

Optimizacija režima rada strojeva za obradu sa stalnom glavnom brzinom rezanja

OPTIMIZATION OF OPERATION MODE ON WOOD WORKING MACHINES WITH A CONSTANT MAIN CUTTING SPEED

Doc. dr. **Vlado Golja**, dipl. ing. strojarstva
Šumarski fakultet Zagreb

UDK 630*823

Prispjelo: 16. listopada 1987.
Prihvaćeno: 17. studenog 1987.

Izvorni znanstveni rad

Sažetak

Problem postavljanja radnih strojeva u optimalne režime rada nije jednostavan, s obzirom na utjecajne faktore značajne za optimizaciju procesa rezanja. U radu se iznosi postupak optimizacije procesa obrade drva na strojevima s konstantnom glavnom brzinom rezanja. Takvi su strojevi najčešće u primjeni pri obradi u drvnoj industriji. Uzeti su u razmatranje svi ograničavajući faktori koji se u procesu obrade mogu pojaviti (mogućnosti regulacije, kvaliteta reza, raspoložive snage, postojanost alata i dr.). Ideja se obrazlaže grafičkim prikazima, te postepenim razvijanjem matematičkog modela funkcije kriterija optimalnosti.

Ključne riječi: proces rezanja — matematički model funkcije kriterija optimalnosti.

Summary

Setting of working machines in an optimal mode of operation is not a simple task because of influential factors characteristic for optimization of cutting operation. This work demonstrates the method of optimization on the wood working machines with a constant main cutting speed. Such machines are mainly used in timber industry. All the limiting factors which might appear in the wood working operation (possibilities of control, cutting quality, available powers, stability of tools, etc) have been taken into consideration.

The idea has been explained by charts and by a gradual development of mathematical model of function criterion of optimization.

Key words: cutting process — mathematical model of function criterion of optimization.

1. UVOD

Racionalno korištenje sredstvima rada trajni je zadatak svakog privrednika. Taj zadatak nije ni lak ni jednostavan. Velik je broj utjecajnih faktora o kojima treba voditi računa. Tek u određenom međusobnom odnosu oni uzrokuju optimalan tok korištenja sredstvima rada. Potreba za interdisciplinarnošću pristupa i rješavanja problema još više otežava pronalaženje optimalnih rješenja. Okupljanje i ujedinjavanje potrebnih znanja, te njihovo usmjeravanje k jedinstvenom cilju, predstavlja jednu od najvećih prepreka u određenju optimalnih uvjeta rada radnih strojeva. U ovom se radu govori o postupku optimiziranja tehnološkog postupka na strojevima za obradu drva rezanjem.

Optimiziranje obrade drva rezanjem rijetko je proučavano. Dok se za postupke obrade metala skidanjem strugotine mogu navesti mnogi radovi u kojima se govori o tom problemu, to se ne može reći za obradu drva. Razloga za to ima više. Prije svega, drvna industrija je privredna grana s daleko manjom industrijskom tradicijom od indu-

strije za preradu metala. Nadalje, mogućnosti optimiziranja procesa obrade drva rezanjem manje su od onih u preradi metala. Zahtjevi za kvalitetom površine, tolerancijom oblika i dimenzija, bitno su oštriji pri preradi metala, uvjeti rezanja su teško usporedivi, kao što je neusporediva postojanost alata itd. Međutim, moguća poboljšanja obrade drva postupkom rezanja još uvijek su velika, te se tom problemu treba posvetiti dužna pažnja.

U radu su uzeti u obzir samo oni činitelji koji utječu na optimizaciju s tehničko-tehnološkog stajališta za vrijeme efektivnog rada stroja. Pritom se pod vremenom efektivnog rada podrazumijevaju pomoćna vremena i vrijeme samog rezanja.

2. DEFINICIJA PROBLEMA

U načelu se svaki proizvodni proces može smatrati pretvorbenim procesom u kojem se koristan izlaz dobiva transformacijom ulaznih veličina [1, 2, 3, 4]. Po analogiji s pretvorbenim procesima u kojima se vrši konverzija energije, može se i pri procesu obrade drva rezanjem govoriti o iskoristivosti. Iskoristivost procesa izražava se omjerom

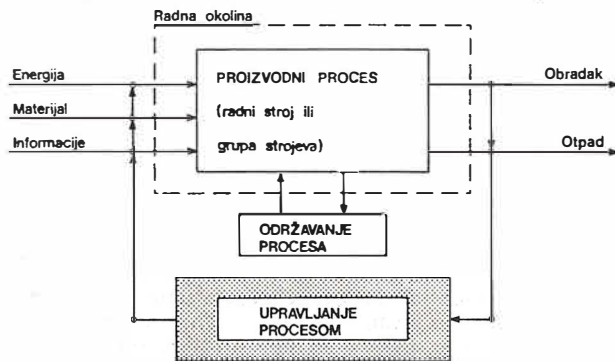
* Referat na XVIII. kongresu IUFRO, Ljubljana 1986. god.

korisnog izlaza i ukupnog ulaza u proces [2, 5, 6]. Shematski prikaz procesa je dan na slici 1, a njegova se valjanost može opisati slijedećim izrazom:

$$\eta = \frac{\sum I_k}{\sum U} \quad (11)$$

— gdje je:

I_k — suma korisnih izlaznih veličina,
 U — suma ukupnog ulaza u proces



Slika 1. Shematski prikaz procesa obrade drva rezanjem
 Fig. 1 Scheme of wood working process by cutting

Razumljivo je da se kao cilj postavlja ostvarenje najveće iskoristivosti procesa u zadanim uvjetima.

U radu se tretiraju samo oni procesi rezanja koji imaju mogućnost regulacije samo posmične brzine, dok glavnu brzinu rezanja (brzinu reznog alata) zadržavaju konstantnom. Ovakvi procesi rezanja su najzastupljeniji u drvnoj industriji. Sve veličine koje ulaze u funkciju kriterija optimalnosti, tj. u iskoristivost procesa, treba izraziti u ovisnosti o posmičnoj brzini. Kod kontinuirane regulacije posmične brzine, optimalna iskoristivost se određuje traženjem ekstrema funkcije kriterija optimalnosti $\eta = f(v_p)$.

Maksimume funkcije $\eta = f(v_p)$ u području mogućnosti regulacije posmične brzine dobit će se na opće poznati način deriviranjem η' po posmičnoj brzini v_p , tj.:

$$\eta' = \frac{d\eta}{dv_p} \quad (12)$$

te traženjem vrijednosti v_p koje zadovoljavaju uvjet

$$\eta' = 0 \quad (13)$$

Drugom derivacijom iskoristivosti pretvorbenog postupka η'' , te uvrštavanjem vrijednosti za v_p , koje su dobivene kao nul-točke prve derivacije, naći će se maksimumi $\eta = f(v_p)$, za koje je:

$$\eta'' < 0 \quad (14)$$

Kod diskontinuirane promjene posmične brzine, i funkcija kriterija optimalnosti bit će diskontinuirana i izražena diskretnim skupom točaka. Optimalnoj posmičnoj brzini pripadat će i odgovarajuća maksimalna vrijednost funkcije kriterija optimalnosti.

3. ANALIZA UKUPNOG ULAZA I KORISNOG IZLAZA

Na osnovi prikaza na slici 1, očito je da optimum treba tražiti u jedinstvu triju veličina koje ulaze u proces unutar ograničenja koje taj proces omeđuje. Tri osnovne veličine koje ulaze u proces jesu:

- stroj sa svojim energetske normativima u ovisnosti o posmičnoj brzini,
- alat sa svojom postojanošću u ovisnosti o posmičnoj brzini, te
- poslužilac stroja i radna okolina.

Neminovno je da se već u ovom trenutku odlučuje za period (vrijeme) optimizacije. Vrijeme postojanosti alata može se uzeti kao vremenski segment u kojem se optimizira postupak, s obzirom da je ukupno vrijeme odvijanja procesa u stvari suma niza djelića vremena postojanosti i vremena zamjene alata. Ostali gubici vremena, koji nisu posljedica promjena posmične brzine, nemaju utjecaja ni na izbor optimalne posmične brzine, te se neće razmatrati.

3.1. Korisni izlaz

Korisni izlaz moguće je izraziti na više načina:

- vrijednošću proizvoda u jedinici vremena u ovisnosti o posmičnoj brzini,
- obrađenom površinom u jedinici vremena u ovisnosti o posmičnoj brzini,
- duljinom reza u jedinici vremena u ovisnosti o posmičnoj brzini i sl.

Svejedno je na koji se način izražava koristan izlaz, iako će u raznim slučajevima funkcija kriterija optimalnosti biti izražena u drugačijim jedinicama. Pritom će postupak izbora optimuma u pojedinom slučaju ostati isti kao i vrijednost posmične brzine koja daje optimalnu iskoristivost (η_{opt}). Pretpostavimo da je koristan izlaz izražen obrađenom površinom u jedinici vremena, kakav je slučaj kod blanjalica. Tada ukupni koristan izlaz u promatranom vremenskom segmentu iznosi:

$$I = i \cdot t_a \quad [m^2] \quad (15)$$

— gdje je:

I — koristan izlaz u jedinici vremena, m^2/s ,
 t_a — postojanost alata, s

Nadalje se može iskazati da je izlaz u jedinici vremena:

$$i = v_p \cdot b \quad [m^2/s] \quad (16)$$

— gdje je:

v_p — posmična brzina, m/s

b — širina reznog brida, m

Uvrštavanjem (6) i (5) dobiva se konačni izraz za koristan izlaz:

$$l = v_o \cdot b \cdot t_e \quad [m^2] \quad /17/$$

3.2. Ukupni ulaz u proces

3.2.1. Energetski normativi

Ukupno zahtijevanu mehaničku energiju koju treba osigurati da se izvrši rezanje treba dijeliti u dva dijela. Prvi dio predstavlja energiju potrebnu za svladavanje vlastitih otpora i otpora pomaka u vremenu kada stroj ne reže. Drugi dio se odnosi na ukupnu energiju koja se troši pri samom rezanju. Predmet razmatranja su oba dijela energije te njihova suma u vremenu efektivnog vremena trajanja alata.

3.2.1.1. Energija vlastitih otpora i otpora pomaka

U prvom redu razmatra se snaga za svladavanje vlastitih otpora i otpora pomaka. Budući da se govori o strojevima koji imaju konstantnu glavnu brzinu rezanja, to će i snaga vlastitih otpora biti stalna. Označi li se s P_o snaga vlastitih otpora, može se pisati da je:

$$P_o = \text{const.} \quad [W] \quad /18/$$

Snaga potrebna za svladavanje otpora pomaka zasigurno je funkcija brzine pomaka, budući da je snaga jednaka umnošku sile otpora i brzine svladavanja sile, tj.

$$P_p = F_{op} \cdot v_p \quad [W] \quad /19/$$

— gdje je:

F_{op} — sila otpora pomaka,

v_p — posmična brzina.

Ukupna snaga potrebna za svladavanje vlastitih otpora i otpora pomaka jednaka je sumi (8) i (9), tj.:

$$P_{uo} = P_o + P_p \quad [W] \quad /10/$$

odnosno:

$$P_{uo} = P_o + F_{op} \cdot v_p \quad [W] \quad /11/$$

Energija koju je potrebno osigurati u vremenu postojanosti alata za svladavanje vlastitih otpora i otpora pomaka, u vremenu efektivnog vijeka trajanja alata, može se dobiti na slijedeći način:

$$E_{uo} = P_{uo} \cdot \sum t_o \quad [J] \quad /12/$$

— gdje je:

$\sum t_o$ — suma pomoćnih vremena.

Uvrštenjem (11) u (12) dobiva se

$$E_{uo} = (P_o + F_{op} \cdot v_p) \cdot \sum t_o \quad [J] \quad /13/$$

Suma pomoćnih vremena može se izraziti na slijedeći način:

$$\sum t_o = \frac{t_e}{t_i} \cdot t_p \quad [h] \quad /14/$$

— gdje je:

t_e — efektivno vrijeme trajanja alata, postojanost alata,

t_i — tehnološke vrijeme.

Uvrštenjem (14) u (13) dobiva se

$$E_{uo} = (P_o + F_{op} \cdot v_p) \cdot \left(\frac{t_e}{t_i} \cdot t_p\right) \quad [J] \quad /15/$$

Ako se snaga ukupnih otpora označi s :

$$P_{uo} = P_o + F_{op} \cdot v_p \quad [W] \quad /16/$$

onda se relacija (15) može napisati u obliku:

$$E_{uo} = P_{uo} \cdot \left(\frac{t_e}{t_i} \cdot t_p\right) \quad [J] \quad /17/$$

3.2.1.2. Ukupna energija rezanja

Ukupna energija rezanja potrebna je jednim dijelom za svladavanje vlastitih otpora pomaka u toku rezanja, a drugim dijelom za neposrednu radnju rezanja. Stoga je ukupno potrebna energija u vremenu postojanosti alata

$$E_{ur} = t_e \cdot (P_o + F_{op} \cdot v_p + P_r) \quad [J] \quad /18/$$

— gdje je:

t_e — vrijeme postojanosti alata

P_r — snaga rezanja.

Nema razloga da se za potrebe optimizacije režima rada mjere pojedine komponente snage; dovoljno je odrediti lako izmjenjivu ukupnu snagu. Stoga se izraz u (16) može pojednostaviti:

$$E_{ur} = t_e \cdot P_{ur} \quad [J] \quad /19/$$

gdje je:

P_{ur} — ukupna snaga za vrijeme rezanja.

Ukupna energija koja će se utrošiti za vrijeme efektivnog rada alata može se sada izraziti na slijedeći način:

$$E_u = E_{uo} + E_{ur} \quad [J] \quad /20/$$

Uvrštenjem (17) i (19) u (20) dobiva se:

$$E_u = P_{uo} \cdot \frac{t_e}{t_i} \cdot t_p + P_{ur} \cdot t_e \quad [J] \quad /21/$$

daljim sređenjem

$$E_u = t_e \cdot \left(P_{uo} \cdot \frac{t_p}{t_i} + P_{ur}\right) \quad [J] \quad /22/$$

Množenjem ukupno utrošene energije s jediničnom cijenom dobiva se vrijednost ukupno utrošene energije, odnosno:

$$C_e = E_u \cdot c_e = c_e \cdot t_e \cdot \left(P_{uo} \cdot \frac{t_p}{t_i} + P_{ur}\right) \quad \text{n.j.} \quad /23/$$

gdje je:

C_e — cijena po jedinici energije
n. j. — novčanih jedinica.

3.2.2 Vrijednost alata

U drvnoj industriji najčešće se koristi alatima koji se, nakon zatupljenja, oštrenjem osposobljavanju za ponovnu upotrebu. Smanjenje vrijednosti alata zatupljenjem može se izračunati na slijedeći način:

$$c_a = \frac{C_a}{B_a} \quad \text{n.j.} \quad /24/$$

gdje je:

C_a — nabavna vrijednost alata
 B_a — dopušteni broj oštrenja alata

Dopušteni broj oštrenja moguće je izračunati iz odnosa

$$B_a = \frac{l}{s} \quad /25/$$

gdje je:

l — ukupna duljina dodatka za oštrenje
 s — debljina sloja materijala koji se skida po jednom oštrenju

Uvrštenjem (25) u (24) dobiva se:

$$c_a = \frac{C_a \cdot s}{l} \quad \text{n.j.} \quad /26/$$

3.2.3 Vrijednost stroja

Ako se uzme proračunska cijena stroja po jedinici vremena (pri čemu su u tu cijenu stroja uključeni i troškovi rada), onda se ukupna vrijednost, koja se ulaže u proces u vremenu postojanosti alata, može izraziti na slijedeći način:

$$C_s = c_s \cdot (t_e + t_a) \quad \text{n.j.} \quad /27/$$

gdje je:

t_a — vrijeme zamjene alata
 c_s — kalkulacijski troškovi stroja u jedinici vremena.

Ukupni ulaz u proces u vremenu postojanosti alata može se izraziti sumom pojedinih stavki, odnosno:

$$\sum U = E_u + C_a + C_s \quad \text{n.j.} \quad /28/$$

Uvrštavanjem se dobiva:

$$\sum U = c_e \cdot t_e \cdot (P_{u0} \cdot \frac{t_p}{t_i} + P_{ur}) + \frac{C_a \cdot s}{l} + c_s \cdot (t_e + t_a) \quad \text{n.j.} \quad /29/$$

4. IZRAČUNAVANJE FUNKCIJE KRITERIJA

Nakon provedene analize ukupnog ulaza i ukupnog izlaza iz procesa, može se pristupiti izračunavanju funkcije kriterija. Treba podsjetiti na izraz funkcije kriterija iz (1):

$$\eta = \frac{\sum U_i}{\sum U}$$

Uvrštenjem vrijednosti utvrđenih analizom dobiva se

$$\eta = \frac{v_p \cdot b \cdot t_e}{c_e \cdot t_e \cdot (P_{u0} \cdot \frac{t_p}{t_i} + P_{ur}) + \frac{C_a \cdot s}{l} + c_s \cdot (t_e + t_a)} \quad [\text{m}^2/\text{n.j.}] /30/$$

Nadalje se može pisati da je:

$$\eta = \frac{v_p \cdot b \cdot t_e}{c_e \cdot t_e \cdot (P_{u0} \cdot \frac{t_p}{t_i} + P_{ur}) + \frac{C_a \cdot s}{l} + c_s \cdot t_a + c_s \cdot t_e} \quad [\text{m}^2/\text{n.j.}] /31/$$

Razlozi zbog kojih se funkcija kriterija označava na ovakav način navest će se kasnije. Za sada tek treba primijetiti da su u relaciji (31) slijedeće veličine ovisne o posmičnoj brzini:

t_e — efektivno vrijeme rada alata ili postojanost alata,

P_{ou} — snaga ukupnih otpora (samo dijelom koji se odnosi na P_2)

P_{ur} — ukupna snaga rezanja.

Sve ostale veličine su konstantne. Zbog toga se može jednadžba (31) napisati u slijedećem obliku:

$$\eta = \frac{v_p \cdot b \cdot f_1(v_p)}{c_e \cdot f_1(v_p) \cdot (f_2(v_p) \cdot \frac{t_p}{t_i} + f_3(v_p)) + K + c_s \cdot f_1(v_p)} \quad [\text{m}^2/\text{n.j.}] /32/$$

gdje je:

K — konstanta s vrijednošću $c_s \cdot t_a + \frac{C_a \cdot s}{l}$

$f_1(v_p) = t_e$ — efektivno vrijeme rada,

$f_2(v_p) = P_{uo}$ — snaga ukupnih otpora,

$f_3(v_p) = P_{ur}$ — ukupna snaga rezanja.

Funkcije $f_1(v_p)$, $f_2(v_p)$ i $f_3(v_p)$ karakteristike su uvjeta u kojima se vrši obrada. Ovisne o strojevima, vrsti obrade, stanju materijala, stanju alata itd. To znači da je potrebno vršiti neposredna mjerenja i optimizaciju za svaki stroj posebno. Ono što je općeg karaktera i što ne ovisi o samom stroju te se može istraživati neovisno, kao što se i radi pri obradi drugih materijala, jest $f_1(v_p)$. U tu svrhu može se poslužiti općom Taylerovom jednadžbom za postojanost alata:

$$t_p = C \cdot v^{\alpha} \cdot s_z^{\beta} \cdot a^{\gamma} \quad [\text{min}] \quad /33/$$

gdje je:

C — konstanta,

v — glavna brzina rezanja (u promatranom slučaju isto tako konstanta),

s_z — pomak po reznom bridu koji se dobiva iz odnosa

$$s_z = \frac{v_p}{n \cdot i}$$

Vrijednosti eksponenata u relaciji (33) takve su da se utjecaj pomaka po zubu, a posebno utjecaj dubine rezanja u dijelu ispitivanja, zanemaruju. Stoga se relacija (33) primjenjuje u pojednostavljenom obliku:

$$t_r = C_1 \cdot v^\alpha \quad [\text{min}] \quad /34/$$

Pomak po zubu je po utjecaju na postojanost alata na drugom mjestu te ako se i taj faktor uzima kao utjecajni, relacija (34) može se proširiti:

$$t_r = C_2 \cdot v^\alpha \cdot s_z^\beta \quad [\text{min}] \quad /35/$$

Za promatrani slučaj, kod kojeg je glavna brzina rezanja konstantna, može se relacija (35) napisati u obliku:

$$t_r = C_3 \cdot s_z^\beta \quad [\text{min}] \quad /36/$$

Već je ranije rečeno da je vrijeme postojanosti alata ujedno i vrijeme efektivnog rada.

Povezanost pomaka po zubu i posmične brzine može se izraziti na slijedeći način:

$$s_z = \frac{v_p}{n \cdot i} \quad [\text{mm/zubu}] \quad /37/$$

gdje je:

n — broj okretaja vretena,

i — broj reznih oštrica na obodu alata.

Nadalje se može iz relacije (37), uzimajući za n i i konstante, napisati:

$$v_p = k \cdot s_z \quad [\text{m/s}] \quad /38/$$

gdje je $k = n \cdot i$.

Uvrštenjem (38) u (36) dobiva se:

$$t_r = C_4 \cdot v_p^\beta \quad [\text{min}] \quad /39/$$

i konačno uvrštenjem (33) u (32) dobiva se funkcija kriterija kako slijedi:

$$\eta = \frac{b \cdot C_4 \cdot v_p^{\beta+1}}{c_e \cdot C_4 \cdot v_p^\beta \cdot (f_2(v_p) \cdot \frac{t_p}{t_1} + f_3(v_p)) + K + c_s \cdot C_4 \cdot v_p^\beta} \quad [\text{m}^2/\text{n.j.}] \quad /40/$$

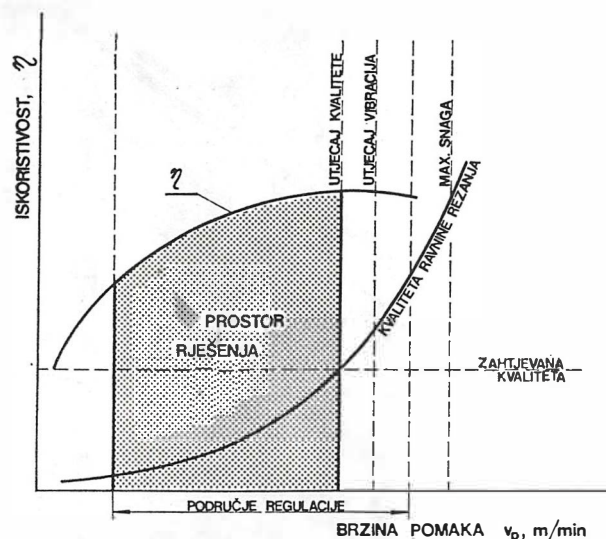
Ne određuje se prva i druga derivacija funkcije kriterija η , budući da za to treba poznavati funkciju $f_2(v_p)$ i $f_3(v_p)$, koje su karakteristike određenog tehnološkog procesa, kako je to ranije rečeno.

5. TEHNOLOŠKA OGRANIČENJA

Do sada su razmatranja vrijednosti funkcije kriterija provedena ne uzimajući u obzir nikakva ograničenja. Stoga će se sada u razmatranja uključiti i ograničenja koja u procesu postoje. Ograničenja se mogu svrstati u slijedeće grupe:

- ograničenja u vezi sa zahtijevanom kvalitetom površine rezanja;
- ograničenja u vezi s mogućnosti regulacije;
- ograničenja s obzirom na raspoloživu snagu;
- ostala ograničenja (buka, vibracije, sigurnost na radu i dr.).

Ako se pretpostavi tok funkcije kriterija, onda se navedena ograničenja mogu prikazati grafički kako to pokazuje slika 2.



Slika 2. Prikaz utjecaja ograničenja na području određenosti funkcije kriterija

Fig. 2 Scheme of limiting factors in the area of function criterion determination

To nadalje znači da će područje definiranosti funkcije biti u području omeđenom ograničenjima.

6. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak optimizacije tehnološkog procesa u danim uvjetima. Opisani postupak znatno umanjuje proizvodne troškove. Međutim, optimizacija tehnološkog procesa u drvnjoj industriji nije lako provediva iz slijedećih razloga:

- u drvnjoj industriji nije puno učinjeno na području ispitivanja postojanosti alata,
- još manje je napravljeno na formiranje tehnološke banke podataka koja bi trebala da sadrži relevantne podatke za postupak optimizacije (specifične otpore rezanja, snagu, postojanost alata u zadanim uvjetima itd.).

Oformljenje takve banke podataka, njeno ažuriranje i proširivanje, predstavlja jednu od zadataka inženjera u drvnjoj industriji.

LITERATURA:

- [1] AYRES, R. U.: Resources, Environment and Economics, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [2] AYRES, R. U., KNEESE, A. V.: Production, Consumption and Externalities, American Economist, 59(3), 1969.
- [3] ĐURASEVIC, A.: Uvod u teoriju proizvodnje, Zagreb 1972.
- [4] GOLJA, V.: Optimizacija vijeka trajanja strojarškog proizvoda. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Doktorska disertacija, Zagreb 1984.
- [5] GOLJA, V.: Optimization of Operating Conditions on Machines with Constant Cutting Speed. Proceedings, Div. 5 XVIII IUFRO Congress, Ljubljana 1986.
- [6] PEKLENIK, J.: Tehnološki informacijski sistemi u proizvodnji, Informatički sistemi za tehnologiju obrade, Ljubljana 1977.
- [7] SLUGA, A.: Optimiziranje obdelovalnih pogojev pri struženju, Informatički sistemi za tehnologiju obrade, Ljubljana 1977.
- [8] VUKELJA, D., MIŠKOVIC, A.: Inženjerske metode optimizacije, IRO Građevinska knjiga, Beograd 1985.
- [9] BARASH, M. M.: Automatic Planning of Optimal Metal-Cutting Operations and Its Effects on Machine Tool Design, Transactions of ASME, May 1971.

Recenzent: prof. dr S. Sever