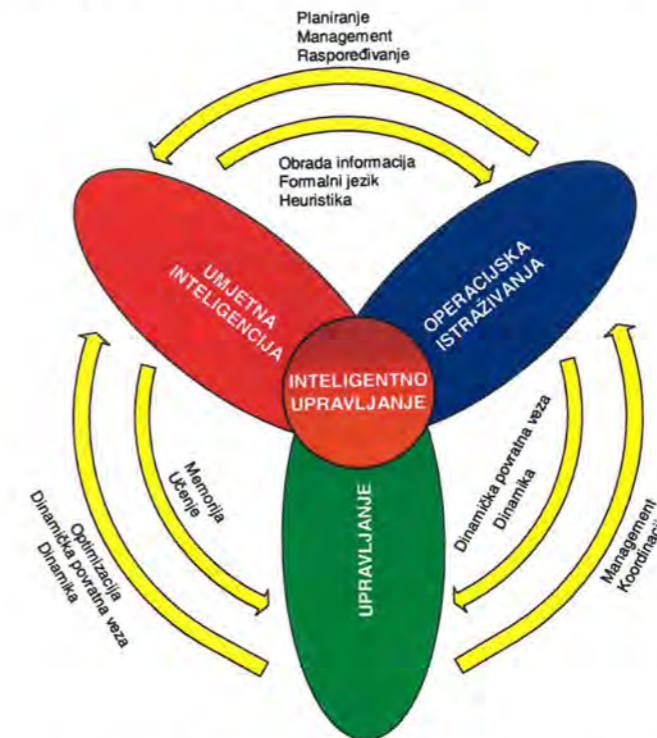
Nijedna od navedenih komponenti nije u mogućnosti samostalno ispuniti zahtjeve za funkcioniranje fleksibilnog sustava. To je jedino moguće postići adekvatnim integriranjem navedenih komponenti.

Iskoristivost sustava izravno je povezana s kvalitetom inteligentnih rješenja ugrađenih u sustav. Zbog toga je veoma važno adekvatno povezati sve funkcije i aktivnosti koje obavljaju navedene komponente.

Kako bi se postiglo optimalno djelovanje kompleksnih fleksibilnih proizvodnih sustava s velikim brojem uskih grla treba koristiti inteligentne alate i metode za optimizaciju izvršnih scenarija i rješavanje konfliktnih situacija na inteligentni način.

Rješenje navedenog problema implementirano je putem inteligentnog upravljanja. *Inteligentno upravljanje* može se smatrati fuzijom između matematičkih i lingvističkih metoda te algoritama primijenjenih na sustave i procese. Formalno se ono definira kao

disciplina koja inteligentnim sustavima omogućava izvođenje najsloženijih zadataka bez ili s minimalnim nadzorom čovjeka. Prema tome, inteligentno upravljanje je multidisciplinarnoga karaktera gdje je važna integracija svih komponenti sustava, slika 4.7.



Slika 4.7. Definicija inteligentnog upravljanja

Da bi inteligentno upravljanje bilo adekvatno izvedeno potrebno je uključiti podatke iz različitih disciplina [129]:

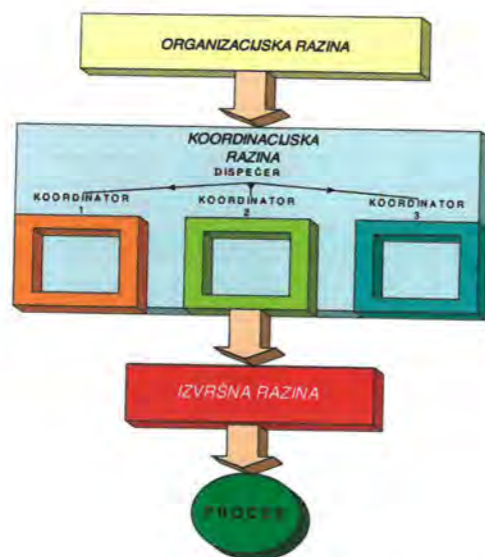
- umjetne inteligencije (UI),
- operacijskih istraživanja (OI) i
- teorije sustava (TS).

Široko prihvaćena struktura inteligentnog upravljanja sastoji se od triju razina upravljanja, kao što je to prikazano na slici 4.8., od kojih svaka razina može sadržavati više od jednog sloja strukturnih funkcija [129].

##### 4.7.1.1. Ekspertno upravljanje (Expert Control)

U području upravljanja sustavima, ekspertni se sustavi primjenjuju za podešavanje, adaptivno upravljanje bazirano na strukturnom znanju, zatim za dijagnosticiranje pogrešaka te raspoređivanje i planiranje. Važnu ulogu pri donošenju odluka na višim razinama ima i znanje operatora. Većina se ekspertnih sustava sastoji od problemski orijentiranih baza znanja i korisničkih sučelja u vidu algoritama usmjerenih k rješavanju problema. Korisnička sučelja ekspertnog sustava ovise o nizu izjava oblika "ako je A ... onda je B ..." pravila, koja predstavljaju prikupljeno znanje i uključene činjenice, veze mišljenja i odluke s varijabilnim stupnjem nepreciznosti. Ti su sustavi u mogućnosti obrađivati kvalitativna i kvantitativna znanja te su stoga našli široku primjenu u proizvodnim sustavima.





Slika 4.8. Struktura inteligentnog upravljanja

Kada se govori o kvalitativnim znanjima, govori se o znanjima koja u sebi nose konkretne podatke bez onih suvišnih, dok se u slučaju kvantitativnih znanja govori o znanjima opisanim količinskim vrijednostima.

Međutim primjena neizrazite (engl. *fuzzy*) logike i živčevnih mreža (engl. *neural networks*) u razvoju upravljačkih sustava teži k zamjeni tradicionalnih ekspertnih sustava stvarajući realističnije inteligentno upravljanje, primjenjivo u inženjerskoj praksi.

#### 4.7.1.2. Neizrazito upravljanje (Fuzzy Control)

Neizrazita logika smatra se jednom od najatraktivnijih strategija za rješavanje kompleksnih upravljačkih sustava, a posebno kada je riječ o nelinearnim sustavima koje je veoma teško matematički opisati i gdje je nedovoljno poznavanje njihova ponašanja. Neizrazito upravljanje u osnovi se odnosi na upravljanje procesima pomoću lingvističkog opisivanja. Upravljački izlaz zasnovan je na dostupnosti znanja za dani problem kodiranih u neizrazito "ako-tada" pravilu. Osnovna je prednost neizrazitog upravljanja njihova inherentna jednostavnost, fleksibilnost i robusnost. Međutim, pored prednosti prisutni su i nedostaci u pogledu nemogućnosti učenja i samoadaptiranja. Zbog toga je neizrazito upravljanje često u upotrebi u sklopu s živčevnim mrežama i genetskim algoritmima.

Primjena neizrazite logike u ekspertnim sustavima postala je atraktivan pravac u uspostavljanju ekspertnih sustava s neizrazitim prikazom znanja i neizrazitim rezoniranjem. Neizrazito upravljanje prisutnije je u industrijskoj primjeni nego u operacijsko-simbolički orijentiranim ekspertnim sustavima s obzirom na to da numerička rješenja mogu osigurati neizraziti ekspertni sustavi.

#### 4.7.1.3. Upravljanje živčevno-neizrazito (Neural-Fuzzy Control)

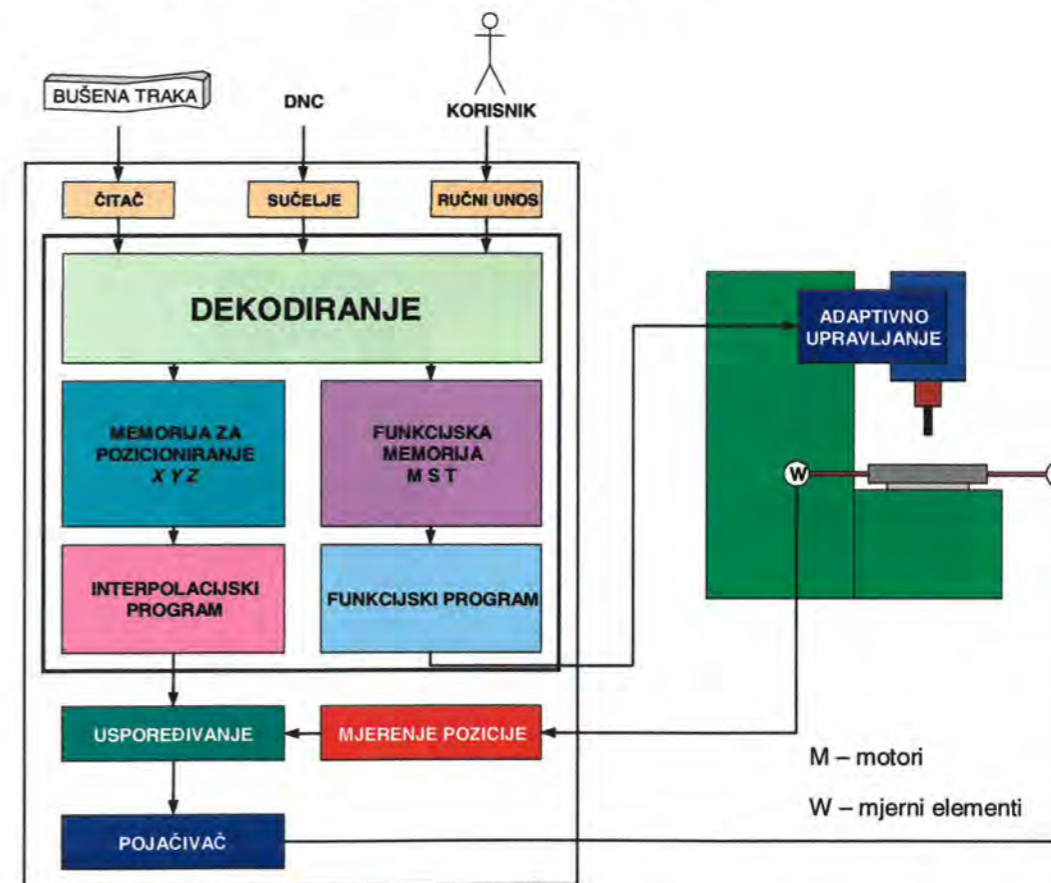
Živčevno-neizrazito upravljanje kombinacija je živčevnih mreža i neizrazitog sustava, pri čemu se učenje živčevnih mreža koristi za određivanje parametara i podešavanje neizrazitog

sustava. Dakle, kombinacijom tih dvaju sustava nastoji se poboljšati neizrazito upravljanje koristeći mogućnost učenja živčevnih mreža, te u isto vrijeme zadržavajući snagu prezentacije znanja neizrazitog upravljanja. U modernim se živčevno-neizrazitim pristupima živčevne mreže neizraziti sustavi također kombiniraju u jednu homogenu arhitekturu. Opći upravljački sustav može se predstaviti kao specifična živčevna mreža i kao neizrazito upravljanje implementirano u formi paralelne distribucije.

#### 4.7.1.4. CNC upravljačka jedinica s mogućnošću učenja

Ove upravljačke jedinice pripadaju području proizvodnih tehnologija u polju programiranja numerički upravljanih obradnih centara za obradu glodanjem, bušenjem i sličnim postupcima. Na slici 4.9. [134] prikazana je upravljačka jedinica konvencionalnog CNC stroja. Unutar CNC jedinice nalazi se računalo s uređajem za dekodiranje, memorijom za pozicioniranje, funkcijskom memorijom te interpolatorom s funkcijskim programima.

NC program prenosi se računalu putem ulaznih jedinica ili ručno putem ulaznoga korisničkog sučelja. Za svaki proizvod računalu se dostavlja novi NC program, s obzirom na to da upravljanje ne pamti već izvedene operacije i ne može automatski promijeniti programske parametre (osim nekih tehnoloških parametara, kao što su uvjeti rezanja, korekcije alata, premještanje referentnih ili nultih točaka).

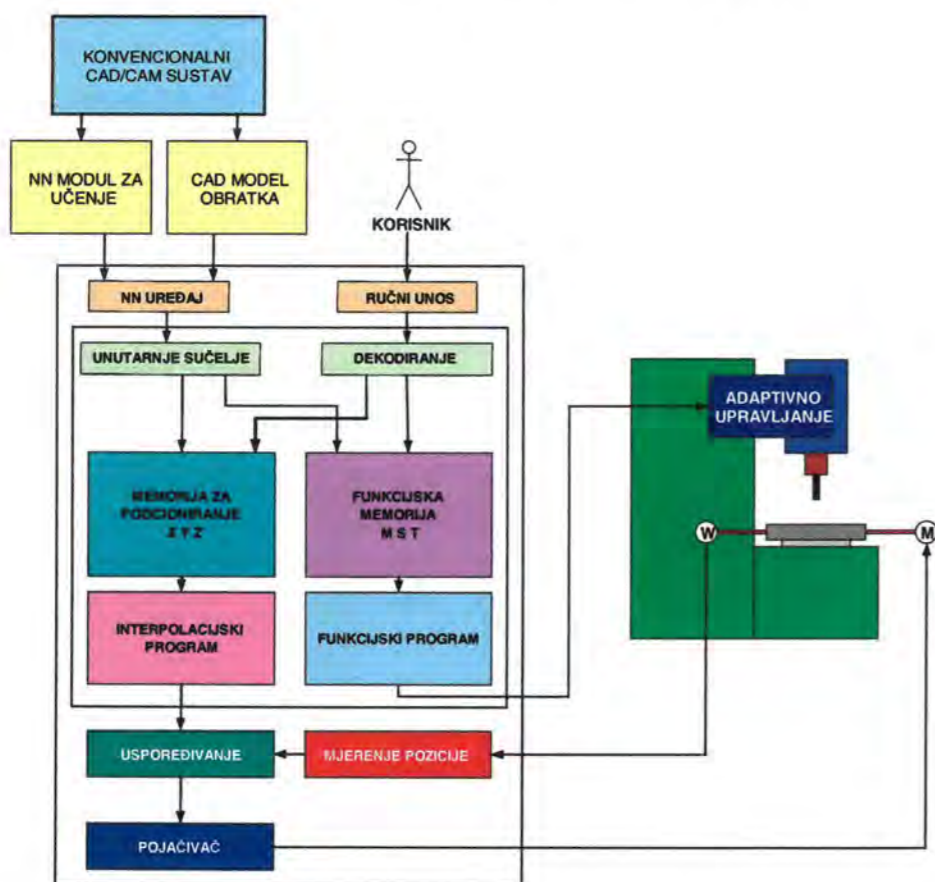


Slika 4.9. Blok-dijagram konvencionalnoga CNC stroja



Upotreba modernih CAD/CAM sustava ne može riješiti taj problem, već sustavu omogućuje bržu i bolju izradu novog NC programa. Rješenje tog problema nalazi se u upotrebi CNC upravljačke jedinice sa sposobnošću učenja "NN (engl. *Neural Network*) uređaj" (slika 4.10.) [135, 136]. Ta se jedinica temelji na upotrebi živčevnih mreža (NN), a sastoji se od specijalnih elektroničkih naprava, računala, unutarnjih sučelja, modula za učenje te modula za direktni unos CAD modela u NN uređaj. Danas je već prisutan velik broj rješenja za jedan takav upravljački sustav. Neka od rješenja našla su svoje mjesto u eksperimentalnim uvjetima, dok su druga još uvijek u obliku patenata. Međutim, zajedničko je za sva predložena rješenja da je nužna intervencija stručnog operatera prilikom pripreme NC programa za CNC alatne strojeve. Dakle, sustavi nisu u mogućnosti sami izraditi NC program za proizvode koji nisu pohranjeni u bazi podataka.

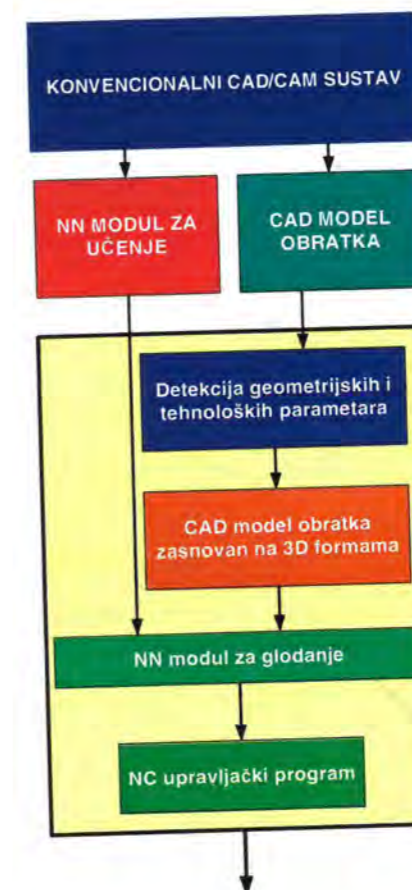
Upravljačka jedinica s mogućnošću učenja izgrađena na primjeni živčevnih mreža (slika 4.10.) predstavlja rješenje navedenog problema budući da je u mogućnosti samostalno generirati NC upravljački program za dijelove za koje on prethodno nije bio napisan. Živčevna mreža u modulu za učenje uči generirati NC program. Taj modul nije sastavni dio CNC upravljačke jedinice te zbog toga ima mogućnost nezavisnog rada.



Slika 4.10. CNC upravljačka jedinica sa sposobnošću učenja uz primjenu živčevne mreže

CNC upravljačka jedinica s mogućnošću učenja sastoji se od modificiranog mikroračunala, modula za dekodiranje, modula za ručni unos naredbi koje su uglavnom naredbe tehnološke

prirode (posmak, frekvencija vrtnje glavnog vretena, itd.). Mikroračunalo također sadrži unutarnje sučelje kojem je funkcija prijevod podataka iz NN uređaja u pozicijsku memoriju. Navedeni NN uređaj sastavni je dio CNC upravljačke jedinice i služi za automatsko generiranje NC programa na osnovi CAD modela obratka koji dobiva od pratećeg CAD/CAM sustava. Cijeli je uređaj realiziran u mikroprocesorskoj tehnici. CNC upravljačka jedinica podatke za učenje živčevne mreže prima od specijalnog modula za učenje koji nije sastavni dio upravljačke jedinice. Zadatak je toga modula naučiti živčevnu mrežu principe i tehnologiju NC programiranja za sve operacije rezanja na CNC stroju. U osnovi se za takve zadatke koriste različiti tipovi živčevnih mreža i komercijalnih programa.



Slika 4.11. Blok-dijagram NN uređaja

NN uređaj sastoji se od sljedećih komponenata (slika 4.11.) [117]: modula za prepoznavanje tehnoloških i geometrijskih osobina CAD modela obratka, računalnog CAD modela obratka koji sadrži geometrijske i tehnološke parametre, NN modula za glodanje koji je naučen za NC programiranje glodanja, bušenja i sličnih operacija, NC upravljačkog programa za dio koji je poslan upravljačkoj jedinici, kao što je CAD model obratka.

U fazi učenja NN uređaj se priključuje na modul za učenje živčevne mreže koji podatke za učenje dobiva iz komercijalno dostupnih CAD/CAM sustava koji se koriste za programiranje NC/CNC alatnih strojeva.



## 5. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Temeljem teorijskog razmatranja i praktičnog iskustva o problemu modeliranja i optimizacije parametara obrade pristupilo se izradi planova eksperimenata za proces uzdužnog tokarenja pri gruboj i finoj (završnoj) obradi. Rezultati mjerenja dobiveni ovim planovima koristit će se u svrhu definiranja odgovarajućih matematičko-statističkih modela i modela dobivenih primjenom evolucijskih algoritama, a u cilju pronalaženja optimalnih vrijednosti parametara obrade unutar domene eksperimenata.

### 5.1. PLANIRANJE EKSPERIMENTA

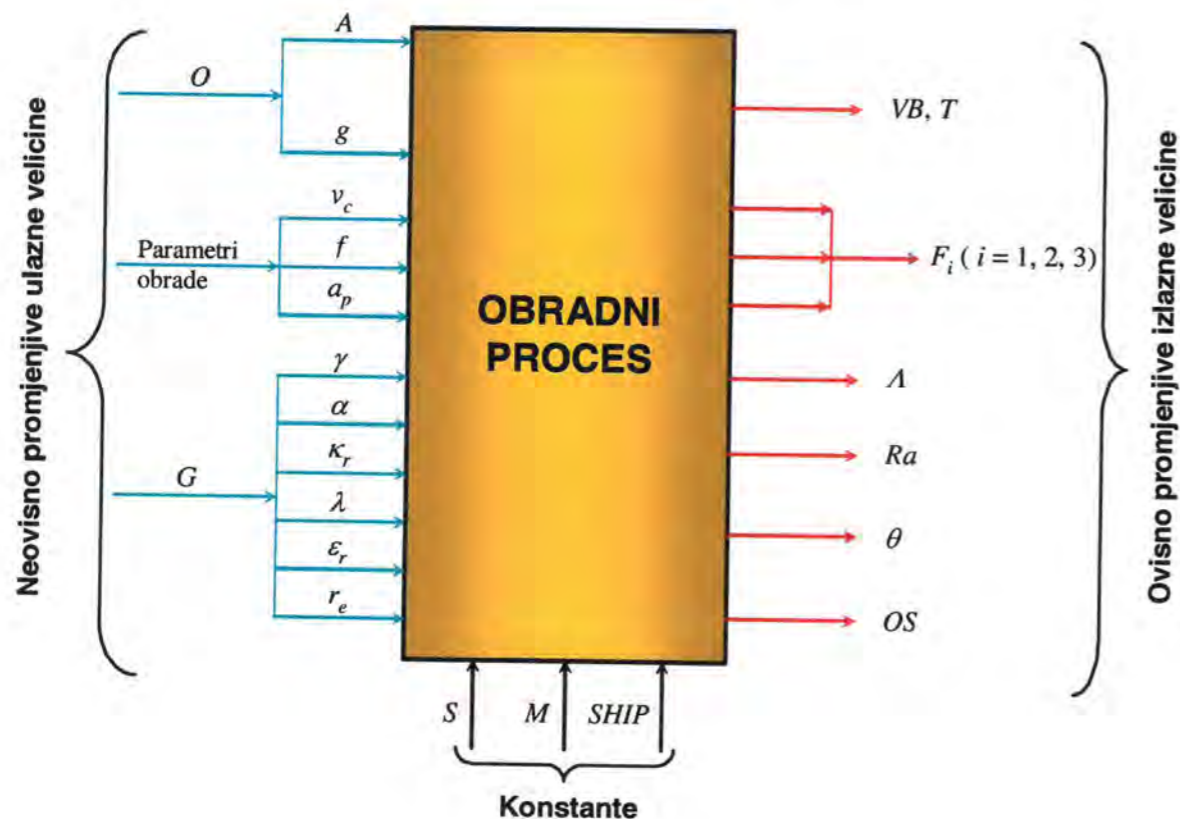
Planiranje eksperimenata (DoE – engl. *Design of Experiments*) već u samom nazivu podrazumijeva sistematski pristup eksperimentu od samog početka tj. prepoznavanja i definiranja problema pa do zaključka i eventualnih preporuka. Postupak planiranja eksperimenta može se uglavnom podijeliti na 7 osnovnih točaka i to [138]:

1. prepoznavanje i definiranje problema,
2. izbor parametara, razina i područja eksperimenta,
3. odabir odzivne varijable,
4. izbor plana eksperimenta,
5. izvođenje eksperimenta,
6. statistička obrada rezultata i
7. zaključak.



Na temelju navedene procedure planiranja eksperimenta, a nakon teorijskih i praktičnih spoznaja o procesu obrade, može se pristupiti veoma važnom drugom koraku, tj. identifikaciji utjecajnih parametara procesa uzdužnog tokarenja (slika 5.1.), te na temelju toga odrediti one ulazne (neovisne) parametre koji će na najbolji mogući način opisati istraživani proces obrade. Stoga, da bi eksperiment u potpunosti uspio od ključnog je značenja ispravno definiranje i upravljanje (razine plana eksperimenta) ulaznim parametrima prema planu eksperimenta. Također, treba imati na umu da ostali parametri procesa (kontrolirani i nekontrolirani) moraju ostati konstantni tijekom cijelog eksperimenta. Ako to nije slučaj, pogreške učinjene u eksperimentu utjecat će kasnije na točnost dobivenog modela u vidu neadekvatnosti tako da model ne opisuje dovoljno točno razmatrani problem. Jedini je način rješenja takva problema izvođenje novog eksperimenta (novi troškovi) uz pornije planiranje kontroliranih i nekontroliranih parametara te bolji odabir ulaznih promjenjivih parametara procesa.

Treći je korak u planiranju odabir odzivne varijable, pri čemu treba postići da odabrana varijabla osigurava bolji opis tretiranog procesa obrade. Pri tome, treba zbog smanjenja pogreški pri mjerenju ponavljati eksperiment više puta u svakoj točki plana, kako bi srednja vrijednost mjerenja postala realnija vrijednost odzivne varijable.



Slika 5.1. Utjecajni parametri procesa uzdužnog tokarenja

Na temelju slike 5.1. može se postaviti opći model procesa uzdužnog tokarenja u obliku

$$\begin{aligned}
 F_i &= \varphi_i(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \quad i = 1, 2, 3, \\
 VB &= \varphi_4(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \\
 T &= \varphi_5(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \\
 A &= \varphi_6(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \\
 Ra &= \varphi_7(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \\
 \theta &= \varphi_8(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon), \\
 OS &= \varphi_9(A, g, v_c, f, a_p, \gamma, \alpha, \kappa_r, \lambda, \varepsilon_r, r_\varepsilon),
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

gdje su:  $O$  - odrezak strugotine određen s površinom odreska  $A = a_p \cdot f$  i vitkošću strugotine  $g = a_p f$ ,

$G$  - geometrija alata određena osnovnim parametrima ( $\gamma$  - prednji kut,  $\alpha$  - stražnji kut,  $\kappa_r$  - kut namještanja,  $\lambda$  - kut nagiba glavne oštrice,  $\varepsilon_r$  - vršni kut,  $r_\varepsilon$  - radijus zaobljenja oštrice),

$S$  - obradni stroj ili obradni sustav (stroj, alat, naprava i obradak),

$M$  - materijal obratka (čvrstoća, tvrdoća, kemijski sastav, oblik, površinsko stanje, itd.),

$SHIP$  - sredstvo za hlađenje i podmazivanje,

$F_i$  - komponente sile rezanja ( $i = 1, 2, 3$ ),

$VB$  - pojas istrošenosti stražnje površine alata,

$T$  - postojanost alata,

$A = m/(\rho \cdot a_p \cdot l_s)$  - faktor zbijanja odreska strugotine,  $m$  - masa odreska dužine  $l_s$ ,  $\rho$  - gustoća materijala strugotine,

$Ra$  - veličina hrapavosti obrađene površine,

$\theta$  - temperatura procesa skidanja strugotine,

$OS$  - oblik strugotine.

Prikazani je model (5.1) vrlo složen, pa ga stoga treba prilagoditi realnim potrebama i uvjetima, tj. svesti broj ulaznih i izlaznih parametara na "optimalnu" razinu imajući uvijek u vidu da modeli i eksperimentalni rezultati moraju adekvatno prezentirati proces.

Prve tri točke postupka planiranja predstavljaju preduvjet uspješno obavljenog eksperimenta i prethodnicu eksperimentalnom dijelu plana.

Četvrta točka u planiranju eksperimenta odnosi se na izbor plana eksperimenta, odabir liste izvođenja pojedinih eksperimenata kao i broja ponavljanja svakog eksperimenta.

Pri odabiru plana eksperimenta pošlo se od dviju poznatih tehnika, s jedne strane, potpunoga faktornog ortogonalnog plana [18, 74, 138] i s druge strane primjene robusnog plana eksperimenta korištenjem ortogonalnih nizova prema metodi Taguchija<sup>1</sup> [28].

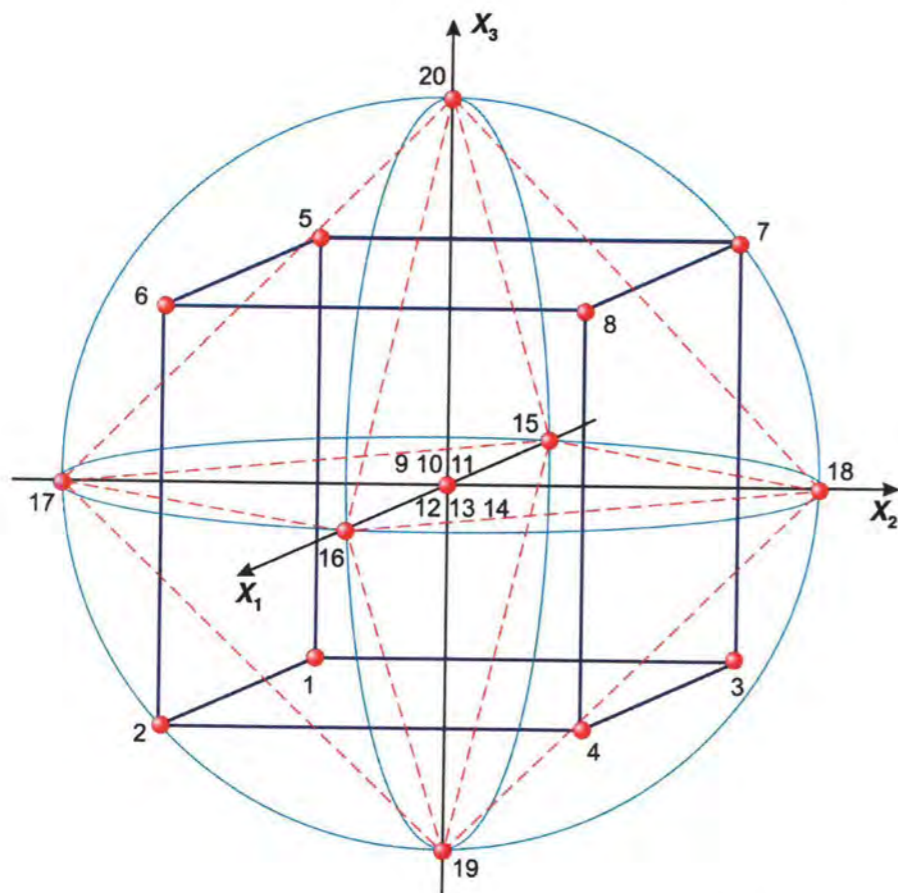
<sup>1</sup> Japanski inženjer dr. Genichi Taguchi utemeljitelj novog pristupa u planiranju eksperimenta, oblikovanju i razvoju proizvoda poznatog pod nazivom *Robust Parameter Design* (RPD) ili Taguchijeva metoda.



### 5.1.1. Potpuni faktorni plan (Full Factorial Experimental Design)

Za istraživanje hipotezom postavljenog cilja nije preporučljivo (traži se veća točnost matematičko-statističkog modela) izvršiti modeliranje linearnom funkcijom  $y = y(x)$  već planiranje eksperimenta treba izvesti na temelju centralnoga kompozicijskog plana (slika 5.2.) u cilju dobivanja matematičkih modela višeg reda, u ovom slučaju drugog reda. Time se postiže bolji matematički opis istraživanih procesa kao i mogućnost primjene klasične matematičke (derivacijske) metode traženja optimalnih vrijednosti parametara obrade.

Između faktornih planova prvog i drugog reda postoji međusobna povezanost, koja se iskazuje činjenicom da su planovi drugog reda nastali nadogradnjom planova prvog reda korištenjem već postojećih eksperimentalnih točaka. To se postiže temeljem poznatih teorijskih ili empirijskih matematičkih modela (poglavlje 3.) gdje se za izlazne veličine koristi opširniji eksperimentalni plan prikazan na slici 5.2. Tako definirani složeni planovi omogućavaju matematičko-statističku obradu rezultata i dobivanje dvaju različitih oblika modela.



Slika 5.2. Centralni kompozicijski plan  $N = 2^k + n_0 + n_a$  za  $k = 3$

Kako je već navedeno, za istraživani postupak obrade tokarenjem (gruba i fina obrada) primijenjen je centralni kompozicijski plan eksperimenta utemeljen na matematičkoj teoriji

eksperimenta s trima neovisno promjenjivim parametrima, gdje je potreban broj eksperimenata:  $N = 2^k + n_0 + n_a = 2^3 + 6 + 6 = 20$  [18, 30, 74]. Koordinata  $\alpha$  izračunata je iz izraza:  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ .

Pri definiranju polinomskog modela drugog reda primijenjena je matrica (plavi pravokutnik) u sljedećem obliku:

$N$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 $X_0 = 1$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	0
16	1	1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0	0
17	1	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0
18	1	0	1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0
19	1	0	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0
20	1	0	0	1,682	0	0	2,828	0	0	0	0

Skraćeni oblik te matrice, prikazan u crvenom pravokutniku, iskorišten je za definiranje polinomskog modela prvog reda.

Iz gore navedenih matrica može se zaključiti da su odabrane tri ulazne varijable procesa, s tom razlikom što veća matrica ima 20 eksperimenata na pet razina promjene ulaznih varijabli s interakcijskim djelovanjem, dok manja matrica ima 8 eksperimenata na dvije razine i bez interakcijskog djelovanja. Temeljem toga, izvedena obrada rezultata, kao i dobiveni modeli bit će različiti kako oblikom tako i točnošću.

### 5.1.2. Robusni plan (Robust Parameter Design)

Potkraj Drugoga svjetskog rata japanska je industrija bila potpuno devastirana što je iziskivalo dodatne napore u obnovi i revitalizaciji postojeće industrije na novim osnovama i u cilju postignuća konkurentnosti. Početkom 50-tih godina japanski inženjer-statističar dr. Genichi Taguchi razvija svoju ideju da proizvodi i procesi mogu biti tako oblikovani da su što manje pod utjecajem okoline. Takav pristup oblikovanju proizvoda i procesa naziva se robusnim planom (dizajnom), a prema idejnome tvorcu cijeli je ovaj pristup danas poznat pod

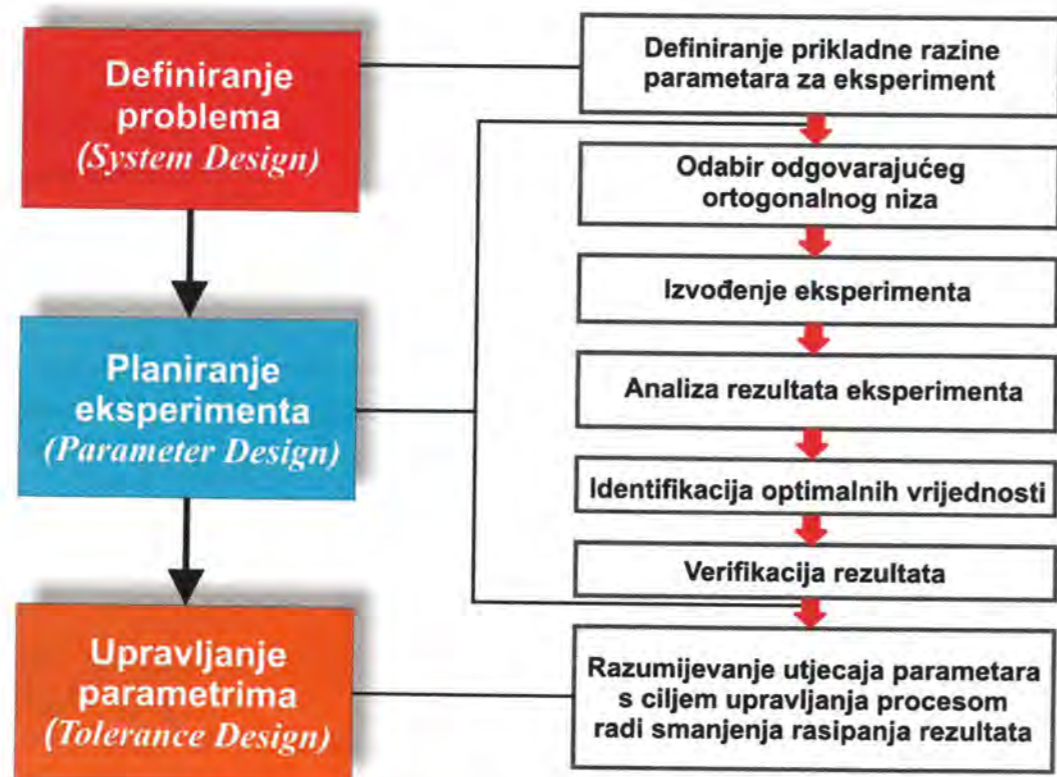


nazivom Taguchijeva metoda. Ta je učinkovita metoda svoju valorizaciju i svjetsku slavu stekla tek 80-ih godina nakon šire primjene u američkoj industriji.

Ideja na kojoj počiva robusni dizajn minimalna je varijanca ciljne vrijednosti proizvoda ili ciljne performanse procesa. Dakle, robusnim se dizajnom namjerava smanjiti potencijalna ovisnost procesa tj. omogućiti takva stabilnost (robusnost) procesa na koji će ograničeni utjecaj imati promjene nastale u procesu oblikovanja i proizvodnje, a u cilju smanjenja mogućih gubitaka do kojih mogu dovesti neželjene promjene ili odstupanja parametara od unaprijed definiranih vrijednosti.

U tu svrhu izgrađen je potpuno novi sustav planiranja eksperimenta (ortogonalni nizovi – engl. *Orthogonal Array*) i dorađeni postupak statističke obrade rezultata. Uvedena je nova karakteristika tj. odnos *S/N* (engl. *Signal-to-Noise*) koja predstavlja utjecaj tzv. šuma (nekontroliranih parametara) na ciljnu funkciju procesa što predstavlja univerzalno mjerilo za ocjenu eksperimentalnih rezultata, a u svrhu kasnije optimizacije parametara. Također treba spomenuti i funkciju gubitaka "*Quality Loss Function*" koja izražava novi pogled na kvalitetu i predstavlja vrlo učinkovit alat u području upravljanja kvalitetom.

Pri planiranju eksperimenta temeljenom na Taguchijevoj metodi treba se pridržavati procedure navedene na slici 5.3. [28]. Broj ulaznih parametara kao i u potpunom faktornom planu ostao je tri, a mijenjaju se razine vrijednosti ulaznih parametara: dvije za ortogonalni niz uobičajene notacije  $L_8(2^7)$ , a tri razine koriste se za plan eksperimenta na temelju ortogonalnog niza oblika  $L_9(3^4)$  (tablica 5.1.) [28, 30-33, 39, 78, 139].



Slika 5.3. Taguchijeva metoda – procedura

Tablica 5.1. Ortogonalni nizovi: a)  $L_8(2^7)$  i b)  $L_9(3^4)$

Eksperiment №	Parametri						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

a)

Eksperiment №	Parametri			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

b)

Iz tablice 5.1. uočljiva je, iako možda ne na prvi pogled, još jedna bitna značajka ove metode planiranja eksperimenta u odnosu na potpuni faktorni plan, a to je smanjenje broja potrebnih eksperimenata, a time i troškova. Tako bi npr. za ortogonalni niz slučaj a), potpuni faktorni plan zahtijevao  $2^7 = 128$  eksperimenata, a za slučaj b),  $3^4 = 81$  eksperiment.

## 5.2. IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

Eksperimentalni je dio rada izveden u laboratorijima Inštituta za proizvodno strojništvo: Laboratoriju za odrezivanje i Laboratoriju za inteligentne obdelovalne sisteme, Fakulteta za strojništvo Univerza v Mariboru. Cilj je istraživanja bio dobiti rezultate mjerenja koji će omogućiti definiranje modela za tri izlazna parametra procesa uzdužnog tokarenja: opterećenje alata definirano preko glavne sile rezanja, mikrogeometrija obrađene površine iskazana kroz površinsku hrapavost i postojanost alata definirana istrošenjem oštrice noža.

### 5.2.1. Uvjeti izvođenja eksperimenta

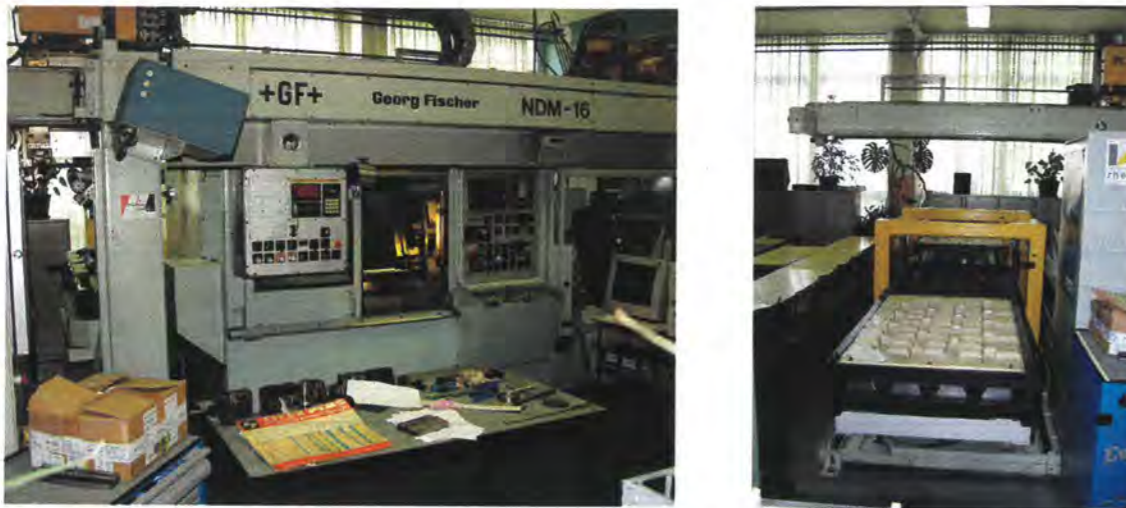
Eksperimentalni podaci dobiveni su pomoću odgovarajuće mjerne opreme bez uporabe sredstava za hlađenje i podmazivanje. Također, tijekom cijeloga eksperimenta pored stroja i materijala obratka konstantan je parametar bila i geometrija oštrice alata koja je ostala ista za grubu i za finu obradu.

#### Alatni stroj

Svi su eksperimenti izvedeni na NC tokarilici "Georg Fisher NDM-16" (slika 5.4.) koja je u stvari osnovni dio fleksibilne tokarske ćelije. Osnovne tehničke značajke stroja su:

- pogonska snaga elektromotora – 30 kW;
- frekvencija vrtnje – I. područje 15 - 1140  $\text{min}^{-1}$  i II. područje 50 - 4000  $\text{min}^{-1}$ ;
- najveći promjer obratka/najveća duljina tokarenja – 160/500 mm.





Slika 5.4. NC tokarilica "Georg Fisher NDM-16"

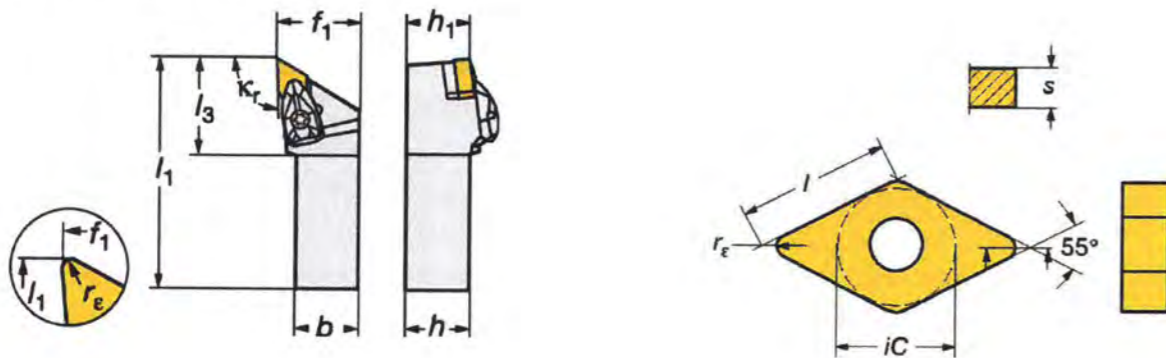
#### Alat – držač pločice i pločica

Korišten je tokarski nož proizvođača *SPK* oznake DDJNL 3225P15 s izmjenjivim pločicama negativne geometrije (tablica 5.2.) proizvođača *Sandvik Coromant* oznake DNMG 150608-PM4025 i prevlakom u tri sloja postupkom CVD (slika 5.5.). Sloj Ti(C, N) koji ide na supstrat je kombinacija visoke otpornosti na trošenje i dobre zaštite rezne oštrice, deblji srednji sloj je  $Al_2O_3$ , a gornji tanji sloj je TiN (žute boje). Ukupna debljina prevlake je približno 12  $\mu m$  [80]. Usvojeni kriterij istrošenja stražnje površine pločice je  $VB = 0,25$  mm. Vrijednosti parametara obrade za definiranu pločicu koje je preporučio proizvođač su:

$$v_c = 265 - 405 = 330 \text{ m/min,}$$

$$f = 0,15 - 0,50 = 0,30 \text{ mm/okr.,}$$

$$a_p = 0,50 - 6,00 = 3,00 \text{ mm.}$$



Slika 5.5. Tokarski nož i pločica

Tablica 5.2. Geometrija alata

$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\kappa_r$	$r_\epsilon$	$\epsilon_r$
5°	17°	-8°	93°	0,8 mm	55°

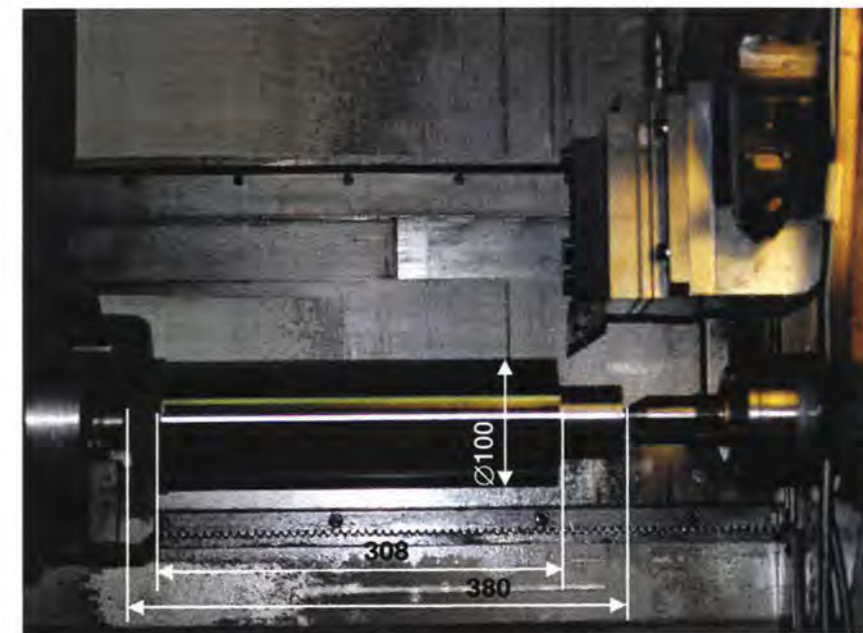
$\alpha$  - stražnji kut,  $\gamma$  - prednji kut,  $\lambda$  - kut nadvišenja,  $\kappa_r$  - kut namještanja,  $r_\epsilon$  - polumjer zaobljenja,  $\epsilon_r$  - kut vrha

#### Materijal obratka

Materijal obratka (tablica 5.3.) je opći konstrukcijski čelik, s oznakom Ck45 (DIN), AISI 1045, C45E (EN 10083/1996.) tj. Č1531 (HRN), dobiven toplim valjanjem. Čelična šipka je nakon toga toplinski obrađena normalizacijskim žarenjem. Osnovne dimenzije šipke su: promjer  $\varnothing 100$  mm, duljina 6 m i masa 61,7 kg/m. Prilikom obrade materijal je bio učvršćen u steznu glavu i oslonjen na konjić, kako bi se izbjegle vibracije i postigla veća krutost prilikom obrade, s obzirom na to da je eksperiment rađen na pripremljenim (odrezanim) komadima šipke, duljine 380 mm (slika 5.6.).

Tablica 5.3. Mehaničke karakteristike i kemijska struktura obratka

Č1531	Mehaničke karakteristike					Kemijski sastav %			
	vlačna čvrstoća $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	granica razvlačenja $R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	tvrdoa HB	istezljivost $A_5$ %	kontrakcija Z %	C	Si		
	650	420	179	24,2	48,2	0,467	0,309		
					Mn	P	S	Ni	Mo
					0,657	0,0141	0,0211	0,0339	0,0087



Slika 5.6. Radni prostor stroja sa stegnutom šipkom

#### Mjerna oprema

Od mjerne opreme, a radi prikupljanja podataka postavljenih kao izlazne veličine procesa, korišteni su: dinamometar, uređaj za mjerenje hrapavosti površine, alatni mikroskop i štoperica.

##### Dinamometar

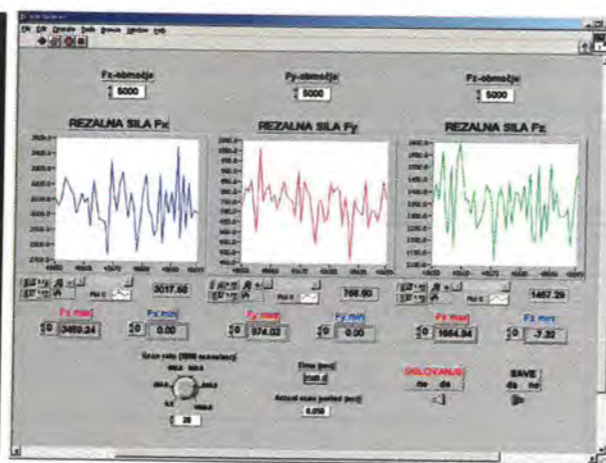
Za mjerenje sila pri tokarenju korišten je mjerni lanac koji se sastojao od dinamometra *KISTLER 9257A* za mjerno područje  $F_{x,y,z} = 5$  kN povezanog s 3-kanalnim pojačivačem *KIAG SWISS 5001* (slika 5.7.), koji je dalje slao signal, s jedne strane na analogni pokazivač *KIAG*



SWISS 5511 (kontrola) i s druge strane, preko akvizicijske kartice i LabVIEW™ softvera za prikupljanje, snimanje i obradu dobivenih mjernih rezultata u digitalnom obliku, na monitor računala (slika 5.8.). Snimanje vrijednosti sila dobiveno je na temelju 20 mjerenja/s ili 1200 mjerenja/min.



Slika 5.7. Pojačivač i analogni pokazivači



Slika 5.8. LabVIEW™ prozor

- Uređaj za mjerenje hrapavosti površine – profilmetar (slika 5.9.)

Kako bi se dobili podaci o kvaliteti obrađene površine korišten je uređaj za mjerenje hrapavosti ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_q$ ) proizvođača Mitutoyo oznake SJ-201P, referentne dužine 2,5 mm.

- Alatni mikroskop (slika 5.10.)

Za mjerenje istrošenja oštrice pločice na stražnjoj površini ( $VB$ ) korišten je alatni mikroskop proizvođača Carl Zeiss s uvećanjem od 30 puta i očitanjem od 0,0001 mm.



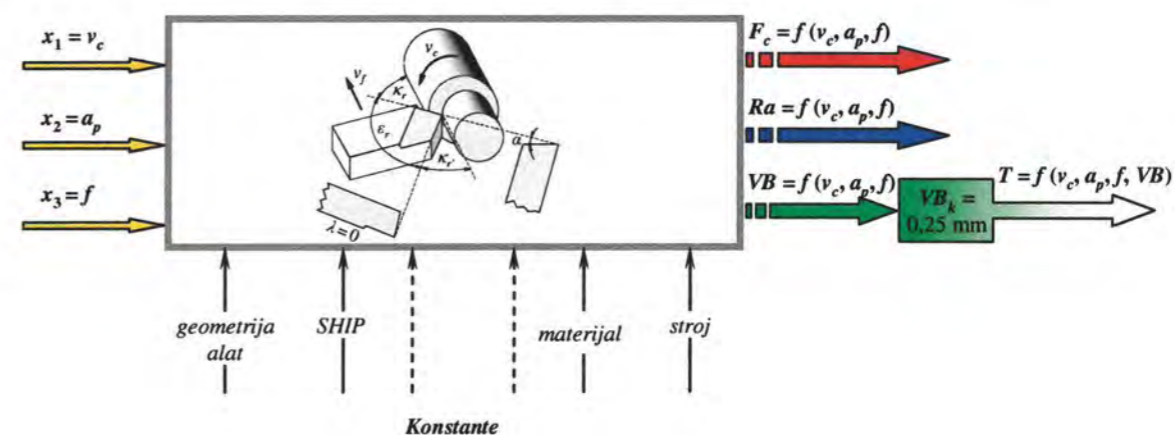
Slika 5.9. Profilmetar



Slika 5.10. Alatni mikroskop

## 5.2.2. Eksperimentalni rezultati

Rezultati dobiveni eksperimentom mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine (temeljem ulaznih parametara): grubu i finu obradu tokarenjem. Izlazne vrijednosti eksperimenta su: glavna sila rezanja ( $F_c$ ), srednje aritmetičko odstupanje profila ( $R_a$ ) i srednje vrijednosti širine pojasa istrošenja oštrice na stražnjoj površini ( $VB$ ), a s ciljem definiranja postojanosti alata ( $T$ ) kao treće izlazne veličine (slika 5.11.). Prve dvije izlazne veličine mjerene dobivene su izravno, dok je treća veličina, postojanost alata, dobivena neizravno preko vrijednosti referentnog istrošenja ( $VB_k = 0,25$  mm). Tijekom eksperimenta dobivene su i vrijednosti sile prodiranja i posmične sile kao i vrijednosti ostalih parametara hrapavosti površine.



Slika 5.11. Shema ulazno-izlaznih parametara za grubu i finu obradu tokarenjem

Temeljem preeksperimentalnih radnji definirane su granice, tj. vrijednosti neovisnih ulaznih parametara ( $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) kroz svih 5 razina kako za grubu tako i za finu obradu, pri tome imajući u vidu i preporuke proizvođača alata [80].

### 5.2.2.1. Gruba obrada tokarenjem

U teoriji o planiranju eksperimenata i kasnijoj matematičko-statističkoj obradi rezultata koriste se kodirane vrijednosti ulaznih parametara procesa tokarenja, a zajedno s fizikalnim vrijednostima parametara danim u tablici 5.4. formiraju matricu centralnoga kompozicijskog plana od 20 eksperimenata s ponavljanjem u nultoj točki plana (tablica 5.5.). Kodirane vrijednosti 3 neovisna ulazna parametra ( $x_i$ ), primjenom matematičko-statističke teorije o planiranju eksperimenata i izraza (5.2), poprimaju vrijednosti 5 razina od -1,6817 do +1,6817.

Tablica 5.4. Fizikalne i kodirane vrijednosti ulaznih parametara za grubu obradu tokarenjem

Parametri	$X_{-i\alpha} = -1,6817$	$X_{imin} = -1$	$X_{0i} = 0$	$X_{imax} = 1$	$X_{+i\alpha} = 1,6817$
<i>razine eksperimenata – kodirane i fizikalne vrijednosti ulaznih parametara</i>					
$x_1 = v_c$ (m/min)	266	300	350	400	434
$x_2 = f$ (mm/okr.)	0,23	0,3	0,4	0,5	0,57
$x_3 = a_p$ (mm)	1	1,5	2,25	3	3,5



Korištenjem izraza

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}} = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (5.2)$$

izvodi se kodiranje fizikalnih vrijednosti parametara obrade pri čemu se srednja razina ( $x_{0i}$ ) određuje izrazom

$$x_{0i} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}, \quad (5.3)$$

gdje su:  $X_i$  - kodirana vrijednost neovisno promjenjivih parametara,  $i$  - broj neovisno promjenjivih parametara ( $i = 1, 2, 3$ ),

$x_i$  - fizikalna vrijednost neovisno promjenjivih parametara na gornjoj (+1) ili donjoj razini (-1),

$x_{0i}$  - fizikalna vrijednost neovisno promjenjivih parametara u centru plana (0), tj. nulta-srednja vrijednost,

$\Delta x_i$  - interval granice fizikalnih vrijednosti parametara od srednje točke (0) do maksimalne (+1), odnosno minimalne (-1) vrijednosti parametara.

**Tablica 5.5.** Eksperimentalni rezultati za grubu obradu tokarenjem

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	300	0,3	1,5	879,224	4,30	17,60
2	400	0,3	1,5	894,327	3,88	4,73
3	300	0,5	1,5	1436,299	11,11	6,68
4	400	0,5	1,5	1408,114	11,48	1,88
5	300	0,3	3,0	1754,215	4,21	13,86
6	400	0,3	3,0	1726,937	4,50	3,80
7	300	0,5	3,0	2896,122	14,29	4,10
8	400	0,5	3,0	2860,663	13,71	1,16
9	350	0,4	2,25	1677,149	8,10	5,38
10	350	0,4	2,25	1672,771	8,13	5,10
11	350	0,4	2,25	1679,359	8,12	5,44
12	350	0,4	2,25	1678,825	8,12	5,28
13	350	0,4	2,25	1675,829	8,11	5,50
14	350	0,4	2,25	1678,223	8,10	5,22
15	266	0,4	2,25	1697,504	7,82	12,95
16	434	0,4	2,25	1683,361	8,15	1,81
17	350	0,23	2,25	1002,763	2,46	10,52
18	350	0,57	2,25	2609,254	17,95	0,75
19	350	0,4	1,0	765,921	6,36	6,65
20	350	0,4	3,5	2746,389	9,07	3,58

Prvih 8 eksperimenata (istaknuti u tablici 5.5.) izdvojeno će se koristiti kod modeliranja izlaznih parametara u polinomskom obliku prvog reda.

Za eksperimentalni plan od  $N = 8$  eksperimenata kodiranje se izvodi pomoću izraza:

$$X_i = 1 + 2 \cdot \frac{\ln x_i - \ln x_{i\max}}{\ln x_{i\max} - \ln x_{i\min}}, \quad (5.4)$$

gdje je:  $x_i = x_{i\max}$  za  $X_i = +1$ ,  
 $x_i = x_{i\min}$  za  $X_i = -1$ .

### 5.2.2.2. Fina obrada tokarenjem

Za finu obradu tokarenjem definirane su vrijednosti ulaznih parametara i njihove kombinacije koje pokrivaju područje većih brzina rezanja, a manjih posmaka i dubina rezanja nego što je to kod grube obrade, tablica 5.6. Eksperiment je također planiran i izvršen na temelju istoga centralnoga kompozicijskog plana (tablica 5.7.) kao i kod grube obrade tokarenjem s istim konstantnim parametrima procesa.

**Tablica 5.6.** Fizikalne i kodirane vrijednosti ulaznih parametara za finu obradu tokarenjem

Parametri	$X_{-i\alpha} = -1,6817$	$X_{i\min} = -1$	$X_{0i} = 0$	$X_{i\max} = 1$	$X_{+i\alpha} = 1,6817$
	razine eksperimenta – kodirane i fizikalne vrijednosti ulaznih parametara				
$x_1 = v_c$ (m/min)	366	400	450	500	534
$x_2 = f$ (mm/okr.)	0,066	0,1	0,15	0,2	0,234
$x_3 = a_p$ (mm)	0,13	0,4	0,8	1,2	1,47

**Tablica 5.7.** Eksperimentalni rezultati za finu obradu tokarenjem

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	400	0,1	0,4	128,893	0,77	32,66
2	500	0,1	0,4	130,755	0,80	11,15
3	400	0,2	0,4	201,899	1,70	25,89
4	500	0,2	0,4	202,200	1,67	7,45
5	400	0,1	1,2	337,859	1,11	28,43
6	500	0,1	1,2	330,745	1,19	9,23
7	400	0,2	1,2	492,945	2,14	20,74
8	500	0,2	1,2	550,848	1,77	5,61
9	450	0,15	0,8	299,005	1,26	14,44
10	450	0,15	0,8	301,647	1,30	14,38
11	450	0,15	0,8	304,772	1,29	14,39
12	450	0,15	0,8	299,519	1,28	14,48
13	450	0,15	0,8	299,875	1,27	14,43
14	450	0,15	0,8	303,832	1,28	14,46
15	366	0,15	0,8	313,225	1,37	34,46
16	534	0,15	0,8	307,622	1,31	6,12
17	450	0,066	0,8	174,024	1,21	20,25
18	450	0,234	0,8	406,719	2,32	10,93
19	450	0,15	0,13	61,223	1,17	12,18
20	450	0,15	1,47	497,895	1,13	10,05



Također, kao i kod grube obrade, prvih 8 eksperimenata omogućit će formiranje modela nižeg reda kao i usporedbu s dobivenim modelima višeg reda na temelju matrice od 20 eksperimenata.

Izlazne vrijednosti mjerenih veličina dane u tablicama 5.5. i 5.7. predstavljaju srednje vrijednosti više mjerenja (3 - 5), čime je smanjena mogućnost odstupanja izmjerenih od stvarnih vrijednosti.

## 6. MODELIRANJE PROCESA OBRADNE

Definiranje pouzdanih matematičkih modela prijeko je potrebno za određivanje parametara obradnog procesa, optimizaciju i simulaciju, te prognoziranje stanja procesa i sustava u fazi projektiranja tehnološkog procesa i kasnijeg njegova upravljanja, a u cilju što veće stabilnosti procesa. Izgradnja matematičkih modela za određene postupke i procese obrade jedna je od bitnih podloga, poglavito kod modernih i inteligentnih obradnih sustava, za implementaciju suvremenih računalnih sustava (CAD – *Computer Aided Design*, CAPP – *Computer Aided Process Planning*, CAM – *Computer Aided Manufacturing*).

Projektiranju procesa obrade uvijek treba prethoditi određeno modeliranje kako bi se tako dobiveni modeli mogli koristiti u definiranju viševarijantnih rješenja iz kojih je moguće definirati optimalni proces, postupak, opterećenje ili geometriju alata, vrijeme obrade i slično.

Korisnost matematičkog modeliranja može se analizirati i promatrati kroz povećanje produktivnosti procesa, odnosno iskoristivosti obradnog sustava, poboljšanje kvalitete proizvoda, smanjenje troškova pripreme i obrade i općenito povećanje ekonomske učinkovitosti.

### 6.1. MODELIRANJE – METODE, SVRHA I CILJ

Pod modeliranjem se podrazumijeva opis fizikalnih, tehnoloških, ekonomskih i drugih procesa. Rezultati procesa modeliranja su modeli koji mogu biti analitički, stohastički, numerički, grafički, statistički i drugi. Znači, modeliranje predstavlja opis zakona promjene



parametara procesa u određenom trenutku i prostoru imajući u vidu definirani skup ulaznih parametara, njihove međusobne interakcije kao i početne uvjete. Tako dobiveni modeli koji na matematički način definiraju odnos ulazno-izlaznih parametara procesa nazivaju se matematičkim modelima.

Metode modeliranja moguće je u osnovi podijeliti u dvije opće skupine i to:

- determinističke i
- stohastičke.

*Deterministički model* izražava se pomoću različitih matematičkih struktura, kao što su algebarske, obične diferencijalne, parcijalne, integralne i druge jednačbe. Kod determinističkog procesa obrade postoji jednoznačna ovisnost izlaznih (upravljanih) veličina  $\bar{y}$  o ulaznim veličinama  $\bar{x}$ , tako da deterministički matematički model ne sadrži poremećajne veličine  $\bar{z}$  (slika 6.1.), pa model procesa ili sustava ima oblik:

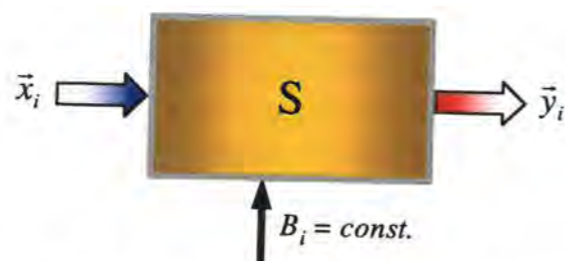
$$\varphi_{si}(\bar{x}, \bar{y}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (6.1)$$

uz ograničenja

$$g_i(\bar{x}, \bar{y}) \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6.2)$$

Eksplicitni oblik uz ista ograničenja (6.2) glasi:

$$\bar{y} = \varphi(\bar{x}). \quad (6.3)$$



Slika 6.1. Blok-shema determinističkog modela

Deterministički model često predstavlja približni i pojednostavljeni matematički opis realnog procesa. Međutim, osnovna obilježja svakoga realnog objekta ili procesa obrade gotovo su redovito stohastička. To znači, ako se želi dobiti adekvatan i točan matematički opis nekoga realnog procesa ili sustava, mora se opis definirati u obliku stohastičkog modela.

Prema tome, deterministički se model može koristiti samo kada su stohastička obilježja u realnom procesu ili sustavu manjeg intenziteta ili kada se želi približni ili pojednostavljeni, ali dovoljno točan matematički opis stohastičkoga procesa ili sustava.

*Stohastički modeli* (empirijsko-statistički) dolaze u obzir kada u procesu obrade ili sustavu postoji znatan utjecaj nekontroliranih – poremećajnih slučajnih faktora  $\bar{z}$ , slika 6.2. Tada opći matematički model stohastičkog procesa obrade glasi:

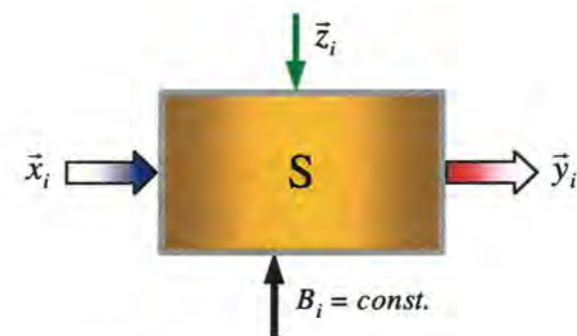
$$\varphi_{si}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (6.4)$$

uz ograničenja

$$g_i(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6.5)$$

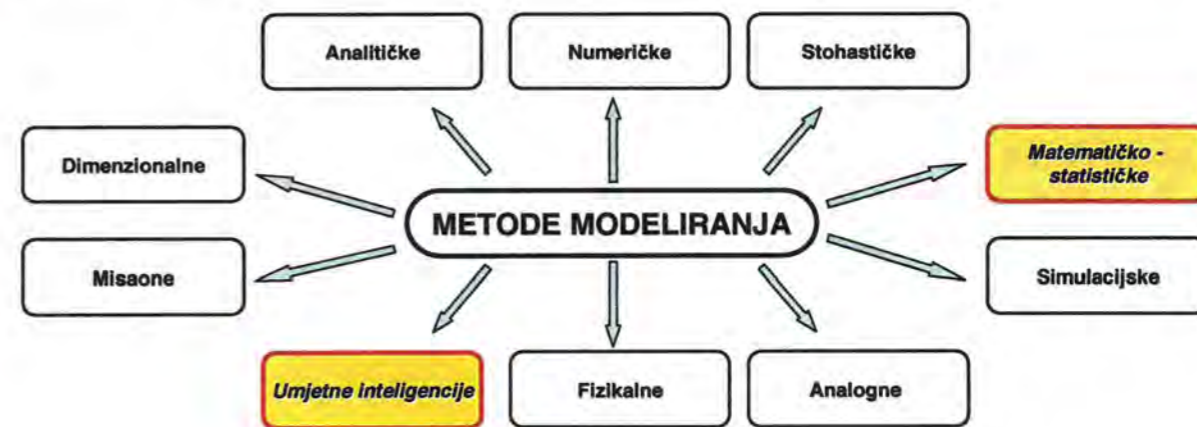
Eksplicitni je oblik modela:

$$\bar{y} = \varphi(\bar{x}, \bar{z}). \quad (6.6)$$



Slika 6.2. Blok-shema stohastičkog modela

U analizi i istraživanju procesa i sustava mogu biti primijenjene neke od sljedećih metoda modeliranja: analitičke, numeričke, matematičko-statističke, stohastičke, simulacijske, dimenzionalne, fizikalne, misaone, analogne kao i metode temeljene na umjetnoj inteligenciji, ali i druge, slika 6.3. U ovom će radu biti prikazan princip modeliranja parametara obrade uzdužnim tokarenjem (grubo i fino) primjenom matematičko-statističke metode i, unutar područja umjetne inteligencije, metode temeljene na genetskom programiranju (GP) i genetskom algoritmu (GA).



Slika 6.3. Klasifikacija metoda modeliranja

Osnovna je svrha modeliranja definiranje matematičkih modela i drugih prikaza (grafičkih, analitičkih, softverskih) koji su neophodni za simulaciju, optimizaciju, revitalizaciju i upravljanje procesima i sustavima. Modeliranje omogućuje da se realni objekt zamijeni matematičkim, fizikalnim, računalnim ili drugim modelom, kako bi postupak analize i ispitivanja bio brži i jeftiniji nego na realnom objektu.



Osnovna je svrha modeliranja procesa ili sustava izgradnja pouzdanih matematičkih modela, koji će s odgovarajućim stupnjem točnosti adekvatno opisati proces ili sustav, a sve s ciljem [74]:

- simulacije varijantnih rješenja, analize i prognoziranja stanja procesa još u fazi projektiranja,
- definiranja matematičkih modela koji su neophodni za optimizaciju procesa i iznalaženje optimalnih rješenja,
- izgradnje modela upravljanja za dani sustav, odnosno objekt optimizacije,
- znanstvenih istraživanja i/ili praktične primjene u realnim procesima.

Matematičko modeliranje i simulacija metode su nadgradnje, kojima je osnovni cilj inoviranje procesa i sustava, modernizacija i podizanje na višu tehnološku razinu.

## 6.2. MATEMATIČKO-STATISTIČKO MODELIRANJE

Cilj je matematičko-statističke obrade eksperimentalnih rezultata dobivanje pouzdanoga matematičkog modela koji bi uz određenu točnost trebao biti identičan analiziranom procesu. Za rješenje ovoga problema tj. dobivanje odgovarajućeg modela postoje različite metode (slika 6.3.), a jedna je od njih regresijska analiza. Ona je vrlo pogodna za definiranje veze između ovisno promjenjive izlazne veličine ( $y$ ) i neovisno promjenjivih ulaznih parametara procesa ( $x_i$ ) koja se može prikazati u obliku

$$y = \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) + \varepsilon, \quad (6.7)$$

gdje  $\varepsilon$  predstavlja slučajnu pogrešku eksperimenta ili tzv. šum nekontroliranih slučajnih parametara procesa, a izlazna funkcija procesa ( $y$ ) predstavlja tzv. odzivnu površinu (engl. *response surface*), obično grafički prezentiranu funkciju ovisnu o razini ulaznih parametara.

Prilikom definiranja matematičkog modela postoji mogućnost da je model poznat temeljem ranijih istraživanja kao i mogućnost da je model potpuno nepoznat.

Ako je model potpuno nepoznat, onda se u prvome koraku pri modeliranju polazi od najjednostavnijeg oblika polinomske funkcije nižeg reda (prvog) tj. linearne funkcije, pa se model može prikazati u obliku

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (6.8)$$

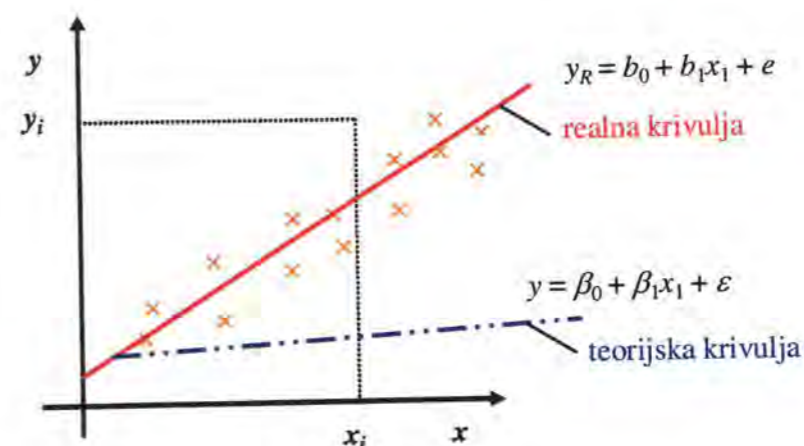
gdje su:  $x_i$  - varijabilni parametri procesa,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ ,

$\beta_i$  - teorijski koeficijenti modela regresije.

Također, ako se dobiveni linearni model kasnijom analizom pokaže nedovoljno dobrim ili neadekvatnim za tretirani proces, tada se pristupa izradi polinomske funkcije višeg reda, koji je u većini slučajeva drugog reda u sljedećem općem obliku:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < m} \beta_{im} x_i x_m + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < m \leq k} \beta_{imk} x_i x_m x_k + \varepsilon. \quad (6.9)$$

Model (6.9) osigurava optimalnu aproksimaciju promjene veličine  $x_i$  pomoću funkcije  $\varphi(x)$ . Dakle, iz familije mogućih regresijskih krivulja traži se ona koja najbolje aproksimira eksperimentalne rezultate, tj. skup točaka  $(x_i, y_i)$ , slika 6.4.



Slika 6.4. Teorijska i realna regresijska funkcija

U matematičkom modelu (6.9),  $\beta_i$  su koeficijenti linijskog utjecaja,  $\beta_{ii}$  kvadratnog utjecaja,  $\beta_{im}$  su dvoparametarske interakcije, a  $\beta_{imk}$  su troparametarske interakcije funkcije regresije. Njihova se vrijednost temeljem izvedenog eksperimenta i regresijske analize statistički određuje pomoću realnih regresijskih koeficijenata  $b_i, b_{ii}, b_{im}, b_{imk}$ , tako da matematički model poprima sljedeći oblik:

$$y_R = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{1 \leq i < m} b_{im} x_i x_m + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < m \leq k} b_{imk} x_i x_m x_k + e. \quad (6.10)$$

Točnost aproksimacije ovisi o broju članova  $b_i, b_{ii}, b_{im}$ , odnosno  $b_{imk}$  i vrijednostima tih koeficijenata. Određivanjem koeficijenata modela (6.10) dobiva se podatak o utjecaju parametara  $x_i$  na izlaznu veličinu  $y_R$  razmatranog procesa.

Na temelju prethodnoga može se zaključiti da oblik modela za manje složene procese može biti polinomske funkcije prvog reda, odnosno linijski

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots, \quad (6.11)$$

a uz sudjelovanje interakcijskog člana ima oblik

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + \dots, \quad (6.12)$$

odnosno uz sudjelovanje interakcija tri parametara model poprima oblik

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{13} x_1 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (6.13)$$

Polinomske matematičke funkcije drugog reda može imati oblik

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (6.14)$$

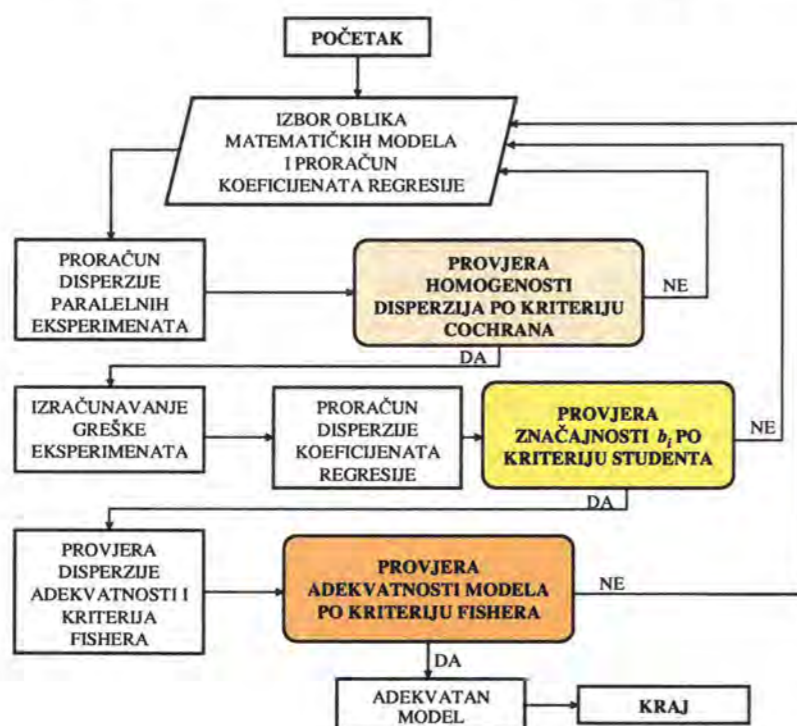


odnosno trećeg reda

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3. \quad (6.15)$$

Na ovaj način oblik polinoma aproksimira određeni problem, te se rješavanje svodi na izračunavanje koeficijenata  $b_i$ . S porastom broja parametara  $x_i$  broj jednadžbi i broj eksperimenata naglo raste. Polinomi trećeg reda, a pogotovo viših redova zbog toga se vrlo rijetko koriste.

Temeljem odabranog oblika matematičkog modela i dobivenih eksperimentalnih podataka pristupa se statističkoj obradi rezultata prema algoritmu danom na slici 6.5. [74].



Slika 6.5. Algoritam statističke obrade rezultata aktivnog eksperimenta

Iz slike 6.5. mogu se uočiti tri bitne točke odlučivanja unutar algoritma pa je shodno tome u nastavku istovjetno prikazan i postupak statističke obrade rezultata eksperimenata [18].

#### Provjera homogenosti disperzije prema Cochranovu kriteriju

Cochranov kriterij je

$$K_h = \frac{\max_j S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \leq K_i(f_j, n_j), \quad (6.16)$$

uz varijancu eksperimenta

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (6.17)$$

te ukupnu varijancu

$$\sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (n_j - 1)}, \quad (6.18)$$

gdje su:  $K_i$  - tablična vrijednost prema Cochranovu kriteriju za stupnjeve slobode  $f_j$  i  $n_j$ ,

$f_j$  - stupanj slobode ( $f_j = n_j - 1$ ),

$n_j$  - broj ponavljanja u eksperimentu ( $n_j = n_0$ ),

$N$  - ukupan broj eksperimenata,

$y_{ji}$  - vrijednosti ponovljenih mjerenja,

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} y_{ji} - \text{srednja vrijednost eksperimenata.}$$

Ako je prema izrazu (6.16) izračunata vrijednost Cochranova kriterija manja od tablične vrijednosti ( $K_h \leq K_i$ ) onda se može zaključiti da je disperzija eksperimenta homogena, te se može pristupiti izračunavanju koeficijenata odabranog modela.

#### Izračunavanje koeficijenata modela i ocjena značajnosti prema kriteriju Studenta

Vrijednosti koeficijenata modela za slučaj ponavljanja eksperimenata u nultoj točki centralnoga kompozicijskog plana izračunava se pomoću izraza

$$b_0 = a_1 \sum_{j=1}^N Y_j + a_2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 Y_j, \quad (6.19)$$

$$b_i = a_3 \sum_{j=1}^N X_{ij} Y_j, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6.20)$$

$$b_{im} = a_4 \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{mj} Y_j, \quad 1 \leq i < m \leq 3, \quad (6.21)$$

$$b_{ii} = a_5 \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 Y_j + a_6 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N X_{ij}^2 Y_j + a_7 \sum_{j=1}^N Y_j, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6.22)$$

gdje su:  $a_i$  - koeficijenti ovisni o broju ulaznih parametara  $k = 3$  (tablice 5.4. i 5.6.) i broju ponavljanja eksperimenata u središnjoj točki plana ( $n_0 = 6$ ),

$Y_j$  - izlazni parametar procesa (izmjerene vrijednosti),

$X_{ij}$  - ulazni parametri procesa (odabrani utjecajni parametri).



Ocjena značajnosti (signifikantnosti) izračunatih koeficijenata matematičkog modela provjerava se pomoću *t*-testa ili *Studentova* kriterija za uvjet

$$|b_i| \geq \Delta b_i = \pm t_{t(f_0, \alpha)} \sqrt{S_0^2 a_{ij}},$$

odnosno

$$|b_0| \geq \Delta b_0 = \pm t_{t(f_0, \alpha)} \sqrt{S_0^2 a_{11}}, \quad (6.23)$$

$$|b_i| \geq \Delta b_i = \pm t_{t(f_0, \alpha)} \sqrt{S_0^2 a_{12}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6.24)$$

$$|b_{im}| \geq \Delta b_{im} = \pm t_{t(f_0, \alpha)} \sqrt{S_0^2 a_{13}}, \quad 1 \leq i < m \leq 3, \quad (6.25)$$

$$|b_{ii}| \geq \Delta b_{ii} = \pm t_{t(f_0, \alpha)} \sqrt{S_0^2 a_{14}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6.26)$$

gdje su:  $f_0 = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$  i vjerojatnost pogreške  $\alpha = 0,05$ ,

$$S_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} (Y_{0j} - \bar{Y}_0)^2}{f_0} - \text{varijanca pogreške eksperimenta,}$$

$$\bar{Y}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} Y_{0j}}{n_0} - \text{srednja vrijednost rezultata eksperimenata } Y_{0j} \text{ u točki ponavljanja,}$$

$t_t$  - tablična vrijednost *t*-kriterija *Studenta* za  $f_0$  i  $\alpha$ ,

$a_{ii}, a_{ij}$  - bezdimenzijske vrijednosti.

#### ✚ Provjera adekvatnosti dobivenog modela prema Fisherovu kriteriju

Ocjena adekvatnosti dobivenog modela provodi se prema *Fisherovu* kriteriju za uvjet

$$F_a = \frac{S_a^2}{S_0^2} \leq F_t(f_a, f_0), \quad (6.27)$$

$$\text{gdje su: } S_a^2 = \frac{\sum_{j=1}^{20} (Y_j^E - Y_j^R) - \sum_{j=1}^{14} (Y_{0j} - \bar{Y}_0)^2}{f_a} - \text{varijanca adekvatnosti}$$

$Y_j^E$  - vrijednosti eksperimentalnih rezultata,

$Y_j^R$  - izračunate vrijednosti iz dobivenog modela,

$f_a = N - 0,5(k + 2)(k + 1) - f_0$  - stupanj slobode disperzije adekvatnosti.

#### ✚ Koeficijent višestruke regresije

Najznačajniji kriterij za izbor matematičkog modela je koeficijent višestruke regresije. Kada dva ili više modela dobro opisuju proces, odluka o najboljem modelu donosi se na

osnovi koeficijenta višestruke regresije. Dakle, koeficijent višestruke regresije dopunski je pokazatelj za ocjenu adekvatnosti modela, a računa se prema izrazu

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j^E - Y_j^R)^2}{\sum_{j=1}^N (Y_j^E - \bar{Y}^E)^2}}, \quad (6.28)$$

gdje je:  $\bar{Y}^E = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j^E}{N}$  - aritmetička sredina svih eksperimentalnih rezultata.

Vrijednost koeficijenta višestruke regresije nalazi se u granicama  $0 \leq R \leq 1$ . Koeficijent determinacije  $R^2$  određuje kvalitetu i pouzdanost modela.

Na osnovi predstavljenog plana eksperimenta, fizikalnih i kodiranih vrijednosti ulaznih parametara procesa obrade pristupilo se statističkoj obradi rezultata eksperimenata (poglavlje 5.2.2.) s ciljem dobivanja odgovarajućih matematičkih modela. Kako je navedeno u definiranju plana eksperimenta (poglavlje 5.1.1.) odabir polaznog modela temeljen je na polinomskom obliku prvog (6.11) i drugog reda (6.14).

Za statističku obradu rezultata eksperimenata postoji velik broj komercijalnih softvera (tablica 6.1.) koji cijelu proceduru obrade i analize podataka znatno pojednostavljuju [140].

**Tablica 6.1.** Pregled softvera za planiranje i analizu eksperimenata

Softver	Internet stranica
Brooks Cornerstone™	<a href="http://www.brookssoftware.com">www.brookssoftware.com</a>
Design-Expert®	<a href="http://www.statease.com">www.statease.com</a>
The Unscrambler®	<a href="http://www.camo.com">www.camo.com</a>
Fusion™	<a href="http://www.smatrix.com">www.smatrix.com</a>
JMP®	<a href="http://www.jmp.com">www.jmp.com</a>
Minitab®	<a href="http://www.minitab.com">www.minitab.com</a>
MODDE®	<a href="http://www.umetrics.com">www.umetrics.com</a>
STATGRAPHICS Centurion®	<a href="http://www.statgraphics.com">www.statgraphics.com</a>
STATISTICA™	<a href="http://www.statsoft.com">www.statsoft.com</a>
STAVEX™	<a href="http://www.aicos.com">www.aicos.com</a>
SPSS®	<a href="http://www.spss.com">www.spss.com</a>

Iz skupine DoE programa odabran je Microsoft® Excel za grubu i finu obradu tokarenjem, a u cilju dobivanja adekvatnih matematičkih modela.

Postupak statističke obrade rezultata eksperimenata može se podijeliti s obzirom na dva plana i dvije vrste polaznih matematičkih modela na:

- *polinomski model drugog reda s interakcijama oblika*

$$y(F_{c(g,f)}, Ra_{g,f}, T_{g,f}) = C_i + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2, \quad (6.29)$$



- eksponencijalni model

$$y(F_{c(g,f)}, Ra_{g,f}, T_{g,f}) = C_i v_c^{a_i} f^{\beta_i} a_p^{\gamma_i} \quad (6.30)$$

### 6.2.1. Matematički modeli za grubu obradu tokarenjem

#### Modeli glavne sile uzdužnog tokarenja ( $F_{cg}$ )

##### a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

Prema navedenim polaznim oblicima modela izvršena je obrada podataka za sva tri izlazna parametra procesa grubog tokarenja, tako da su rezultati obrade, uključujući koeficijente modela, njihovu značajnost kao i adekvatnost modela (crvene vrijednosti u tablici), za plan od  $N = 20$  eksperimenata i silu tokarenja  $F_{cg}$  predstavljeni u tablici 6.2.

**Tablica 6.2.** Rezultati regresijske analize za silu tokarenja ( $F_{cg}$ ) dobiveni pomoću Excela

Regression Statistics	
Multiple R	0,999076088
<b>R Square</b>	<b>0,99815303</b>
Adjusted R Square	0,99610084
Standard Error	39,32037907
Observations	20

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	10	7519952,738	751995,2738	486,3844918	4,7205E-11
Residual	9	13914,82989	1546,09221		
Total	19	7533867,568			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
<b>Intercept</b>	<b>1677,782392</b>	16,03666912	104,6216255	<b>3,37923E-15</b>	1641,504898	1714,059885
<b>b1</b>	<b>-7,29284796</b>	10,63947501	-0,685451862	<b>0,510326819</b>	-31,3610309	16,77533499
<b>b2</b>	<b>442,8542271</b>	10,63947501	41,62369165	<b>1,32923E-11</b>	418,7860442	466,9224101
<b>b3</b>	<b>582,1478843</b>	10,63947501	54,71584676	<b>1,14425E-12</b>	558,0797013	606,2160672
<b>b11</b>	<b>-0,19192731</b>	10,35893853	-0,018527701	<b>0,985622125</b>	-23,62549216	23,24163754
<b>b22</b>	<b>40,67653096</b>	10,35893853	3,926708403	<b>0,003475371</b>	17,24296611	64,11009581
<b>b33</b>	<b>23,04799489</b>	10,35893853	2,224937896	<b>0,053134074</b>	-0,385569957	46,48155975
<b>b12</b>	<b>-6,433625</b>	13,90185334	-0,462789014	<b>0,654501371</b>	-37,88182607	25,01457607
<b>b13</b>	<b>-6,206875</b>	13,90185334	-0,446478239	<b>0,66580105</b>	-37,65507607	25,24132607
<b>b23</b>	<b>150,596375</b>	13,90185334	10,8328272	<b>1,83164E-06</b>	119,1481739	182,0445761
<b>b123</b>	<b>4,388375</b>	13,90185334	0,315668342	<b>0,75945151</b>	-27,05982607	35,83657607

#### RESIDUAL OUTPUT

Observation	Predicted $F_{cg}$	Residuals
1	857,1732268	22,05077318
2	876,6452809	17,6817191
3	1463,332931	-27,03393108
4	1439,516985	-31,40298517
5	1741,466745	12,74825465
6	1718,557799	8,37920056
7	2932,45845	-36,33644961
8	2901,368504	-40,7055037
9	1677,782392	-0,633391714
10	1677,782392	-5,011391714
11	1677,782392	1,576608286
12	1677,782392	1,042608286

13	1677,782392	-1,953391714
14	1677,782392	0,440608286
15	1689,506192	7,997808464
16	1664,973051	18,38794899
17	1047,934811	-45,17181124
18	2537,696431	71,55756869
19	763,7893799	2,131620063
20	2722,134863	24,25413739

Nakon dobivenih rezultata matematički model sile grubog tokarenja može se predstaviti u kodiranom obliku ( $X_1, X_2, X_3$ ):

$$Y = F_{cg} = 1677,78 - 7,29X_1 + 442,85X_2 + 582,14X_3 - 6,43X_1X_2 - 6,20X_1X_3 + 150,59X_2X_3 + 4,38X_1X_2X_3 - 0,19X_1^2 + 40,67X_2^2 + 23,04X_3^2 \quad (6.31)$$

Vrijednost koeficijenta višestruke regresije  $R = 0,99$  pokazuje da model (6.31) izvrsno opisuje proces uzdužnog tokarenja definiran pomoću glavne sile rezanja  $F_{cg}$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,998$  pokazuje da se 99,8% varijabiliteta pripisuje djelovanju triju ulaznih parametara obrade.

Nakon provjere adekvatnosti pristupa se dekodiranju matematičkog modela (6.31), prema izrazima (5.2 i 5.3), tako da fizikalni oblik modela za glavnu silu procesa uzdužnog tokarenja ima konačan oblik:

$$F_{cg} = 187,937 + 1,847v_c - 1970,77f + 10,418a_p - 3,918v_c f - 0,633v_c a_p + 1598fa_p + 1,169v_c fa_p - 0,00007676v_c^2 + 4067,65f^2 + 40,953a_p^2 \quad (6.32)$$

Grafički je prikaz modela dan na slici 6.6.

##### b) Eksponencijalni model

S obzirom na to da je analitičko-eksponencijalni oblik modela izlaznih parametara uobičajen u području obrade odvajanjem čestica, pristupilo se modeliranju glavne sile tokarenja temeljem plana od 8 eksperimenata (poglavlje 5.1.1.) i tablice eksperimentalnih rezultata (tablica 5.5.). Matematički se oblik (6.30) prevodi logaritmiranjem u linearni oblik (polinom prvoga reda):

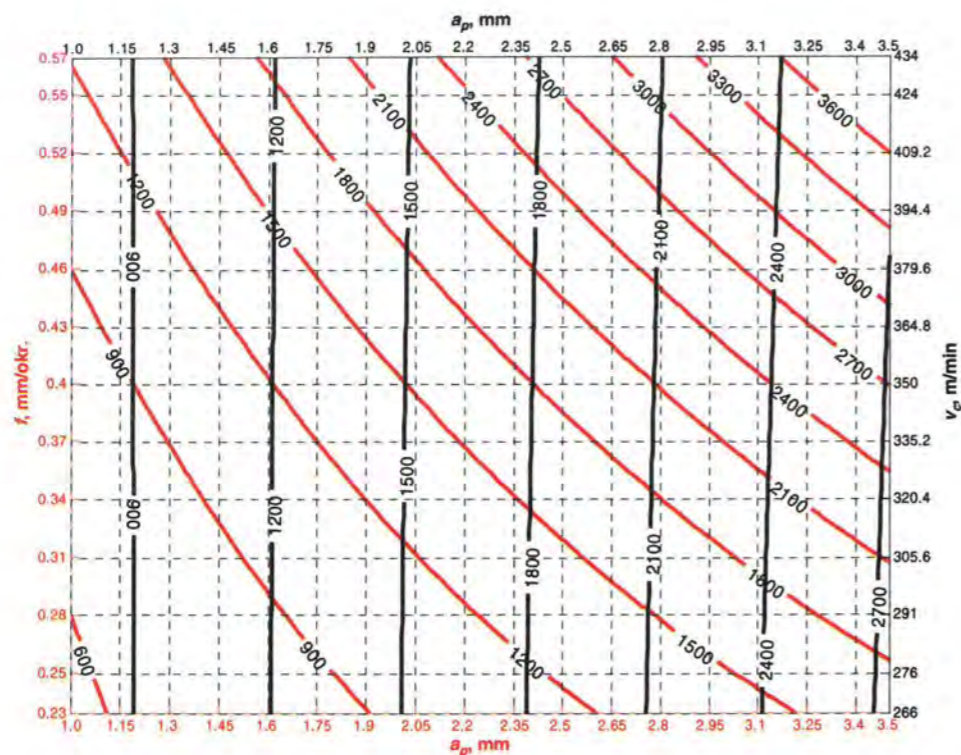
$$y(F_{c(g,f)}, Ra_{g,f}, T_{g,f}) = C_i v_c^{a_i} f^{\beta_i} a_p^{\gamma_i} \Rightarrow \ln(F_{c(g,f)}, Ra_{g,f}, T_{g,f}) = \ln C_i + a_i \ln v_c + \beta_i \ln f + \gamma_i \ln a_p, \quad (6.33)$$

odnosno

$$Y = \ln F_{cg} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \quad (6.34)$$

a rezultati statističke obrade ovako pretpostavljenog modela dani su u tablici 6.3.





Slika 6.6. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cg}$ ) prema polinomskom modelu (6.32) za  $v_c = 350$  m/min (crveni) i za  $f = 0,4$  mm/okr. (crni)

Tablica 6.3. Rezultati regresijske analize glavne sile tokarenja ( $F_{cg}$ ) prema modelu (6.33)

Regression Statistics	
Multiple R	0,99968767
<b>R Square</b>	<b>0,999375438</b>
Adjusted R Square	0,998907017
Standard Error	0,014932783
Observations	8

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	1,42723315	0,475744383	2133,497527	7,31E-07
Residual	4	0,00089195	0,000222988		
Total	7	1,4281251			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
<b>Intercept</b>	<b>7,368595068</b>	0,00527954	1395,689855	<b>1,58123E-12</b>	7,353937	7,383253
<b>b1</b>	<b>-0,003847249</b>	0,00527954	-0,728709728	<b>0,506551564</b>	-0,01851	0,010811
<b>b2</b>	<b>0,243846937</b>	0,00527954	46,18718947	<b>1,31434E-06</b>	0,229189	0,258505
<b>b3</b>	<b>0,344859411</b>	0,00527954	65,32002061	<b>3,2907E-07</b>	0,330201	0,359518

#### RESIDUAL OUTPUT

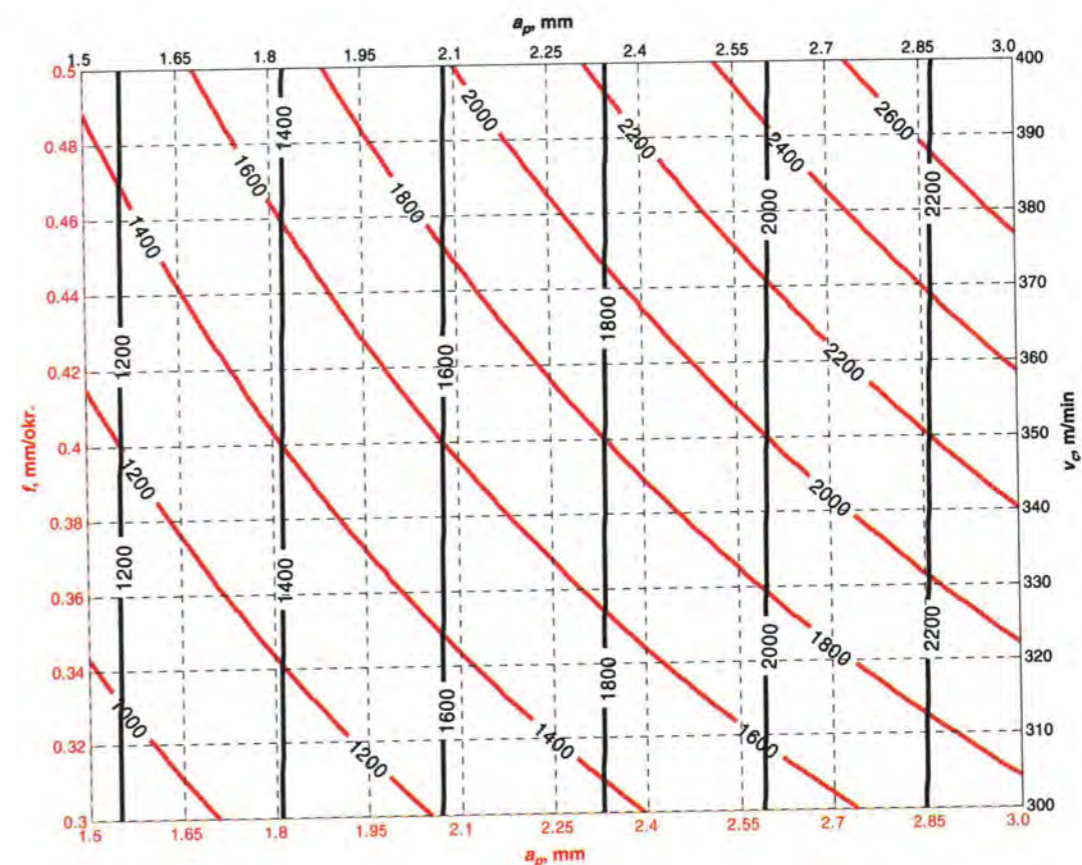
Observation	Predicted $\ln F_{cg}$	Residuals
1	6,783735968	-0,00469627

2	6,77604147	0,02003001
3	7,271429843	-0,0016049
4	7,263735344	-0,01372884
5	7,473454791	-0,00367805
6	7,465760292	-0,01165569
7	7,961148665	0,00997921
8	7,953454167	0,00535453

Uvrštavanjem koeficijenata modela ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  i  $b_3$ ) i dekodiranjem parametara prema izrazu (5.4) model (6.34) dobiva konačni oblik:

$$F_{cg} = 2169,5415 v_c^{-0,026746} f^{0,954716} a_p^{0,99503} \quad (6.35)$$

Ovaj model također ima visoki koeficijent determinacije  $R^2 = 0,999$  što ga čini adekvatnim modelom za daljnje korištenje u simulaciji (unutar domene eksperimenta) utjecaja ulaznih parametara obrade na glavnu silu uzdužnog tokarenja pri gruboj obradi. Grafički je prikaz modela dan na slici 6.7.



Slika 6.7. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cg}$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.35) za  $v_c = 350$  m/min (crveni) i za  $f = 0,4$  mm/okr. (crni)

Na osnovi prikazanog postupka definiranja matematičko-statističkog modela dobiveni su modeli i za ostala dva izlazna parametra  $R_a$  i  $T$ .



### Modeli srednjega aritmetičkog odstupanja profila ( $Ra_g$ )

#### a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

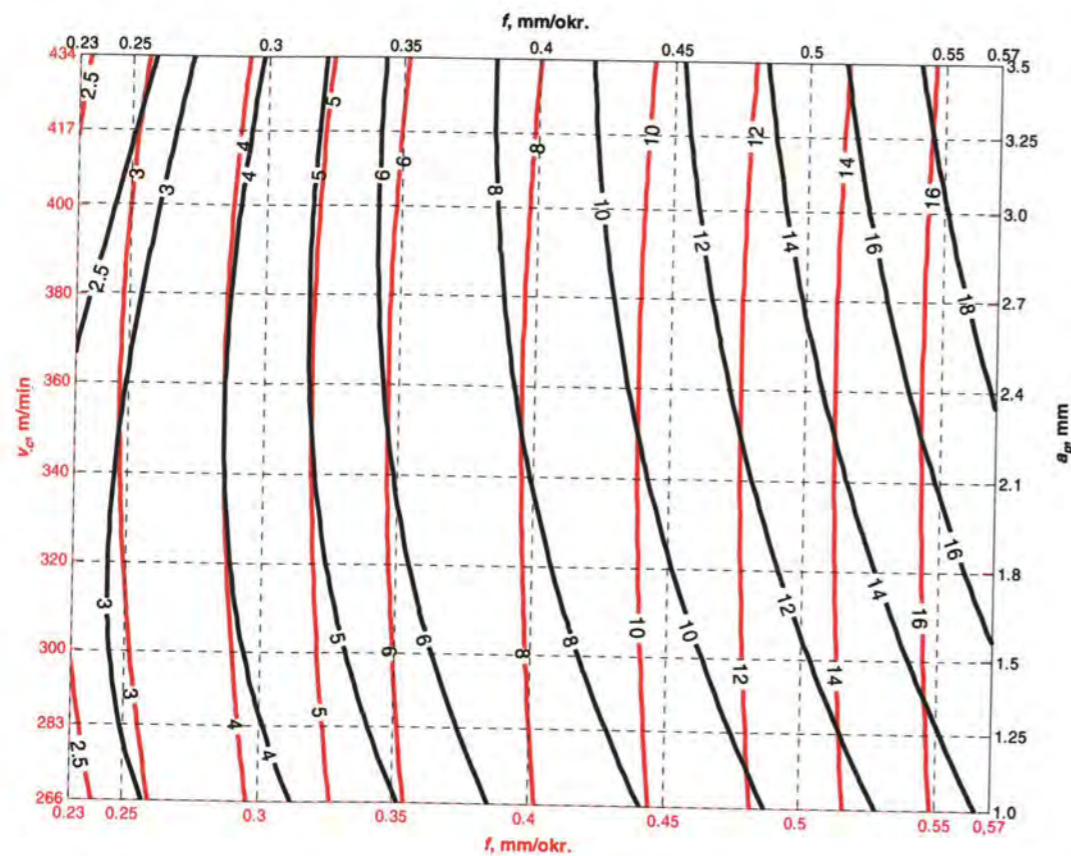
Model u kodiranom obliku nakon obrade podataka ima izgled:

$$Ra_g = 8,120 + 0,015X_1 + 4,374X_2 + 0,768X_3 - 0,01X_1X_2 - 0,03X_1X_3 + 0,61X_2X_3 - 0,2075X_1X_2X_3 - 0,094X_1^2 + 0,69X_2^2 - 0,189X_3^2. \quad (6.36)$$

Fizikalni oblik modela hrapavosti površine za grubu obradu izražen preko parametra  $Ra$  ima konačni oblik:

$$Ra_g = 16,783 - 0,0205v_c - 72,619f - 8,182a_p + 0,124v_c f + 0,021v_c a_p + 27,493fa_p - 0,055v_c fa_p - 0,0000376v_c^2 + 69f^2 - 0,335a_p^2. \quad (6.37)$$

Grafički je prikaz modela dan na slici 6.8.



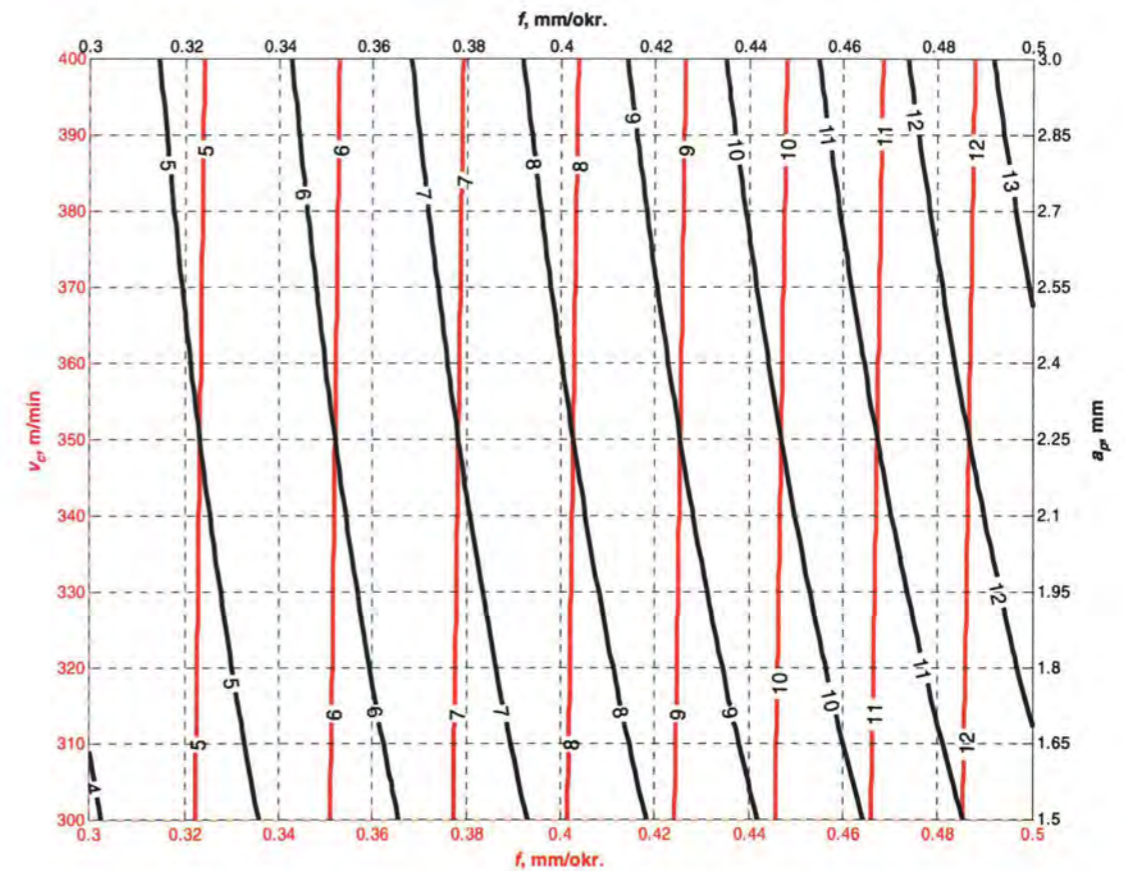
Slika 6.8. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_g$ ) prema polinomskom modelu (6.37) za  $a_p = 2,25$  mm (crveni) i za  $v_c = 350$  m/min (crni)

Koeficijent determinacije od  $R^2 = 0,997$  pokazatelj je pouzdanosti ovoga modela.

#### b) Eksponencijalni model

Za eksperimentalni plan od  $N = 8$  eksperimenata model hrapavosti površine  $Ra$  ima oblik:

$$Ra_g = 59,78533 v_c^{-0,03893} f^{2,13876} a_p^{0,20065}. \quad (6.38)$$



Slika 6.9. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_g$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.38) za  $a_p = 2,25$  mm (crveni) i za  $v_c = 350$  m/min (crni)

Visoki koeficijent determinacije  $R^2 = 0,991$  čini ovaj model adekvatnim za uporabu.

### Modeli postojanosti alata ( $T_g$ )

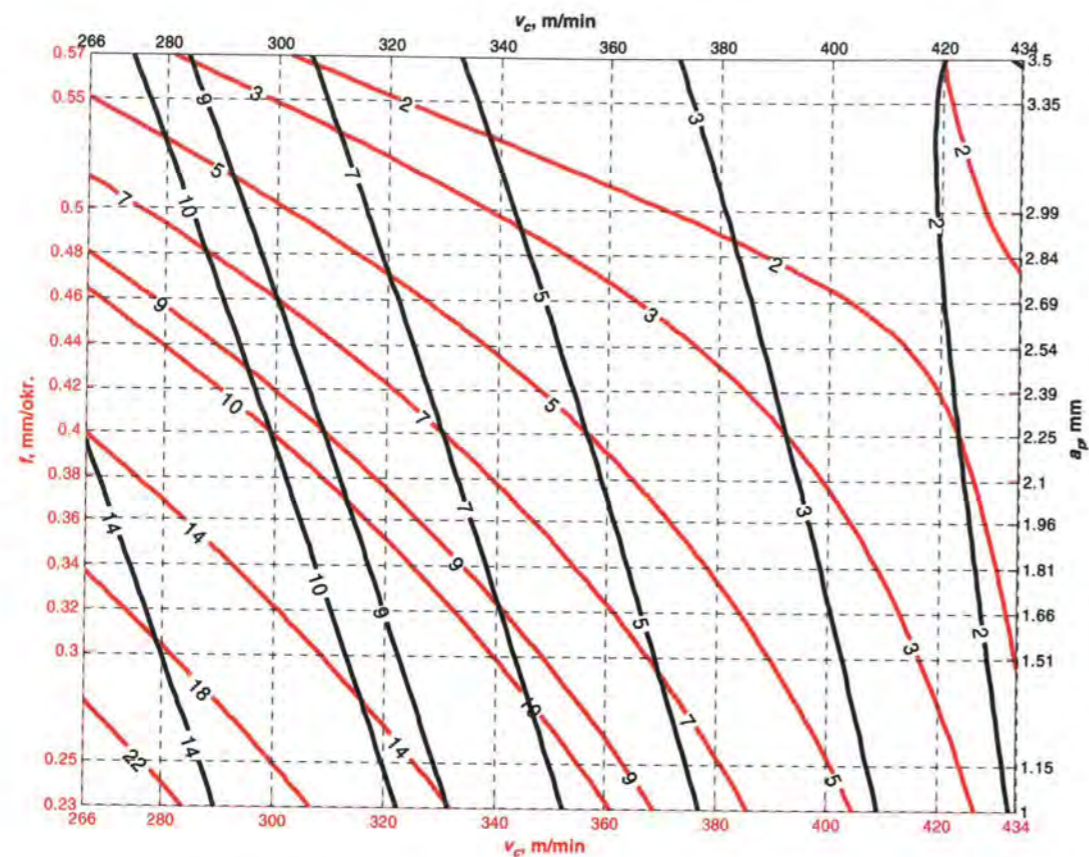
#### a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

Model postojanosti alata ima kodirani, odnosno konačni oblik kako slijedi:

$$T_g = 5,2993 - 3,6174X_1 - 3,1192X_2 - 0,9615X_3 + 1,8987X_1X_2 + 0,5837X_1X_3 + 0,1712X_2X_3 - 0,1187X_1X_2X_3 + 0,8632X_1^2 + 0,2462X_2^2 + 0,0623X_3^2, \quad (6.39)$$

$$T_g = 170,239 - 0,529v_c - 213,879f - 12,572a_p + 0,451v_c f + 0,0282v_c a_p + 13,363fa_p - 0,0316v_c fa_p + 0,000345v_c^2 + 24,624f^2 + 0,110a_p^2. \quad (6.40)$$





Slika 6.10. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_g$ ) prema polinomskom modelu (6.40) za  $a_p = 2,25$  mm (crveni) i za  $f = 0,4$  mm/okr. (crni)

#### b) Eksponencijalni model

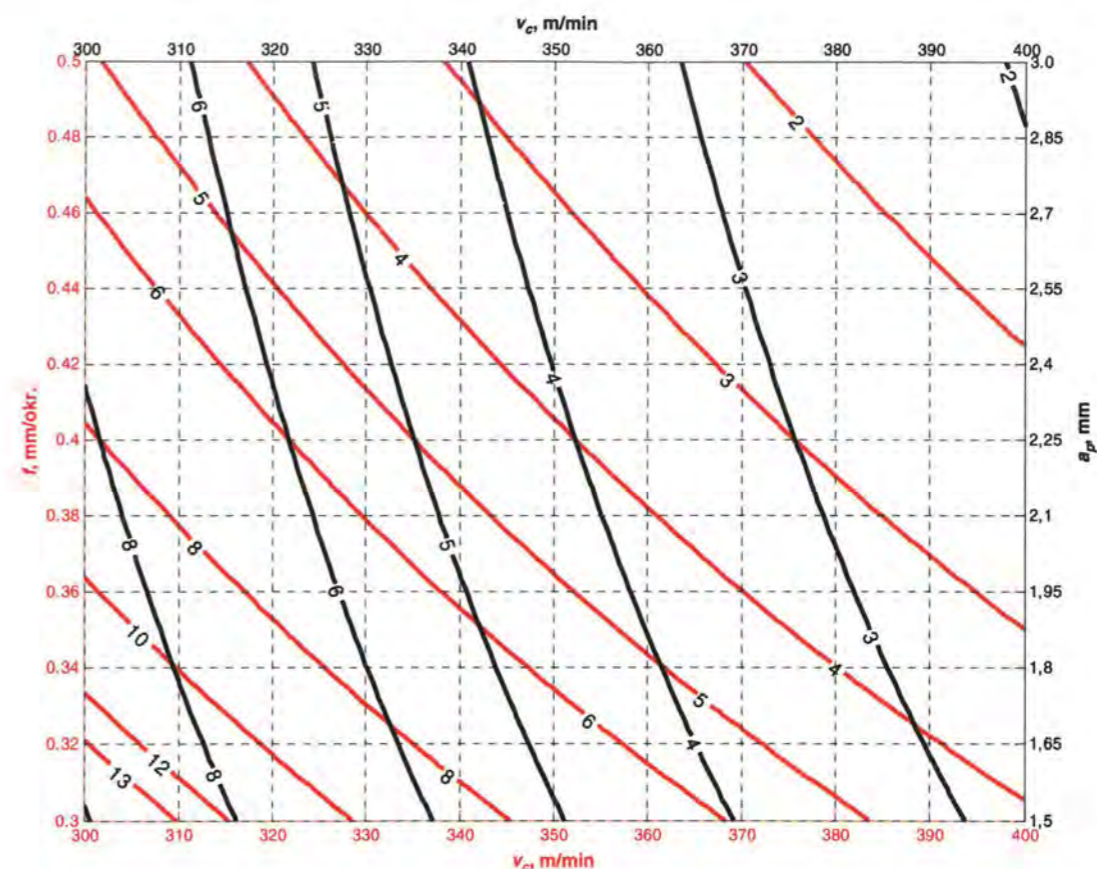
Prikazani oblik modela uobičajeni je način predstavljanja postojanosti alata od samih početaka istraživanja ovoga problema, a za definirani plan eksperimenta i uvjete izvođenja ima sljedeći oblik:

$$T_g = e^{26,06424} v_c^{-4,46533} f^{-2,10249} a_p^{-0,51533} \quad (6.41)$$

Koeficijenti determinacije od  $R^2 = 0,992$  i  $R^2 = 0,994$  za svaki model posebno, pokazatelji su adekvatnosti i pouzdanosti dobivenih modela.

Temeljem dobivenih modela, posebice je to razvidno na modelima eksponencijalnog oblika, vidljiv je utjecaj pojedinih ulaznih parametara obrade na izlazne veličine  $F_c$ ,  $R_a$  i  $T$ . Vrijednost pojedinih eksponenata odražava stvarni utjecaj na izlaznu veličinu. Također i grafička prezentacija krivulja izlaznih veličina zorno predočava taj trend vrlo bitan za projektiranje procesa i njegovo održavanje u kontroliranom-stabilnom području.

Iz prezentiranoga se može zaključiti da najjači utjecaj na silu rezanja  $F_c$  imaju dubina rezanja i posmak (njihovim se povećanjem povećava i sila rezanja), dok brzina rezanja ima minorno značenje negativnog utjecaja, tj. povećanjem brzine rezanja smanjuje se sila rezanja.



Slika 6.11. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_g$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.41) za  $a_p = 2,25$  mm (crveni) i za  $f = 0,4$  mm/okr. (crni)

Utjecaj parametara na hrapavost obrađene površine  $R_a$  pokazuje mali, također negativan utjecaj brzine rezanja, nešto veći dubine rezanja i enormno značajan utjecaj posmaka što potvrđuju i teorijska razmatranja.

Situacija glede postojanosti alata  $T$  također potvrđuje poznatu veliku ulogu brzine rezanja u trajnosti alata, a manju posmaka i dubine rezanja. Sva su tri koeficijenta modela negativna što upućuje na proturječnu ulogu svih triju parametara obrade prema postojanosti alata.

### 6.2.2. Matematički modeli za finu obradu tokarenjem

Fina obrada tokarenjem izvedena je prema odabranim ulaznim vrijednostima parametara obrade prikazanima u tablici 5.6. i eksperimentalnim vrijednostima u tablici 5.7. Kao i kod grube obrade definirani su polinomski i eksponencijalni modeli za sva tri izlazna parametra.

#### Modeli glavne sile uzdužnog tokarenja ( $F_{cf}$ )

##### a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

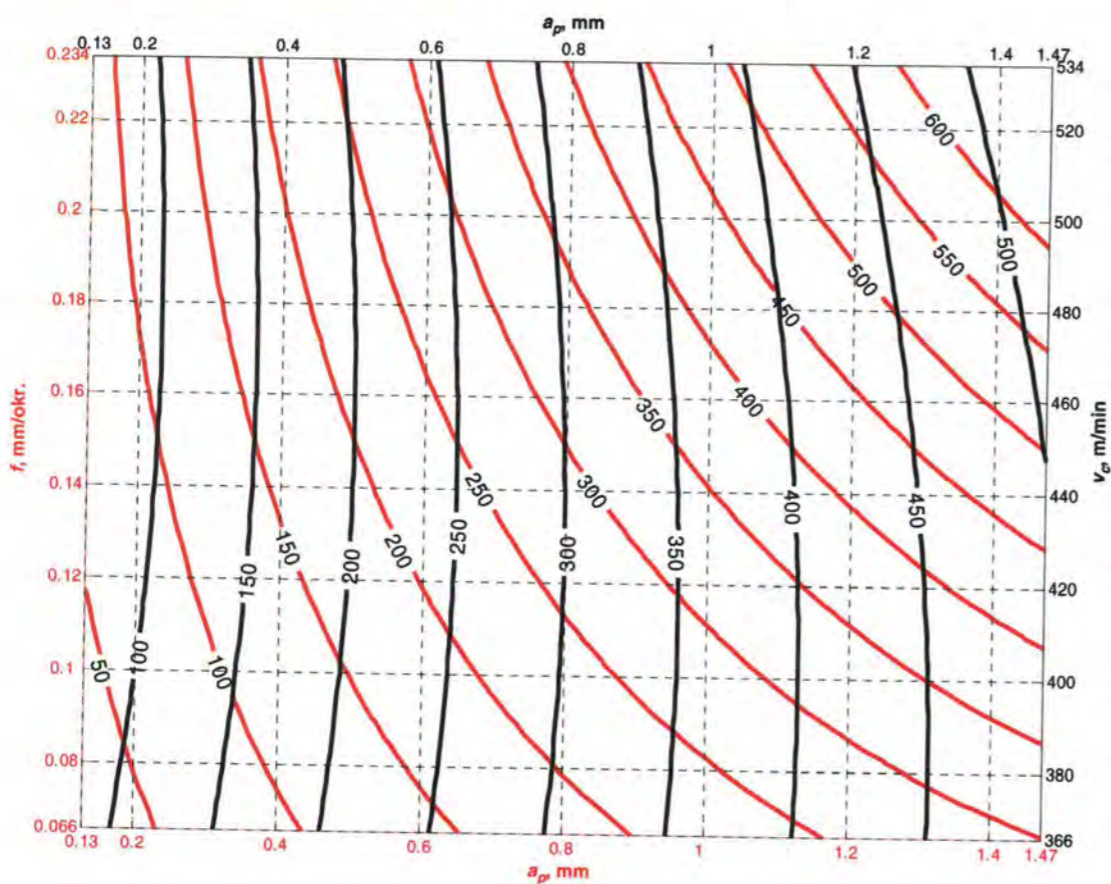
Na osnovi većega eksperimentalnog plana i obrade rezultata dobiven je kodirani oblik sile uzdužnog tokarenja za finu obradu:



$$F_{cf} = 301,310 + 3,187 X_1 + 66,702 X_2 + 130,554 X_3 + 7,935 X_1 X_2 + 6,077 X_1 X_3 + 28,842 X_2 X_3 + 8,322 X_1 X_2 X_3 + 4,030 X_1^2 - 3,059 X_2^2 - 6,883 X_3^2. \quad (6.42)$$

Nakon provjere adekvatnosti pristupa se dekodiranju matematičkog modela (6.42), tako da fizikalni oblik modela za glavnu silu finoga uzdužnog tokarenja ima konačni oblik:

$$F_{cf} = 130,075 - 1,1076 v_c + 2115,06 f + 603,9025 a_p - 3,4836 v_c f - 0,94445 v_c a_p - 2302,8 f a_p + 8,322 v_c f a_p + 0,001612 v_c^2 - 1223,6 f^2 - 43,01875 a_p^2. \quad (6.43)$$

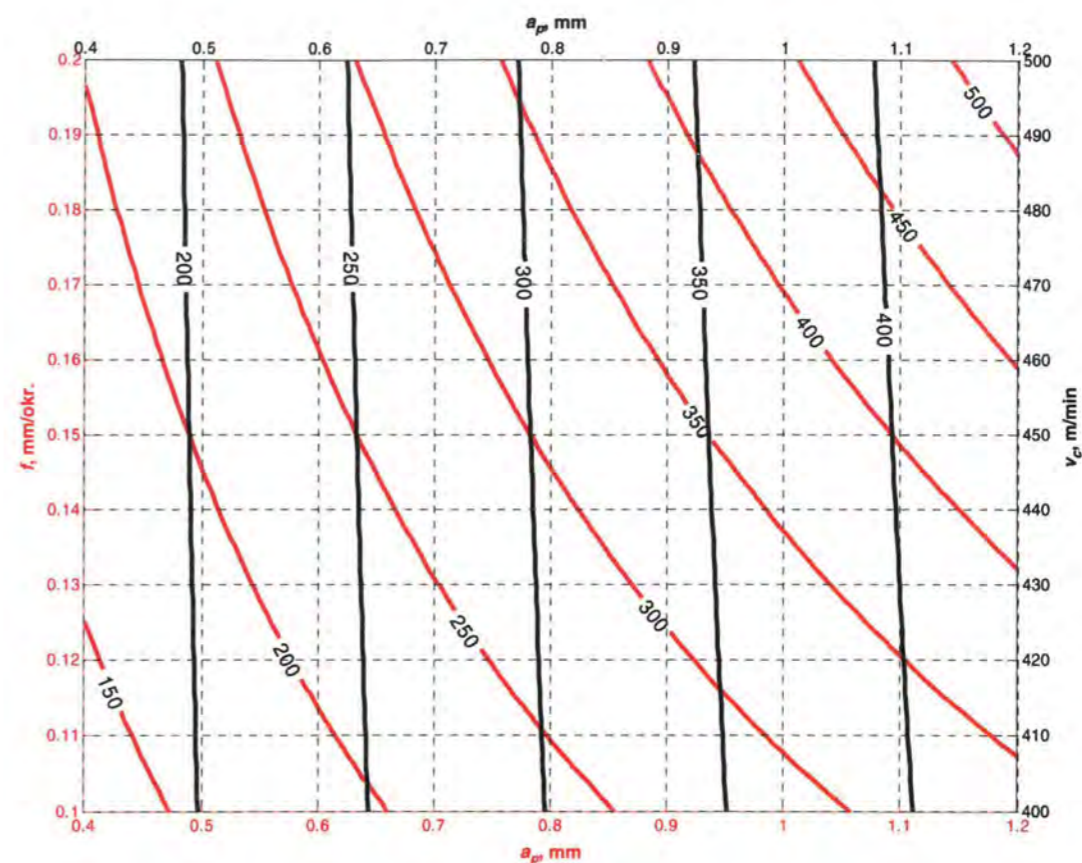


Slika 6.12. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cf}$ ) prema polinomskom modelu (6.43) za  $v_c = 450$  m/min (crveni) i za  $f = 0,15$  mm/okr. (crni)

#### b) Eksponencijalni model

Eksponencijalni model glavne sile uzdužnog tokarenja za finu obradu ima oblik:

$$F_{cf} = 605,039 v_c^{0,118318} f^{0,639329} a_p^{0,3616549}. \quad (6.44)$$



Slika 6.13. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cf}$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.44) za  $v_c = 450$  m/min (crveni) i za  $f = 0,15$  mm/okr. (crni)

Oba ova modela (6.43 i 6.44) pokazala su visoku pouzdanost temeljem postignutih vrijednosti koeficijenta determinacije od  $R^2 = 0,998$  i  $R^2 = 0,997$ .

#### Modeli srednjega aritmetičkog odstupanja profila ( $Ra_f$ )

##### a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

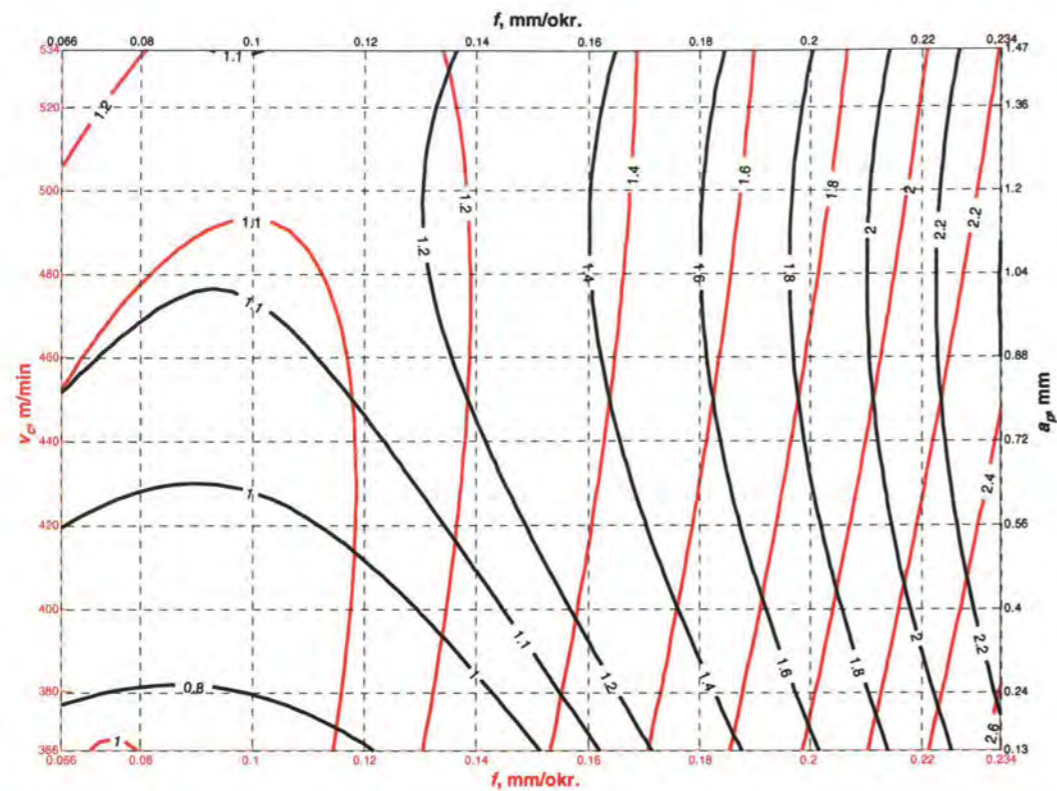
Model u kodiranom obliku ima izgled:

$$Ra_f = 1,281 - 0,028 X_1 + 0,386 X_2 + 0,088 X_3 - 0,063 X_1 X_2 - 0,036 X_1 X_3 - 0,023 X_2 X_3 - 0,048 X_1 X_2 X_3 + 0,014 X_1^2 + 0,164 X_2^2 - 0,052 X_3^2. \quad (6.45)$$

Matematički model mikogeometrije obrađene površine ima konačni fizikalni oblik:

$$Ra_f = 2,706 - 0,00614 v_c - 16,98 f - 1,5175 a_p + 0,0132 v_c f + 0,0054 v_c a_p + 20,45 f a_p - 0,048 v_c f a_p + 0,0000056 v_c^2 + 65,6 f^2 - 0,325 a_p^2. \quad (6.46)$$





Slika 6.14. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_f$ ) prema polinomskom modelu (6.46) za  $a_p = 0,8$  mm (crveni) i za  $v_c = 450$  m/min (crni)

b) Eksponencijalni model

$$Ra_f = 17,50635 v_c^{-0,111829} f^{0,931054} a_p^{0,239199} \quad (6.47)$$

Visok stupanj adekvatnosti dobivenih modela potvrđuje se za svaki model preko koeficijenta determinacije  $R^2 = 0,988$  i  $R^2 = 0,952$ .

Modeli postojanosti alata ( $T_f$ )

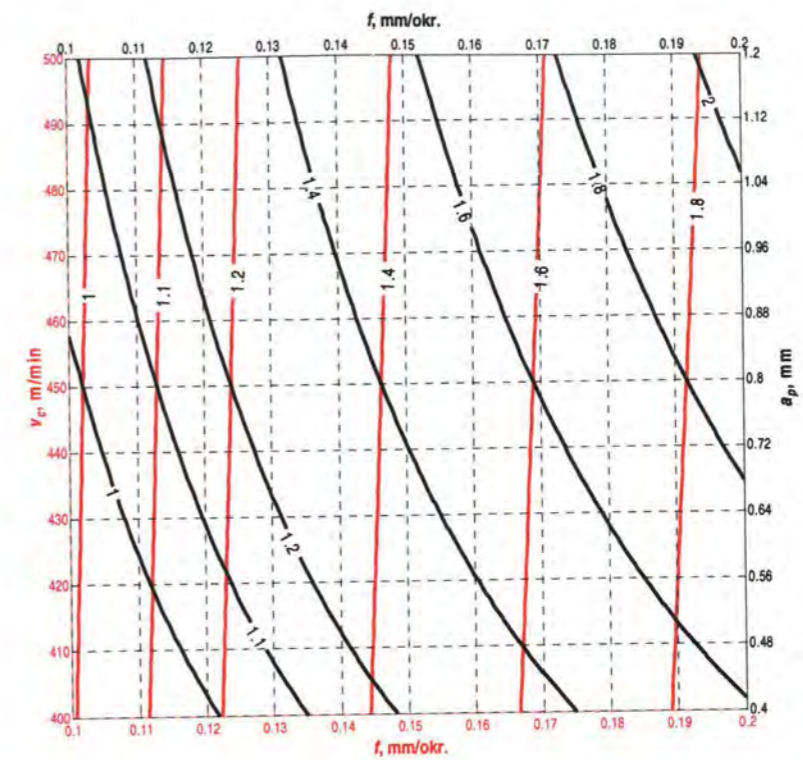
a) Polinomski model drugog reda s interakcijama

Model postojanosti alata za finu obradu ima sljedeći kodirani oblik:

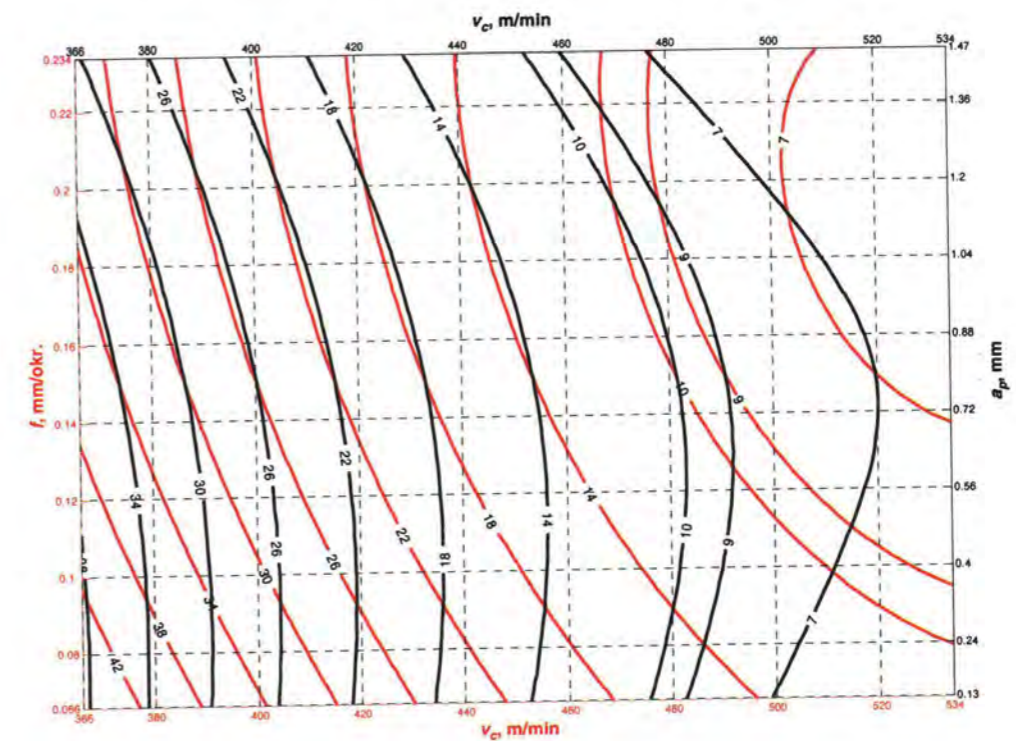
$$\begin{aligned} T_f = & 14,3683 - 8,9285X_1 - 2,7423X_2 - 1,2243X_3 + 0,8925X_1X_2 + \\ & + 0,7025X_1X_3 - 0,105X_2X_3 + 0,125X_1X_2X_3 + \\ & + 2,4742X_1^2 + 0,8122X_2^2 - 0,7701X_3^2. \end{aligned} \quad (6.48)$$

Konačni oblik polinomskog modela postojanosti alata je:

$$\begin{aligned} T_f = & 339,404 - 1,135v_c - 263,768f - 1,942a_p + 0,257v_c f + 0,0163v_c a_p - \\ & - 61,5fa_p + 0,125v_c fa_p + 0,000989v_c^2 + 324,903f^2 - 4,812a_p^2. \end{aligned} \quad (6.49)$$



Slika 6.15. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_f$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.47) za  $a_p = 0,8$  mm (crveni) i za  $v_c = 450$  m/min (crni)



Slika 6.16. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_f$ ) prema polinomskom modelu (6.49) za  $a_p = 0,8$  mm (crveni) i za  $f = 0,15$  mm/okr. (crni)

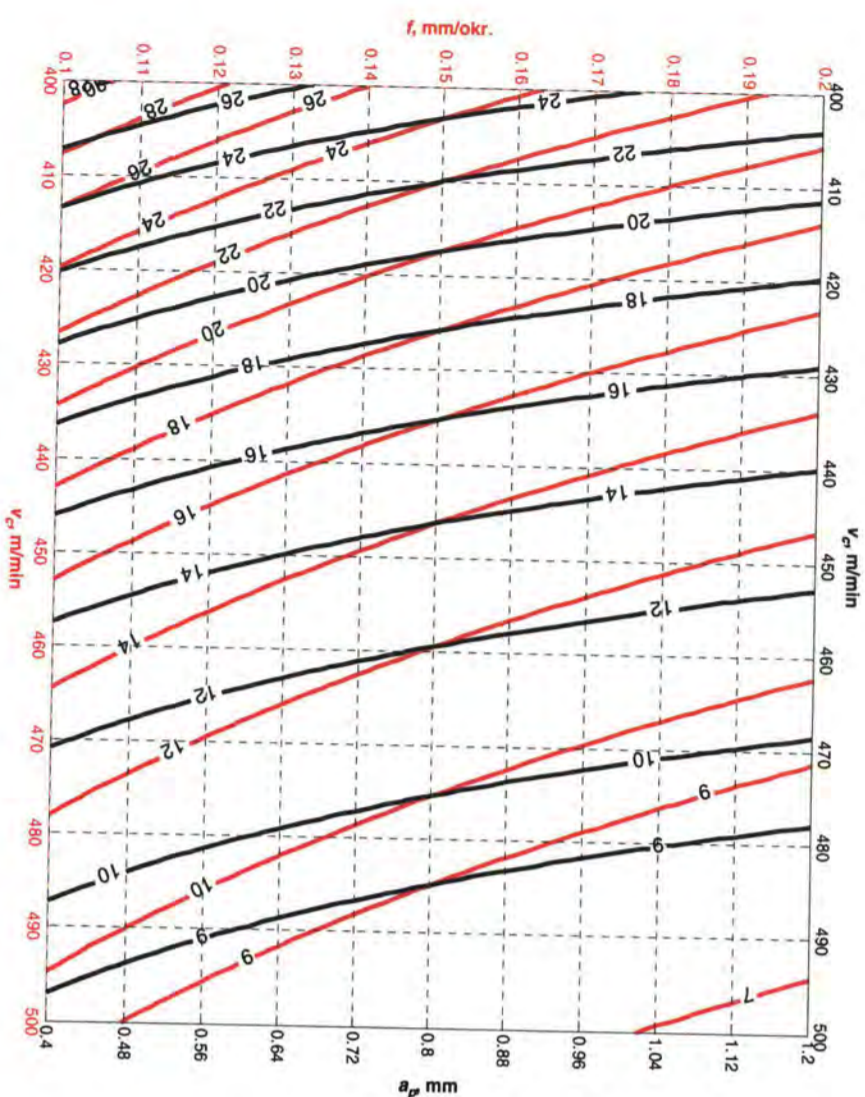


## b) Eksponecijalni model

Ovaj najčešći način modeliranja postojanosti alata daje sljedeći izraz:

$$T_f = e^{34,09203} v_c^{-5,32488} f^{-0,522547} a_p^{-0,189589} \quad (6.50)$$

Izvedeni eksperimenti i na osnovi toga dobiveni matematički modeli (6.49 i 6.50) postojanosti alata pokazali su također visok stupanj pouzdanosti izražen preko koeficijenata determinacije  $R^2 = 0,987$  i  $R^2 = 0,993$ .



Slika 6.17. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_f$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.50) za  $a_p = 0,8$  mm (crveni) i za  $f = 0,15$  mm/okr. (crni)

Trend utjecaja parametara obrade na izlazne veličine ostao je gotovo isti kao i kod grube obrade s iznimkom pozitivnog utjecaja brzine rezanja na silu rezanja.

Razvidno je da su svi dobiveni matematički modeli pokazali visok stupanj pouzdanosti što je dokazano i usporednim testom srednjih vrijednosti rezultata eksperimenata i rezultata dobivenih primjenom polinomskih i eksponencijalnih modela za sve tri izlazne veličine procesa uzdužnog tokarenja, kako za grubu (tablica 6.4.) tako i za finu obradu (tablica 6.5.).

Tablica 6.4. Usporedba eksperimenta i rezultata dobivenih modela za grubu obradu tokarenjem

Eksperiment №	Rezultati eksperimenata			Polinomski modeli			Eksponecijalni modeli		
	$F_{cg}$ (N)	$Ra_g$ ( $\mu$ m)	$T_g$ (min)	$F_{cg}$ (6.32)	$Ra_g$ (6.37)	$T_g$ (6.40)	$F_{cg}$ (6.35)	$Ra_g$ (6.38)	$T_g$ (6.41)
1	879,224	4,30	17,60	857,273	4,14	16,94	883,351	3,95	18,49
2	894,327	3,88	4,73	876,738	3,84	4,50	876,581	3,91	5,11
3	1436,299	11,11	6,68	1463,504	11,28	6,32	1438,587	11,79	6,31
4	1408,114	11,48	1,88	1439,689	11,76	1,95	1427,561	11,66	1,74
5	1754,215	4,21	13,86	1741,342	4,11	13,27	1760,652	4,54	12,93
6	1726,937	4,50	3,80	1718,441	4,51	3,64	1747,157	4,49	3,58
7	2896,122	14,29	4,10	2932,259	14,51	3,81	2867,320	13,55	4,41
8	2860,663	13,71	1,16	2901,174	14,04	1,30	2845,342	13,40	1,22
9÷14	1677,026	8,11	5,32	1677,782	8,12	5,29	1733,180	7,89	4,11
15	1697,504	7,82	12,95	1689,491	7,83	13,81	1745,949	7,97	14,02
16	1683,361	8,15	1,81	1664,989	7,88	1,65	1723,237	7,82	1,57
17	1002,763	2,46	10,52	1042,485	2,68	11,31	1021,868	2,41	13,17
18	2609,254	17,95	0,75	2548,188	17,55	0,70	2430,487	16,83	1,95
19	765,921	6,36	6,65	771,769	6,31	7,07	773,400	6,70	6,25
20	2746,389	9,07	3,58	2711,774	8,87	3,86	2690,168	8,62	3,27
Srednje odstupanje dobivenih modela od eksperimenata				1,49%	2,18%	5,93%	1,82%	3,94%	19,70%



Tablica 6.5. Usporedba eksperimenata i rezultata dobivenih modela za finu obradu tokarenjem

Eksperiment №	Rezultati eksperimenata		Polinomski modeli		Eksponecijalni modeli				
	$F_{cf}(N)$	$R_{af}(\mu m)$	$T_f(\text{min})$	$F_{cf}(6.43)$	$R_{af}(6.46)$	$T_f(6.49)$	$F_{cf}(6.44)$	$R_{af}(6.47)$	$T_f(6.50)$
1	128,893	0,77	32,66	129,487	0,88	31,14	128,067	0,84	35,34
2	130,755	0,80	11,15	124,481	0,93	10,34	131,493	0,82	10,77
3	201,899	1,70	25,89	205,981	1,73	24,33	199,478	1,60	24,60
4	202,200	1,67	7,45	199,427	1,72	6,60	204,814	1,56	7,49
5	337,859	1,11	28,43	337,401	1,08	27,75	330,028	1,09	28,69
6	330,745	1,19	9,23	323,415	1,17	9,26	338,858	1,06	8,74
7	492,945	2,14	20,74	495,975	2,03	20,02	514,054	2,09	19,97
8	550,848	1,77	5,61	547,017	1,68	5,60	527,807	2,03	6,08
9÷14	301,441	1,28	14,43	301,310	1,28	14,36	305,811	1,43	13,39
15	313,225	1,37	34,46	307,330	1,36	35,36	298,426	1,46	40,24
16	307,622	1,31	6,12	318,038	1,27	6,35	312,067	1,40	5,38
17	174,024	1,21	20,25	180,616	1,09	21,26	180,927	0,66	20,56
18	406,719	2,32	10,93	404,735	2,39	12,05	406,372	2,16	10,61
19	61,223	1,17	12,18	63,320	0,98	14,25	63,897	0,92	18,90
20	497,895	1,13	10,05	500,676	1,28	10,15	516,567	1,65	11,93
Srednje odstupanje dobivenih modela od eksperimenata				1,72%	6,31%	5,23%	2,44%	13,18%	9,99%

### 6.3. EVOLUCIJSKI ALGORITMI

U čovjeka je oduvijek postojala potreba za definiranjem prirode oko sebe kroz odgovarajuće modele. Pritom se upravo primjena matematičkog aparata pokazala učinkovitom tijekom dužega razdoblja ljudskog stvaranja. Kako takav način modeliranja u sebi nosi i određene vidove ograničenja, idealizacija i pojednostavljenja, nije bilo moguće uvijek definirati probleme na zadovoljavajući način. U drugoj polovici XX. stoljeća stvorila se ideja o novom pristupu rješavanju takvih problema temeljem promatranja pojava u prirodi i izučavanja njihovih mehanizama funkcioniranja. Imitacija prirodnih principa matematičkim putem omogućila bi rješavanje različitih veoma složenih procesa i pojava. Korištenjem prirodnih evolucijskih mehanizama u definiranju i rješavanju problema otvoren je put razvoju novih metoda temeljenih na evolucijskim algoritmima. Pod evolucijskim se algoritmima podrazumijeva skupina algoritama definiranih na evolucijskim principima uz korištenje operatora koji oponašaju prirodne genetske principe.

Evolucijske tehnike izračunavanja mogu se podijeliti na sljedeći način: genetski algoritmi (GA), genetsko programiranje (GP), evolucijske strategije i evolucijsko programiranje. Takvi algoritmi omogućavaju modeliranje i optimizaciju različitih veoma kompleksnih funkcija u višedimenzionalnom prostoru.

#### 6.3.1. Genetski algoritam (GA)

Iako je teorijsku postavku genetskih algoritama, odnosno primjenu oponašanja prirodnoga evolucijskog procesa iznio još u ranim sedamdesetim godinama prošlog stoljeća Holland [41], ona je tek u posljednjem desetljeću našla svoju općeprihvaćenu primjenu posebice poslije objavljenih dijela Goldberga [44], Michalewicza [45], Gena [46] i drugih autora.

Kao heuristička metoda optimiranja genetski algoritam temelji se na Darwinovu konceptu prirodne genetike i selekcije, tj. težnji za preživljavanjem vrste iz generacije u generaciju što sa sobom donosi nove jedinke, sposobnije, otpornije i prilagodljivije od prethodnih. Kako je evolucija robustan proces pretraživanja mogućeg prostora rješenja, taj je prirodni mehanizam iskorišten u cilju pronalaska optimalnog rješenja višemodalnih funkcija. Ta analogija između evolucije kao prirodnoga procesa i genetskog algoritma kao metode optimiranja očituje se u procesu selekcije i genetskim operatorima. Mehanizam odabira nad nekom vrstom živih bića u evolucijskom procesu čine okolina i uvjeti u prirodi. U genetskim algoritmima ključ selekcije je funkcija cilja, koja na odgovarajući način predstavlja problem koji se rješava. Slično kao što su okolina i uvjeti u prirodi ključ selekcije nad nekom vrstom živih bića, tako je i funkcija cilja ključ selekcije nad populacijom rješenja u genetskom algoritmu. Naime, u prirodi jedinka koja je najbolje prilagođena uvjetima i okolini u kojoj živi ima najveću vjerojatnost preživljavanja i parenja, a time i prenošenja svojega genetskog materijala na potomke. Za genetski algoritam jedino rješenje je jedna jedinka. Selekcijom se odabiru dobre jedinke koje se prenose u sljedeću populaciju, a manipulacijom genetskog materijala stvaraju se nove jedinke. Takav ciklus selekcije, reprodukcije i manipulacije genetskim materijalom jedinki ponavlja se sve dok nije zadovoljen uvjet zaustavljanja evolucijskog procesa.



Jednostavni genetski algoritam, čija je struktura dana na slici 6.18., prikazuje primjenu triju glavnih operatora: reprodukcije (selekcije), križanja i mutacije.

```

Genetski_algoritam
{
  t = 0
  generiraj početnu populaciju potencijalnih rješenja P(0);
  sve dok nije zadovoljen uvjet završetka evolucijskog procesa
  {
    t = t + 1;
    selektiraj P'(t) iz P(t-1);
    križaj jedinke iz P'(t) i djecu spremi u P(t);
    mutiraj jedinke iz P(t);
  }
  ispiši rješenje;
}

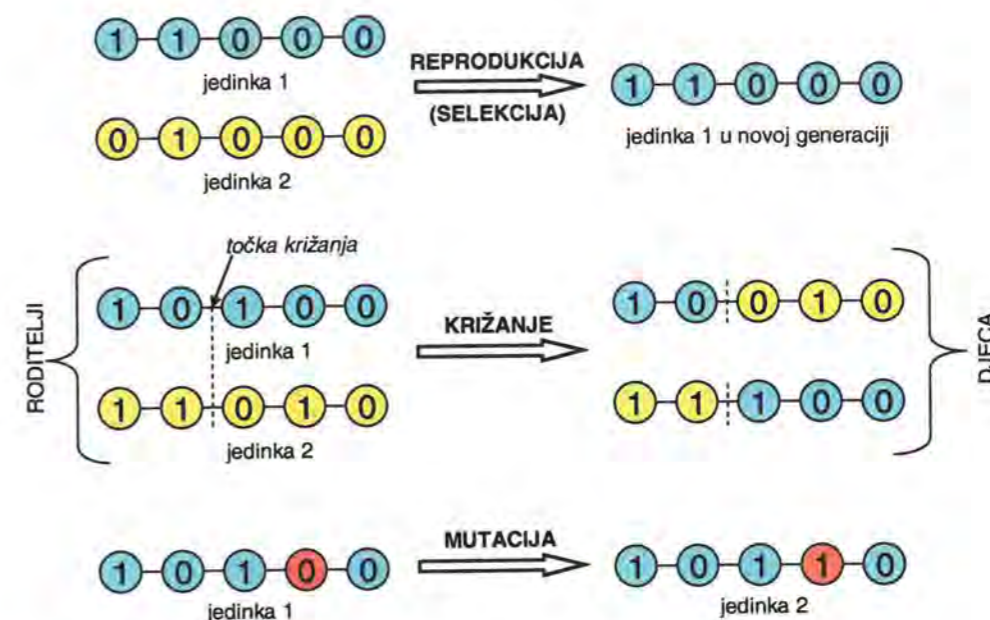
```

Slika 6.18. Struktura genetskog algoritma

Svaki evolucijski program održava populaciju jedinki u nekoj određenoj generaciji. Svaka jedinka predstavlja potencijalno rješenje problema koji se obrađuje; to može biti matematička funkcija, plan rada neke tvornice, put trgovačkog putnika i sl. Svaka je jedinka predstavljena jednakom podatkovnom strukturom (broj, niz, matrica, stablo, itd.). Te se jedinke nazivaju kromosomi. Svakom se rješenju pridjeljuje određena mjera kvalitete koja se u literaturi obično naziva dobrotom, dok se funkcija koja tu kvalitetu određuje naziva funkcija cilja, funkcija dobrote ili funkcija prikladnosti. Tada se iz stare formira nova populacija izdvajajući, po nekom postupku odabira, bolje jedinke iz skupa postojećih. Neki su članovi te nove populacije podvrgnuti utjecajima genetskih operatora koji iz njih formiraju nove jedinke. Operatori se dijele na unarne, koji stvaraju novu jedinku mijenjajući manji dio genetskog materijala stare populacije (mutacijska grupa) i operatore višeg reda, koji kreiraju nove individue kombinirajući osobine nekoliko jedinki (grupa križanja). Nakon nekog broja izvršenih generacija čitav se postupak zaustavlja kada se zadovolji uvjet zaustavljanja, a najbolji član trenutačne populacije predstavlja rješenje koje bi trebalo biti sasvim blizu optimumu [141]. Grafički prikaz principa djelovanja operatora kod jednostavnoga genetskog algoritma dan je na slici 6.19. [61].

Genetski algoritam veoma je učinkoviti princip rješavanja jednokriterijskih i višekriterijskih optimizacijskih problema zahvaljujući prednostima koje ima u odnosu na klasične metode optimizacije, kao što su gradijentne, a ističe se sljedećim značajkama:

- kako nije gradijentna metoda, može se primjenjivati kako kod diskretnih varijabli tako i kod kombinacije kontinuiranih i diskretnih varijabli, ali diskontinuiranih problema, jer ne zahtijeva dodatne informacije (derivacije);
- može pretraživati velika područja mogućih rješenja i to stohastički što omogućava smanjenje vjerojatnosti odabira lokalnog optimuma;
- radi na principu populacije mogućih rješenja iz kojih traži optimum što povećava vjerojatnost uspjeha za razliku od klasičnih metoda koje rade po principu točka po točku;
- ima mogućnost rješavanja višemodalnih, višedimenzijskih, višekriterijskih funkcija cilja.



Slika 6.19. Grafički prikaz genetskih operatora

Zahvaljujući tim prednostima temeljna postavka prirode definirana u obliku evolucijskih algoritama omogućila je intenzivnu primjenu u optimizacijskim procesima posljednjih godina i to s velikim uspjehom na različitim područjima ljudskoga djelovanja, a ovdje je dan primjer pristupa primjene tih metoda na procese obrade rezanjem kroz modeliranje i optimizaciju parametara obrade uzdužnog tokarenja.

### 6.3.1.1. Primjena GA pri modeliranju

Prednosti genetskog algoritma u optimizaciji koeficijenata prethodno definiranih oblika modela iskorištene su za dobivanje matematičkih modela polinomskog i eksponencijalnog oblika, tj odgovarajućih koeficijenata modela prema eksperimentalnim rezultatima plana danim u tablicama 5.5 i 5.7. Od toga se 15 eksperimenata, bez ponavljanja, koristi za modeliranje izlaznih veličina procesa pomoću GA.

Opći eksperimentalni i teorijski modeli (polinomski i eksponencijalni) izlaznih parametara procesa obrade korištenih ujedno i kao funkcije dobrote u procesu određivanja koeficijenata modela primjenom GA, imaju polazne oblike opisane u nastavku.

#### Polazni oblik polinomskih modela za primjenu u procesu modeliranja pomoću GA

$$F_c = C_1 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2 \quad (6.51)$$

$$R_a = C_2 + b_1' v_c + b_2' f + b_3' a_p + b_{12}' v_c f + b_{13}' v_c a_p + b_{23}' f a_p + b_{123}' v_c f a_p + b_{11}' v_c^2 + b_{22}' f^2 + b_{33}' a_p^2 \quad (6.52)$$



$$T = C_3 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2 \quad (6.53)$$

#### Polazni oblik eksponencijalnih modela korištenih u modeliranju pomoću GA

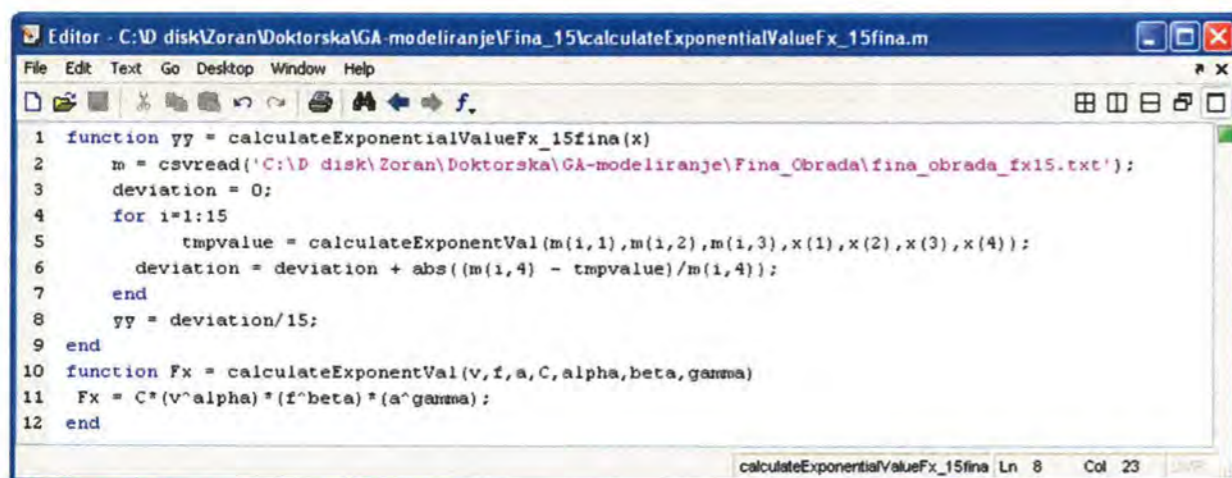
$$F_c = C_4 v_c^{\alpha_1} f^{\beta_1} a_p^{\gamma_1} \quad (6.54)$$

$$Ra = C_5 v_c^{\alpha_2} f^{\beta_2} a_p^{\gamma_2} \quad (6.55)$$

$$T = C_6 v_c^{\alpha_3} f^{\beta_3} a_p^{\gamma_3} \quad (6.56)$$

Modeli su dobiveni za sljedeće vrijednosti evolucijskih parametara: broj generacija  $G = 300$ , populacija  $M = 5000$ , vjerojatnost križanja  $p_c = 0,8$  (u dvije točke) i mutacije  $p_m = 0,01$  kao i veličina turnirske selekcije  $S = 10$ , broj jedinki koji se bez mijenjanja prebacuje u drugu generaciju (elitizam)  $E_l = 250$ . Granice pretraživanja koeficijenata modela ovise o vrsti modela. Tako su za eksponencijalni model glavne sile rezanja granice: donja [-3000, -10, -10, -10] i gornja [3000, 10, 10, 10]. Za ostala dva parametra, hrapavost obrađene površine i postojanost alata, granice su: donja [-100, -10, -10, -10] i gornja [100, 10, 10, 10].

Za polinomske modele situacija je kompliciranija jer ima 11 koeficijenata koje treba naći. Stoga se granice postavljaju najprije široko: donja [-2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000] i gornja [2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000], a zatim ovisno o rezultatima pretraživanja prostora te se granice mogu mijenjati i time sužavati prostor pretrage, pa time i skratiti vrijeme dolaska do najboljeg rezultata za navedene evolucijske parametre. Funkcija cilja ili dobrote definirana je za svaki model posebno, a izgled kostura jedne takve funkcije pripremljene u Matlab<sup>®</sup> programu za glavnu silu rezanja kod fine obrade prezentiran je na slici 6.20.



```

1 function yy = calculateExponentialValueFx_15fina(x)
2     m = csvread('C:\D disk\Zoran\Doktorska\GA-modeliranje\Fina_Obrada\fina_obrada_fx15.txt');
3     deviation = 0;
4     for i=1:15
5         tmpvalue = calculateExponentVal(m(i,1),m(i,2),m(i,3),x(1),x(2),x(3),x(4));
6         deviation = deviation + abs(m(i,4) - tmpvalue)/m(i,4);
7     end
8     yy = deviation/15;
9 end
10 function Fx = calculateExponentVal(v,f,a,C,alpha,beta,gamma)
11     Fx = C*(v^alpha)*(f^beta)*(a^gamma);
12 end

```

Slika 6.20. Prikaz funkcije cilja-dobrote

#### Dobiveni GA modeli za finu obradu

$$F_{cf} = 354,5579 - 2,2926v_c + 2435,2718f + 672,9255a_p - 3,77751v_c f - 1,0907v_c a_p - 2595,4597 f a_p + 9,0536v_c f a_p + 0,0030701v_c^2 - 2015,2932 f^2 - 48,7725a_p^2 \quad (6.57)$$

srednja pogreška polinomskeg modela prema eksperimentalnim rezultatima je 0,927%

$$F_{cf} = 1224,5528 v_c^{0,006676} f^{0,65467} a_p^{0,86097} \quad (6.58)$$

srednja pogreška eksponencijalnog modela je 1,965%

$$Ra_f = 2,85197 - 0,0082174v_c - 18,285653f + 0,392163a_p + 0,00614529v_c f + 0,00366079v_c a_p + 11,554833 f a_p - 0,03036v_c f a_p + 0,0000085034v_c^2 + 84,544043 f^2 - 0,857849a_p^2 \quad (6.59)$$

srednja pogreška modela je 4,163%

$$Ra_f = 18,467886 v_c^{-0,1185511} f^{0,9936567} a_p^{0,07337468} \quad (6.60)$$

srednja pogreška modela je 10,808%

$$T_f = 366,71185 - 1,101617v_c - 839,748142f - 42,12697a_p + 1,274736v_c f + 0,1010139v_c a_p + 362,382549 f a_p - 0,722744v_c f a_p + 0,000830724v_c^2 + 549,915754 f^2 - 6,8011335a_p^2 \quad (6.61)$$

srednja pogreška modela prema eksperimentalnim rezultatima je 4,223%

$$T_f = e^{32,43106} v_c^{-5,041534} f^{-0,4969} a_p^{-0,11849} \quad (6.62)$$

srednja pogreška eksponencijalnog modela je 8,331%

#### Dobiveni GA modeli za grubu obradu

$$F_{cg} = 460,540479 + 0,899172v_c - 1674,36665f + 23,894864a_p - 5,739166v_c f - 0,996769v_c a_p + 1391,784113 f a_p + 2,387642v_c f a_p + 0,00199208v_c^2 + 3773,274349 f^2 + 50,188729a_p^2 \quad (6.63)$$

srednja pogreška modela je 0,829%

$$F_{cg} = 2590,22324 v_c^{-0,0544773} f^{0,981452} a_p^{1,0036719} \quad (6.64)$$

srednja pogreška modela je 1,484%

$$Ra_g = 17,003982 - 0,03211555v_c - 55,741557f - 6,9004a_p + 0,0943v_c f + 0,0156933v_c a_p + 21,86 f a_p - 0,036533v_c f a_p - 0,000010677v_c^2 + 56,439446 f^2 - 0,2528a_p^2 \quad (6.65)$$

srednja pogreška modela je 0,817%



$$Ra_g = 37,355654 v_c^{0,0311988} f^{2,1316559} a_p^{0,2833288} \quad (6.66)$$

srednja pogreška modela je 2,934%

$$T_g = 187,944577 - 0,58713171 v_c - 237,66354 f - 19,3717955 a_p + 0,5024517 v_c f + 0,0453839 v_c a_p + 27,087135 f a_p - 0,0659678 v_c f a_p + 0,000384722 v_c^2 + 26,728545 f^2 + 0,08627294 a_p^2 \quad (6.67)$$

srednja pogreška polinomskog modela prema eksperimentalnim rezultatima je 2,43%

$$T_g = e^{25,586213} v_c^{-4,3522965} f^{-1,9686606} a_p^{-0,65104444} \quad (6.68)$$

srednja pogreška eksponencijalnog modela je 18,55%

### 6.3.2. Genetsko programiranje (GP)

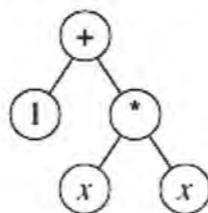
Genetsko programiranje kao i genetski algoritmi heuristička je metoda optimiranja i spada u klasu evolucijskih algoritama. Osnovna razlika između ova dva koncepta je u tome što se u GA koristi koncept kromosoma fiksne duljine, dok se GP zasniva na principu jedinki koje su reprezentirane kao polinomi proizvoljne kompleksnosti. Jedino ograničenje kod polinoma je maksimalna kompleksnost i različiti broj operatora. Kao kod GA, i kod GP postoji reprodukcija, funkcija cilja, kao i genetski operatori, križanje i mutacija.

Radovi [42, 43, 61] pokazali su neučinkovitost mutacije u ovom pristupu pa se stoga ona i ne koristi, a takav rezultat je dobiven i prilikom izrade ovog programa. Stoga se kao zaključak može reći da se kod GP metode primjenjuju evolucijske operacije reprodukcije i križanja. Vrlo je bitno naglasiti, a to je drukčije nego kod GA, problem konstantnog povećanja kompleksnosti polinoma u svakoj novoj generaciji. Funkcije cilja koje se koriste nisu nikada ili jako rijetko strukturalne prirode, nego se skoro uvijek zasnivaju na vrijednosti koja se dobiva evaluiranjem polinoma. Postoje pokušaji da se uvede i neka vrsta strukturalne funkcije cilja (funkcije koja vrednuje istovremeno i kompleksnost polinoma), no u praksi se pokazalo da se polinom koji prekorači zadanu kompleksnost jednostavno izbacuje iz populacije i zamjenjuje novim polinomom.

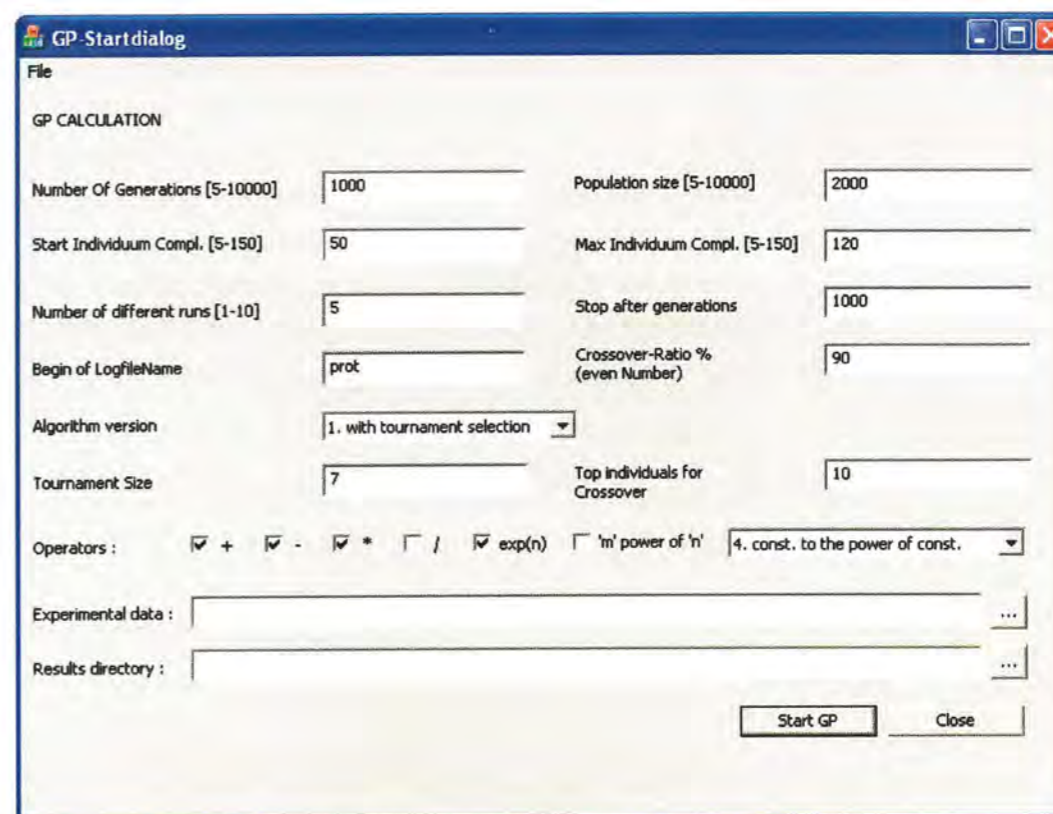
#### 6.3.2.1. GP modul

Za razvoj GP modula korišten je programski jezik C++ s MFC-om verzija 7.0. Algoritam koji je korišten u ovom radu ima sljedeću strukturu. Temeljem unosa podataka od korisnika (slika 6.21.) kreira se početna populacija. Korisnički unos relevantan je za kreiranje početne populacije, kao što su klasa operatora: +, -, \*, /, exp,  $m^n$ , te minimalna i maksimalna kompleksnost polinoma, ali i svi drugi relevantni podaci koji su potrebni za pokretanje implementiranog GP algoritma.

Polinomi s kojima se operira u GP modulu imaju sljedeću formu:



Prethodno stablo reprezentira polinom oblika:  $1 + x*x$ . Ovakav je prikaz, tj. struktura koja odgovara binarnom stablu, jako praktičan iz više razloga. Evaluiranje polinoma je lako moguće uz pomoć rekurzivnog puta po stablu (engl. *tree-travelling*), a također je i samom strukturom dan ispis u tzv. infiksnoj notaciji koja se koristi kod prikaza rezultata.



Slika 6.21. GP modul – prozor za unos evolucijskih parametara

Temeljem unešenih informacija kreira se polinom. Struktura je polinoma dana kroz stohastičnost odabira operatora i operanada, kao i odabira njihove pozicije u budućem polinomu, s tim što je i kompleksnost polinoma predmet stohastičnog odabira. Nakon generiranja početne populacije sljedeći je korak evaluiranje polinoma temeljem funkcije cilja i pripreme rezultata za reprodukciju i križanje. Funkcija cilja definirana je u obliku

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n}, \quad (6.69)$$

gdje su:  $n$  - veličina (broj) eksperimentalnih rezultata,

$\Delta_i$  - odstupanje pojedinačnih rezultata.

Postotna devijacija koju producira jedinka je

$$\Delta i = \frac{|E_i - G_i|}{E_i} \cdot 100\%, \quad (6.70)$$

gdje su:  $E_i, G_i$  - eksperimentalni rezultati i rezultati dobiveni evaluacijom modela.



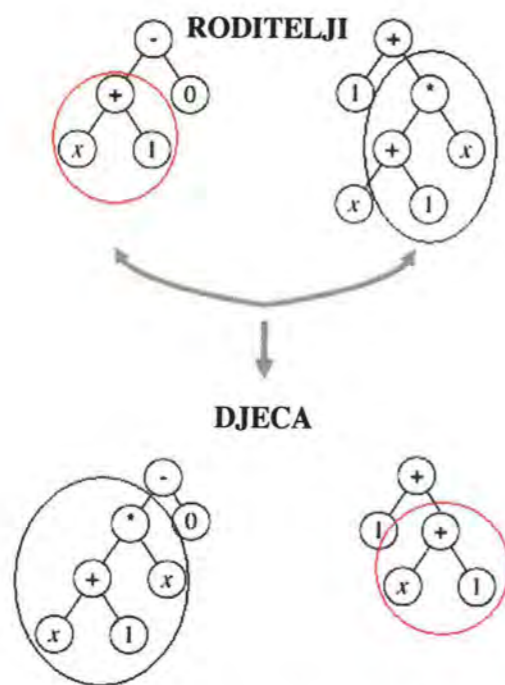
Sam korak reprodukcije je relativno jednostavan i u njemu se radi isključivo o tome da se nakon klasificiranja rezultata, a ovisno o vrijednosti za reprodukciju (riječ je o postotku) koju korisnik unosi kroz ulazni prozor, određeni broj polinoma (jedinki) preuzme u novu generaciju.

Kod križanja je situacija nešto kompliciranija jer postoji više pristupa, a u radu su implementirana dva.

Prvi pristup temelji se na uzimanju

$$n = \frac{100\% - \text{reprodukcija}\%}{2} \quad (6.71)$$

broja jedinki koje sudjeluju u križanju. Iz ovog skupa polinomi se uzimaju uz pomoć funkcije slučajnog odabira. Svaki se put odaberu 2 jedinke od kojih se uzimaju dijelovi polinoma i križaju međusobno. Tako nastaju 2 nova polinoma kod kojih se provjerava funkcija cilja i ako su bolji od svojih roditelja bit će preuzeti u sljedeću generaciju. Tipično GP križanje izgleda kao na slici 6.22.



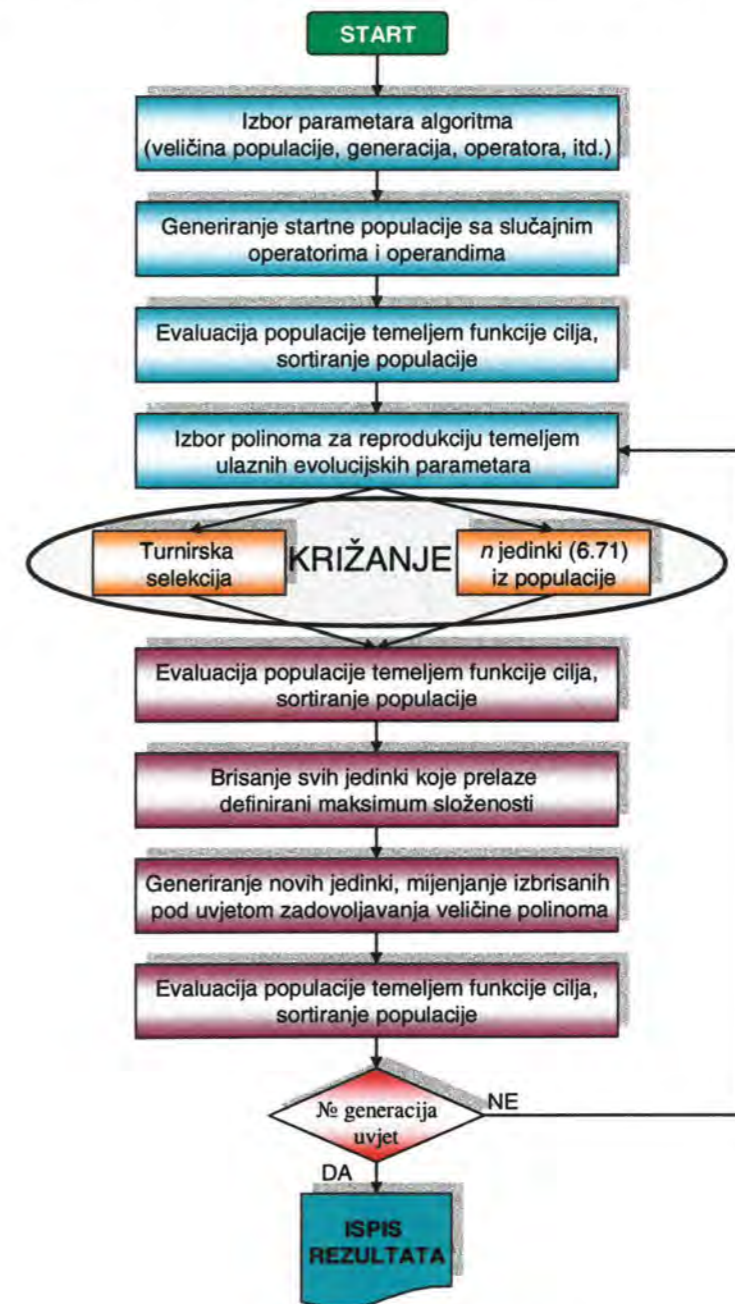
Slika 6.22. Križanje u GP

Kod drugog pristupa odabir jedinki, koje će sudjelovati u samom procesu križanja izgleda nešto drukčije, dok je sam korak križanja identičan prvom pristupu. Odabir jedinki se odvija uz pomoć veličine turnirske selekcije. Veličina turnirske selekcije definirana je na sljedeći način: veličina turnirske selekcije od  $X$  kaže da se iz populacije odabere  $X$  jedinki, a onda se iz tog skupa odabire najboljih  $X$  (engl. *top individuals for crossover*) jedinki koje onda sudjeluju u križanju. Ovaj korak se ponavlja sve dok se križanjem iz jedinki odabranih uz pomoć turnirske selekcije ne popuni ostatak populacije. Nakon evaluacije populacije iz nje se odstranjuju polinomi koji su strukturalno gledano preveliki, a preveliki polinomi su oni kod

kojih je broj operanada prešao zadani broj. Nove se jedinke koje moraju popuniti populaciju nakon eliminiranja prevelikih polinoma generiraju na isti način kao i jedinke u početnoj populaciji. Nakon ovoga koraka vrši se ispis rezultata u datoteku, gdje se ispisuje najbolji polinom iz generacije i njegova vrijednost funkcije cilja.

Korisničko sučelje dopušta i mogućnost različitih pokretanja algoritma više puta odjednom s istom konfiguracijom parametara, kako bi se postigao što bolji rezultat. Zbog stohastičke prirode algoritma ovaj korak može donijeti ponekad i bolji konačni rezultat. Struktura primijenjenog GP algoritma dana je na slici 6.23.

Testiranjem programa dobiveni su bolji rezultati primjenom prvog pristupa.



Slika 6.23. GP algoritam







### ✚ Dobiveni GP modeli za grubu obradu

- glavna sila rezanja ( $F_{cg}$ ) – operatori: +, -, \*

```
this is FitnessValue : 25.506221
this is Deviation : 1.371826
this is Generation : 199
this is Polynomialform : (((6.570+x3)+(((x3+x2)+-3.471)*-8.799)-
((6.570+x3)*-8.799))+((x3*x2)*((6.570+x3)-(((x3+-4.371)+((x3+-4.371)*-
8.799)*x3))+x1)-(-4.542+(x3-
((((((6.570+x3)+(6.570+x3)+(6.570+x3)+(x3*x2))*x2)+(x3-((6.570+x3)*-
8.799))*-8.799))))+((x3-((x3+((x3+-3.471)*-
8.799)+((6.570+x3)+(6.570+x3))))*-8.799))+((-4.542+(x3-((-
1.020+x2)+((x3+-3.471)+((x3+x2)+-3.471)*-8.799)))+(x3-((6.570+x3)*-
8.799))))*-8.799))+x1)))) (6.77)
```

srednja pogreška modela je 1,371%

- hrapavost obrađene površine ( $Ra_g$ ) – operatori: +, -, \*

```
this is FitnessValue : 0.198281
this is Deviation : 2.283496
this is Generation : 199
this is Polynomialform : ((((-3.784+x2)*(((((-
3.784+x2)+x1)+x1)*((((((9.567*x2)-(x3+x1))*((9.567*x2)+(9.567*x2)))-
(9.567*x2))*((((9.567*x2)+(9.567*x2)+(x2*x3)))*x2)+(x2*x3))-
x3))+x1)*(x3+x1))*((x3+x1))*((x3+x1))*((9.567*x2)-
(x3+(9.567*x2))+x3))+((((9.567*x2)+((((9.567*x2)+(x2*x3))-x3)*x3)+((x1-
x1)*(x3+x1))))*x2)+((((9.567*x2)+(9.567*x2)+(x2*x3)))*x2)+(x2*x3)))) (6.78)
```

srednja pogreška modela je 2,283%

- postojanost alata ( $T_g$ ) – operatori: +, -, \*, /, exp

```
this is FitnessValue : 0.406275
this is Deviation : 12.593752
this is Generation : 199
this is Polynomialform : ((-6.662-x3)-((-5.110+x2)+((2.703-
((x2+x1)+((((((((((((((x2+x1)+(x2+x1))/(-5.110+x2))/x2)+((((((x2--
7.614)+((x2--7.614)+(2.71828183exp7.517))+x2))+x2)/((((((x2+x1)-x1)+-
2.758)+x2)+x2))/((2.703-(x2+x1))+((2.71828183exp7.517)/(((x1-x1)+x2)+-
2.758)+x2))+((2.71828183exp7.517))-x1))+((2.71828183exp7.517))-x1)+-
2.758)/(x1+(-6.662-x3)))+-2.758)/((x2--
7.614)/((2.71828183exp7.517)/2.703))/x2)+(2.71828183exp7.517))-x1)/(-
2.758+x1))/x2))+x1))) (6.79)
```

srednja pogreška modela je 12,593%

## 7. OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADNE

Optimizacija je postupak koji podrazumijeva definiranje najpovoljnijih rješenja za dane početne uvjete iz skupa mogućih rješenja (slika 7.1.). Objekt optimizacije može biti neki proces u širem ili užem obliku ili sustav (tehnološki, obradni, proizvodno-pogonski ili neko drugo postrojenje, instalacija, proizvod, alat, itd.). Nema ograničenja kada je u pitanju izbor objekta optimizacije, jer postoji potreba da se svako tehničko ili tehnološko rješenje unaprijedi, što se dakako postiže primjenom metoda optimizacije.

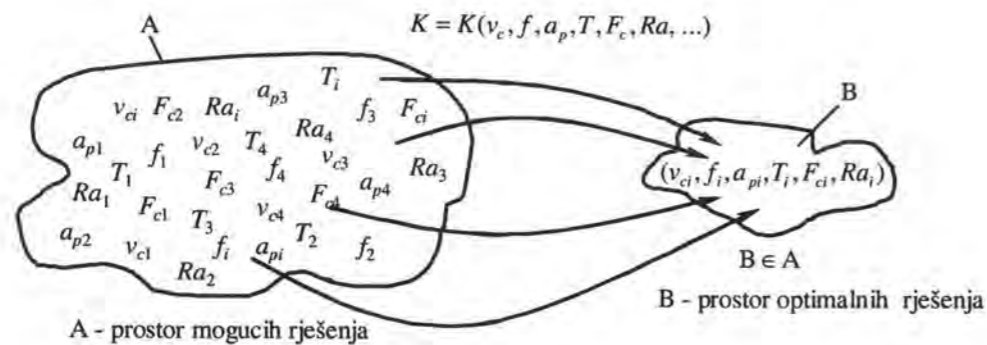
Prema tome, nema tehničkih znanosti niti inženjerskih problema gdje se manje ili više ne koriste metode optimizacije. Može se reći da gotovo i ne postoji područje čovjekove djelatnosti, sustav ili proces koji se na neki način ne bi mogao optimizirati.

Kada su u pitanju inženjerski procesi i sistemi u području proizvodnog strojarstva, obično se izvodi mikro tehno-ekonomska optimizacija i/ili makro tehno-ekonomska optimizacija.

*Makrooptimizacija* obradnog procesa i sustava najviše se odnosi na izbor optimalne varijante tehnološkog procesa (izbor optimalne tehnološke metode, odnosno postupka obrade, broja operacija, redosljeda operacija i zahvata, tehnološke baze, izbor optimalnoga obradnog stroja, alata, itd.).

*Mikrooptimizacija* obradnog procesa ili sustava odnosi se na optimizaciju parametara obrade, geometrije i postojanosti alata, vremena obrade, sredstva za podmazivanje, kvalitete obrađene površine, iskoristivosti materijala i dr.





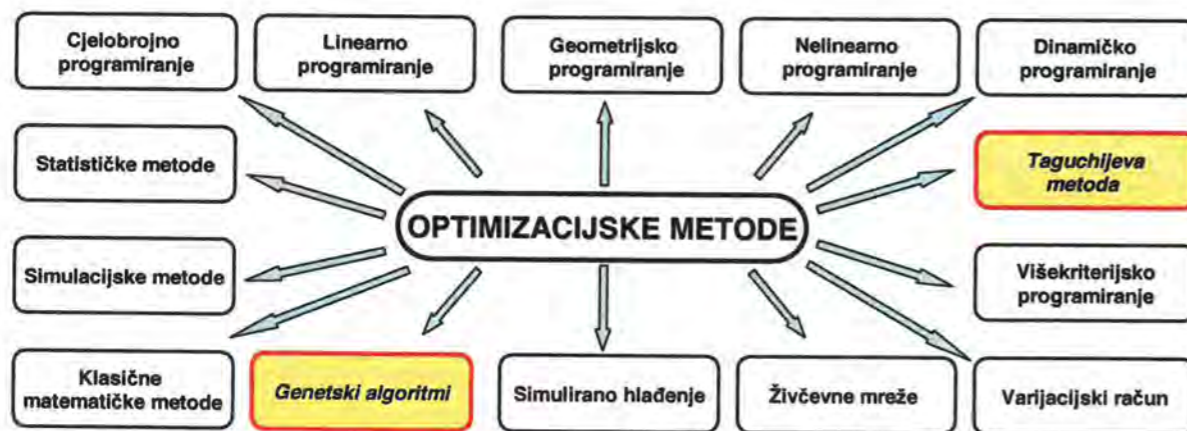
Slika 7.1. Definiranje optimalnih rješenja iz skupa mogućih

Optimizacija se može primijeniti kod:

- projektiranja i razvoja obradnih sustava, strojeva i geometrije alata, proizvoda i proizvodnih programa;
- projektiranja tehnologije i tehnoloških procesa obrade, određivanja optimalnih parametara obrade, slijeda izvođenja operacija i zahvata obrade, utroška materijala i energije, izbora postupaka obrade, itd.;
- planiranja proizvodnje, zaliha, tokova materijala, rasporeda obradnih sustava i sl.;
- upravljanja tokovima informacija (geometrijske i tehnološke), koje se odnose na obradni proces i/ili obradni sustav [74].

## 7.1. OPTIMIZACIJSKE METODE

Kako ne postoji jedinstvena metoda za rješavanje različitih optimizacijskih problema, razvijen je velik broj metoda (slika 7.2.). U cilju rješavanja različitih zadataka, odabir i primjena određene optimizacijske metode ovise o konkretnom problemu, odnosno o prednostima i ograničenjima koju takve metode imaju, kao i njihove moguće implementacije na definiranu funkciju cilja i dana ograničenja.



Slika 7.2. Pregled nekih optimizacijskih metoda [30]

Također, metode optimizacije mogu se podijeliti prema prirodi objekta za optimizaciju na

- determinističke,
- stohastičke,
- statičke i
- dinamičke,

prema broju kriterija optimizacije na

- jednokriterijske i
- višekriterijske,

prema dopuštenoj vrijednosti varijabli na

- cjelobrojne (cjelobrojno programiranje) i
- realne,

ili prema podjeli na

- konvencionalne i
- nekonvencionalne optimizacijske tehnike.

Grupa konvencionalnih tehnika optimizacije može se nadalje podijeliti u tri glavne skupine. Jedna temeljena na eksperimentu i statističkoj analizi, kao Taguchijeva metoda i metoda odzivne površine (engl. *Response Surface Methodology* – RSM), drugu čine matematičke iterativne tehnike pretraživanja kao što su linearno programiranje, nelinearno programiranje i dinamičko programiranje, a treću analitičke metode i to klasična matematička analiza, metoda Lagrangeovih množitelja, varijacijski račun, gradijentna metoda, itd.

Od nekonvencionalnih tehnika optimizacije najvažnije su svakako: genetski algoritam (GA), simulirano hlađenje (SA), umjetne živčevne mreže (ANN), neizrazita logika, itd. [62, 142-145].

Stohastičnost procesa obrade odvajanjem čestica izražena kroz diskretne i/ili kontinuirane vrijednosti parametara s višemodalnim, diferencijabilnim i/ili nediferencijabilnim funkcijama cilja kao i sve stroži tržišni zahtjevi glede učinkovitosti procesa obrade doveli su do sve veće primjene nekonvencionalnih tehnika optimizacije, koje s velikom vjerojatnošću nalaze funkcije cilja optimalno ili blizu optimalnog rješenja (što je vrlo često zadovoljavajuće rješenje za praktičnu primjenu). Razvoj i sve širu primjenu nekonvencionalnih tehnika optimizacije omogućile su informacijske tehnologije što se reflektiralo i na razvoj novih inteligentnih obradnih sustava.

Kod optimizacije parametara obrade polazi se od matematičkog modela koji opisuje određeni proces obrade. Postavi se odgovarajući kriterij za optimizaciju parametara obrade i traži se njihova kombinacija iz područja mogućih rješenja, kako bi odgovarajuća funkcija cilja dobila ekstremnu vrijednost (minimum ili maksimum).

U obzir se mogu uzeti različita ograničenja procesa obrade, kao što su: ograničenja alatnog stroja, ograničenja alata, ograničenja obratka, materijala i sl. Neki od kriterija mogu biti maksimalni profit, maksimalna produktivnost ili minimalni troškovi, minimalno vrijeme obrade, itd. Uz odgovarajuće zadane funkcije ograničenja i korištenjem različitih metoda optimizacije procesa obrade moguće je riješiti funkciju cilja i tako dobiti optimalne vrijednosti parametara obrade, optimalnu geometriju alata, optimalno SHIP, itd.



## 7.2. TAGUCHIJEVA METODA (PRISTUP)

Temeljem iznesenog u poglavlju 5.1.2. pristupilo se optimizaciji parametara obrade uzdužnog tokarenja korištenjem plana eksperimenata pomoću ortogonalnih nizova, odnosno planiranju eksperimenata i statistička obrada rezultata prema Taguchijevoj metodi.

Cilj je eksperimenta bio dobiti optimalne vrijednosti parametara obrade za grubo i fino tokarenje, kao i analizirati utjecaj pojedinih parametara i mogući utjecaj interakcija na glavne izlazne vrijednosti procesa, odnosno glavnu silu rezanja, hrapavost obrađene površine i postojanost alata.

Kako centralni kompozicijski plan od 20 eksperimenata zadovoljava samo jednim dijelom, pristupilo se planiranju i izvođenju dodatnih eksperimenata temeljem ortogonalnih nizova uobičajene notacije oblika  $L_8(2^7)$  i  $L_9(3^4)$ , tablica 5.1. U tu je svrhu potrebno utvrditi razine eksperimenata i vrijednosti neovisnih ulaznih parametara za svaki plan posebno, tako za  $L_8(2^7)$  dvije razine i do 7 mogućih parametara (tablica 7.1.), a za  $L_9(3^4)$  tri razine vrijednosti i 4 parametra (tablica 7.2.). Plan eksperimenata definiran pomoću ortogonalnih nizova dan je u tablici 7.3. za  $L_8(2^7)$ , odnosno tablici 7.4. za  $L_9(3^4)$  i to za grubu i finu obradu.

Tablica 7.1. Razine kontrolnih – ulaznih parametara za grubu i finu obradu  $L_8(2^7)$

	Simbol	Parametri	razine eksperimenata		stupnjevi slobode (DOF)
			1	2	
Gruba obrada	A	$v_c$ (m/min)	300	400	1
	B	$f$ (mm/okr.)	0,3	0,5	1
	C	$a_p$ (mm)	1,5	3,0	1
	Centralni kompozicijski plan (tablica 5.4.)			-1	+1
Fina obrada	A	$v_c$ (m/min)	400	500	1
	B	$f$ (mm/okr.)	0,1	0,2	1
	C	$a_p$ (mm)	0,4	1,2	1
	Centralni kompozicijski plan (tablica 5.6.)			-1	+1

Tablica 7.2. Razine kontrolnih – ulaznih parametara za grubu i finu obradu  $L_9(3^4)$

	Simbol	Parametri	razine eksperimenata			stupnjevi slobode (DOF)
			1	2	3	
Gruba obrada	A	$v_c$ (m/min)	300	350	400	2
	B	$f$ (mm/okr.)	0,3	0,4	0,5	2
	C	$a_p$ (mm)	1,5	2,25	3,0	2
	Centralni kompozicijski plan (tablica 5.4.)			-1	0	+1
Fina obrada	A	$v_c$ (m/min)	400	450	500	2
	B	$f$ (mm/okr.)	0,1	0,15	0,2	2
	C	$a_p$ (mm)	0,4	0,8	1,2	2
	Centralni kompozicijski plan (tablica 5.6.)			-1	0	+1

Tablica 7.3. Plan eksperimenata i rezultati za grubu i finu obradu prema  $L_8(2^7)$

№	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D	srednje eksperimentalne vrijednosti				S/N	№ (Tab. 5.5.) (Tab. 5.7.)		
								gruba obrada		fina obrada					
	$v_c$	$f$	$v \times f$	$a_p$	$v_c \times a_p$	$f \times a_p$	eks. pogreška	$F_c$ (N)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	T (min)	S/N	$F_c$ (N)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	T (min)	S/N
1	1	1	1	1	1	1	0	879,224	4,30	17,60	-58,886	128,893	0,77	32,66	-42,205
2	1	1	1	2	2	2	0	1754,215	4,21	13,86	-12,67	337,859	1,11	28,43	2,306
3	1	2	2	1	1	2	0	1436,299	11,11	6,68	24,907	201,899	1,70	25,89	30,279
4	1	2	2	2	2	1	0	2896,122	14,29	4,10	-64,885	492,945	2,14	20,74	-50,576
5	2	1	2	1	2	1	0	894,327	3,88	4,73	-12,493	130,755	0,80	11,15	-0,96
6	2	1	2	2	1	2	0	1726,937	4,50	3,80	22,832	330,745	1,19	9,23	29,074
7	2	2	1	1	2	2	0	1408,114	11,48	1,88	-63,145	202,200	1,67	7,45	-46,104
8	2	2	1	2	1	1	0	2860,663	13,71	1,16	-20,912	550,848	1,77	5,61	-4,593
											16,487				28,261
											-69,248				-53,857
											-23,103				-6,595
											12,237				26,334
											-59,031				-42,331
											-11,778				1,936
											13,491				20,941
											-64,746				-50,39
											-13,065				-1,487
											11,58				19,298
											-62,975				-46,123
											-21,201				-4,455
											5,471				17,416
											-69,131				-54,822
											-22,761				-4,993
											1,254				14,974



Tablica 7.4. Plan eksperimenata i rezultati za grubu i finu obradu prema  $L_9(3^4)$ 

№	A	B	C	D	srednje eksperimentalne vrijednosti								№ (Tab. 5.5.) (Tab. 5.7.)
					gruba obrada			S/N	fina obrada			S/N	
					$F_c$ (N)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	T (min)		$F_c$ (N)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	T (min)		
1	1	1	1	0	879,224	4,30	17,60	-58,886 -12,67 -24,912	128,893	0,77	32,66	-42,205 2,306 30,279	1
2	1	2	2	0	1706,310	7,76	9,21	-64,642 -17,803 -19,289	305,987	1,33	26,22	-49,715 -2,503 28,369	*
3	1	3	3	0	2896,122	14,29	4,10	-69,248 -23,103 -12,262	492,945	2,14	20,74	-53,857 -6,595 26,334	7
4	2	1	2	0	1260,859	4,07	8,37	-62,014 -12,192 -18,461	229,973	1,11	17,38	-47,234 -0,887 24,795	*
5	2	2	3	0	2370,946	8,13	4,17	-67,51 -18,206 -12,407	431,962	1,13	12,13	-52,71 -1,037 21,669	*
6	2	3	1	0	1415,452	11,57	3,13	-63,02 -21,27 -9,914	196,137	2,01	12,26	-45,851 -6,07 21,767	*
7	3	1	3	0	1726,937	4,50	3,80	-64,746 -13,065 -11,601	330,745	1,19	9,23	-50,39 -1,487 19,298	6
8	3	2	1	0	1177,007	7,14	2,83	-61,419 -17,071 -9,049	166,920	1,05	8,26	-44,451 -0,452 18,319	*
9	3	3	2	0	2177,104	14,26	1,42	-66,758 -23,088 -3,066	377,908	1,93	7,03	-51,548 -5,715 16,93	*

\* dodatno izvedeni eksperimenti

Planiranje eksperimenata ključni je korak u Taguchijevu pristupu s glavnim ciljem doseganja više kvalitete bez nužnog povećanja troškova. Za rješenje toga problema Taguchijev pristup koristi specijalno planirane ortogonalne nizove, gdje se eksperimentalni rezultati transformiraju u  $S/N$  odnos kao mjerilo karakteristike kvalitete, odnosno njezine devijacije od željene vrijednosti. Zadnja se kolona (D) u obama eksperimentalnim planovima koristi za izračun eksperimentalne pogreške. Vrijednosti izlaznih parametara procesa ( $F_c$ ,  $Ra$ ,

T) dane su kao srednje vrijednosti triju ponovljenih eksperimenata, a temeljem izraza (7.1) i (7.2) izračunati su odnosi  $S/N$  za svaki parametar posebno. Odnos  $S/N$  predstavlja ključno mjerilo za analizu eksperimentalnih rezultata, a izračunava se pomoću izraza

$$S/N = \eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (7.1)$$

gdje su:  $\eta$  - odnos signal-šum ( $S/N$ ),  
 $n$  - broj ponavljanja eksperimenata,  
 $y_i$  - izmjerena vrijednost karakteristike kvalitete.

Metoda za mjerenje, odnosno jedinica kojom se izražavaju rezultati može se prema Taguchijevoj metodi podijeliti u tri različite grupe i to prema karakteristici kvalitete na:

- definirana fiksna vrijednost je najbolja (engl. *nominal is best*),
- što manja vrijednost to bolja (engl. *smaller is better*) i
- što veća vrijednost to bolja (engl. *bigger is better*).

Izraz (7.1) predstavlja izračun  $S/N$  odnosa kada se traži karakteristika kvalitete "što manja vrijednost, to bolja", odnosno kada se traži minimalna vrijednost izlaznog parametra procesa. Za tretirani je proces obrade to slučaj kada se traže minimalna glavna sila rezanja i minimalna hrapavost obrađene površine, međutim kada je u pitanju postojanost alata, tada se teži rješenju "što veća vrijednost, to bolja" i za nju se odnos  $S/N$  izračunava prema izrazu:

$$S/N = \eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (7.2)$$

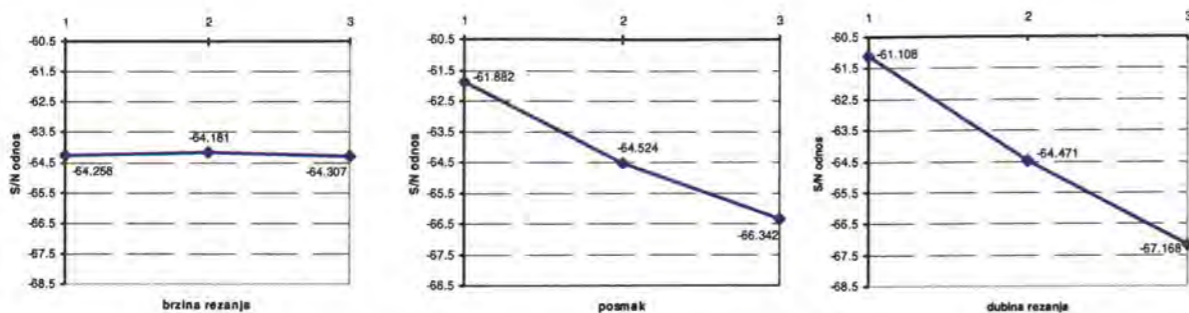
Vrijednosti odnosa  $S/N$  za sve kontrolne parametre i njihove razine izračunavaju se prema jednadžbama:

$$\begin{aligned} A1 &= \frac{1}{3}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) = \frac{1}{3}(-58,886 - 64,642 - 69,248) = -64,258, \\ A2 &= \frac{1}{3}(\eta_4 + \eta_5 + \eta_6) = \frac{1}{3}(-62,014 - 67,51 - 63,02) = -64,181, \\ A3 &= \frac{1}{3}(\eta_7 + \eta_8 + \eta_9) = \frac{1}{3}(-64,746 - 61,419 - 66,758) = -64,307. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Izračun se odnosi za rezultate u tablici 7.4. i to za glavnu silu rezanja – gruba obrada. Na isti se način izračunavaju i ostale vrijednosti odnosa  $S/N$  i to za parametre B (B1, B2, B3) i C (C1, C2, C3), kao i djelovanje interakcija ( $A \times B$ ,  $A \times C$ ,  $B \times C$ ), dano prema planu  $L_8(2^7)$ .

Utjecaj pojedinih parametara na izlaznu veličinu procesa može se predstaviti putem odzivnog grafa, koji pokazuje promjenu odnosa  $S/N$  u trenutku promjene razine kontrolnog parametra i to od 1 do 3 za plan  $L_9(3^4)$ , dok za plan  $L_8(2^7)$  promjena razine ide od 1 do 2. Na slici 7.3. predstavljen je odzivni graf za glavnu silu rezanja – gruba obrada za sva tri kontrolna parametra.





Slika 7.3. S/N grafovi kontrolnih parametara procesa za glavnu silu rezanja – gruba obrada

Utjecaj pojedinih parametara na izlaznu veličinu procesa izražen je grafički kroz kut nagiba crte koja povezuje različite razine parametara. Iz navedenih grafova razvidan je jak (najjači od svih parametara) utjecaj dubine rezanja na glavnu silu rezanja kod procesa grubog tokarenja, zatim također značajan utjecaj posmaka i potpuno zanemariv (beznačajan) utjecaj brzine rezanja. Potvrdu tih grafičkih rezultata daje analiza varijance (ANOVA) u tablici 7.5.

Tablica 7.5. ANOVA za glavnu silu rezanja – gruba obrada prema planu  $L_9(3^4)$ 

Simbol	Parametri	DOF	Zbroj kvadrata	Varijanca	F	Udio u utjecaju (%)
A	brzina rezanja, $v_c$	2	0,022	0,011	0,229	0,001
B	posmak, $f$	2	30,175	15,087	308,474	35,137
C	dubina rezanja, $a_p$	2	55,303	27,651	565,351	64,493
D	pogreška	2	0,097	0,048		0,369
Ukupno		8	34,101			100

Utjecaj pogreške u iznosu od 0,369% govori o nesignifikantnom utjecaju svih onih parametara koji nisu uključeni u sam eksperiment, kao i o utjecaju same pogreške eksperimenta. Time je potvrđena pravilna odluka o izboru utjecajnih parametara procesa, dobro planiranje eksperimenata kao i samo izvođenje svih eksperimenata. Prikazana procedura Taguchijeve metode provedena je i za sve ostale izlazne parametre procesa, a u cilju definiranja optimalnih ulaznih parametara za obje kategorije obrade tokarenjem.

### 7.2.1. Optimizacija parametara za grubu obradu – rezultati

#### Optimalne vrijednosti parametara za grubu obradu plan $L_8(2^7)$ i plan $L_9(3^4)$

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što manja vrijednost, to bolja" (S/N analiza za glavnu silu rezanja  $F_{cg}$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_8(2^7)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	2	№ 5	$S/N=-58,841\pm 0,179$ za 90%	$F_{cg}$ average=894,32 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperimenta	$F_{cg}=875,084$	$F_{cg}=887,38; 891,41;$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_8(2^7)$	$F_{cgmax}=893,278$ $F_{cgmin}=857,261$	904,18

#### Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu $L_9(3^4)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	350	2	potreban dodatni	$S/N=-58,675\pm 0,365$ za 90%	$F_{cg}$ average=848,58 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperiment	$F_{cg}=858,519$	$F_{cg}=807,79; 864,81;$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_9(3^4)$	$F_{cgmax}=895,354$ $F_{cgmin}=823,2$	873,14

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što manja vrijednost, to bolja" (S/N analiza za hrapavost obrađene površine  $Ra_g$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

#### Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu $L_8(2^7)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	2	№ 5	$S/N=-11,849\pm 0,814$ za 90%	$Ra_g$ average=3,88 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperimenta	$Ra_g=3,912$	$Ra_g=3,81; 3,89; 3,94$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_8(2^7)$	$Ra_{gmax}=4,297$ $Ra_{gmin}=3,562$	

#### Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu $L_9(3^4)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	350	2	potreban dodatni	$S/N=-11,654\pm 0,948$ za 90%	$Ra_g$ average=3,78 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperiment	$Ra_g=3,826$	$Ra_g=3,71; 3,84; 3,78$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_9(3^4)$	$Ra_{gmax}=4,267$ $Ra_{gmin}=3,43$	

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što veća vrijednost, to bolja" (S/N analiza za postojanost alata  $T_g$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

#### Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu $L_8(2^7)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	300	1	№ 1	$S/N=25,341\pm 1,06$ za 90%	$T_g$ average= 17,60 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperimenta	$T_g=18,495$	$T_g=17,25; 17,84; 17,71$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_8(2^7)$	$T_{gmax}=20,895$ $T_{gmin}=16,37$	

#### Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu $L_9(3^4)$ , i njihova provjera

	Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	300	1	№ 1	$S/N=24,891\pm 0,519$ za 90%	$T_g$ average= 17,60 tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,3	1	eksperimenta	$T_g=17,561$	$T_g=17,25; 17,84; 17,71$
$a_p$ (mm)	1,5	1	$L_9(3^4)$	$T_{gmax}=18,641$ $T_{gmin}=16,543$	



## 7.2.2. Optimizacija parametara za finu obradu – rezultati

### Optimalne vrijednosti parametara za finu obradu plan $L_8(2^7)$ i plan $L_9(3^4)$

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što manja vrijednost, to bolja" (S/N analiza za glavnu silu rezanja  $F_{cf}$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_8(2^7)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	№ 1	$S/N=-42,151\pm 0,412$ za 90%	$F_{cf\text{ average}}=128,89$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$F_{cf}=128,1$	$F_{cf}=128,72; 129,53;$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_8(2^7)$	$F_{cf\text{ max}}=134,323$ $F_{cf\text{ min}}=122,166$	128,42

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_9(3^4)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	№ 1	$S/N=-42,047\pm 0,441$ za 90%	$F_{cf\text{ average}}=128,89$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$F_{cf}=126,576$	$F_{cf}=128,72; 129,53;$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_9(3^4)$	$F_{cf\text{ max}}=133,168$ $F_{cf\text{ min}}=120,309$	128,42

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što manja vrijednost, to bolja" (S/N analiza za hrapavost obrađene površine  $Ra_f$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_8(2^7)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	500	№ 5	$S/N=1,706\pm 1,249$ za 90%	$Ra_{f\text{ average}}=0,80$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$Ra_f=0,822$	$Ra_f=0,80; 0,82; 0,78$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_8(2^7)$	$Ra_{f\text{ max}}=0,949$ $Ra_{f\text{ min}}=0,712$	

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_9(3^4)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	№ 1	$S/N=1,293\pm 2,7$ za 90%	$Ra_{f\text{ average}}=0,77$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$Ra_f=0,862$	$Ra_f=0,75; 0,77; 0,78$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_9(3^4)$	$Ra_{f\text{ max}}=1,176$ $Ra_{f\text{ min}}=0,631$	

- Optimizacija parametara obrade po kriteriju "što veća vrijednost, to bolja" (S/N analiza za postojanost alata  $T_f$ ) dala je sljedeće vrijednosti:

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_8(2^7)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	№ 1	$S/N=30,963\pm 0,836$ za 90%	$T_{f\text{ average}}=32,66$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$T_f=35,331$	$T_f=33,05; 32,50; 32,43$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_8(2^7)$	$T_{f\text{ min}}=32,089$ $T_{f\text{ max}}=38,899$	

Optimalne vrijednosti parametara obrade, prema planu  $L_9(3^4)$ , i njihova verifikacija

Optimalne vrijednosti	Razina		Vrijednost dobivena Taguchijevom metodom	Vrijednost dobivena testom provjere-potvrde
$v_c$ (m/min)	400	№ 1	$S/N=30,403\pm 0,31$ za 90%	$T_{f\text{ average}}=32,66$ tj. za
$f$ (mm/okr.)	0,1	eksperimenta	$T_f=33,125$	$T_f=33,05; 32,50; 32,43$
$a_p$ (mm)	0,4	$L_9(3^4)$	$T_{f\text{ max}}=34,328$ $T_{f\text{ min}}=31,964$	

Podešavanja parametara u cilju dobivanja optimalnih vrijednosti procesa može se očitati i sa slike 7.3., tj. najboljim/optimalnim se vrijednostima parametara smatraju one za koje se dobiva maksimalna vrijednost odnosa S/N, ili u prikazanom slučaju glavne sile rezanja za grubu obradu kombinacija parametara razine (A2, B1, C1).

Može se reći da su sve dobivene optimalne vrijednosti parametara u potpunosti potvrđene test-provjerama za razinu pouzdanosti od 90%. Također, utjecaj je interakcijskog djelovanja parametara u postotnom udjelu manji nego samih kontrolnih parametara, a oni pak ovisno o izlaznoj veličini procesa mogu biti više ili manje signifikantni. Znači, pored dobivanja optimalnih vrijednosti ne manje važna osobina Taguchijeve metode je i definiranje utjecaja svakog parametra na krajnji rezultat, što je veoma bitno u praktičnoj primjeni gotovo jednako toliko koliko i sama optimalna vrijednost.

Tako je, pored već spomenutog utjecaja parametara na glavnu silu rezanja bitno spomenuti i enormno velik utjecaj posmaka na hrapavost obrađene površine kao i veći utjecaj brzine rezanja od posmaka na postojanost alata.

Na kraju se kao zaključak, a vezano za glavne karakteristike (prednosti i nedostaci) ove metode optimizacije može reći sljedeće:

- glede planiranja eksperimenata Taguchijevom metodom svakako se kao jedna od najvećih prednosti pokazala učinkovitost samog postupka koja se ogleda u smanjenom broju potrebnih eksperimenata, za razliku od također prezentiranoga potpunog faktornog plana, a uz dobivanje također pouzdanih rezultata, što je prezentiranim primjerom i potvrđeno;
- jednostavnost se procedure ogleda u nepostojanju potrebe za matematičkim ili nekim drugim modelom što omogućava optimizaciju koju nije moguće postići drugim poznatim metodama;

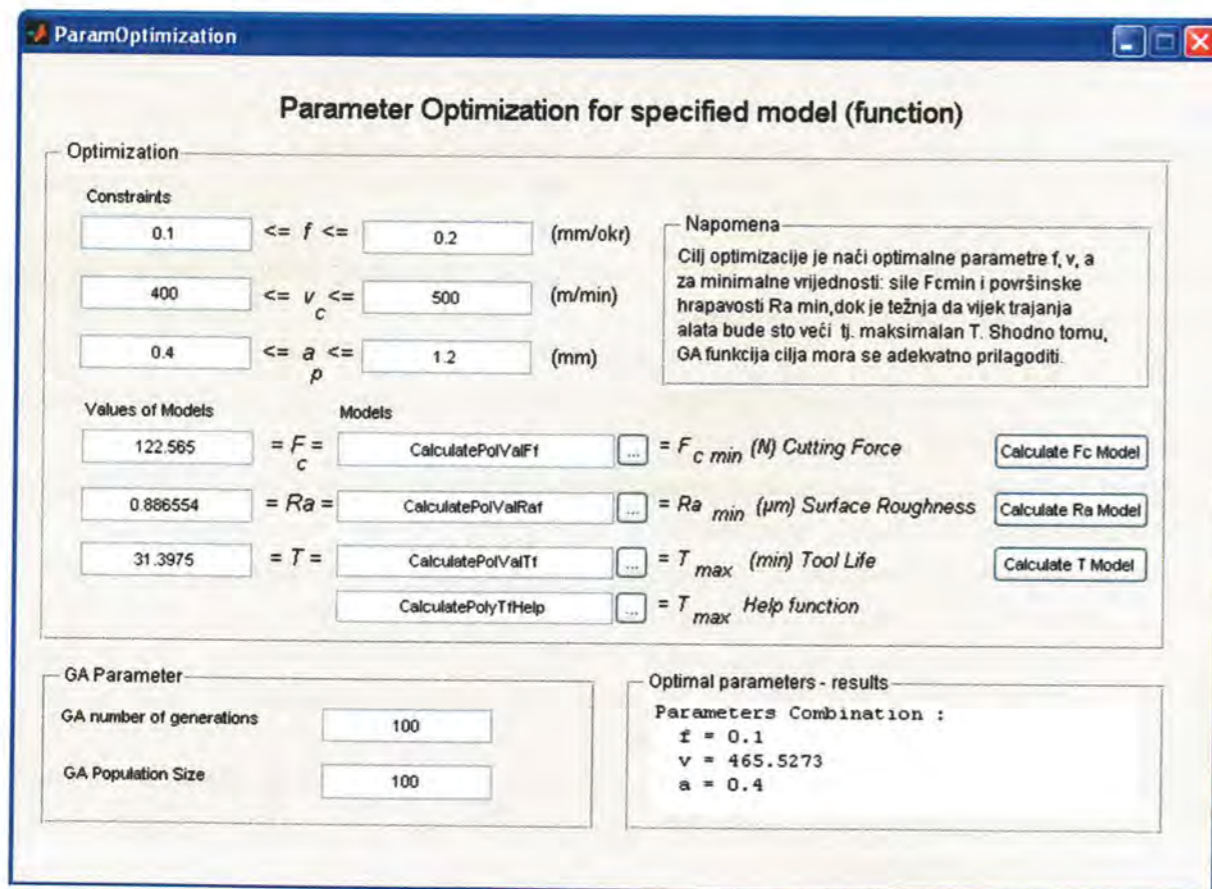


- nije potrebna striktna numerička definicija parametara, već je moguće koristiti i opise stanja procesa kao razine parametara, što govori i o mogućnosti optimiranja procesa koji su diskretni;
- kao nedostatak te metode može se reći da nepostojanje matematičkog modela onemogućava kvalitetnu analizu cijele domene eksperimenta, a kao rezultat toga su dobivene vrijednosti optimalnih parametara samo za razine eksperimenta, što značajno ograničava područje optimalnih vrijednosti, posebice ako se optimalna vrijednost nalazi negdje na intervalu između dviju razina.

Iako se iz navedenog može zaključiti da je Taguchijeva metoda bolja za diskretne procese optimizacije, ta se metoda primjenjuje i za kontinuirane procese gdje s dovoljnom pouzdanošću (posebice kod monotonih funkcija) osigurava optimalna (blizu optimalnih) rješenja, o čemu svjedoče praktični primjeri i literaturni podaci [28, 30-33, 39, 78, 139].

### 7.3. GA OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADNE

Optimizacija parametara obrade izvedena je pomoću GA modula (slika 7.4.) programiranog za parametarsku optimizaciju temeljenu na matematičkim modelima izlaznih parametara procesa obrade ( $F_{c(f,g)}$ ,  $Ra_{f,g}$ ,  $T_{f,g}$ ).



Slika 7.4. Modul za parametarsku GA optimizaciju

Matematički modeli u 6. poglavlju predstavljaju osnovu kvalitetne optimizacije zasnovane na hipotezi "proces obrade bit će optimalan u cjelini ukoliko ako je optimalna obrada po svim njegovim etapama".

Dobiveni matematički modeli eksponencijalnog i polinomskog tipa iskorišteni su za formiranje funkcija dobrote (funkcija prikladnosti) u cilju optimizacije parametara obrade ( $v_{c(f,g)}$ ,  $f_{f,g}$ ,  $a_{p(f,g)}$ ). Svi optimalni parametri obrade dobiveni su za iste vrijednosti evolucijskih parametara i to: generacija  $G = 150$ , populacija  $M = 200$ , vjerojatnosti križanja  $p_c = 0,75$  (u dvije točke) i mutacije  $p_m = 0,01$  i veličina turnirske selekcije  $S = 7$ .

Cilj je optimizacije pronaći optimalne parametre obrade imajući u vidu da funkcije cilja (funkcije dobrote) imaju oprečnu ulogu za glavnu silu rezanja i hrapavost obrađene površine, gdje se traži minimalna vrijednost izlaznog parametra, od postojanosti alata gdje se traži maksimalna vrijednost.

#### 7.3.1. Rezultati optimizacije za grubu obradu

Rezultati optimalnih parametara i njihovih izlaznih veličina za grubu obradu tokarenjem dani su u tablici 7.6.

Tablica 7.6. Vrijednosti optimalnih parametara za grubu obradu

	Modeli	Parametri			Funkcija dobrote
		$v_c$	$f$	$a_p$	
eksp. modeli	$F_{c_g}$	400	0,3	1,5	876,581
	$Ra_g$	400	0,3	1,5	3,9113
	$T_g$	300	0,3	1,5	18,4924
polinom. modeli	$F_{c_g}$	300	0,3	1,5	857,202
	$Ra_g$	400	0,3	1,5	3,9164
	$T_g$	300	0,3	1,5	17,0583

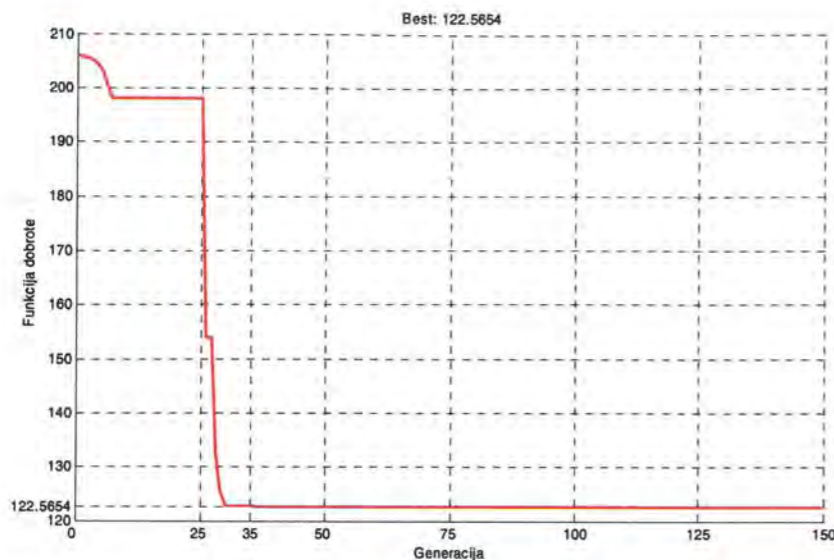
#### 7.3.2. Rezultati optimizacije za finu obradu

Rezultati optimalnih parametara i njihovih izlaznih veličina za finu obradu tokarenjem dani su u tablici 7.7. Na slici 7.5. prikazan je tijek funkcije dobrote glavne sile rezanja (polinomski model) kroz generacijske faze.

Tablica 7.7. Vrijednosti optimalnih parametara za finu obradu

	Modeli	Parametri			Funkcija dobrote
		$v_c$	$f$	$a_p$	
eksp. modeli	$F_{c_g}$	400	0,1	0,4	128,0672
	$Ra_g$	500	0,1	0,4	0,82249
	$T_g$	400	0,1	0,4	35,4659
polinom. modeli	$F_{c_g}$	465,5273	0,1	0,4	122,5654
	$Ra_g$	408,9286	0,1	0,4	0,88655
	$T_g$	400	0,1	0,4	31,3975





Slika 7.5. Funkcija dobrote kroz generacijske faze: glavna sila rezanja – fina obrada

Kao zaključak moguće je reći da optimalne vrijednosti parametara grube i fine obrade postižu svoje optimalne vrijednosti (minimalne, odnosno maksimalne) za granične vrijednosti posmaka ( $f = 0,3$  i  $0,1$  mm/okr.), odnosno dubine rezanja ( $a_p = 1,5$  i  $0,4$  mm). Vrijednost optimalne brzine rezanja samo u dva slučaja (fina obrada) nije bila na granici eksperimentalnog područja.

#### 7.4. GA OPTIMIZACIJA TEHNO-EKONOMSKIH PARAMETARA

Optimizacija procesa obrade odvajanjem čestica podrazumijeva proces dobivanja optimalnih vrijednosti parametara obrade pod uvjetom da ispunjavaju postavljene ciljne funkcije kao i definirane funkcije ograničenja obradnog procesa. Najčešće korišteni kriteriji su kriteriji tehno-ekonomske optimizacije i to:

- minimalno vrijeme ili minimalni trošak obrade kao jednokriterijska optimizacija,
- kombinacija navedenih kriterija primjenom težinskih koeficijenata kao dvokriterijska optimizacija ili
- primjena višekriterijske optimizacije korištenjem odgovarajuće funkcije cilja temeljene na kriterijima obradivosti materijala (postojanost alata, sila rezanja, kvaliteta obrađene površine, temperatura rezanja, oblik strugotine, itd.).

U cilju rješavanja navedenih kriterija optimizacije pristupilo se izradi programske podrške temeljem modularnih cjelina uporabom evolucijskih algoritama kao vrlo pogodne tehnike istodobnog pretraživanja širokog područja mogućih rješenja u cilju pronalaska Pareto\* optimalnih rješenja već u prvom pokretanju programa, umjesto serije odvojenih startanja programa kakav je slučaj s tradicionalnim tehnikama matematičkog programiranja [146].

\* Vilfredo Pareto, ekonomista koji je prvi formuirao problem višekriterijske optimizacije (Pareto optimum) u knjizi, Cours D Economie Politique, volume I & II, Lausanne, 1896.

Općenito se višekriterijski optimizacijski problem može formulirati na sljedeći način:

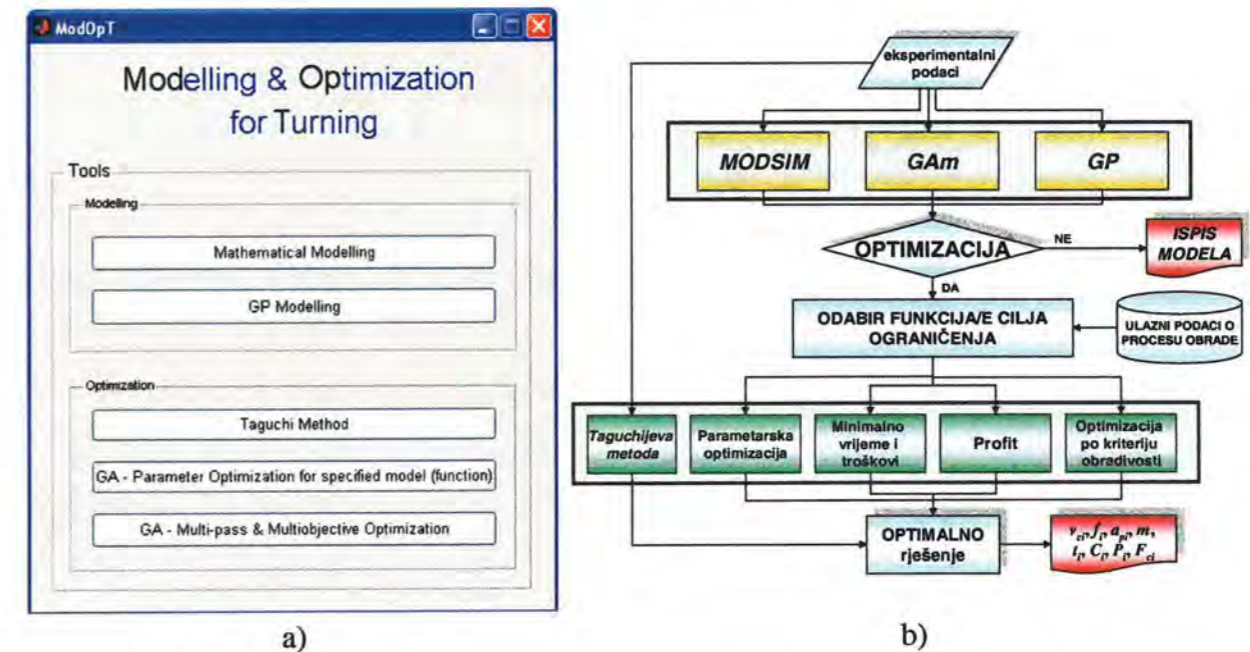
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \varphi(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\mathbf{X}) \\ \varphi_2(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \varphi_n(\mathbf{X}) \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} [h(\mathbf{X})]_p &\leq 0 \\ [c(\mathbf{X})]_r &= 0 \\ \mathbf{X}^d &\leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^g \end{aligned} \quad (7.4)$$

odnosno treba pronaći odgovarajući vektor  $\mathbf{X}$  koji minimizira funkcije cilja  $\varphi(\mathbf{X})$  i pri tome zadovoljava različita linearna i nelinearna ograničenja. Vektor  $\mathbf{X}$  mora zadovoljiti oprečne kriterije, tako da optimalno rješenje višekriterijske optimizacije nikada nije jednoznačno definirano već predstavlja skup mogućih rješenja, a odabir jedinstvenoga jedan je vid kompromisnog rješenja koje definira od strane projektanta optimizacije.

Do sada navedeni moduli za GA modeliranje i optimiranje kao i GP modul za modeliranje upotunjeni su modulom za jednokriterijsku, dvokriterijsku i višekriterijsku optimizaciju parametara za grubu i finu obradu tokarenjem. Gruba obrada tokarenjem programirana je za dvije varijante optimizacije i to:

- optimiranje parametara obrade  $v_c, f$  i  $a_p$  pri istoj dubini rezanja za sve prolaze i
- optimiranje parametara obrade  $v_c, f$  i  $a_p$  pri svakom prolazu.

Razvijeni softver *ModOpT* (Modeliranje i optimizacija tokarenja) izrađen u *Matlab*<sup>®</sup> okružju predstavlja cjelovito rješenje kada su u pitanju modeliranje i optimizacija procesa obrade tokarenjem, a na jednostavan način omogućava eventualnu prilagodbu definiranom problemu, slika 7.6.



Slika 7.6. Program *ModOpT*: a) uvodni prozor, b) dijagram tijeka informacija kroz module



### 7.4.1. Jednokriterijska optimizacija

Obrada odvajanjem čestica pri optimalnim parametrima obrade jedini je način ostvarenja maksimalnog tehnno-ekonomskog učinka i time podizanja obradnog procesa na višu razinu upravljanja. Jedan je od načina za postizanje tog cilja jednokriterijska optimizacija temeljena na:

- minimalnom jediničnom vremenu obrade ili maksimalnoj produktivnosti te
- minimalnom jediničnom trošku obrade.

#### 7.4.1.1. Definiranje funkcija cilja

Temeljem teorijskog istraživanja u 3. poglavlju postavljeni su kriteriji optimizacije te se pristupilo izradi funkcija cilja i ograničenja za grubu (u više prolaza) i finu obradu (završni prolaz) tokarenjem.

#### Opći izraz za minimalno jedinično vrijeme i trošak obrade\*

$$t_{1(f,g)} = t_n + \sum_{j=1}^{j=i} t_{g(f,g)j} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_{(f,g)j}} \right) \quad \text{ili} \quad t_{1(f,g)} = t_n + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_{(f,g)j}} \right)$$

$$C_{1(f,g)} = C_f + C_o + C_a \quad \text{ili} \quad C_{1(f,g)} = k_o t_n + \sum_{j=1}^i k_o t_{g(f,g)j} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{\sum_{j=1}^i t_{g(f,g)j}}{T_{(f,g)j}} \quad (7.5)$$

Opći se izraz transformira ovisno o vrsti obrade.

#### 1. GRUBA obrada – varijanta 1

- Minimalno vrijeme obrade  $t_{1g}$

Za  $i$ -jednakih prolaza gdje su  $v_c, f$  i  $a_p$  isti po svakom prolazu slijedi:

$$t_{1g} = t_n + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cg} \cdot f_g} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_g} \right) \quad (7.6)$$

Ovdje se mijenja promjer  $D_j$  (za svaki prolaz manji) dok su parametri  $v_c, f$  i  $a_p$ , a time i postojanost  $T_g$  isti po svim prolazima.

- Minimalni troškovi obrade  $C_{1g}$

$$C_{1g} = k_o t_n + \sum_{j=1}^i k_o t_{ggj} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{\sum_{j=1}^i t_{ggj}}{T_g} \quad (7.7)$$

\* indeksi označavaju:  $f$  - fina obrada;  $g$  - gruba obrada

Strojno vrijeme grube obrade za  $i$ -prolaza je:  $t_{ggj} = \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cg} \cdot f_{gj}}$

#### 2. GRUBA obrada – varijanta 2

- Minimalno vrijeme obrade  $t_{1g}$

Za optimiranje parametara  $v_c, f$  i  $a_p$  pri svakom prolazu slijedi:

$$t_{1g} = t_n + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_{gj}} \right) \quad (7.8)$$

S obzirom na to da je u ovoj varijanti za svaki prolaz moguća različita vrijednost parametara  $v_c, f$  i  $a_p$ , to automatski znači da je i postojanost alata  $T$  različita za svaki prolaz što dovodi do neujednačenosti kriterija za istrošenost alata, a time i definirane zamjene alata zbog istrošenja.

Kako se to ne bi dogodilo potrebno je postojanost alata definirati na drukčiji način tj. preko jedinstvenog vremena zamjene alata nakon kojeg više nije moguće proizvoditi dijelove prihvatljive kvalitete. Takav problem definiranja jedinstvene postojanosti alata dolazi do izražaja i kod obrade istim alatom pri gruboj i finoj obradi, zbog različitih vrijednosti parametara obrade. Posebno to dolazi do izražaja pri automatskoj proceduri rezanja kada definirana vrijednost postojanosti alata omogućava sigurnu izmjenu alata, odnosno tamo gdje ne postoji *on-line* nadgledanje istrošenosti alata. Temeljem iznesenog potrebno je prilikom unosa ulaznih podataka obrade definirati egzaktnu vrijednost postojanosti alata  $T_g = \text{const.}$  pa se gornji izraz transformira u:

$$t_{1g} = t_n + \sum_{j=1}^{j=i} \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_g} \right) \quad (7.9)$$

- Minimalni troškovi obrade  $C_{1g}$

$$C_{1g} = k_o t_n + \sum_{j=1}^i k_o t_{ggj} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{\sum_{j=1}^i t_{ggj}}{T_g} \quad (7.10)$$

Strojno vrijeme grube obrade za  $i$ -prolaza je:  $t_{ggj} = \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}}$

#### 3. FINA obrada

- Minimalno vrijeme obrade  $t_{1f}$  (za jedan prolaz)

$$t_{1f} = t_n + \frac{\pi \cdot D_i \cdot L}{1000 \cdot v_{cf} \cdot f_f} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_f} \right) \quad (7.11)$$



gdje je:  $D_i$  - krajnji (završni) promjer izratka.

- Minimalni troškovi obrade  $C_{1f}$  (za jedan prolaz)

$$C_{1f} = k_o t_n + k_o t_{gf} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{t_{gf}}{T_f} \quad (7.12)$$

Strojno vrijeme fine obrade je:  $t_{gf} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot L}{1000 \cdot v_{cf} \cdot f_f}$ .

#### 4. UKUPNO jedinično vrijeme i jedinični troškovi obrade

Na kraju zbroj vremena  $t_1$  i troškova obrade  $C_1$  za finu i grubu obradu (sve prolaze) daje konačni rezultat glede postavljenih kriterija.

- Minimalno (optimalno) jedinično vrijeme obrade  $t_{1min}$

$$t_{1min} = t_{1f} + \sum_{j=1}^i t_{1g_j} \quad (7.13)$$

- Minimalni (optimalni) jedinični troškovi obrade  $C_{1min}$

$$C_{1min} = C_{1f} + \sum_{j=1}^i C_{1g_j} \quad (7.14)$$

#### 7.4.2. Višekriterijska optimizacija

Za rješavanje problema višekriterijske optimizacije postoje različite tehnike, od kojih je ovdje odabrana metoda težinskih koeficijenata (engl. *aggregating functions*) ili tzv. kompromisna metoda, gdje se kombinacijom vrijednosti težinskih koeficijenata ( $w$ ) i jednokriterijskih funkcija cilja omogućava pretraživanje cjelokupnog intervala mogućih optimalnih rješenja [142, 146, 147]. Odabir vrijednosti težinskih koeficijenata predstavlja bitan kritični moment u procesu optimizacije, poglavito kod slabo istraženih procesa.

Rješavanju ovoga optimizacijskog problema pristupilo se na dva načina:

- primjenom definiranih jednokriterijskih funkcija cilja u novoj agregatnoj funkciji cilja i
- primjenom kriterija vrednovanja obradivosti materijala u složenoj višekriterijskoj funkciji cilja.

##### 7.4.2.1. Definiranje funkcije cilja za dvokriterijsku optimizaciju

Model ciljne funkcije prema kojem se izvodi dvokriterijska optimizacija za grubu obradu ima oblik

$$\min(\varphi_c) = w \sum_{j=1}^i \frac{C_{1g_j}}{C_{1g}} + (1-w) \sum_{j=1}^i \frac{t_{1g_j}}{t_{1g}}, \quad (7.15)$$

gdje je:  $w$  - težinski koeficijent u intervalu  $[0, 1]$ .

Za  $w = 1$  vrijedi slučaj minimalnih jediničnih troškova obrade, odnosno za  $w = 0$  vrijedi slučaj minimalnoga jediničnog vremena obrade tj. ciljna se funkcija svodi na jednokriterijsku optimizaciju.

#### 1. GRUBA obrada:

varijanta - 1

$$\min(\varphi_c) = \frac{w}{C_{1g}} \left[ k_o t_n + \sum_{j=1}^i k_o t_{ggj} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{\sum_{j=1}^i t_{ggj}}{T_g} \right] + \frac{(1-w)}{t_{1g}} \left[ t_n + \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cg} \cdot f_g} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_g} \right) \right] \quad (7.16)$$

Strojno je vrijeme  $t_{ggj} = \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cg} \cdot f_g}$ , tj.  $(v_{cg}, f_g, a_{pg}) =$  za sve prolaze.

varijanta - 2

$$\min(\varphi_c) = \frac{w}{C_{1g}} \left[ k_o t_n + \sum_{j=1}^i k_o t_{ggj} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{\sum_{j=1}^i t_{ggj}}{T_g} \right] + \frac{(1-w)}{t_{1g}} \left[ t_n + \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_g} \right) \right] \quad (7.17)$$

Strojno je vrijeme  $t_{ggj} = \sum_{j=1}^i \frac{\pi \cdot D_j \cdot L}{1000 \cdot v_{cgj} \cdot f_{gj}}$ , tj.  $(v_{cgj}, f_{gj}, a_{pgj}) \neq$  za svaki prolaz.

#### 2. FINA obrada:

$$\begin{aligned} \min(\varphi_c) &= w \frac{C_{1f}}{C_{1f}} + (1-w) \frac{t_{1f}}{t_{1f}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \min(\varphi_c) = \frac{w}{C_{1f}} \left[ k_o t_n + k_o t_{gf} + \left( \frac{C_N}{Z_{pl}} + k_o t_{al} \right) \frac{t_{gf}}{T_f} \right] + \\ &\quad + \frac{(1-w)}{t_{1f}} \left[ t_n + \frac{\pi \cdot D_i \cdot L}{1000 \cdot v_{cf} \cdot f_f} \left( 1 + \frac{t_{al}}{T_f} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.18)$$

Strojno je vrijeme  $t_{gf} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot L}{1000 \cdot v_{cf} \cdot f_f}$ , tj.  $(v_{cf}, f_f, a_{pf})$  za završni prolaz.



### 7.4.2.2. Definiranje funkcije cilja za višekriterijsku optimizaciju

Funkcija cilja definirana je temeljem kriterija vrednovanja obradivosti materijala za grubu i finu obradu tokarenjem. Važnost pojedinih kriterija definira se vrijednošću težinskih koeficijenata tako da za grubo tokarenje vrijedi sljedeća klasifikacija: postojanost alata, sile rezanja (snaga), oblik strugotine te na kraju kvaliteta obrađene površine. Kod finog tokarenja situacija je nešto izmijenjena: kvaliteta obrađene površine, postojanost alata, oblik strugotine pa onda sile rezanja (snaga).

Eksperimentalnim istraživanjem prikupljeni su podaci o silama rezanja, postojanosti alata i kvaliteti obrađene površine, a za dodatni kriterij usvojen je volumen skinute strugotine u jedinici vremena kao vrlo bitan uvjet ekonomičnosti grube obrade.

#### 1. GRUBA obrada:

varijanta – 1

$$\min(\varphi_c) = \sum_{j=1}^i \frac{w_1}{F_{cg}^*} F_{cgj} - \sum_{j=1}^i \frac{w_2}{T_g^*} T_{gj} - \sum_{j=1}^i \frac{w_3}{MRR_g^*} MRR_{gj} + \sum_{j=1}^i \frac{w_4}{Ra_g^*} Ra_{gj}, \quad (7.19)$$

gdje su:  $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ,

$MRR_g = v_{cg} \cdot f_g \cdot a_{pg}$  - količina skinute strugotine u jedinici vremena,  $\text{cm}^3/\text{min}$ ,

$F_{cgj}, T_{gj}, Ra_{gj}$  - polinomski i/ili eksponencijalni modeli za grubu obradu,

$(F_{cg}, T_g, Ra_g, MRR_g)^*$  - numeričke vrijednosti dane kao ograničenja pa je tako

$F_{cg}^* \geq F_{cgj}; Ra_g^* \geq Ra_{gj}; MRR_g^* \leq MRR_{gj}; T_g^* \leq T_{gj}$ , i

$$\sum_{j=1}^n a_{pgj} = a_u. \quad (7.20)$$

Izlazna je vrijednost ove optimizacije funkcija cilja  $\varphi_c$  i parametri  $(v_{cg}, f_g, a_{pg}) =$  za sve prolaze.

varijanta – 2

Kao i varijanta – 1 samo što su izlazni rezultati  $(v_{cgj}, f_{gj}, a_{pgj}) \neq$  za sve prolaze.

#### 2. FINA obrada:

$$\min(\varphi_c) = \frac{w_1}{F_{cf}^*} F_{cf} - \frac{w_2}{T_f^*} T_f - \frac{w_3}{MRR_f^*} MRR_f + \frac{w_4}{Ra_f^*} Ra_f, \quad (7.21)$$

gdje su:  $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ,

$MRR_f = v_{cf} \cdot f_f \cdot a_{pf}$  - količina skinute strugotine u jedinici vremena,  $\text{cm}^3/\text{min}$ ,

$F_{cf}, T_f, Ra_f$  - polinomski i/ili eksponencijalni modeli za finu obradu,

$(F_{cf}, T_f, Ra_f, MRR_f)^*$  - numeričke vrijednosti dane kao ograničenja pa je tako

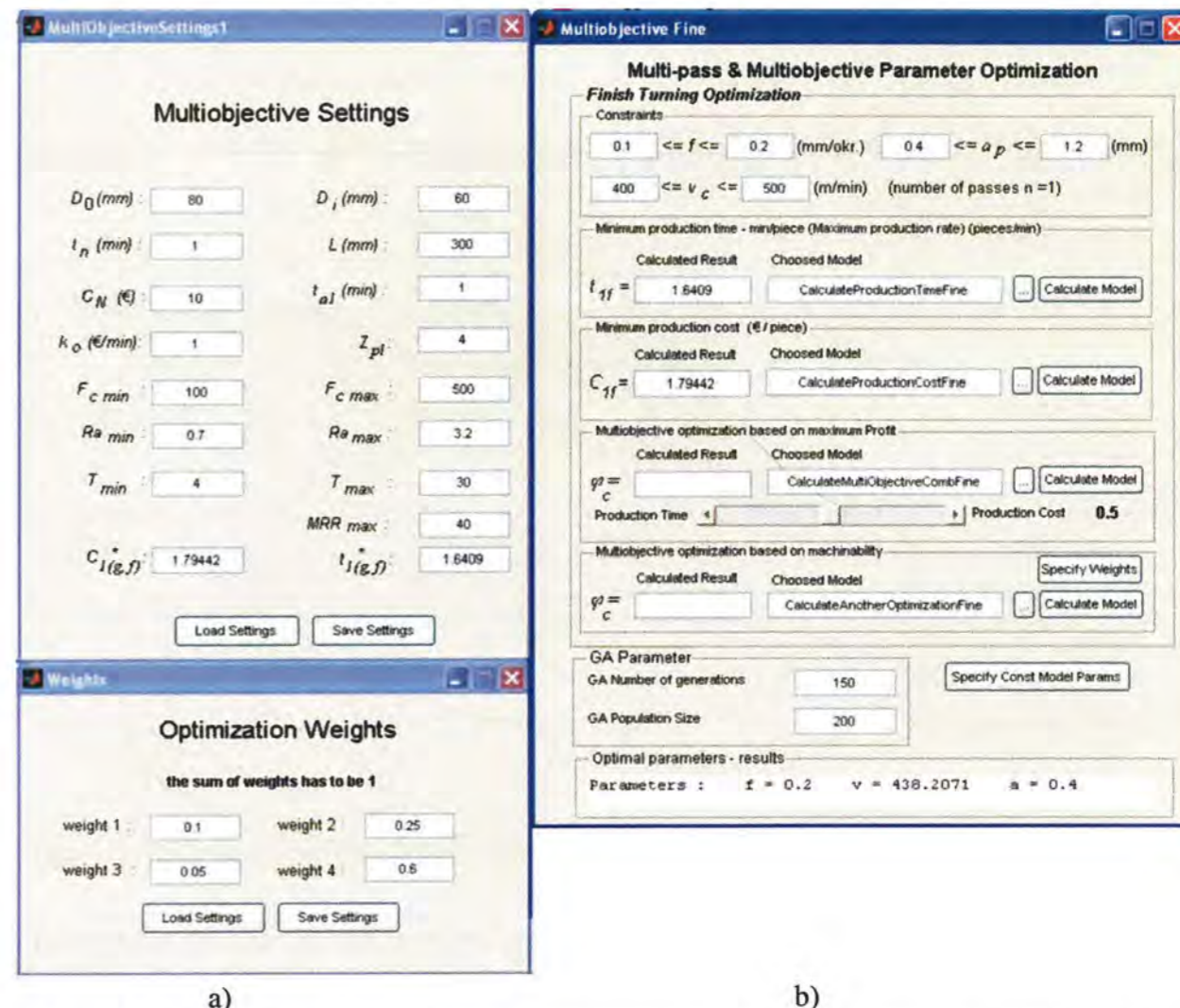
$F_{cf}^* \geq F_{cf}; Ra_f^* \geq Ra_f; MRR_f^* \leq MRR_f; T_f^* \leq T_f$ .

Izlazna je vrijednost ove optimizacije funkcija cilja  $\varphi_c$  i parametri  $(v_{cf}, f_f, a_{pf}) =$  za sve prolaze.

### 7.4.3. Rezultati tehno-ekonomske optimizacije

Način funkcioniranja razvijenog programa *ModOpT* temeljenog na evolucijskim algoritmima kao i dobiveni optimalni rezultati parametara obrade za primjer uzdužnog tokarenja, grubo i fino, predstavljeni su za konkretni primjer. Šipku promjera  $D_0 = 80$  mm i duljine radnog hoda alata  $L = 300$  mm potrebno je obraditi na promjer  $D_i = 60$  mm u više prolaza grube i jedan fine obrade. Proces optimiranja svodi se na pronalaženje optimalnih vrijednosti parametara imajući u vidu ulazne podatke procesa (slike 7.7. i 7.8.) kao i ograničavajuće vrijednosti izlaznih parametara ( $F_{cf,g}, Ra_{f,g}, T_{f,g}, MRR_{f,g}$ ), prezentiranih u obliku funkcija ograničenja (polinomske i/ili eksponencijalne) dobivenih postupkom modeliranja (poglavlje 6.). Donje i gornje granice vrijednosti izlaznih parametara postavljene su ovisno o području koje se želi optimirati.

Svi optimalni parametri dobiveni su za iste vrijednosti evolucijskih parametara i to: generacija  $G = 150$ , populacija  $M = 200$ , vjerojatnosti križanja  $p_c = 0,75$  (u dvije točke) i mutacije  $p_m = 0,01$  i turnirska selekcija  $S = 7$ .

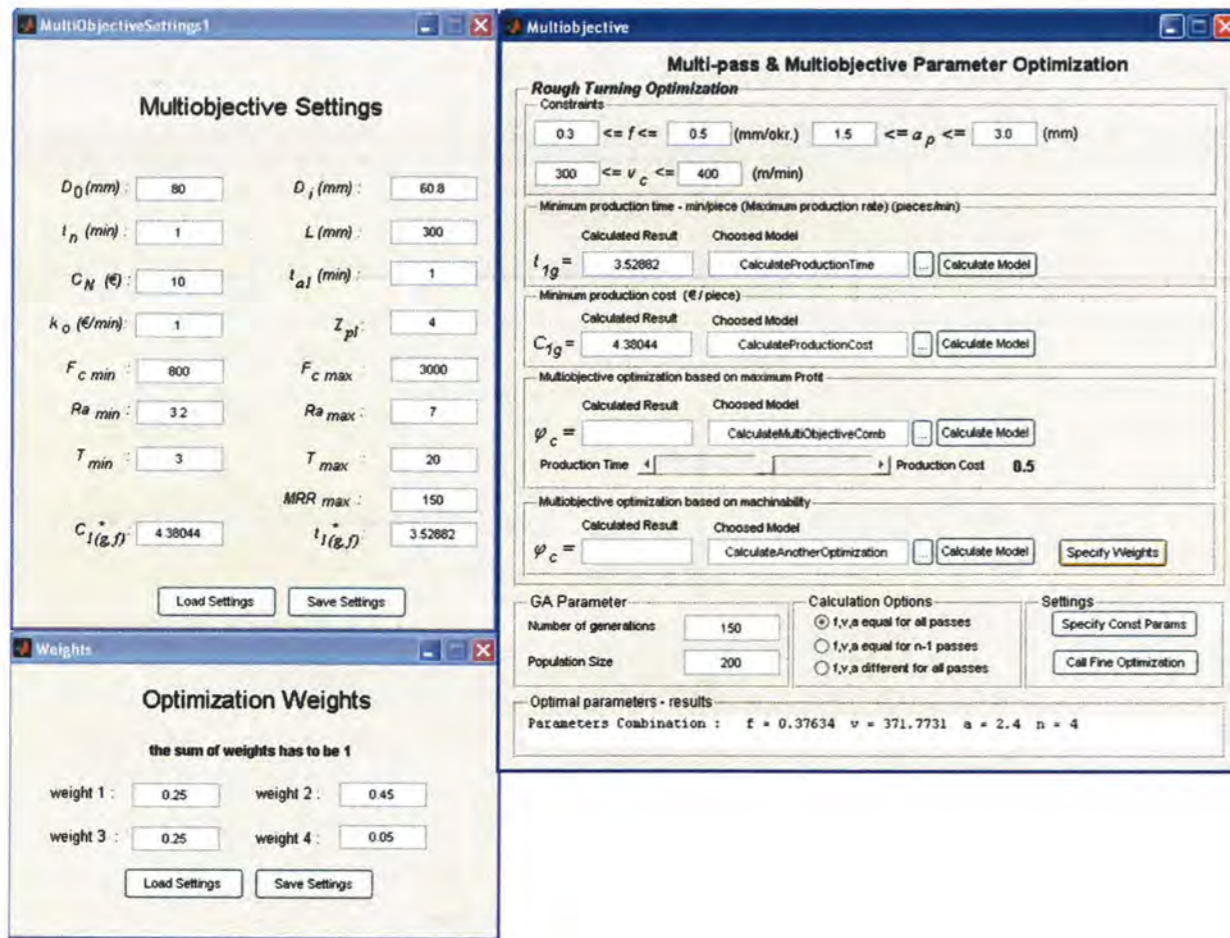


Slika 7.7. ModOpT – fina obrada: a) ulazni parametri optimizacije, b) višekriterijski modul



Polazište za izbor težinskih koeficijenata ( $w_1, w_2, w_3, w_4$ ) (engl. *weights*) temelji se na iznešenoj klasifikaciji danoj u poglavlju 7.4.2.2. Prema toj klasifikaciji vrijednosti težinskih koeficijenata dani su na slikama 7.7. (fina obrada) i 7.8. (gruba obrada), odnosno za finu obradu ima sljedeće vrijednosti:  $w_1(F_{cf}) = 0,1$ ;  $w_2(T_f) = 0,25$ ;  $w_3(MRR_f) = 0,05$  i  $w_4(Ra_f) = 0,6$ ; dok za grubu obradu vrijednosti su:  $w_1(F_{cg}) = 0,25$ ;  $w_2(T_g) = 0,45$ ;  $w_3(MRR_g) = 0,25$  i  $w_4(Ra_g) = 0,05$ . Temeljem navedenog razvidna je važnost (najveća) hrapavosti obrađene površine pri finoj obradi ( $w_4 = 0,6$ ), odnosno pri gruboj obradi postojanosti alata ( $w_2 = 0,45$ ).

Funkcije cilja kao i sam postupak optimiranja parametara podijeljeni su na dva glavna dijela: optimizaciju fine i optimizaciju grube obrade uzdužnog tokarenja. Proces polazi od postavke optimizacije fine obrade u jednom prolazu, tj. dobiveni podatak za optimalnu dubinu rezanja predstavlja krajnju točku promjera u procesu grube obrade, odnosno dubine rezanja po prolazu grube obrade moraju zadovoljiti uvjet oblikovan u izrazu (7.20).



a)

b)

Slika 7.8. ModOpT – gruba obrada: a) ulazni parametri optimizacije, b) višekriterijski modul

Funkcije cilja podijeljene su prema potrebama za optimiranjem na funkcije minimalnih vremena, funkcije minimalnih troškova izrade, a one još na dvije varijante za grubu obradu i jednu za finu obradu, kako je to prikazano u poglavlju 7.4.1. Za dvokriterijsku i

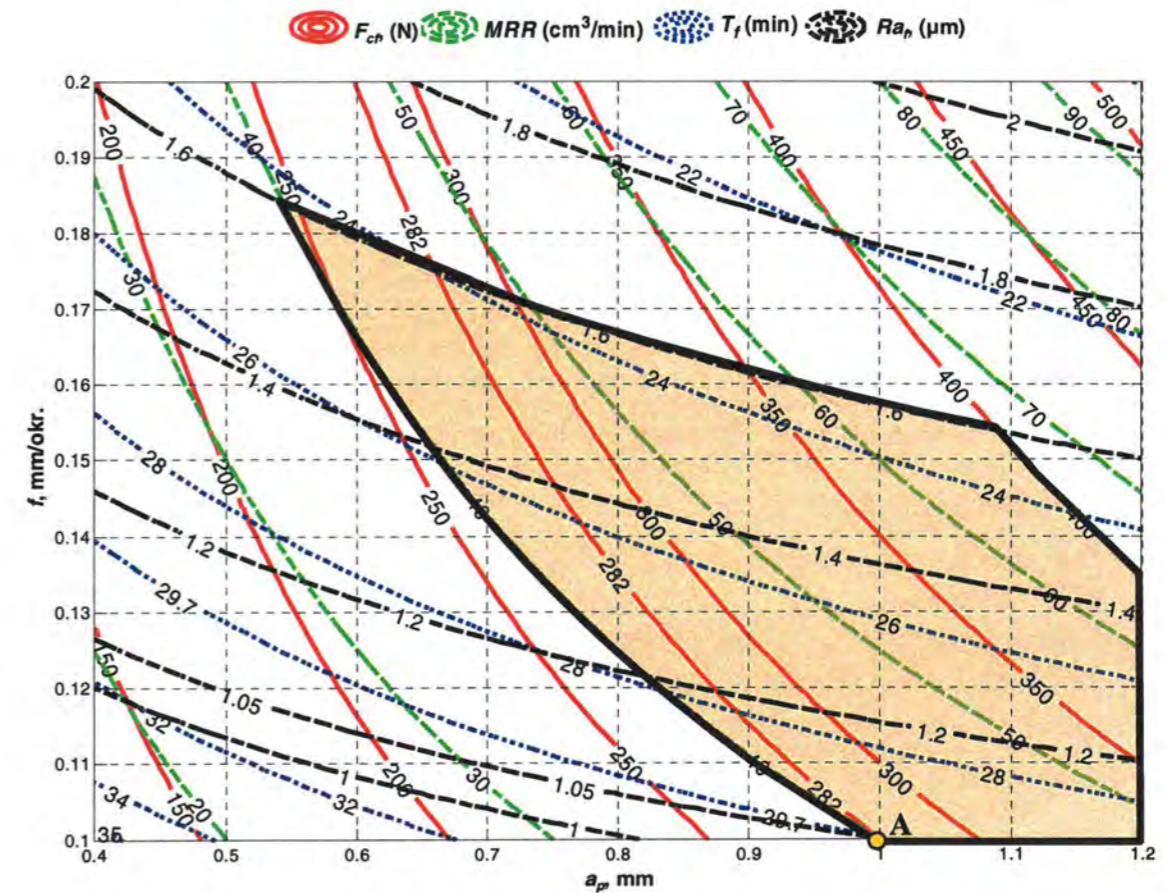
višekriterijsku optimizaciju korišteni su izrazi definirani u poglavlju 7.4.2., a i za njih vrijedi podjela na dvije varijante u gruboj obradi.

Tablica 7.8. Optimalni parametri – rezultati za finu obradu tokarenjem

Funkcije cilja	Optimalni ulazni parametri			Rezultati izlaznih parametara
	$v_{cf}$ m/min	$f_f$ mm/okr.	$a_{pf}$ mm	
$t_{1f}$ , min/kom.	500	0,2	0,4	1,640
$C_{1f}$ , kn/kom.	438,207	0,2	0,4	13,099
$\varphi_c$ - dvokriterijska	478,372	0,2	0,4	1,007 (za $w = 0,5$ )
	455,982	0,2	0,4	1,005 (za $w = 0,75$ )
$\varphi_c$ - višekriterijska	400	0,1	1,0	0,0428

Na slici 7.9. grafički je predstavljena optimalna vrijednost (točka A) višekriterijske funkcije (kriterij obradivosti) za finu obradu dobivenu temeljem procesnih ograničenja oblika:

$$F_{cf} \leq 400 \text{ N}, \quad MRR_f \geq 40 \text{ cm}^3/\text{min}, \quad T_f \geq 20 \text{ min}, \quad Ra_f \leq 1,6 \mu\text{m}.$$



Slika 7.9. Plošni grafovi za optimalnu vrijednost parametara fine obrade pri  $v_{cf} = 400$  m/min



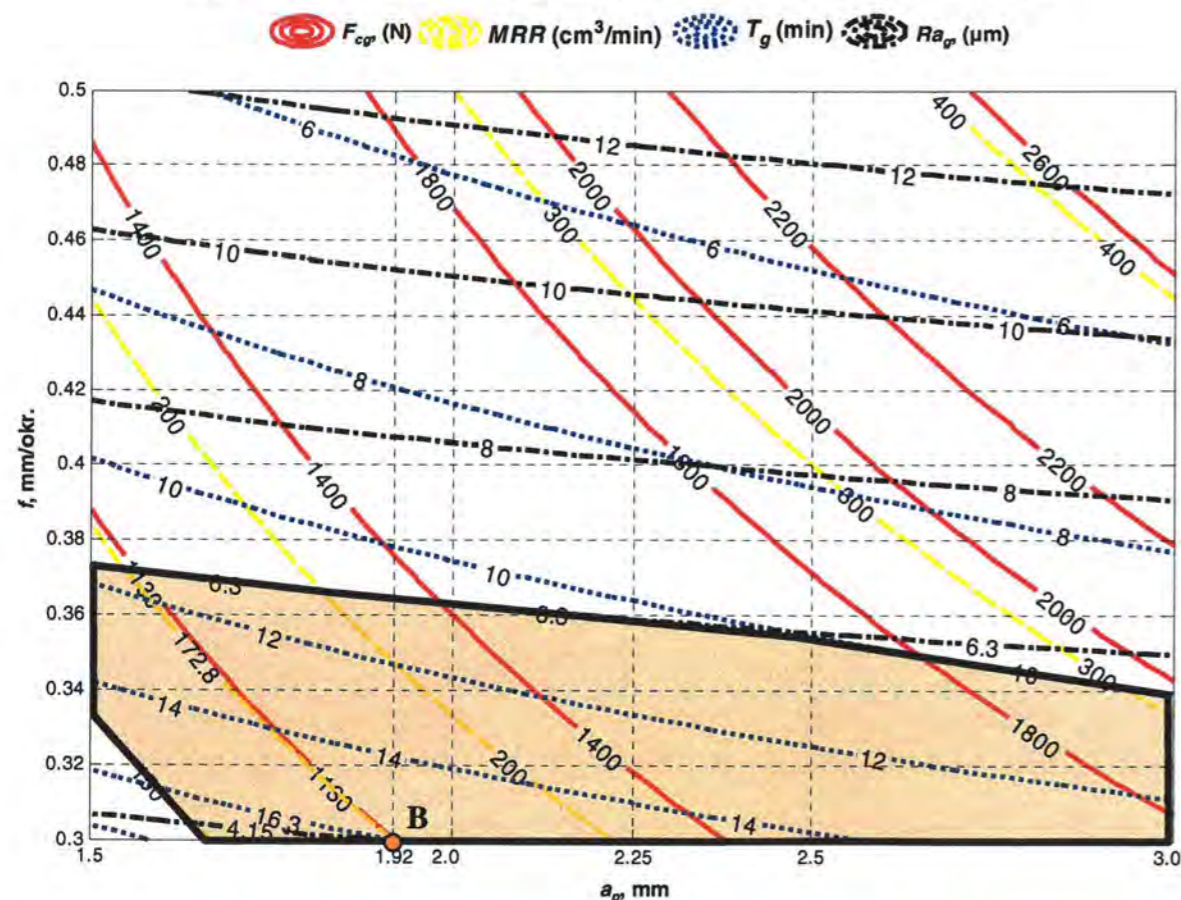
Rezultati procesa optimizacije parametara obrade dobiveni za navedeni oblik izratka prezentirani su u tablicama 7.8., 7.9. i 7.10. prema kategoriji obrade i varijantama grube obrade.

Tablica 7.9. Optimalni parametri – rezultati za grubu obradu tokarenjem, varijanta – 1

Funkcije cilja	Optimalni ulazni parametri				Rezultati izlaznih parametara
	$v_{cg}$ m/min	$f_g$ mm/okr.	$a_{pg}$ mm	$i$ br. prolaza	
$t_{1g}$ , min/kom.	371,773	0,376	2,4	4	3,528
$C_{1g}$ , kn/kom.	300	0,374	2,4	4	31,977
$\varphi_c$ - dvokriterijska	314,832	0,375	2,4	4	1,022 (za $w = 0,5$ )
	339,123	0,375	2,4	4	1,020 (za $w = 0,25$ )
$\varphi_c$ - višekriterijska	300	0,3	1,92	5	-4,233

Na slici 7.10. grafički je predstavljena optimalna vrijednost (točka B) višekriterijske funkcije (kriterij obradivosti) za grubu obradu dobivenu temeljem procesnih ograničenja:

$$F_{cg} \leq 2000 \text{ N}, \quad MRR_g \geq 150 \text{ cm}^3/\text{min}, \quad T_g \geq 10 \text{ min}, \quad Ra_r \leq 6,3 \text{ } \mu\text{m}.$$



Slika 7.10. Plošni grafovi za optimalnu vrijednost parametara grube obrade, varijanta – 1

Tablica 7.10. Optimalni parametri – rezultati za grubu obradu tokarenjem, varijanta – 2

Funkcije cilja		Optimalni ulazni parametri				Rezultati izlaznih parametara
		$v_{cg}$ m/min	$f_g$ mm/okr.	$a_{pg}$ mm	$i$ br. prolaza	
$t_{1g}$ , min/kom.	(i-1) prolaz	385,186	0,394	1,5	5	4,522
	zadnji prolaz	376,416	0,381	2,1	1	
$C_{1g}$ , kn/kom.	(i-1) prolaz	300	0,392	1,5	5	41,636
	zadnji prolaz	300	0,361	2,1	1	
$\varphi_c$ - dvokriterijska	(i-1) prolaz	326,478	0,392	1,5	5	1,025 (za $w = 0,5$ )
	zadnji prolaz	318,678	0,380	2,1	1	
	(i-1) prolaz	350,846	0,393	1,5	5	1,039 (za $w = 0,25$ )
	zadnji prolaz	383,238	0,3	2,1	1	
$\varphi_c$ - višekriterijska	(i-1) prolaz	300	0,3	2,444	3	-3,187
	zadnji prolaz	300	0,3056	2,267	1	

Vrijednosti dvokriterijske funkcije cilja ovdje je bezjedinčna i predstavlja odnos vrijednosti kriterija minimalnog vremena izrade i minimalnih troškova prema izrazima (7.16, 7.17 i 7.18) za odgovarajuće vrijednosti težinskog koeficijenta ( $w$ ). Za vrijednost profita izraženog u novčanoj jedinici potreban je podatak o jediničnom prihodu prema izrazu (3.87).

Također, ovisno o vrijednosti jediničnog prihoda (koji ne ovisi o parametrima obrade) vrijednost profita se mijenja, a time se mijenjaju i optimalne vrijednosti parametara obrade [100]. Ako za vrijednost jediničnog prihoda usvojimo  $U_1 = 14$  kn/kom za finu, odnosno  $U_1 = 50$  kn/kom za grubu obradu, onda vrijednost profita može se temeljem tablica 7.8, 7.9 i 7.10 predstaviti u obliku:

- fina obrada
  - za  $v_{cf} = 455,982$  m/min,  $f_f = 0,2$  mm/okr. i  $a_{pf} = 0,4$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 0,526$  kn/min.
  - za  $v_{cf} = 478,372$  m/min,  $f_f = 0,2$  mm/okr. i  $a_{pf} = 0,4$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 0,48$  kn/min.
- gruba obrada, varijanta – 1
  - za  $v_{cg} = 314,832$  m/min,  $f_g = 0,375$  mm/okr. i  $a_{pg} = 2,4$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 4,836$  kn/min.
  - za  $v_{cg} = 339,123$  m/min,  $f_g = 0,375$  mm/okr. i  $a_{pg} = 2,4$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 4,614$  kn/min.
- gruba obrada, varijanta – 2
  - za  $v_{cg} = 326,478$  m/min,  $f_g = 0,392$  mm/okr. i  $a_{pg} = 1,5$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 1,643$  kn/min.
  - za  $v_{cg} = 350,846$  m/min,  $f_g = 0,393$  mm/okr. i  $a_{pg} = 1,5$  mm, a vrijednost profita iznosi  $P_r = 1,146$  kn/min.



## 8. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

U cilju kvalitetne analize i usporedbe dobivenih matematičkih modela obradivosti materijala definiranih kroz izlazne veličine procesa ( $F_{c(f,g)}$ ,  $Ra_{f,g}$ ,  $T_{f,g}$ ), kao i verifikacije optimalnih vrijednosti parametara obrade ( $v_{c(f,g)}$ ,  $f_{f,g}$ ,  $a_{p(f,g)}$ ) bilo je potrebno izvesti dodatne eksperimente, tj. postojeći planovi eksperimenata prošireni su s dodatnih 26, odnosno ukupno je proveden 41 eksperiment (Prilog A i B) za svaki tip obrade. Proširenje eksperimentalnih planova ima za glavni cilj, pored navedenih, potvrdu hipoteze: *"Definiranje optimalnih parametara procesa obrade ( $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) rezultat je dobivenih dovoljno pouzdanih modela i njihove simulacije u cilju mogućeg minimiziranja izlaznih tehnno-ekonomskih parametara (jedinični troškovi obrade, jedinično vrijeme obrade), a za postavljene funkcije ograničenja procesa i obradnog sustava u cjelini."*

### 8.1. ANALIZA I USPOREDBA MATEMATIČKIH MODELA PROCESA OBRADE

Kako bi se ispitala pouzdanost dobivenih modela, u 6. poglavlju, uporabom matematičko-statističke metode i evolucijskih algoritama (GA i GP), a temeljenih na eksperimentalnim istraživanjima procesa obrade uzdužnog tokarenja za grubu i finu obradu, izvršena je provjera adekvatnosti matematičkih modela polinomskog i eksponencijalnog oblika kao i verifikacija predloženog pristupa za identifikaciju utjecajnih parametara procesa iz domene obrade odvajanjem čestica.



### 8.1.1. Gruba obrada

Temeljem navedenog izvedeni su dodatni eksperimenti, njih 26 (tablica 8.1.) za sva tri izlazna parametra obrade.

**Tablica 8.1.** Dodatni eksperimenti za verifikaciju dobivenih modela za grubu obradu

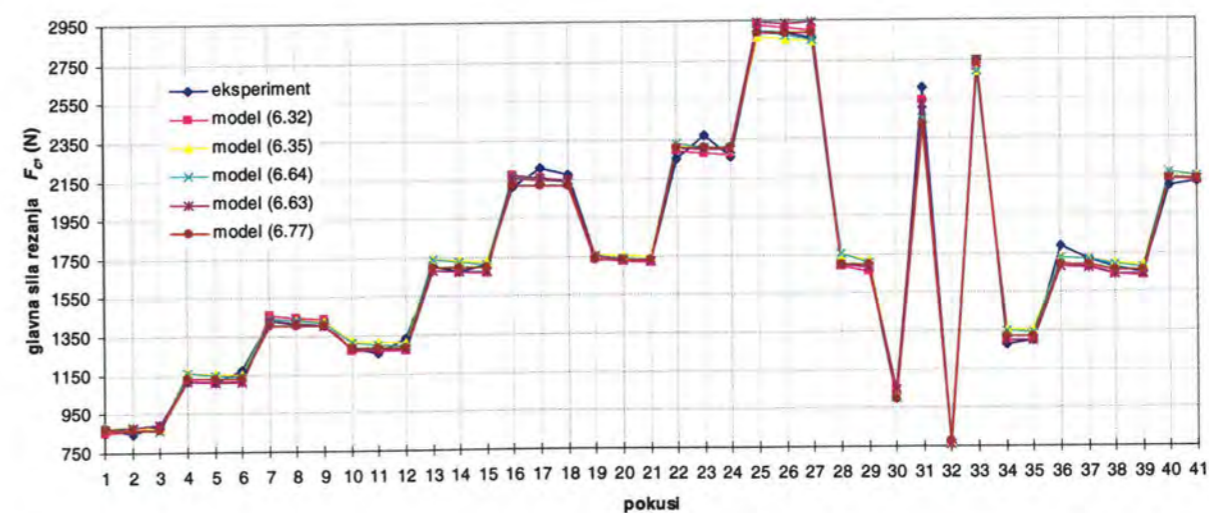
Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	350,0	0,3	1,50	848,586	3,780	9,36
2	300,0	0,4	1,50	1119,517	7,630	11,03
3	350,0	0,4	1,50	1111,016	7,090	6,28
4	400,0	0,4	1,50	1177,007	7,140	2,83
5	350,0	0,5	1,50	1415,452	11,570	3,13
6	300,0	0,3	2,25	1289,769	4,080	15,42
7	350,0	0,3	2,25	1260,859	4,070	8,37
8	400,0	0,3	2,25	1333,207	3,840	3,92
9	300,0	0,4	2,25	1706,310	7,760	9,21
10	400,0	0,4	2,25	1711,773	7,950	2,26
11	300,0	0,5	2,25	2113,549	13,000	4,68
12	350,0	0,5	2,25	2210,386	14,620	2,37
13	400,0	0,5	2,25	2177,104	14,260	1,42
14	350,0	0,3	3,00	1745,217	4,730	7,02
15	300,0	0,4	3,00	2248,647	8,200	7,92
16	350,0	0,4	3,00	2370,946	8,130	4,17
17	400,0	0,4	3,00	2260,277	9,090	2,06
18	350,0	0,5	3,00	2886,451	14,250	2,02
19	325,0	0,35	2,00	1279,093	5,980	9,26
20	375,0	0,35	2,00	1303,333	5,690	4,87
21	325,0	0,45	2,00	1787,773	9,560	5,56
22	375,0	0,45	2,00	1722,324	10,090	2,74
23	325,0	0,35	2,50	1676,456	6,020	8,54
24	375,0	0,35	2,50	1648,966	6,220	4,37
25	325,0	0,45	2,50	2097,975	10,860	4,69
26	375,0	0,45	2,50	2119,506	11,300	2,31

Usporedbom dobivenih modela (15 različitih modela), temeljenih na manjem eksperimentu (tablica 5.5.) i njihovom provjerom na znatno većem, pokazan je visoki stupanj adekvatnosti i pouzdanosti predloženog pristupa unutar eksperimentalne domene za grubu obradu. Rezultati dobivenih odstupanja pokazali su visok stupanj točnosti polinomskih modela, poglavito onih dobivenih GA metodom (tablica 8.2.) za sva tri izlazna parametra procesa obrade. Modeli dobiveni za grubu obradu tokarenjem potvrdili su svoju učinkovitost i kod dodatnog plana eksperimenta što potvrđuje relativno odstupanje (pogreška) koje se prostire unutar područja

od 1,503% za glavnu silu rezanja kod GA pristupa, do 14,124% za postojanost alata definiranog eksponencijalnim modelom pomoću GA algoritma. Na slici 8.1. prikazan je dijagram odstupanja pet različitih modela glavne sile rezanja za svih 41 eksperiment detaljno prikazanih u *Prilogu A*.

**Tablica 8.2.** Odstupanja dobivenih modela od svih eksperimentalnih vrijednosti – grubu obradu

DOBIVENI MODELI		GRUBA OBRADA (%)		
		$F_c$	$Ra$	$T$
polinomski	$F_c$ (6.32)	1,755		
	$Ra$ (6.37)		5,277	
	$T$ (6.40)			5,928
eksponen.	$F_c$ (6.35)	2,223		
	$Ra$ (6.38)		4,222	
	$T$ (6.41)			12,513
GA polinomski	$F_c$ (6.63)	1,503		
	$Ra$ (6.65)		3,18	
	$T$ (6.67)			5,145
GA eksponen.	$F_c$ (6.64)	1,987		
	$Ra$ (6.66)		3,599	
	$T$ (6.68)			14,124
GP	$F_c$ (6.77)	1,675		
	$Ra$ (6.78)		3,463	
	$T$ (6.79)			8,595



**Slika 8.1.** Dijagram odstupanja modela za silu od eksperimentalnih rezultata – grubu obradu



### 8.1.2. Fina obrada

Također, i za finu obradu izvedeni su dodatni eksperimenti prezentirani u tablici 8.3.

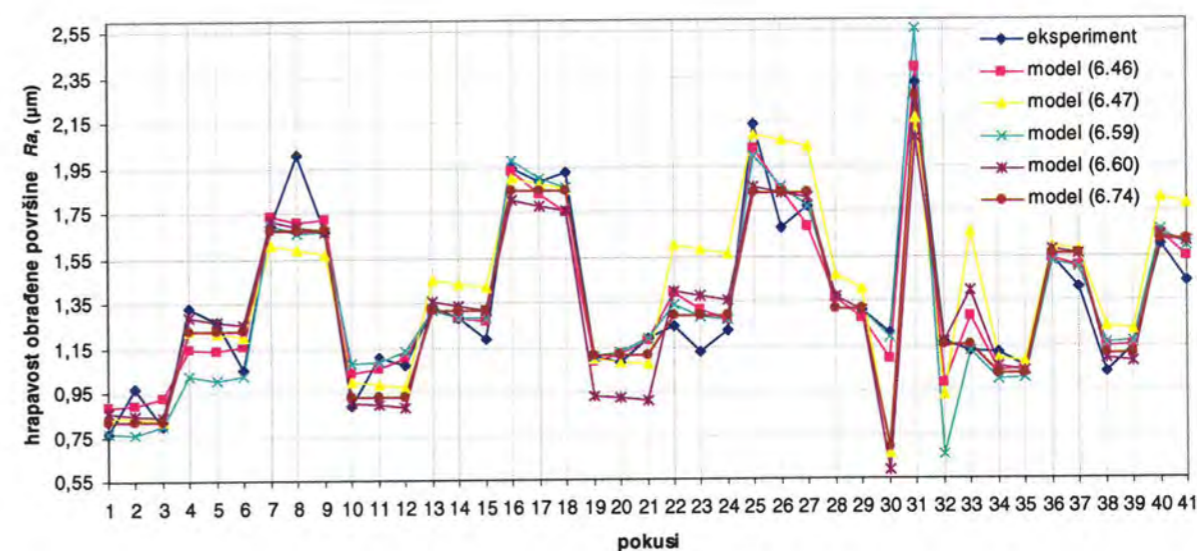
Tablica 8.3. Dodatni eksperimenti za verifikaciju dobivenih modela za finu obradu

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	450,0	0,1	0,4	137,792	0,970	18,35
2	400,0	0,15	0,4	167,630	1,330	28,05
3	450,0	0,15	0,4	171,110	1,270	15,16
4	500,0	0,15	0,4	166,920	1,050	8,26
5	450,0	0,2	0,4	196,137	2,010	12,26
6	400,0	0,1	0,8	222,195	0,890	30,74
7	450,0	0,1	0,8	229,973	1,110	17,38
8	500,0	0,1	0,8	247,127	1,070	10,26
9	400,0	0,15	0,8	305,987	1,330	26,22
10	500,0	0,15	0,8	300,215	1,190	8,34
11	400,0	0,2	0,8	372,675	1,950	21,79
12	450,0	0,2	0,8	375,776	1,890	12,29
13	500,0	0,2	0,8	377,833	1,930	7,03
14	450,0	0,1	1,2	336,218	1,080	15,18
15	400,0	0,15	1,2	435,620	1,240	24,1
16	450,0	0,15	1,2	431,962	1,130	12,13
17	500,0	0,15	1,2	431,280	1,220	7,12
18	450,0	0,2	1,2	520,538	1,680	9,54
19	425,0	0,12	0,6	186,192	1,120	21,56
20	475,0	0,12	0,6	187,965	1,060	12,79
21	425,0	0,18	0,6	253,966	1,550	17,9
22	475,0	0,18	0,6	256,644	1,410	10,2
23	425,0	0,12	1	306,973	1,030	21,56
24	475,0	0,12	1	302,810	1,150	11,23
25	425,0	0,18	1	389,992	1,600	17,32
26	475,0	0,18	1	389,515	1,440	8,52

Modeli dobiveni za finu obradu tokarenjem potvrdili su svoju učinkovitost i kod dodatnog plana eksperimenta što potvrđuje relativno odstupanje koje se prostire unutar granica od 2,836% za glavnu silu rezanja dobivenu pomoću eksponencijalnog modela GA metodom, pa do 12,89% za hrapavost obrađene površine definiranu pomoću eksponencijalnog modela (tablica 8.4.). Na slici 8.2. prikazan je dijagram odstupanja svih dobivenih modela za hrapavost obrađene površine temeljenih na cjelovitom eksperimentu, Prilog B, iz kojih se može vidjeti adekvatnost dobivenih modela koji s visokim stupnjem pouzdanosti mogu predvidjeti trend promjene  $Ra$  ovisno o ulaznim karakteristikama obrade.

Tablica 8.4. Odstupanja dobivenih modela od svih eksperimentalnih vrijednosti – fina obrada

DOBIVENI MODELI		FINA OBRADA (%)		
		$F_c$	$Ra$	$T$
polinomski	$F_c$ (6.43)	3,096		
	$Ra$ (6.46)		6,828	
	$T$ (6.49)			4,301
eksponen.	$F_c$ (6.44)	3,227		
	$Ra$ (6.47)		12,892	
	$T$ (6.50)			6,508
GA polinomski	$F_c$ (6.57)	2,992		
	$Ra$ (6.59)		6,969	
	$T$ (6.61)			5,722
GA eksponen.	$F_c$ (6.58)	2,836		
	$Ra$ (6.60)		9,856	
	$T$ (6.62)			6,383
GP	$F_c$ (6.72)	5,146		
	$Ra$ (6.74)		7,180	
	$T$ (6.76)			8,083



Slika 8.2. Dijagram odstupanja modela za hrapavost od eksperimentalnih rezultata – fina obrada

Kao jedinstveni zaključak za obje se obrade može istaknuti adekvatnost i pouzdanost dobivenih modela, te visoki stupanj predvidivosti izlaznih veličina procesa temeljem



dobivenih modela, a u cilju što sigurnijeg upravljanja kao bitnog parametra stabilnosti procesa obrade. Dobiveni modeli stoga imaju veliku ulogu u stvaranju okruženja potrebnoga kod implementacije inteligentnih obradnih sustava, i ne samo njih, u proizvodni proces.

## 8.2. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA OPTIMALNIH PARAMETARA OBRADNE

Dobiveni modeli pored mogućnosti predviđanja tijeka promjena unutar samog procesa obrade imaju za cilj i definiranje optimalnih vrijednosti parametara obrade temeljem nekog od kriterija koji definira tehnolog imajući pri tome u vidu ograničenja procesa i stroja.

Optimalne vrijednosti parametara obrade ( $v_c$ ,  $f$  i  $a_p$ ) dobivene su korištenjem dviju različitih metoda i to:

- Taguchijeve metode i
- primjene GA kroz programski modul *ModOpt*.

Kako planiranje eksperimenata predstavlja ključni korak u Taguchijevu pristupu, odlučeno je da se izvedu dva plana eksperimenata oblika  $L_8(2^7)$  i  $L_9(3^4)$ , a cilj je dobiti optimalne vrijednosti parametara obrade za grubo i fino tokarenje, kao i analizirati utjecaje pojedinih parametara obrade te moguće utjecaje interakcija na glavne izlazne vrijednosti procesa, odnosno glavnu silu rezanja, hrapavost obrađene površine i postojanost alata. Pomoću GA modula dobivene su optimalne vrijednosti parametara obrade. Svi dobiveni rezultati provjereni su dodatnim eksperimentima u cilju verifikacije optimalnih vrijednosti.

### 8.2.1. Gruba obrada

U tablici 8.5. prikazane su optimalne vrijednosti parametara za grubu obradu.

Tablica 8.5. Vrijednosti optimalnih parametara za grubu obradu ovisno o vrsti metode i modela

Metode	Modeli	Parametri			Optimalna vrijednost	Eksperiment potvrde	
		$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)			
GA modul	eksp. modeli	$F_c$ (N)	400	0,3	1,5	876,581	894,327
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	400	0,3	1,5	3,9113	3,88
		$T$ (min)	300	0,3	1,5	18,4924	17,60
	polinom. modeli	$F_c$ (N)	300	0,3	1,5	857,202	879,224
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	400	0,3	1,5	3,9164	3,88
		$T$ (min)	300	0,3	1,5	17,0583	17,60
Taguchijeva metoda	$L_8(2^7)$	$F_c$ (N)	400	0,3	1,5	875,084	894,327
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	400	0,3	1,5	3,912	3,88
		$T$ (min)	300	0,3	1,5	18,495	17,60
	$L_9(3^4)$	$F_c$ (N)	350	0,3	1,5	858,519	848,586
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	350	0,3	1,5	3,826	3,78
		$T$ (min)	300	0,3	1,5	17,561	17,60

### 8.2.2. Fina obrada

U tablici 8.6. prikazane su optimalne vrijednosti parametara za finu obradu.

Tablica 8.6. Vrijednosti optimalnih parametara za finu obradu ovisno o vrsti metode i modela

Metode	Modeli	Parametri			Optimalna vrijednost	Eksperiment potvrde	
		$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)			
GA modul	eksp. modeli	$F_c$ (N)	400	0,1	0,4	128,0672	128,893
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	500	0,1	0,4	0,82249	0,80
		$T$ (min)	400	0,1	0,4	35,4659	32,66
	polinom. modeli	$F_c$ (N)	465,5273	0,1	0,4	122,5654	130,525
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	408,9286	0,1	0,4	0,88655	0,78
		$T$ (min)	400	0,1	0,4	31,3975	32,66
Taguchijeva metoda	$L_8(2^7)$	$F_c$ (N)	400	0,1	0,4	128,1	128,893
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	500	0,1	0,4	0,822	0,80
		$T$ (min)	400	0,1	0,4	35,331	32,66
	$L_9(3^4)$	$F_c$ (N)	400	0,1	0,4	126,576	128,893
		$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	400	0,1	0,4	0,862	0,77
		$T$ (min)	400	0,1	0,4	33,125	32,66

Optimalni parametri za finu i grubu obradu ovisno o metodi, Taguchijevoj ili GA, kao i vrsti modela ili plana eksperimenta pokazuju mala odstupanja izračunatih vrijednosti od vrijednosti dobivenih ponovljenim eksperimentom, čime je izvršena verifikacija optimalnih vrijednosti parametara procesa obrade za razinu pouzdanosti od 90%.

Također, utjecaji pojedinih parametara kao i njihovih interakcija na izlazne veličine procesa obrade dani su u tablici 8.7. Iz tablice 8.7. razvidan je utjecaj svakog od parametara obrade, pa je tako brzina rezanja nesigifikantna za silu rezanja i hrapavost obrađene površine, ali ima velik utjecaj na postojanost alata.

Tablica 8.7. Utjecaji pojedinih parametara obrade

Parametri	Gruba obrada (%)			Fina obrada (%)		
	$F_c$	$Ra$	$T$	$F_c$	$Ra$	$T$
$v_c$	-	-	56	-	-	88,5
$f$	33	97	39	18	81	8
$a_p$	66,5	1,5	4,5	81,5	13,5	2,5
interakcije	0,5	1,5	0,5	0,5	5,5	1

Isto tako, posmak ima velik utjecaj na hrapavost površine i znatno manji na silu rezanja i postojanost alata, dok dubina rezanja bitno utječe na silu rezanja, ali vrlo malo na hrapavost površine i postojanost alata.



### 8.3. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA TEHNO-EKONOMSKE OPTIMIZACIJE

Rezultati tehno-ekonomske optimizacije za grubu (u više prolaza) i finu obradu uzdužnim tokarenjem dobiveni u 7.4.3. poglavlju imali su za cilj definiranje optimalnih parametara obrade temeljem kriterija:

- minimalnog jediničnog vremena obrade, prema izrazu (7.13),
- minimalnog jediničnog troška obrade, prema izrazu (7.14) i
- maksimalnog profita, prema izrazu (3.87).

Optimalne vrijednost parametara obrade uzdužnim tokarenjem temeljem kriterija minimalnog jediničnog vremena i troška obrade dane su u tablicama 8.8. i 8.9.

**Tablica 8.8.** Optimalne vrijednosti parametara obrade – minimalno jedinično vrijeme  $t_{1\min}$

Kategorija obrade	$v_{c(f,g)}$ m/min	$f_{f,g}$ mm/okr.	$a_{p(f,g)}$ mm	$i$ br. prolaza	$F_{c(f,g)}$ (N)	$Ra_{f,g}$ ( $\mu\text{m}$ )	$T_{f,g}$ (min)	$MRR_{f,g}$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	Jedinično vrijeme min/kom.
fina	500	0,2	0,4	1	204,81	1,56	7,49	40,00	<b>1,640</b>
gruba-var1	371,773	0,376	2,4	4	1740,81	7,00	3,45	335,79	<b>3,528</b>
gruba-var2	385,186	0,394	1,5	5	1138,26	7,00	3,41	227,64	4,522
	376,416	0,381	2,1	1	1541,72	7,00	3,41	301,17	
Optimalno rješenje – minimalno jedinično vrijeme $t_{1\min}$									<b>5,168</b>

**Tablica 8.9.** Optimalne vrijednosti parametara obrade – minimalni jedinični trošak  $C_{1\min}$

Kategorija obrade	$v_{c(f,g)}$ m/min	$f_{f,g}$ mm/okr.	$a_{p(f,g)}$ mm	$i$ br. prolaza	$F_{c(f,g)}$ (N)	$Ra_{f,g}$ ( $\mu\text{m}$ )	$T_{f,g}$ (min)	$MRR_{f,g}$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	Jedinični trošak kn/kom.
fina	438,207	0,2	0,4	1	201,64	1,59	15,13	35,05	<b>13,099</b>
gruba-var1	300	0,374	2,4	4	1744,34	7,00	9,08	269,91	<b>31,977</b>
gruba-var2	300	0,392	1,5	5	1140,35	7,00	10,53	176,40	41,636
	300	0,361	2,1	1	1473,27	6,28	10,53	227,43	
Optimalno rješenje – minimalni jedinični trošak $C_{1\min}$									<b>45,076</b>

Iz tablica je razvidno optimalno rješenje parametara obrade glede minimalnog jediničnog vremena i troška obrade. Kombinacija jednog prolaza fine obrade i četiri prolaza grube obrade varijanta-1 (jednake dubine, posmaka i brzine rezanja kroz sve prolaze) daje ukupno minimalno (optimalno) jedinično vrijeme i trošak obrade, bolji nego kombinacija fine i grube obrade varijanta-2 (veći broj prolaza). Dobivena hrapavost obrađene površine ( $Ra_f$ ) po oba kriterija je unutar klase N7.

## 9. ZAKLJUČAK

Modernu proizvodnju nemoguće je zamisliti bez stalne težnje za poboljšanjem produktivnosti, fleksibilnosti, kvalitete i smanjenja troškova proizvodnje u uvjetima globalne konkurentnosti. Inteligentni proizvodni sustavi (IMS) su sustavi koji mogu odgovoriti i na sve druge izazove i zahtjeve koje pred njih postavljaju moderna proizvodnja i suvremeno tržište. Uvođenje umjetne inteligencije u planiranje i upravljanje procesima i sustavima, bez izravne intervencije čovjeka, s ciljem postignuća optimalnih tehno-ekonomskih rezultata, našlo je konkretnu primjenu u različitim postupcima proizvodnje: obrada odvajanjem čestica, obrada deformiranjem, injekcijsko prešanje, lijevanje, brza izrada proizvoda, itd.

Stalna i neiscrpna težnja da se procesi obrade unaprijede primjenom znanja naprednih tehnika modeliranja i simulacije, a u novije vrijeme i umjetne inteligencije, sve se više ostvaruje u suvremenoj proizvodnji. Na tragu tih težnji izveden je i ovaj rad s ciljem analize obradnog procesa zbog definiranja pouzdanih modela za izbor optimalnih parametara obrade, što je iskazano postavljenom hipotezom: "Optimizacija procesa temelji se na hipotezi da je proces obrade u cjelini vođen optimalno ako su definirani optimalni parametri svih faza obrade." Prema tome, definirani optimalni parametri obrade ( $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) rezultat su dobivenih, dovoljno pouzdanih modela i njihove simulacije koja je izvedena u cilju minimalizacije izlaznih tehno-ekonomskih parametara procesa prema kriterijima jediničnih troškova i jediničnog vremena obrade, što je bio uvjet za postavljanje hipoteze. U tijeku rada istraživački je zadatak proširen kroz primjenu višekriterijskih funkcija cilja temeljenih na obradivosti



materijala i jediničnome profitu, a za postavljene funkcije ograničenja procesa i obradnog sustava u cjelini.

Za ostvarenje postavljenih ciljeva definirana je metodologija i primijenjene su sljedeće znanstvene metode:

- ✦ eksperimentalne metode,
- ✦ metode matematičkog planiranja eksperimenata,
- ✦ matematičko-statističke metode,
- ✦ Taguchijeva metoda,
- ✦ evolucijsko-optimizacijske metode i
- ✦ evolucijske metode modeliranja.

Primijenjena metodologija istraživanja i obrade rezultata potpuno pokriva složeni proces modeliranja i optimizacije postupka uzdužnog tokarenja za finu i grubu obradu s više prolaza. Eksperimentalno je istraživanje izvedeno s ciljem identifikacije parametara obrade, njihova pojedinačnog i interakcijskog utjecaja na izlazne parametre procesa:

- ✦ silu rezanja  $F_c$ ,
- ✦ hrapavost obrađene površine  $Ra$  i
- ✦ postojanost alata  $T$  za definirano istrošenje stražnje površine alata  $VB$ .

Postignuti se ciljevi najbolje mogu sagledati ako se prezentirana metodologija prikaže kroz segmente istraživanja, kako je to napravljeno i u programskom rješenju *ModOpT* za modeliranje i optimizaciju procesa obrade uzdužnog tokarenja.

1. Temeljem teorijskih spoznaja i analiza procesa planirano je i izvedeno eksperimentalno istraživanje postupka fine i grube obrade uzdužnog tokarenja uporabom različitih planova eksperimenata uz primjenu:

- ✦ eksperimentalno-statističke metode s ciljem prikupljanja dovoljnog broja eksperimentalnih podataka uporabom centralnoga kompozicijskog plana za 5 razina parametara i 20 eksperimenata,
- ✦ ortogonalnih nizova i to  $L_8(2^7)$  za dvije odnosno  $L_9(3^4)$  za tri razine plana eksperimenata.

Dobiveni eksperimentalni podaci temeljeni su na aktivnim eksperimentalnim planovima, te su omogućili adekvatnu primjenu metoda modeliranja i optimizacije.

2. Postupak modeliranja izveden je primjenom:

- ✦ matematičko-statističke metode, kojom su dobiveni originalni modeli procesa obrade uzdužnog tokarenja za sve tri procesuirane izlazne veličine procesa i
- ✦ evolucijskih algoritama, odnosno metodama genetskog algoritma i genetskog programiranja.

Dobiveni matematički modeli (njih ukupno 32) eksponencijalnog su i polinomskog oblika te predstavljaju sliku složenih odnosa između ulaznih varijabli i izlaznih parametara procesa uzdužnog tokarenja koji se mogu s dovoljnom točnošću primijeniti u adaptivnom

vođenju i nadzoru procesa te donošenju rješenja u realnom vremenu što je od velike važnosti za učinkovitu eksploataciju IMS.

Modeliranje procesa obrade izvedeno je matematičko-statističkom metodom i primjenom evolucijskih algoritama uz uporabu za to definirana i programirana cjelovitog rješenja utemeljenog na GA i GP strukturi po principu modula. Rezultati dobiveni na temelju definiranih modela mogu se sažeti kako slijedi:

- ✦ visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti modela izražen je preko koeficijenta determinacije od  $R^2 = 0,95$  do  $R^2 = 0,99$  kako za polinomske tako i za eksponencijalne modele (ukupno 12) uključujući finu i grubu obradu;
- ✦ usporedba rezultata dobivenih modelima s eksperimentalnim rezultatima pokazuje razliku u granicama od 1,5% do 10%, osim kod 3 modela od njih 32, gdje je odstupanje od 12,89% do 14,12%;
- ✦ adekvatnost i pouzdanost originalno dobivenih modela za  $F_c$ ,  $Ra$  i  $T$  potvrđena je dodatno izvedenim eksperimentima (ukupno 26) koji su verificirali izvedeno modeliranje procesa u široj eksperimentalnoj domeni;
- ✦ najbolje rezultate dobivene usporedbom primijenjenih metoda modeliranja osigurava GA postupak temeljen na prethodno definiranim polaznim modelima eksponencijalnog i polinomskog oblika;
- ✦ GP algoritmom dobiveni su također veoma pouzdani modeli čije se odstupanje kreće u granicama od 1,67% do 8,59%.

3. Optimizacija ulaznih parametara (brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja) na temelju postavljenih ograničenja obrade (karakteristike stroja, kvaliteta i točnost obrađene površine, postojanost alata, sile rezanja), a s ciljem ostvarenja jedne ili više funkcija cilja, kao što su minimalizacija jediničnih troškova obrade i/ili minimalizacija jediničnog vremena obrade, kao i primjena kriterija obradivosti materijala, imaju s ekonomskog stajališta najveću praktičnu vrijednost i značenje u proizvodnom okruženju.

Cjelokupni je proces optimizacije parametara obrade podijeljen na segmente – module kao polazne osnove temeljem koje je izvršeno programsko strukturiranje. U radu je predložen model višekriterijske, višefunkcijske i višeparametarske optimizacije temeljene na tehnološkim i ekonomskim aspektima procesa obrade. Predložena rješenja za optimizaciju procesa obrade su sljedeća:

- ✦ *jednokriterijska optimizacija* temeljena na
  - funkciji cilja ovisnoj o izlaznim parametrima procesa tj. minimalizaciji funkcija  $F_c$  i  $Ra$  odnosno maksimalizaciji postojanosti alata  $T$ 
    - po Taguchijevu principu i
    - primjenom GA parametarskog modula,
  - minimalnom vremenu ili minimalnom trošku obrade kao principu tehnološke optimizacije koji je definiran modelom (7.5);
- ✦ *dvokriterijska optimizacija* temeljena na
  - kombinaciji navedenih kriterija primjenom predloženog modela (7.15);



- ✦ *višekriterijska optimizacija* temeljena na
  - predloženim funkcijama cilja (7.19) i (7.21) ovisnim o kriterijima obradivosti materijala (postojanost alata, sila rezanja, kvaliteta obrađene površine) i njihovu različitom značenju ovisno o kategoriji obrade (fina ili gruba).

Rezultati dobiveni optimizacijom parametara obrade mogu se sažeti kako slijedi:

- ✦ kod jednokriterijske optimizacije primjenom Taguchijeva pristupa dobivene su optimalne vrijednosti parametara obrade za razinu pouzdanosti od 90%, potvrđene dodatnim eksperimentima u točkama optimalnosti čime su verificirane optimalne vrijednosti parametara za finu i grubu obradu;
  - ✦ vrijednosti optimalnih parametara dobivene pomoću GA modula također su pokazale visok stupanj pouzdanosti koji je potvrđen dodatnim eksperimentima;
  - ✦ dvokriterijska optimizacija temeljena na težinskim koeficijentima za grubu obradu u više prolaza i finu obradu testirana je na praktičnom problemu uzdužnog tokarenja imajući u vidu definirane funkcije ograničenja i definirane funkcije minimalnoga jediničnog vremena i jediničnih troškova izrade;
  - ✦ primjenom predložene funkcije cilja omogućena je kvalitetna provjera cijelog područja visoke učinkovitosti obrade ovisno o vrijednosti (težini) pojedinoga kriterija;
  - ✦ višekriterijskom funkcijom cilja za grubu (više prolaza) i finu obradu objedinjene su glavne odlike obradivosti materijala izražene pomoću parametara  $F_c$ ,  $R_a$  i  $T$ , te su ovisno o vrijednosti (težini) pojedinih parametara i njihovih ograničenja dobiveni optimalni rezultati koji su grafički prikazani plošnim dijagramima.
4. Predložen i izveden postupak modeliranja i optimizacije parametara obrade uzdužnog tokarenja za grubu (u više prolaza) i finu obradu objedinjen je cjelovitim i originalnim programskim rješenjem *ModOpT*, koje vrijedi za sve navedene metode u modeliranju i optimizaciji procesa obrade temeljenih na klasičnom i novom evolucijskom pristupu. Dobiveni program osigurava sljedeće ciljeve:
- ✦ cjelovito rješenje modeliranja i optimizacije omogućava učinkovitu i brzu praktičnu primjenu navedenih metoda, a rezultati dobiveni implementiranom metodom osiguravaju visoku vjerojatnost dobivenih rješenja što je potvrđeno mnogobrojnim eksperimentima;
  - ✦ zbog modulnog principa izrade programskog rješenja omogućena je prilagodba programa zahtjevima korisnika.

Znanstveni se doprinos ovoga rada može sagledati u nekoliko značajki. Modeliranjem istraživanog procesa na temelju originalnih eksperimentalnih rezultata i primjene evolucijskih algoritama, genetskog programiranja i genetskog algoritma, dobiveni su originalni matematički modeli izlaznih parametara procesa uzdužnog tokarenja. Originalni

optimizacijski modeli definirani višekriterijskim funkcijama cilja omogućili su određivanje optimalnih vrijednosti parametara obrade za postupak uzdužnog tokarenja u više prolaza za grubu i finu obradu. Projektirana i realizirana računalna podrška u vidu programa *ModOpT* objedinila je potrebu modeliranja i optimizacije postupaka obrade u više prolaza, kao bitnog elementa suvremene proizvodnje i omogućila praktičnu primjenu toga cjelovitog programskog rješenja.

Temeljem svega navedenog može se konstatirati da je hipoteza postavljena u ovome radu u potpunosti ostvarena.

Daljnja istraživanja glede modeliranja procesa mogla bi ići u pravcu primjene drugih metoda umjetne inteligencije, npr. živčevnih mreža, dok bi u pogledu optimizacije istraživanja mogla krenuti u smjeru primjene hibridnih rješenja s ciljem povećanja učinkovitosti GA. Također, zanimljiva bi bila integracija ovoga programskog rješenja s modulom za optimizaciju hoda alata i automatskoga generiranja optimalnog NC koda. S druge strane, eksperimentalna istraživanja mogla bi se proširiti i na druge materijale kao i druge postupke obrade. S obzirom na cjelovitost prikazanog pristupa bila bi zanimljiva moguća implementacija ovoga rješenja u industrijskim uvjetima poglavito na pitanjima optimizacije troškova proizvodnje.



## LITERATURA

- [1] Gilbert, W. W.: *Economics of Machining in: Machining Theory and Practice*, American Society for Metal, OH, 1950, 465-485.
- [2] Montgomery, D.: *Design and analysis of experiments*, fifth edition, JohnWiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- [3] Box, G. E. P., Hunter, J. S.: *Multifactor Experimental Design*, Journal Ann. Math. Stat. 28(1957).
- [4] Lambert, B. K., Taraman, K.: *Development and Utilization of a Mathematical Model of a Turning Operation*, International Journal of Production Research 11(1973), 69-81.
- [5] Hassan, G. A., Suliman S. M. A.: *Experimental Modeling and Optimization of Turning Medium Carbon Steel*, International Journal of Production Research 28(1990)6, 1057-1065.
- [6] El Baradie, M. A.: *Surface Roughness Model for Turning Grey Cast Iron (154BHN)*, Proc. Inst. Mech. Eng. 207(1993), 43-54.
- [7] Choudhury, I. A., El Baradie, M. A.: *Surface Roughness Prediction in the Turning of High-Strength Steel by Factorial Design of Experiments*, Journal of Materials Processing Technology 67(1997), 55-61.
- [8] Choudhury, I. A., El Baradie, M. A.: *Machinability Assessment of Inconel 718 by Factorial Design of Experiment Coupled with Response Surface Methodology*, Journal of Materials Processing Technology 95(1999), 30-39.
- [9] Puertas, A. I., Luis P. C. J.: *Surface Roughness Prediction by Factorial Design of Experiments in Turning Processes*, Journal of Materials Processing Technology 143-144(2003), 390-396.
- [10] Dabnun, M.A., Hashmi, M. S. J., El-Baradie, M.A.: *Surface Roughness Prediction Model by Design of Experiments for Turning Machinable Glass-Ceramic (Macor)*, Journal of Materials Processing Technology 164-165(2005), 1289-1293.
- [11] Bajić, D., Špar I., Veža, I.: *Mathematical Modeling of Surface Roughness in Turning Process*, DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries, Rijeka, 2006, 113-118.
- [12] Huang, L., Chen, J., C.: *A Multiple Regression Model to Predict In-process Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer*, Journal of Industrial Technology 17(2001)2, 1-8.
- [13] Choudhury, I. A., El-Baradie, M.A.: *Tool-life Prediction Model by Design of Experiments for Turning High Strength Steel (290BHN)*, Journal of Materials Processing Technology 77(1998), 319-326.
- [14] Jurković, M., Smoljan, B., Jurković, Z.: *Mathematical Modelling and Benefits Analysis of TiN (PVD) Coated Tools Application*, 8<sup>th</sup> International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering IFHTSE 2001, Dubrovnik, 373-380, 2001.
- [15] Cukor, G.: *Tool Life Models for Advanced Machining Systems*, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Journal on Production Engineering CIM 97, Opatija, 1997, B35-42.
- [16] Cukor, G.: *Optimizacija procesa obrade odvajanjem strugotine za nove obradne sustave*, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 1999.



- [17] Kuljanić, E.: *Različite Taylor-ove jednadžbe dobivene iz istih podataka-Utjecaj na optimalnu postojanost alata*, Zbornik radova KEMOS 83, Rijeka, 1983.
- [18] Jurković, Z.: *Modeliranje i simulacija opterećenja alata obradnog procesa*, Magistarski rad, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2002.
- [19] Jurković, Z., Jurković, M.: *Modeling and Simulation of the Cutting Force Using Experimental Data*, 7<sup>th</sup> International Conference TMT 2003, Barcelona, 81-84, 2003.
- [20] Jurković, Z., Hriješik, A., Barišić, B., Gantar, G.: *Mathematical Modelling and Minimization of the Tool Loading Force of Machining Process*, 7<sup>th</sup> International Conference-CIM 2001, Lumbarda, IV059-IV067, 2001.
- [21] Jurković, Z., Hriješik, A., Tominović, K., *Modelling and Simulation of Cutting Force at Turning Process*, 8<sup>th</sup> International Conference-CIM 2002", Brijuni, I057-I064, 2002.
- [22] Cebalo, R., Škorić, S., Stoić, A.: *Mathematical Modelling Cutting Forces by the Second Order Response Surface*, International Conference-CIM 97. Opatija, B13-B20, 1997.
- [23] Jurković, M., Cukor, G., Jurković, Z.: *Stohastičko modeliranje geometrije alata za tokarenje*, Strojarstvo, 40(1998)1-2, 17-29.
- [24] Feng, C.X. J., Wang, X. F. D.: *Surface Roughness Predictive Modeling: Neural Networks Versus Regression*, IIE Transactions 35(2003), 11-27.
- [25] Lin, W. S., Lee, B. Y., Wu, C. L.: *Modeling the Surface Roughness and Cutting Force for Turning*, Journal of Materials Processing Technology 108(2001), 286-293.
- [26] Ozel, T., Karpat, Y.: *Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Networks*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45(2005), 467-479.
- [27] Chrystolouris, G., Guillot, M.: *A Comparison of Statistical and AI Approaches to the Selection of Process Parameters in Intelligent Machining*, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 112(1990), 122-131.
- [28] Taguchi, G., Sayed, M. El., Hsaing, C.: *Quality Engineering and Quality Systems*, McGraw-Hill, NY, 1989.
- [29] Youssef, A.Y., Beauchamp, Y., Thomas, M.: *Comparison of a Full Factorial Experiment to Fractional and Taguchi's Method in a Lathe Dry Turning Operation*, Computer and Industrial Engineering, 27(1994)1-4, 59-62.
- [30] Jurković, Z., Jurković, M., Buljan, S.: *Optimization of Extrusion Force Prediction model using different techniques*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 17(2006)1-2, 353-356.
- [31] Yang, W.H., Tarn, Y.S.: *Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method*, Journal of Materials Processing Technology 84(1998), 122-129.
- [32] Kopač, J., Bahor, M., Soković, M.: *Optimal Machining Parameters for Achieving the Desired Surface Roughness in Fine Turning of Cold Pre-formed Steel Workpieces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42(2002), 707-716.
- [33] Ekinovic, S., Brdarevic, S.: *Optimization of the Cutting Tool Geometry by Use of Different Experimental Plans*, 1<sup>st</sup> International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries – ATDC 2002, Slavonski Brod, 2002, 181-186.
- [34] Davim, J. P.: *A Note on the Determination of Optimal Cutting Conditions for Surface Finish Obtained in Turning Using Design of Experiments*, Journal of Materials Processing Technology 116(2001), 305-308.
- [35] Davim, J. P.: *Design of Optimisation of Cutting Parameters for Turning Metal Matrix Composites Based on the Orthogonal Arrays*, Journal of Materials Processing Technology 132(2003), 340-344.
- [36] Yang, J. L., Chen, J. C.: *A Systematic Approach for Identifying Optimum Surface Roughness Performance in End-Milling Operations*, Journal of Industrial Technology 17(2001)2, 2-8.
- [37] Blatnik, O., Junkar, M.: *Optimal micro EDM Machining Parameters Found Based on the Taguchi Method*, 8<sup>th</sup> International Conference on Management of Innovative Technologies MIT2005, Fiesa, 209-216, 2005.
- [38] Tang, S. H., Tan, S. M., Sulaiman, S., Ismail, N., Samin R.: *The Use of Taguchi method in the Design of Plastic Injection Mould for Reducing Warpage*, Journal of Materials Processing Technology 182(2007), 418-426.
- [39] Zhang, J. Z., Chen, J. C., Kirby, E. D.: *Surface Roughness Optimization in an End-Milling Operation Using the Taguchi Design Method*, Journal of Materials Processing Technology 184(2007), 233-239.
- [40] Reddy, T. A. J., Kumar, R. Y., Rao, C. S. P. *Determination of Optimum Process Parameters Using Taguchi's Approach to Improve the Quality of SLS Parts*, 17<sup>th</sup> IASTED International Conference Modelling and Simulation, Montreal, 2006, 228-233.
- [41] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI, University of Michigan Press, 1975.
- [42] Koza, J. R.: *Genetic Programming: On The Programming of Computers by Means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992.
- [43] Koza, J. R.: *Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs*, The MIT Press, 1994.
- [44] Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [45] Michalewicz, Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer Verlag, 1994.
- [46] Gen, M., Cheng, R.: *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [47] Mitchell, M.: *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press, 1996.
- [48] Reddy, S. V. B., Shunmugam, M.S., Narendran, T.T.: *Optimal Sub-Division of the Depth of Cut to Achieve Minimum Production Cost in Multi-pass Turning Using a Genetic Algorithm*, Journal of Materials Processing Technology 79(1998), 101-108.
- [49] Chen, M. C.: *Roundness Inspection Strategies for Machine Visions Using Non-linear Programs and Genetic Algorithms*, International Journal of Production Research 38(2000), 2967-2988.
- [50] Chen, M.C., Chen, K. Y.: *Optimization of Multipass Turning Operations with Genetic Algorithms: a Note*, International Journal of Production Research 14(2003), 3385-3388.
- [51] Balič, J.: *Solving the Problems in Mechanical Engineering Using Genetic Algorithms*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Tools ICIT99, Maribor, 1999, 37-45.



- [52] Čuš, F., Milfelner M., Balič, J.: *An Intelligent System for Monitoring and Optimization of Ball-end Milling Process*, Journal of Materials Processing Technology 175(2006), 90-97.
- [53] Čuš, F., Balič, J.: *Optimization of Cutting Process by GA Approach*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 19(2003), 113-121.
- [54] Khan, Z., Prasad, B., Singh T.: *Machining Condition Optimization by Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, Computers & Operation Research 24(1997)7, 647-657.
- [55] Ko, T. J., Kim, H. S.: *Autonomous Cutting Parameter Regulation Using Adaptive Modeling and Genetic Algorithms*, Precision Engineering 22(1998), 243-251.
- [56] Chien W. T., Tsai, C. S.: *The Investigation on the Prediction of Tool Wear and the Determination of Optimum Cutting Conditions in Machining 17-4PH Stainless Steel*, Journal of Materials Processing Technology 140(2003), 340-345.
- [57] Hsieh, C. H., Chou, J. H., Wu, Y. J.: *Optimal Predicted Fuzzy Controller of a Constant Turning Force System with Fixed Metal Removal Rate*, Journal of Materials Processing Technology 123(2002), 22-30.
- [58] Brezočnik, M., Balič, J., Brezočnik, Z.: *Emergence of a Intelligence in Next-generation Manufacturing Systems*, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 19(2003), 55-63.
- [59] Brezočnik, M., Kovačić, M.: *Integrated Genetic Programming and Genetic Algorithm Approach to Predict Surface Roughness*, Materials and Manufacturing Processes 18(2003)3, 475-491.
- [60] Brezočnik, M., Kovačić, M., Fičko, M.: *Prediction of Surface Roughness with Genetic Programming*, Journal of Materials Processing Technology 157-158(2004), 28-36.
- [61] Brezočnik, M.: *Uporaba genetskega programiranja v inteligentnih proizvodnih sistemih*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2000.
- [62] Onwubolu, G. C.: *Emerging Optimization Techniques in Production Planning and Control*, Imperial College Press, London, 2002.
- [63] Onwubolu, G. C., Kumalo, T.: *Optimization of Multipass Turning Operations with Genetic Algorithms*, International Journal of Production Research 39(2001)16, 3727-3745.
- [64] Saravanan, R., Asokan, P., Sachithanandam, M.: *Comparative Analysis of Conventional and Non-Conventional Optimisation Techniques for CNC Turning Proces*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17(2001), 471-476.
- [65] Wang, X., Da, Z. J., Balaji, A. K., Jawahir, I. S.: *Performance-Based Optimal Selection of Cutting Conditions and Cutting Tools in Multipass Turning Operations Using Genetic Algorithms*, International Journal of Production Research 40(2002)9, 2053-2065.
- [66] Shin, Y. C., Joo, Y. S.: *Optimization of Machining Conditions with Practical Constraints*, International Journal of Production Research 30(1992)12, 2907-2919.
- [67] Gupta, R., Batra, J. L., Lal, G. K.: *Determination of Optimal Subdivision of Depth of Cut in Multipass Turning with Constraints*, International Journal of Production Research 33(1995)9, 2555-2565.
- [68] Prasad, A. V. S. R. K., Rao, P. N., Rao, U. R. K.: *Optimal Selection of Process Parameters for Turning Operations in a CAPP System*, International Journal of Production Research 35(1997)6, 1495-1522.
- [69] Ermer, D. S., Kromodihardjo, S.: *Optimization of Multipass Turning with Constraints*, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 103(1981), 462-468.
- [70] Gupta, R., Batra, J. L., Lal, G. K.: *Profit Rate Maximization in Multipass Turning with Constraints: A Geometric Programming Approach*, International Journal of Production Research 32(1994)7, 1557-1569.
- [71] Yeo, S.H.: *A Multipass Optimization Strategy for CNC Lathe Operations*, International Journal of Production Economics 40(1995), 209-218.
- [72] Rao, S. S., Hati, S. K.: *Computerized Selection of Optimum Machining Conditions for a Job Requiring Multiple Operations*, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 100(1978), 356-362.
- [73] Kovač, P., Milikić, D.: *Rezanje metala*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1998.
- [74] Jurković, M.: *Matematičko modeliranje i optimizacija obradnih procesa*, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [75] Šavar, Š.: *Obrada metala odvajanjem čestica*, Svezak 1 i 2, Školska knjiga, Zagreb 1999.
- [76] Buda, J., Souček, J., Vasilko, K.: *Teória obrábania*, ALFA, Bratislava, 1983.
- [77] König, W.: *Informations System fur Schnitwerte*, Industrie Anzeiger, 93(1971)60, 1538-1546.
- [78] Jurković, Z., Jurković, M., Brezočnik, M., Buljan, S.: *Extrusion Parameters Determination Based on Different Optimization Approaches*, Journal for Technology of Plasticity 31(2006)1-2, 79-89.
- [79] Ekinović, S.: *Obrada rezanjem*, Mašinski fakultet, Zenica, 2001.
- [80] *Metal Cutting Technical Guide*, SANDVIK Coromant, 2005.
- [81] Kacev, P.G.: *Statističeskie metody issledovanija režuščega instrumenta*, Mašinstroenie, Moskva, 1974.
- [82] Sekulić, S.: *Primena dimenzionalne analize na određivanje zavisnosti između glavnog otpora rezanja i primarnih uticajnih faktora*, Zbornik 10. Savjetovanja proizvodnog strojarstva, Beograd, 1975.
- [83] Bridgman, P.W.: *Dimensional Analysis*, Yale University, London, 1978.
- [84] Stanić, J.: *Teorija obrade metala I*, Mašinski fakultet, Beograd, 1989.
- [85] Mišković, A.: *Optimizacija i dimenzioniranje reznih elemenata alata primjenom metode konačnih elemenata*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Mostar, 1982.
- [86] Kronenberg, M.: *Machining Science and Application*, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [87] Degner, W., Lutze, H., Smejkal, E.: *Spanende Formung*, WEB, Berlin, 1989.
- [88] Čuš, F.: *Tehnika odrezavanja*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 1996.
- [89] Stanić, J.: *Teorija procesa rezanja*, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [90] Kuljanić, E.: *Površinska obradba metala odvajanjem čestica*, Tehnička enciklopedija, Sveska 11, 1-29, Leksikografski zavod «Miroslav Krleža», Zagreb, 1988.
- [91] Kronenberg, M.: *Replacing the Taylor Formule by a New Tool Life Equation*, Int. Journal of Machine Tool Design and Research, 10(1970), 193-202.



- [92] Kuljanić, E.: *Random Strategy Method for Determining Tool Life Equations*, Annals of the CIRP, 29(1980)1, 351-356.
- [93] Jamielniak, K., *Difficulties in Tool Life Predicting when Turning with Variable Cutting Parameters*, Annals of the CIRP, 34(1985)1, 113-116.
- [94] Colding, B.N.: *A Tool Temperature/Tool Life Relationship Covering a Wide Range of Cutting Data*, Annals of the CIRP, 40(1991)35-40.
- [95] Tarman, K., Lambert, B.: *A Surface Model for Turning Operation*, Int. Journal Prod. Res., 12(1974)6, 691-703.
- [96] Čuš, F.: *Visokohitrostno rezanje in posebni postopki obdelav*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2004.
- [97] Wand, Th.: *Simulation des exzentrischen Drehenfräsens*, Industrie Anzeiger, 107(1985)6, 28-29.
- [98] Cebalo, R., Škorić, S.: *CAPP i modul za optimiranje režima obrade*, Zbornik radova BIAM 94, Zagreb, 1994. C32-37.
- [99] Muršec, B. Vrečer, G., Čuš, F.: *Model of Selection of Optimal Cutting Conditions from Data Bases of Tool Makers*, Proceedings 4<sup>th</sup> Int. Research/Expert Conference TMT, pp. 224-229, Zenica, 1998.
- [100] Wu, S. M., Ermer, D.S.: *Maximum Profit as the Criterion in the Determination of the Optimum Machining Conditions*, Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME, 88(1966), 435-442.
- [101] Okushima, K., Hitomi, K.: *A Study of Economical Machining: An Analysis of the Maximum-Profit Cutting Speed*, Int. Journal of Production Research, 3(1964), 73-81.
- [102] Cukor, G., Kuljanić, E.: *Multi-Criteria Optimization in Multi-Pass Turning*, Proceedings AMST 1996, CISM Courses and Lectures No. 372, Springer Verlag, Wien-New York, 1996, 221-227.
- [103] Hidnja, S., Petty, D.J., Tester, M., Barrow, G.: *Calculation of Optimum Cutting Conditions for Turning Operations*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 199(1985)82, 81-92.
- [104] Ljubetić, J.: *Optimizacija postupka pri projektiranju višepredmetnih proizvodnih sistema*, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka, 1991.
- [105] Jurković, M., Karabegović, I.: *Nova filozofija proizvodnje i revitalizacija proizvodnih procesa i sistema, pozvano predavanje*, Zbornik radova RIM-99, 3-31, University of Bihać, 1999.
- [106] Jurković, M., Karabegović, I.: *Some Trends in the Development of Manufacturing Engineering*, Proceedings, 5<sup>th</sup> Int. Research /Expert Conference TMT 2000, 1-10, keynote papers, University of Sarajevo, Zenica, 2000.
- [107] Jurić, M.: *Tržišni mehanizam i proizvodni sistemi*, Zbornik radova "Suvremeni trendovi strojarstva", 1-13, Zagreb, 1992.
- [108] Jurković, Z., Buljan, S.: *Some Trends in the Development of Machine Tools*, Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference, MTeM 2005- Modern Technologies in Manufacturing, Cluj- Napoca, 249-252, 2005.
- [109] Jurković, M.: *Tehničko tehnološke osnove moderne industrijske proizvodnje*, Proceedings RIM-2001 "Revitalization and modernization of production", keynote papers, 25-47, University of Bihać, 2001.
- [110] Pahole, I.: *Planiranje, vodenje in optimiranje inteligentnih fleksibilnih obdelovalnih sistemov z uporabo koncepta pretočne matrike*, Doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 1997.
- [111] Jurković, M., Mahmić, M., Jurković, Z.: *Evolution and Application of Rapid Prototyping Technologies*, Journal for Technology of Plasticity. 30(2005)1-2; 95-108.
- [112] Esser, G., Niebling, F., Geiger, M.: *Rapid Tooling-current Status and Future Trends*, ICIT, 3-12, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2001.
- [113] Brezočnik, M., Jurković, M., Mahmić, M., Botolin, L., Vaupotic, B.: *Development of a New Product by Reverse Engineering and Rapid Prototyping*, TMT 2006- Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Technical University of Catalonia, Barcelona, 2006. 1391-1394.
- [114] Mehrabi, M.G., Ulsoy, A.G., Koren, Y.: *Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing*, University of Michigan, MI 48 109-2125, 2000.
- [115] Katz, R., Moon, Y.M.: *Virtual ArchType Reconfigurable Machine Tool Design: Principles and Metodology*, University of Michigan, 2000.
- [116] Moyne, J., Korsakas, J., Tilbury, D.: *Reconfigurable Factory Testbed: a Distributed Testbed for Manufacturing Systems*, University of Michigan, 2004.
- [117] Balič, J.: *Inteligentni obdelovalni sistemi*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2004.
- [118] Burns, R.: *Intelligent Manufacturing*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 69(1997)5, 440-446.
- [119] Balic, J., Valavanis, H. P., Tsourveloudis, N., Ioannidis S.: *Intelligent Manufacturing Systems: Programming and Control*, Chania-Greece, Maribor-Slovenia, 2003.
- [120] Englemore, R., Feigenbaum E.: *Expert Systems and Artificial Intelligence*, WTEC Hyper-Librarian 1993.
- [121] Stipančev, D., Bonković, M., Torba, Z, Božanić, M. Vidak L.: *Inteligentno vodenje- kada, gdje i kako? Inteligentno vodenje i inteligentni sustavi*, Hrvatsko društvo za sustave, Zagreb, 1998.
- [122] Bezdeh: *On the Relationship Between Neural Networks, Pattern Recognition & Intelligence*, Int. J. of Approx. Reasoning, 6(1992), 85-107.
- [123] Astrom, K. J., Anton, K. E., Arzen, K. A.: *Expert Control*, Automatica, 22(1986)3, 227-286, 1986.
- [124] Giarratano, J., Riley, G.: *Expert Systems, Principles and Programming*, Pws-Kent, Boston, 1989.
- [125] Fiswick, P.A., Luker, P.A.: *Qualitative Simulation, Modeling and Analysis*, Springer Verlag, New York, 1991.
- [126] Zadeh, L.A.: *"Fuzzy Sets"*, Information and Control, 8(1965), 338-353.
- [127] Driankov, D., Hellendoom, H., Reinfrank, M.: *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer – Verlag, New York, 1993.
- [128] Kartolopoulos, S.V.: *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic*, IEEE Pres, New York, 1996.
- [129] Valavanis, K.P., Saridis, G.N.: *Intelligent Robotic Systems: Theory, Design and Applications*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [130] Bratko, I.: *Prolog Programming for Artificial Intelligence*, Addison-Wesley Publishing Company, Wokingham, England, 1990.
- [131] Nauck, D., Klawonn, F., Kruse, R.: *Foundation of Neuro-Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1997.
- [132] Katalinić, B.: *Industriroboter und Flexible Fertigungssysteme für Drehteile*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990.



- [133] Rodd, M.G., Verbruggen, H., Krijgsman, A. J.: *Artificial Intelligence in real-time control*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 5 (1992)5, 385-399.
- [134] Weck, M.: *Werkzeugmaschinen Fertigungssystem*, Berlin, Springer Verlag, 1998.
- [135] Balič, J.: *CNC Control Unit with Learning Ability for Machining Centers*: V. United States patent application, attorney docket no. 03852-P0002A WWW, filing date August 12, 2002: priority dana 27.03.2002, P-200200088 [SI]Stamford: St Onge Steward Johnston & Reens LLC, 2002. [12] f., graf. Prikazi. [COBBISS. SI-ID7335190].
- [136] Balič, J.: *Contribution to Integrated Manufacturing*, DAAAM International, Publishing series-Manufacturing technology, Vienna, 1999.
- [137] Brezočnik, M., Kovačić, M.: *Survey of the Evolutionary Computation and its Application in Manufacturing Systems*, RIM 2001, 3<sup>rd</sup> International conference on revitalization and modernization of production, University of Bihać, 2001.
- [138] Montgomery, D.: *Design and Analysis of Experiments*, fifth edition, JohnWiley & Sons, Inc., New York, 2003.
- [139] Roy, R. K.: *Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, Wiley-Interscience, New York, 2001.
- [140] Milfelner, M.: *Simulacija rezalnih veličin pri procesu odrezovanja*, Magistarski rad, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 2001.
- [141] Golub, M.: *Genetski algoritam*, dostupno na internet adresi, [www.zemris.fer.hr/~golub/ga/skripta1/ga\\_skripta1.doc.gz](http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/skripta1/ga_skripta1.doc.gz)
- [142] Rao, S. S.: *Engineering Optimization – Theory and Practice*, Wiley-Interscience Publication, NY, 1996.
- [143] Venkataraman, P.: *Applied Optimization with Matlab Programming*, Wiley-Interscience Publication, NY, 2002.
- [144] Mukherjee, I., Ray, P. K.: *A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes*, Computers & Industrial Engineering 50(2006),15-34.
- [145] Aggarwal, A., Singh, H.: *Optimization of Machining Techniques – A Retrospective and Literature Review*, Sadhana 30(2005)6, 699-711.
- [146] Coello, C. A.: *An Updated Survey of Evolutionary Multiobjective Optimization Techniques: State of the Art and Future Trends*, Congress on Evolutionary Computation, Washington D. C., 3-13, 1999.
- [147] Opricović, S.: *Višekriterijumska optimizacija*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.

## POPIS OZNAKA

$A$	površina presjeka odvojene strugotine, $\text{mm}^2$
$a_p$	dubina rezanja, mm
$a_{pj}$	dubina rezanja $j$ -tog prolaza obrade, mm
$a_{pmax}$	maksimalna dopuštena dubina rezanja s obzirom na lomljenje strugotine, mm
$a_{pmin}$	minimalna dopuštena dubina rezanja s obzirom na lomljenje strugotine, mm
$b$	širina čestice materijala, mm
$C$	dubina defektnoga površinskog sloja materijala obratka, mm
$C_a$	ukupni troškovi alata, kn/kom.
$C_{an}$	troškovi nabave alata po jednom komadu, kn/kom.
$C_{az}$	troškovi zamjene i postavljanja alata, kn/kom.
$C_{al}$	troškovi po jednoj oštrici pločice, kn
$C_{CA}$	geometrijska konstanta stezanja obratka ovisna o poprečnom presjeku i geometriji noža, $1/\text{mm}^2$
$C_f$	fiksni troškovi neovisni o brzini rezanja, kn/kom.
$C_{f1}$	troškovi stroja kod obavljanja pomoćnih poslova, kn/kom.
$C_{f2}$	troškovi plaće osoblja kod pomoćnih poslova, kn/kom.
$C_i, C_{ki}, C_{ks}, C_{Fc}$	konstante sile rezanja ovisne o vrsti materijala obratka i uvjetima obrade, $\text{N}/\text{mm}^2$
$C_N$	nabavna cijena pločice alata, kn.
$C_o$	troškovi obrade ovisni o glavnom strojnom vremenu obrade, kn/kom.
$C_R, K_S, C$	konstante hrapavosti obrađene površine ovisne o uvjetima obrade, geometriji alata i vrsti materijala
$C_v, C_b, C_e, k_T$	konstante postojanosti alata ovisne o vrsti materijala obratka i alata i uvjetima obrade
$C_u$	ukupni troškovi, kn/kom. ili kn/min
$C_1$	jedinični troškovi izrade, kn/kom.
$C_{1min}$	minimalni jedinični troškovi izrade, kn/kom.
$D, D_0$	promjer priprema, mm
$D_b$	bruto osobni dohodak operatera na radnom mjestu, kn/min
$D_j$	promjer nakon $j$ -tog prolaza obrade ( $j = 1, 2, \dots, i$ ), mm
$D_{sr}$	srednji promjer rezanja, mm
$D_1$	promjer obrađene površine, mm
$E$	modul elastičnosti materijala obratka, $\text{N}/\text{mm}^2$
$E_l$	elitizam
$F_c$	glavna sila rezanja, N
$F_f$	posmična sila, N
$F_p$	sila prodiranja, N
$F_R$	rezultanta sila rezanja, N



$f$	posmak po okretaju obratka, mm
$f_c$	jedinična glavna sila rezanja, $N/mm^2$
$f_{emax}$	maksimalni progib obratka, mm
$f_f$	jedinična posmična sila rezanja, $N/mm^2$
$f_j$	posmak $j$ -tog prolaza obrade, mm
$f_{max}$	maksimalni dopušteni posmak s obzirom na lomljenje strugotine, mm
$f_{min}$	minimalni dopušteni posmak s obzirom na lomljenje strugotine, mm
$f_p$	jedinična sila prodiranja pri rezanju, $N/mm^2$
$f_{s(1,x)}$	jedinična – specifična sila rezanja, $N/mm^2$
$f_0$	posmak mjerodavan za proračun frekvencije vrtnje s obzirom na snagu stroju, mm
$G$	broj generacija
$h$	debljina čestice materijala, mm
$I$	moment inercije poprečnog presjeka obratka, $mm^4$
$i$	indeks
$i_p$	ukupan broj prolaza
$j$	indeks
$K$	krutost stroja, $N/mm$
$k$	broj varijabli eksperimenta
$k_o$	troškovi radnog mjesta i ostali opći troškovi, $kn/min$
$k_s$	konstanta ovisna o vrsti materijala obratka i alata i uvjetima obrade, $N/mm^2$
$L$	dužina prolaza, mm
$L_{ph}$	ukupan put alata u smjeru povratnog hoda, mm
$L_v$	dužina u smjeru glavnoga gibanja obratka, mm
$l$	slobodna dužina obratka izvan čeljusti stezne glave, mm
$l_c$	referentna duljina, mm
$l_n$	duljina vrjednovanja, mm
$M$	veličina populacije
$MRR$	učinak skinutog materijala (engl. <i>Material Removal Rate</i> ), $cm^3/min$
$M_y$	moment savijanja nosača alata u horizontalnoj ravnini, $Nmm$
$M_z$	moment savijanja nosača alata u vertikalnoj ravnini, $Nmm$
$m$	Taylorov eksponent
$N$	broj točaka plana eksperimenata
$N_s$	broj izradaka u seriji, kom.
$n$	frekvencija vrtnje, $min^{-1}$
$n_a$	frekvencija vrtnje u odnosu na iskoristivost postojanosti alata, $min^{-1}$
$n_{max}$	maksimalna frekvencija vrtnje glavnog vretena alatnog stroja, $min^{-1}$
$n_{min}$	minimalna frekvencija vrtnje glavnog vretena alatnog stroja, $min^{-1}$
$n_S$	frekvencija vrtnje u odnosu na iskoristivost snage stroja, $min^{-1}$
$n_0$	broj ponavljanja eksperimenata u centralnoj točki plana
$n_a$	broj eksperimenata za plan višeg reda

$P$	korisna snaga stroja, kW
$P_r$	profit, $kn/min$
$P_S$	instalirana snaga glavnog pogona, kW
$P_c$	vjerojatnost križanja
$p_m$	vjerojatnost mutacije
$Q$	produktivnost, kom./min
$Q_{max}$	maksimalna produktivnost, kom./min
$R$	koeficijent višestruke regresije
$R^2$	koeficijent determinacije
$Ra$	prosječno odstupanje profila obrađene površine, $\mu m$
$Ra_{max}$	maksimalna vrijednost hrapavosti površine, $\mu m$
$R_q$	srednje kvadratno odstupanje profila, $\mu m$
$R_{tr}$	ostali opći troškovi radnog mjesta, $kn/min$
$R_r, R_{tt}$	teorijska zahtijevana hrapavost obrađene površine, $\mu m$
$R_y, R_{max}$	najveća visina profila, $\mu m$
$R_z$	visina neravnina profila u deset točaka, $\mu m$
$r_e$	radijus zaobljenja vrha oštrice noža, mm
$S$	veličina turnirske selekcije
$S/N$	odnos signal-šum (engl. <i>Signal-to-Noise</i> )
$T$	postojanost alata, min
$T_e$	ekonomska postojanost alata, min
$T_j$	postojanost alata u $j$ -prolazu, min
$T_{opt}$	optimalna postojanost alata, min
$T_p$	postojanost alata pri maksimalnoj proizvodnosti, min
$t_a$	vrijeme jednokratne zamjene i postavljanja alata po komadu, $min/kom.$
$t_{a1}$	vrijeme jednokratne zamjene i postavljanja alata, min
$t_g$	glavno strojno vrijeme rezanja (čisto vrijeme obrade), min
$t_n$	vrijeme podešavanja neovisno o parametrima obrade, min
$t_p$	vrijeme pozicioniranja (vrijeme do zahvata alata i obratka), min
$t_{pa}$	vrijeme pripreme alata, $min/kom.$
$t_{ph}$	vrijeme povratnog hoda, min.
$t_{ps}$	ukupno vrijeme pripreme alatnog stroja, min
$t_{ss}$	vrijeme stavljanja i skidanja obratka, min
$t_1$	jedinično vrijeme izrade, $min/kom.$
$t_{1min}$	minimalno jedinično vrijeme izrade, $min/kom.$
$U_p$	ukupan prihod, $kn/min$
$U_j$	jedinični prihod, $kn/kom.$
$VB, VB_{max}, VB_k$	srednja, maksimalna i prema izabranom kriterij određena vrijednost širine pojasa trošenja na stražnjoj površini alata, mm
$v_c$	brzina rezanja, $m/min$
$v_{cd}$	brzina rezanja za maksimalni profit-dobit, $m/min$



$v_{ce}$	brzina rezanja za minimalne troškove – ekonomska brzina rezanja, m/min
$v_{cmax}$	maksimalna dopuštena brzina rezanja s obzirom na materijal obratka, m/min
$v_{cmin}$	minimalna dopuštena brzina rezanja s obzirom na materijal obratka, m/min
$v_{copt}$	optimalna brzina rezanja, m/min
$v_{cp}$	brzina rezanja za maksimalnu produktivnost, m/min
$v_{cS}$	brzina rezanja pune iskoristivosti snage stroja, m/min
$v_{csr}$	srednja brzina rezanja, m/min
$v_{ph}$	programirana brzina povratnog hoda, mm/min
$x, y, x_1, y_1,$	eksponenti ovisni o materijalu obratka i alata i uvjetima obrade
$x_a, y_a, x_g, y_g, z,$	
$k_v, \alpha_T, \beta_T, \gamma_T$	
$W_y, W_z$	momenti otpora poprečnog presjeka nosača alata, mm <sup>3</sup>
$w, w_1, w_2, w_3, w_4$	težinski koeficijenti u intervalu [0, 1]
$Z_{pl}$	broj oštrica pločice alata
$Z_T$	broj obrađenih komada između dviju zamjena alata ili za vrijeme postojanosti alata $T$
$z$	eksponent Kinzleova izraza
$\alpha$	stražnji kut reznoga klina alata, °
$\beta$	kut reznoga klina alata, °
$\gamma$	prednji kut alata, °
$\Delta_d$	donja dopuštena granica tolerantnog polja za postojeće dimenzije obratka, mm.
$\delta$	dodatak za obradu u promjeru, mm
$\delta_{max}$	maksimalni sloj koji treba skinuti s obratka, mm
$\delta_1$	dodatak za grubu završnu obradu, mm
$\delta_2$	dodatak za finu završnu obradu, mm
$\varepsilon_k$	Kronenbergov koeficijent
$\varepsilon_r$	vršni kut oštrice, °
$\eta$	energetski stupanj iskoristivosti prijenosa snage od pogonskog elektromotora do glavnoga radnog vretena stroja
$\kappa_r$	kut namještanja glavne oštrice alata, °
$\lambda$	kut nagiba glavne oštrice, °
$\mu$	koeficijent ovisan o načinu stezanja obratka
$\rho$	kut nagiba pravca koji određuje minimalni posmak u funkciji dubine rezanja, °
$\sigma_{dop}$	dopušteno naprezanje na savijanje nosača alata, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_x$	naprezanje na tlak nosača alata, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	naprezanje na savijanje nosača alata, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_z$	naprezanje na savijanje nosača alata, N/mm <sup>2</sup>
$\varphi_c$	funkcija cilja

## POPIS KRATICA I SIMBOLA

CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom podržano projektiranje
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> – računalom podržana proizvodnja
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i> – računalom podržano planiranje procesa
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i> – računalom integrirana proizvodnja
CIRP	<i>International Academy for Production Engineering</i> – međunarodna akademija proizvodnog strojarstva
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – računalno numeričko upravljanje
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – kemijsko nanošenje prevlake
DoE	<i>Design of Experiments</i> – planiranje eksperimenata
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i> – fleksibilni proizvodni sustav
GA	<i>Genetic algorithm</i> – genetski algoritmi
GP	<i>Genetic programming</i> – genetsko programiranje
Hi-E	<i>High Efficiency</i> – područje visoke učinkovitosti obrade
IMS	<i>Intelligent Manufacturing System</i> – inteligentni proizvodni sustav
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> – Massachusettski tehnološki institut
ModOpT	<i>Modeliranje i optimizacija tokarenja</i>
NC	<i>Numerical Control</i> – numeričko upravljanje
NN	<i>Neural networks</i> – živčevne mreže
RAS	Rekonfigurabilni alatni strojevi
RSM	<i>Response surface methodology</i> – metodologija odzivne površine
SA	<i>Simulated annealing</i> – simulirano hlađenje
SHIP	Sredstvo za hlađenje i podmazivanje



## POPIS SLIKA

Sl. 1.1. Faze istraživanja	3
Sl. 3.1. Analiza procesa obrade uz tehnička, tehnološka i druga ograničenja	12
Sl. 3.2. Utjecajni faktori na parametre obrade rezanjem	13
Sl. 3.3. Sile kod postupka obrade tokarenjem: $F_c$ - glavna sila rezanja, $F_p$ - sila prodiranja, $F_f$ - posmična sila	14
Sl. 3.4. Geometrija presjeka čestice materijala	16
Sl. 3.5. Ovisnost postojanosti alata o parametrima obrade	17
Sl. 3.6. Krivulje istrošenosti alata za različite brzine rezanja $v_{ci}$	17
Sl. 3.7. Skupina utjecajnih parametara na hrapavost obrađene površine	20
Sl. 3.8. Utjecaj brzine, dubine i posmaka na parametar hrapavosti $Ra$ : a) tokarenje $r_\epsilon = 2$ mm i $\kappa_r = 45^\circ$ , b) bušenje, glodanje, c) tokarenje sa širokom reznom oštricom [84]	20
Sl. 3.9. Srednje prosječno odstupanje profila $Ra$	20
Sl. 3.10. Srednja visina neravnina u 10 točaka	21
Sl. 3.11. Utjecajni parametri na teorijsku hrapavost obrađene površine $R_r$ : a) posmak, b) radijus zaobljenja vrha oštrice alata, c) brzina rezanja	21
Sl. 3.12. Promjeri obratka po svakom od prolaza	23
Sl. 3.13. Blok-shema određivanja parametara obrade	27
Sl. 3.14. Analitičko određivanje posmaka i brzine rezanja	28
Sl. 3.15. Grafički prikaz troškova: a) troškovi stroja i osobnih dohodaka pri pomoćnim poslovima neovisni o brzini rezanja $v_c$ , b) ovisnost troškova zamjene alata $C_{az}$ , troškova nabave i održavanja alata $C_{an}$ i troškova obrade $C_o$ o brzini rezanja $v_c$	31
Sl. 3.16. Osnovni elementi i zahtjevi postupka optimizacije	35
Sl. 3.17. Osnovni koraci procedure optimizacije	36
Sl. 3.18. Hijerarhijska struktura vrijednosti parametara obrade i parametara procesa: $Q$ - proizvodni učinak - učinak skidanja materijala, $P_r$ - profit, $C_1$ - jedinični troškovi izrade, $Ra$ - srednja hrapavost profila obrađene površine, $T$ - postojanost alata	36
Sl. 3.19. Osnovni slijed optimizacije parametara obrade	37
Sl. 3.20. Kriteriji za definiranje optimalnog procesa obrade: $Ra$ - srednji profil hrapavosti obrađene površine, $C_{1min}$ - minimalni jedinični troškovi izrade, $t_{1min}$ - minimalno vrijeme izrade, $Q_{max}$ - maksimalna količina, $P_{max}$ - maksimalni profit	38
Sl. 3.21. Ovisnost troškova, vremena izrade i produktivnosti procesa o brzini rezanja	39
Sl. 3.22. Ekonomičnost procesa obrade - kriterij visoke iskoristivosti procesa obrade: a) troškovi, b) profit, c) vrijeme procesa	40
Sl. 3.23. Ovisnost produktivnosti, troškova, prihoda i profita o brzini rezanja	41
Sl. 3.24. Tijek optimizacije parametara obrade na računaru	42
Sl. 3.25. Analiza opterećenja tokarskog noža	44
Sl. 3.26. Dijagram $a_p - f$ za izbor posmaka $f$ i dubine rezanja $a_p$	46
Sl. 3.27. Modeli za određivanje posmaka s obzirom na krutost obratka, kvalitetu obrađene površine i točnost obrade: a) početak tokarenja, b) završetak tokarenja, A1 - gruba obrada je i završna, A2 - poslije grube slijedi zahvat fine obrade [79]	48

Sl. 4.1. Razvoj obradnih i proizvodnih sustava	52
Sl. 4.2. Prikaz lokacije rekonfigurabilnih obradnih sustava u funkciji količine (broj istih dijelova) i asortimana proizvoda (veličina serije)	54
Sl. 4.3. Mogući scenariji u pogledu upotrebe obradnih sustava	55
Sl. 4.4. Troškovi u ovisnosti o stupnju automatizacije [117]	55
Sl. 4.5. Struktura inteligentnog stroja	61
Sl. 4.6. Koncept inteligentnog stroja [130]	62
Sl. 4.7. Definicija inteligentnog upravljanja	63
Sl. 4.8. Struktura inteligentnog upravljanja	64
Sl. 4.9. Blok-dijagram konvencionalnoga CNC stroja	65
Sl. 4.10. CNC upravljačka jedinica sa sposobnošću učenja uz primjenu živčevne mreže	66
Sl. 4.11. Blok-dijagram NN uređaja	67
Sl. 5.1. Utjecajni parametri procesa uzdužnog tokarenja	70
Sl. 5.2. Centralni kompozicijski plan $N = 2^k + n_0 + n_a$ za $k = 3$	72
Sl. 5.3. Taguchijeva metoda - procedura	74
Sl. 5.4. NC tokarilica "Georg Fisher NDM-16"	76
Sl. 5.5. Tokarski nož i pločica	76
Sl. 5.6. Radni prostor stroja sa stegnutom šipkom	77
Sl. 5.7. Pojačivač i analogni pokazivači	78
Sl. 5.8. LabVIEW™ prozor	78
Sl. 5.9. Profilmetar	78
Sl. 5.10. Alatni mikroskop	78
Sl. 5.11. Shema ulazno - izlaznih parametara za grubu i finu obradu tokarenjem	79
Sl. 6.1. Blok-shema determinističkog modela	84
Sl. 6.2. Blok-shema stohastičkog modela	85
Sl. 6.3. Klasifikacija metoda modeliranja	85
Sl. 6.4. Teorijska i realna regresijska funkcija	87
Sl. 6.5. Algoritam statističke obrade rezultata aktivnog eksperimenta	88
Sl. 6.6. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cg}$ ) prema polinomskom modelu (6.32) za $v_c = 350$ m/min (crveni) i za $f = 0,4$ mm/okr. (crni)	94
Sl. 6.7. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cg}$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.35) za $v_c = 350$ m/min (crveni) i za $f = 0,4$ mm/okr. (crni)	95
Sl. 6.8. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_g$ ) prema polinomskom modelu (6.37) za $a_p = 2,25$ mm (crveni) i za $v_c = 350$ m/min (crni)	96
Sl. 6.9. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_g$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.38) za $a_p = 2,25$ mm (crveni) i za $v_c = 350$ m/min (crni)	97
Sl. 6.10. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_g$ ) prema polinomskom modelu (6.40) za $a_p = 2,25$ mm (crveni) i za $f = 0,4$ mm/okr. (crni)	98
Sl. 6.11. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_g$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.41) za $a_p = 2,25$ mm (crveni) i za $f = 0,4$ mm/okr. (crni)	99



Sl. 6.12. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cf}$ ) prema polinomskom modelu (6.43) za $v_c = 450$ m/min (crveni) i za $f = 0,15$ mm/okr. (crni)	100
Sl. 6.13. Plošni grafovi glavne sile rezanja ( $F_{cf}$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.44) za $v_c = 450$ m/min (crveni) i za $f = 0,15$ mm/okr. (crni)	101
Sl. 6.14. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_p$ ) prema polinomskom modelu (6.46) za $a_p = 0,8$ mm (crveni) i za $v_c = 450$ m/min (crni)	102
Sl. 6.15. Plošni grafovi hrapavosti obrađene površine ( $Ra_p$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.47) za $a_p = 0,8$ mm (crveni) i za $v_c = 450$ m/min (crni)	103
Sl. 6.16. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_f$ ) prema polinomskom modelu (6.49) za $a_p = 0,8$ mm (crveni) i za $f = 0,15$ mm/okr. (crni)	103
Sl. 6.17. Plošni grafovi postojanosti alata ( $T_f$ ) prema eksponencijalnom modelu (6.50) za $a_p = 0,8$ mm (crveni) i za $f = 0,15$ mm/okr. (crni)	104
Sl. 6.18. Struktura genetskog algoritma	108
Sl. 6.19. Grafički prikaz genetskih operatora	109
Sl. 6.20. Prikaz funkcije cilja-dobrote	110
Sl. 6.21. GP modul – prozor za unos evolucijskih parametara	113
Sl. 6.22. Križanje u GP	114
Sl. 6.23. GP algoritam	115
Sl. 6.24. Prikaz ispisa modela kroz generacije pomoću GP modula	116
Sl. 7.1. Definiranje optimalnih rješenja iz skupa mogućih	120
Sl. 7.2. Pregled nekih optimizacijskih metoda [30]	120
Sl. 7.3. $S/N$ grafovi kontrolnih parametara procesa za glavnu silu rezanja – gruba obrada	126
Sl. 7.4. Modul za parametarsku GA optimizaciju	130
Sl. 7.5. Funkcija dobrote kroz generacijske faze: glavna sila rezanja – fina obrada	132
Sl. 7.6. Program <i>ModOpt</i> : a) uvodni prozor, b) dijagram tijeka informacija kroz module	133
Sl. 7.7. <i>ModOpt</i> – fina obrada: a) ulazni parametri optimizacije, b) višekriterijski modul	139
Sl. 7.8. <i>ModOpt</i> – gruba obrada: a) ulazni parametri optimizacije, b) višekriterijski modul	140
Sl. 7.9. Plošni grafovi za optimalnu vrijednost parametara fine obrade pri $v_{cf} = 400$ m/min	141
Sl. 7.10. Plošni grafovi za optimalnu vrijednost parametara grube obrade, varijanta – 1	142
Sl. 8.1. Dijagram odstupanja modela za silu od eksperimentalnih rezultata – gruba obrada	147
Sl. 8.2. Dijagram odstupanja modela za hrapavost od eksperimentalnih rezultata – fina obrada	149

## POPIS TABLICA

Tab. 5.1. Ortogonalni nizovi: a) $L_8(2^7)$ i b) $L_9(3^4)$	75
Tab. 5.2. Geometrija alata	76
Tab. 5.3. Mehaničke karakteristike i kemijska struktura obratka	77
Tab. 5.4. Fizikalne i kodirane vrijednosti ulaznih parametara za grubu obradu tokarenjem	79
Tab. 5.5. Eksperimentalni rezultati za grubu obradu tokarenjem	80
Tab. 5.6. Fizikalne i kodirane vrijednosti ulaznih parametara za finu obradu tokarenjem	81
Tab. 5.7. Eksperimentalni rezultati za finu obradu tokarenjem	81
Tab. 6.1. Pregled softvera za planiranje i analizu eksperimenata	91
Tab. 6.2. Rezultati regresijske analize za silu tokarenja ( $F_{cg}$ ) dobiveni pomoću Excela	92
Tab. 6.3. Rezultati regresijske analize glavne sile tokarenja ( $F_{cg}$ ) prema modelu (6.33)	94
Tab. 6.4. Usporedba eksperimenta i rezultata dobivenih modela za grubu obradu tokarenjem	105
Tab. 6.5. Usporedba eksperimenta i rezultata dobivenih modela za finu obradu tokarenjem	106
Tab. 7.1. Razine kontrolnih – ulaznih parametara za grubu i finu obradu $L_8(2^7)$	122
Tab. 7.2. Razine kontrolnih – ulaznih parametara za grubu i finu obradu $L_9(3^4)$	122
Tab. 7.3. Plan eksperimenata i rezultati za grubu i finu obradu prema $L_8(2^7)$	123
Tab. 7.4. Plan eksperimenata i rezultati za grubu i finu obradu prema $L_9(3^4)$	124
Tab. 7.5. ANOVA za glavnu silu rezanja – gruba obrada prema planu $L_9(3^4)$	126
Tab. 7.6. Vrijednosti optimalnih parametara za grubu obradu	131
Tab. 7.7. Vrijednosti optimalnih parametara za finu obradu	131
Tab. 7.8. Optimalni parametri – rezultati za finu obradu tokarenjem	141
Tab. 7.9. Optimalni parametri – rezultati za grubu obradu tokarenjem, varijanta – 1	142
Tab. 7.10. Optimalni parametri – rezultati za grubu obradu tokarenjem, varijanta – 2	143
Tab. 8.1. Dodatni eksperimenti za verifikaciju dobivenih modela za grubu obradu	146
Tab. 8.2. Odstupanja dobivenih modela od svih eksperimentalnih vrijednosti – gruba obrada	147
Tab. 8.3. Dodatni eksperimenti za verifikaciju dobivenih modela za finu obradu	148
Tab. 8.4. Odstupanja dobivenih modela od svih eksperimentalnih vrijednosti – fina obrada	149
Tab. 8.5. Vrijednosti optimalnih parametara za grubu obradu ovisno o vrsti metode i modela	150
Tab. 8.6. Vrijednosti optimalnih parametara za finu obradu ovisno o vrsti metode i modela	151
Tab. 8.7. Utjecaji pojedinih parametara obrade	151
Tab. 8.8. Optimalne vrijednosti parametara obrade – minimalno jedinično vrijeme $t_{1min}$	152
Tab. 8.9. Optimalne vrijednosti parametara obrade – minimalni jedinični trošak $C_{1min}$	152



**PRILOG A:**

Cjelovit pregled svih izvedenih eksperimenata s rezultatima za grubu obradu uzdužnim tokarenjem.

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	300	0,3	1,5	879,224	4,30	17,60
2	350	0,3	1,5	848,586	3,78	9,36
3	400	0,3	1,5	894,327	3,88	4,73
4	300	0,4	1,5	1119,517	7,63	11,03
5	350	0,4	1,5	1111,016	7,09	6,28
6	400	0,4	1,5	1177,007	7,14	2,83
7	300	0,5	1,5	1436,299	11,11	6,68
8	350	0,5	1,5	1415,452	11,57	3,13
9	400	0,5	1,5	1408,114	11,48	1,88
10	300	0,3	2,25	1289,769	4,08	15,42
11	350	0,3	2,25	1260,859	4,07	8,37
12	400	0,3	2,25	1333,207	3,84	3,92
13	300	0,4	2,25	1706,310	7,76	9,21
14	350	0,4	2,25	1677,026	8,11	5,32
15	400	0,4	2,25	1711,773	7,95	2,26
16	300	0,5	2,25	2113,549	13,00	4,68
17	350	0,5	2,25	2210,386	14,62	2,37
18	400	0,5	2,25	2177,104	14,26	1,42
19	300	0,3	3,0	1754,215	4,21	13,86
20	350	0,3	3,0	1745,217	4,73	7,02
21	400	0,3	3,0	1726,937	4,50	3,80
22	300	0,4	3,0	2248,647	8,20	7,92
23	350	0,4	3,0	2370,946	8,13	4,17
24	400	0,4	3,0	2260,277	9,09	2,06
25	300	0,5	3,0	2896,122	14,29	4,10
26	350	0,5	3,0	2886,451	14,25	2,02
27	400	0,5	3,0	2860,663	13,71	1,16
28	266	0,4	2,25	1697,504	7,82	12,95
29	434	0,4	2,25	1683,361	8,15	1,81
30	350	0,23	2,25	1002,763	2,46	10,52
31	350	0,57	2,25	2609,254	17,95	0,75
32	350	0,4	1,0	765,921	6,36	6,65
33	350	0,4	3,5	2746,389	9,07	3,58
34	325	0,35	2,0	1279,093	5,98	9,26
35	375	0,35	2,0	1303,333	5,69	4,87
36	325	0,45	2,0	1787,773	9,56	5,56
37	375	0,45	2,0	1722,324	10,09	2,74
38	325	0,35	2,5	1676,456	6,02	8,54
39	375	0,35	2,5	1648,966	6,22	4,37
40	325	0,45	2,5	2097,975	10,86	4,69
41	375	0,45	2,5	2119,506	11,30	2,31

**PRILOG B:**

Cjelovit pregled svih izvedenih eksperimenata s rezultatima za finu obradu uzdužnim tokarenjem.

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	400	0,1	0,4	128,893	0,77	32,66
2	450	0,1	0,4	137,792	0,97	18,35
3	500	0,1	0,4	130,755	0,80	11,15
4	400	0,15	0,4	167,630	1,33	28,05
5	450	0,15	0,4	171,110	1,27	15,16
6	500	0,15	0,4	166,920	1,05	8,26
7	400	0,2	0,4	201,899	1,70	25,89
8	450	0,2	0,4	196,137	2,01	12,26
9	500	0,2	0,4	202,200	1,67	7,45
10	400	0,1	0,8	222,195	0,89	30,74
11	450	0,1	0,8	229,973	1,11	17,38
12	500	0,1	0,8	247,127	1,07	10,26
13	400	0,15	0,8	305,987	1,33	26,22
14	450	0,15	0,8	301,441	1,28	14,43
15	500	0,15	0,8	300,215	1,19	8,34
16	400	0,2	0,8	372,675	1,95	21,79
17	450	0,2	0,8	375,776	1,89	12,29
18	500	0,2	0,8	377,833	1,93	7,03
19	400	0,1	1,2	337,859	1,11	28,43
20	450	0,1	1,2	336,218	1,08	15,18
21	500	0,1	1,2	330,745	1,19	9,23
22	400	0,15	1,2	435,620	1,24	24,10
23	450	0,15	1,2	431,962	1,13	12,13
24	500	0,15	1,2	431,280	1,22	7,12
25	400	0,2	1,2	492,945	2,14	20,74
26	450	0,2	1,2	520,538	1,68	9,54
27	500	0,2	1,2	550,848	1,77	5,61
28	366	0,15	0,8	313,225	1,37	34,46
29	534	0,15	0,8	307,622	1,31	6,12
30	450	0,066	0,8	174,024	1,21	20,25
31	450	0,234	0,8	406,719	2,32	10,93
32	450	0,15	0,13	61,223	1,17	12,18
33	450	0,15	1,47	497,895	1,13	10,05
34	425	0,12	0,6	186,192	1,12	21,56
35	475	0,12	0,6	187,965	1,06	12,79
36	425	0,18	0,6	253,966	1,55	17,90
37	475	0,18	0,6	256,644	1,41	10,20
38	425	0,12	1,0	306,973	1,03	21,56
39	475	0,12	1,0	302,810	1,15	11,23
40	425	0,18	1,0	389,992	1,60	17,32
41	475	0,18	1,0	389,515	1,44	8,52



## ŽIVOTOPIS

Zoran Jurković rođen je 7. listopada 1967. u Bihaću, Republika Bosna i Hercegovina. Osnovnu školu završava 1982. godine u Banjoj Luci, a 1986. Srednju tehničku strojaršku školu. Studij strojarstva upisao je 1987. godine na Mašinskom fakultetu u Banja Luci, i završio ga u redovitom roku te diplomirao 6. srpnja 1992. godine s prosječnom ocjenom dodiplomskog studija 3,90. Time je stekao visoku spremu i stručni naziv diplomirani inženjer strojarstva, smjer proizvodni. Tema diplomskog rada bila je *"Pogonski sistemi za glavno i pomoćno kretanje na strojevima s kompjuterskim upravljanjem"*.

Poslijediplomski studij za znanstveno usavršavanje upisuje na Tehničkom fakultetu u Rijeci iz znanstvenog područja Tehničke znanosti, znanstveno polje Strojstvo, znanstvene grane Proizvodno strojarstvo, usmjerenje Tehnologija deformiranja i odvajanja. Zbog ratnih okolnosti i nemogućnosti nostrifikacije diplome Mašinskog fakulteta iz Banja Luke, a radi nastavka s poslijediplomskim studijem, na Strojarskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru, polože razlikovne ispite i ponovni diplomski rad pod naslovom *"Stohastičko modeliranje sile dubokog izvlačenja"*, te 17. rujna 1997. ponovno stječe stručni naziv diplomiranoga inženjera strojarstva. Magistarski rad pod naslovom *"Modeliranje i simulacija opterećenja alata obradnog procesa"* uspješno je obranio 15. veljače 2002. na Tehničkom fakultetu, Sveučilišta u Rijeci, pred Povjerenstvom u sastavu: red.prof.dr.sc. Josip Brnić, dipl. ing., red.prof.dr.sc. Andrej Hriješik, dipl. ing. (mentor), Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci i red.prof.dr.sc. Karl Kuzman, dipl. ing., Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, te time stekao akademski stupanj magistar znanosti iz područja tehničke znanosti, znanstvenog polja strojarstvo, znanstvene grane proizvodno strojarstvo.

Početakom 1998. godine zapošljava se na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u svojstvu mlađeg asistenta, a 13. lipnja 2002. izabran je u suradničko zvanje asistenta za predmete: Obradni strojevi, alati i naprave, Modeliranje i optimizacija procesa obrade, Postupci i strojevi za plastičnu obradu, Obradni strojevi I i II, te Tehnička mjerenja.

Tijekom razdoblja od 1998. godine do danas boravio je u više navrata na Katedri za preoblikovanje, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, te Institutu za proizvodno strojarstvo, Fakulteta za strojništvo Univerze v Mariboru. Sudjelovao na seminaru *CISM* u Udinama, te seminaru *"Modeling of metal cutting"* na IPT – Fraunhofer Institut of Production Technologie Aachen, Njemačka. Tijekom 2002. i 2006. godine u sklopu *CEEPUS programa* boravi na Faculty of Machine Building, Department of Manufacturing Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, Rumunjska.

Autor je i koautor preko 50 znanstvenih i stručnih radova objavljenih u časopisima i zbornicima međunarodnih skupova održanih u zemlji i inozemstvu, a na nekima je od njih i aktivno sudjelovao, te jednog sveučilišnog udžbenika. Od samog početka uključen je u znanstvene projekte Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske pod naslovima *"Modeliranje procesa plastične obrade metala"* i *"Modeliranje i simulacija procesa primjenom genetskog i stohastičkog algoritma"*, te međunarodnom znanstvenom projektu pod naslovom *"Modeliranje procesa dubokog vučenja eksplozijom, primjenom genetskih i stohastičkih metoda"*.

Član je Hrvatske udruge proizvodnog strojarstva (HUPS) te za doprinos nagrađen zlatnom medaljom HUPS-2005. Sudjelovao je u radu organizacijskih odbora međunarodnih skupova DAAAM 2005 i ATDC 2006.

Služi se aktivno engleskim jezikom i pasivno njemačkim. Oženjen je i otac jednog djeteta.



## PODACI O AUTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI

### 1. AUTOR

Ime i prezime:	mr.sc. Zoran Jurković, dipl.ing.
Datum i mjesto rođenja:	07.10.1967., Bihać
Naziv fakulteta, studija i godina završetka dodiplomskog studija:	prvi put Mašinski fakultet Banja Luka, studij strojarstva, 1992.; drugi put Strojarski fakultet Mostar, studij strojarstva, 1997.
Naziv fakulteta, studija i godina završetka poslijediplomskog studija:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, proizvodni, 2002.
Sadašnje zaposlenje:	asistent, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

### 2. DOKTORSKA DISERTACIJA

Naslov:	Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava
Broj stranica, slika, tablica i bibliografskih podataka:	VII+177 stranica, 86 slika, 31 tablica, 147 bibliografska podatka
Znanstveno polje i grana:	Strojarstvo, Proizvodno strojarstvo
Voditelji rada:	izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Jože Balič, dipl. ing.
Fakultet na kojem je rad obranjen:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

### 3. OBRANA I OCJENA

Datum prijave teme:	08.05.2004.
Datum predaje rada:	05.07.2007.
Datum prihvatanja ocjene rada:	28.09.2007.
Sastav Povjerenstva za ocjenu:	red. prof. dr. sc. Juraj Ljubetić, predsjednik izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, mentor, član red. prof. dr. sc. Goran Cukor, komentor, član red. prof. dr. sc. Jože Balič, komentor, član izv. prof. dr. sc. Dražen Bajić, član
Datum obrane:	09.10.2007.
Sastav Povjerenstva za obranu:	red. prof. dr. sc. Juraj Ljubetić, predsjednik izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, mentor, član red. prof. dr. sc. Goran Cukor, komentor, član red. prof. dr. sc. Jože Balič, komentor, član izv. prof. dr. sc. Dražen Bajić, član
Datum promocije:	_____



**MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA PARAMETARA OBRADNE PRIMJENOM  
EVOLUCIJSKIH ALGORITAMA KOD INTELIGENTNIH OBRADNIH SUSTAVA**

Zoran Jurković

Sveučilište u Rijeci  
Tehnički fakultet  
Hrvatska**Ključne riječi:** ModeliranjeVišekriterijska optimizacija  
Evolucijski algoritmi  
Taguchi metoda  
Tokarenje u više prolaza

**Sažetak:** U radu se analizira proces uzdužnog tokarenja (gruba i fina obrada) temeljem podataka prikupljenih eksperimentalnim istraživanjem za tri izlazne veličine procesa: glavnu silu rezanja ( $F_c$ ), hrapavost obradene površine ( $Ra$ ) i postojanost alata ( $T$ ). Dobiveni eksperimentalni podaci koriste se za razvoj matematičkih modela uporabom evolucijskih algoritama (genetski algoritam i genetsko programiranje) i matematičko-statističke metode. Optimalne vrijednosti parametara obrade ( $v_c$ ,  $f$  i  $a_p$ ) dobivene su primjenom Taguchi metode i uporabom genetskog algoritma. Temeljem postavljenih funkcija cilja i ograničenja razvijen je program za modeliranje i optimizaciju procesa uzdužnog tokarenja (*ModOpT*). Optimizacija je izvršena primjenom sljedećih kriterija: minimalnog vremena, minimalnog troška, maksimalnog profita i obradivosti materijala kao temelja višekriterijske optimizacije.

Rad nije objavljen.

Mentor:	izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, dipl. ing.
Komentori:	red. prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing. red. prof. dr. sc. Jože Balič, dipl. ing.
Povjerenstvo za ocjenu:	red. prof. dr. sc. Juraj Ljubetić, dipl. ing., predsjednik izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, dipl. ing., mentor, član red. prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing., komentor, član red. prof. dr. sc. Jože Balič, dipl. ing., komentor, član izv. prof. dr. sc. Dražen Bajić, dipl. ing., član
Povjerenstvo za obranu:	red. prof. dr. sc. Juraj Ljubetić, dipl. ing., predsjednik izv. prof. dr. sc. Miran Brezočnik, dipl. ing., mentor, član red. prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing., komentor, član red. prof. dr. sc. Jože Balič, dipl. ing., komentor, član izv. prof. dr. sc. Dražen Bajić, dipl. ing., član

Datum obrane: 09. listopad 2007.

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.  
(VII+177 stranica, 86 slika, 31 tablica, 147 bibliografska podatka, hrvatski jezik)



Code: DD

No.

UDC 621.941:621.7.01:519.24:004.89(043)

## MODELING AND OPTIMIZATION OF THE CUTTING PARAMETERS USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS AT THE INTELLIGENT MACHINING SYSTEMS

Zoran Jurković

University of Rijeka  
Faculty of Engineering  
Croatia

**Key words:** Modeling  
Multi-objective optimization  
Evolutionary algorithms  
Taguchi method  
Multi-pass turning

**Summary:** In the work were analyzed longitudinal turning process (multi-pass rough and finish) based on experimental acquisition data for three output process parameters: the cutting force ( $F_c$ ), the surface roughness ( $Ra$ ) and the tool life ( $T$ ). The obtained experimental data were used for development of mathematical models by evolutionary algorithms (genetic algorithm and genetic programming) and mathematical-statistical method. The optimal values of process parameters ( $v_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ) were obtained by application of Taguchi method and genetic algorithm. On the basis of established objective and constraint functions software for modeling and optimization of the longitudinal turning process (*ModOpT*) was developed. The optimization of machining process was achieved by using the following criteria: minimum production time per unit, minimum production costs per unit, maximum profit rate and machinability of materials as fundamental for the multi-objective optimization.

This thesis has not been published.

**Mentor:** Assoc. Prof. D. Sc. Miran Brezočnik  
**Co-mentors:** Prof. D. Sc. Goran Cukor  
 Prof. D. Sc. Jože Balič  
**Reviewers:** Prof. D. Sc. Juraj Ljubetić, chairmen  
 Assoc. Prof. D. Sc. Miran Brezočnik, mentor, member  
 Prof. D. Sc. Goran Cukor, co-mentor, member  
 Prof. D. Sc. Jože Balič, co-mentor, member  
 Assoc. Prof. D. Sc. Dražen Bajić, member  
**Examiners:** Prof. D. Sc. Juraj Ljubetić, chairmen  
 Assoc. Prof. D. Sc. Miran Brezočnik, mentor, member  
 Prof. D. Sc. Goran Cukor, co-mentor, member  
 Prof. D. Sc. Jože Balič, co-mentor, member  
 Assoc. Prof. D. Sc. Dražen Bajić, member

Presentation: October 09, 2007.

Degree conferred: \_\_\_\_\_

This thesis is deposited at Faculty of Engineering of the University of Rijeka.  
(VII+177 pages, 86 figures, 31 tables, 147 references, Croatian language)

II Sveučilište u Rijeci  
Tehnički fakultet  
Hrvatska

I Zoran Jurković

1. Modeliranje i optimizacija  
parametara obrade primjenom  
evolucijskih algoritama kod  
inteligentnih obradnih sustava

Ključne riječi:  
Modeliranje  
Višekriterijska optimizacija  
Evolucijski algoritmi  
Taguchi metoda  
Tokarenje u više prolaza

UDK 621.941:621.7.01:519.24:004.89(043)

DD



DD

UDC 621.941:621.7.01:519.24:004.89(043)

1. Modeling and Optimization of the  
Cutting Parameters Using  
Evolutionary Algorithms at the  
Intelligent Machining Systems

Key words:  
Modeling  
Multi-objective optimization  
Evolutionary algorithms  
Taguchi method  
Multi-pass turning

I Zoran Jurković

II University of Rijeka,  
Faculty of Engineering  
Croatia