

# Optimizacija učina viševretenskih glodalica za obradu drva

---

**Risović, Stjepan**

*Source / Izvornik:* **Glasnik za šumske pokuse: Annales Experimentis Silvarum Culturae Provehendis, 1995, 32, 129 - 168**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:600504>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-08**



*Repository / Repozitorij:*

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



STJEPAN RISOVIĆ

## OPTIMIZACIJA UČINA VIŠEVRETENSKIH GLODALICA ZA OBRADBU DRVA

### OPTIMIZATION OF THE WOODWORKING MULTISPINDLE MILLING MACHINES EFFICIENCY

Prispjelo: 5.01.1995.

Prihvaćeno: 01.02.1995.

U radu se iznose rezultati istraživanja obradbe drva glodanjem. Eksperimentalni dio pokusa obavljen je na viševretenskim glodalicama, kakve se obično upotrebljavaju za obradbu drva odvajanjem čestica u drvnoj industriji. Sva su ispitivanja obavljena prema višefaktornom planu pokusa na dvije vrste drva, na bukovini i na jelovini. Pritom je u potpunosti poštovan postupak koji je uvriježen pri obradbi drva: glodala ne mijenjaju frekvenciju vrtnje ni svoj položaj tijekom rada, obradak se u jednom prolazu giba stalnom posmičnom brzinom. Ukupno su varirani posmaci u tri razine za tri različite dubine glodanja. Osim kontrole smjera obradbe, temperature i mokrine drva pojedinačnim mjerenjima potvrđena je proračunska hrpaost površine obratka u granicama od 4  $\mu\text{m}$  do 29  $\mu\text{m}$ .

Za sve provedene pokuse utvrđene su čvršće sveze proučavanih veličina pri glodanju jelovine negoli obradbi bukovine, npr. za ovisnost jediničnog otpora glodanja u ovisnosti o posmičnoj brzini i dr. Inače su jedinični otpori glodanja bukovine veći za oko 55 % od onih utvrđenih za jelovinu pri sličnim eksploatacijskim uvjetima.

Najveći utrošak jedinične energije pri dubini glodanja bukovine od 7,5 mm iznosi 120,3 J/mm, a za jelovinu pri dubini glodanja od 8 mm 113,1 J/mm. Značajnije su razlike utvrđene pri najmanjim ispitnim dubinama glodanja; za bukovinu je jedinična energija glodanja iznosila 47,7 J/mm, a za jelovinu 29,2 J/mm. Uz svekoliku korisnost glodanja koja određuje optimum obradbe, može se ustvrditi da je ta korisnost proporcionalna s posmičnom brzinom i jediničnom širinom obradbe, a obrnuto proporcionalna sa zbrojem vrijednosti ulaznih procesnih veličina (alata, stroja, poslužitelja i energije) u jedinici vremena. Kao osnova za osnutak vlastitoga modela glodanja, uz pridržavanje znanih općih načela, uzeti su parametri koji su potekli iz teorijske analize ove vrste obradbe drva.

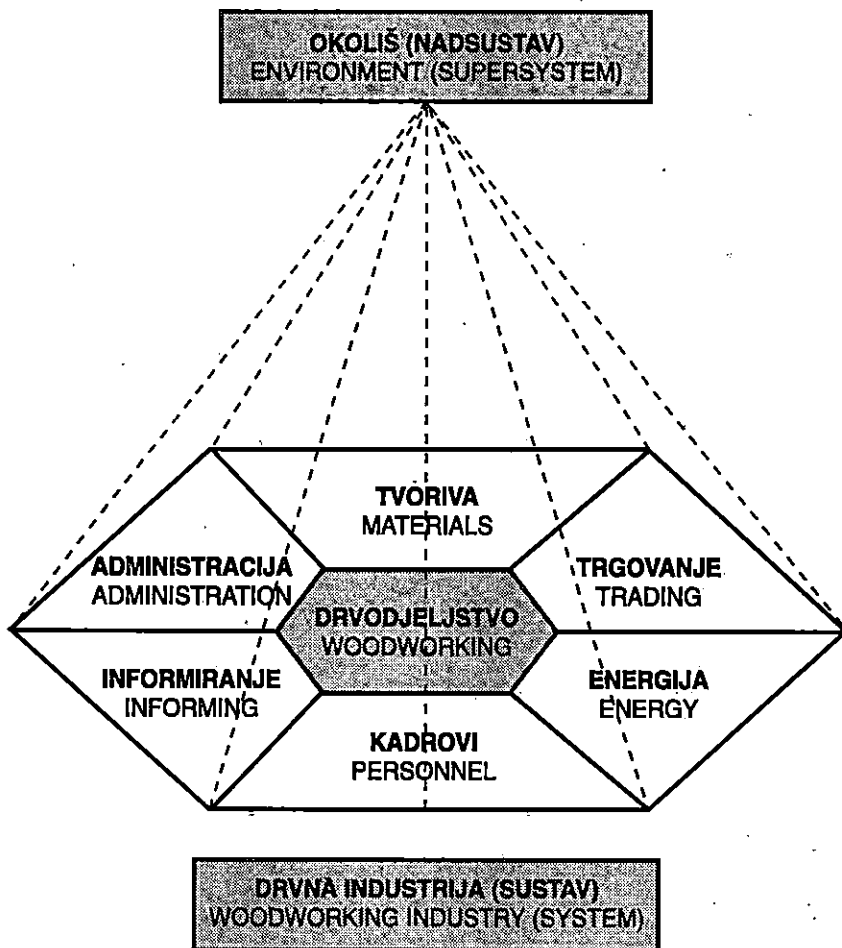
**Ključne riječi:** optimizacija, učin, obradba drva, glodanje

## UVOD I PROBLEMATIKA — INTRODUCTION AND ISSUES

O uspješnosti obradbe drva u mnogome ovisi svekolika djelotvornost drvne industrije. U drvodjeljskim istraživanjima sve se više susreće tzv. sustavna analiza koja omogućuje bolje razumijevanje sveza drvne industrije i njezinih podsustava. Važna je i višestruka povezanost između sastavnica drvne industrije te drvne industrije kao gospodarske grane sa svojim nadsustavom — okolišem (okruženjem) čiji je sastavni dio (sl. 1).

Terminološko određenje sustava *drvena industrija* u mnogim je sastavnicama dvojbena, pa i proturječno. Ipak, neke dvojbe otklanjaju se definicijama u rječnicima i jezičnim savjetnicima. Za mnoge tek ostaje da se istraže, isprave, dopune. Dio sastavnica sustava *drvene industrije* poznat je i u drugim industrijskim gospodarskim granama, koje u mijeni, prijenosu i pohrani kao ulaz/izlaz imaju tvar/tvorivo, energiju i informaciju, kako to navodi Čatić (1992).

Da bi se navedeno unapređivalo, ili barem održalo, mnogostrano se istražuje drvo, obradbeni, postupci i posljedici obradbe — sve s tehničkoga, tehnološkoga, gospodarstvenoga i drugih stajališta.



Sl. — Fig. 1. Shematski prikaz podsustava drvodjeljstvo u sklopu sustava drvene industrije i nadsustava okoliš — The woodworkingsubsystem in the framework of the woodworkings industry system and the environment supersystem

## SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA — RESEARCH OBJECT AND INTENTION

Važni dio drvodjelske djelatnosti je mehanička obradba drva. Kao prilog istraživačkim naporima na tom uskom području drvnotehnološkoga znanstva određena je svrha, ono što se želi postići radom. Tako je za obradbu drva u ciljeve istraživanja uvršteno: raščlanjivanje i ocjenjivanje postojećih sustava glavnih i posmičnih prigona viševrećenskih glodalica, raščlanjivanje i ocjenjivanje posmičnih prigona glodalica za drvo, utvrđenje čimbenika i pokazatelja učina viševrećenskih glodalica, izradba prijedloga za optimizaciju učina glodalica, izradba optimizacijskoga matematičkoga modela, pokus glodanja drva raznih svojstava s različitim dubinama glodanja i posmična brzina, provjera matematičkoga modela s pomoću eksperimentom utvrđenih rezultata učina glodanja, izradba zaključaka i preporuka za dalje postupanje pri obradbi drva s viševrećenskim glodalicama.

## PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA OBRADBE DRVA A REVIEW OF THE WOODWORKING RESEARCH CONDUCTED BY NOW

Značajna istraživanja obradbe drva provedena su tek poslije šezdesetih godina u srednjoj Europi (Njemačka) i Sjevernoj Americi (SAD). Velik broj radova iz njemačkih instituta predvodi Pahlitzsch i Puttkammer (1972, 1973, 1974) istraživanjem mjerenja tračnih pila. Hribar (1968) istražuje sile na alatu za obradbu drva, uz metodologiju određivanja sila rezanjem, te naglašenim proučavanjem anizotropnosti drvne tvari.

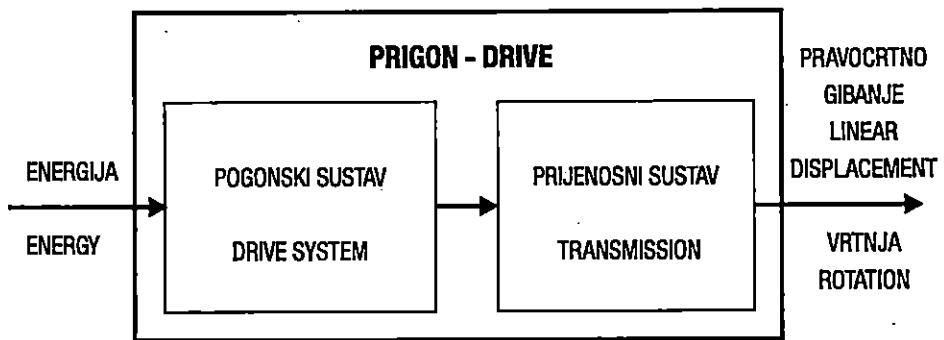
Proučavanje glodanja/blanjanja drva započelo je značajnije šezdesetih godina sa sve većim zahtjevima. Goodchild se (1962) bavio teorijom rezanja, određenjem elemenata oštrice noža te energetske problemima. Slično je u to vrijeme radio i Lisičan (1965) proučavajući neke probleme nadmjere pri obradbi glodanjem. Endersby (1964) proučava blanjanje drva četinjača, a Goodchild (1967) proučava temeljne čimbenike blanjanja: snagu, posmak, kutove rezanja, jediničnu snagu, zahvat, dobrotu obradene površine. Istražuju se i druge pojave i načini rada. Salje i Druckhammer (1987) mjere buku obradnih strojeva za drvo, Wittmann (1983) rješava dilemu brusiti ili blanjati, Rosenheim (1985) proučava automatizirane fleksibilne sustave za obradbu drva. Golja (1986) daje uvid u energetske povoljnost i proizvodnost piljenja laserom.

Salje i dr. (1985) iznose rezultate povećanja gospodarstvenosti tzv. kosim glodanjem (sustav glodala pod različitim kutovima u odnosu na posmično gibanje obratka). Autori istražuju rast kakvoće obrađenih ploha. Maier (1985) pokušava proračunom obuhvatiti probleme glodanja raznih vrsta drva. Na području istraživanja optimizacije proizvodnih procesa u preradbi drva spadaju i radovi nastali istraživanjem u vremenu 1981 — 1985. Tu se Ljuljka (1985) bavi optimizacijom proizvodnih procesa u preradbi drva, Sertić (1985) optimizacijom procesa mehaničko-kemijske tehnologije, Pavlin (1985) optimizacijom hidrotermičke obradbe drva i drugih energetskih procesa, a Figurić (1985) kriterijima optimizacije pri oblikovanju organizacijskih sustava. Golja (1987) iznosi rezultate optimizacije režima rada strojeva za obradbu drva sa stalnom

glavnom brzinom rezanja, uz naglasak na činjenici da optimizacija tehnološkog procesa u drvenoj industriji nije lako provediva.

## ANALIZA SUSTAVA GLAVNOGA I POSMIČNOG PRIGONA VIŠEVRETENSKIH GLODALICA ZA OBRADBU DRVA THE ANALYSIS OF THE MAIN AND FEED DRIVE OF WOODWORKING MULTISPINDLE MILLING MACHINE

Ako se na obradnomu stroju želi kakvočno i ekonomično obrađivati tvari i tvorevine odvajanjem čestica, osim alata, obratka i informacija, potrebno je osigurati energiju i odgovarajuće promjenljivo gibanje. Ovo se zadnje ostvaruje raznim prigonima. Prema Mulcu (1991) prigon se može definirati kao pretvornik gibanja pomoću kojega se ostvaruje aktivno željeno gibanje pojedinih sustava, pa se može podijeliti na *pogonski i prijenosni sustav* (sl. 2). Prvi alatni strojevi upotrebljavali su za glavni pogonski sustav jednobrzinske ili višebzinske elektromotore, koji su uz primjenu raznih zupčatih prijenosnika omogućavali traženu frekvenciju vrtnje. U posljednje se vrijeme razvojem elektroničkih regulacijskih sklopova sve više za glavni pogon upotrebljavaju: asinkroni motori s pretvaralom napona i frekvencije te ugradbeni asinkroni motori s pretvaralom napona i frekvencije. Njihove su osnovne značajke: vrlo velike frekvencije vrtnje (do  $20\ 000\ \text{min}^{-1}$ ), iznimno veliko regulacijsko područje frekvencije vrtnje (do  $1 : 4\ 000\ 000$ ), velika krutost, mala odstupanja frekvencije vrtnje ( $\pm 0,0001\ \text{min}^{-1}$ ), široko područje stalne snage ( $1 : 3,3$  do  $1 : 20$ ), minimalni zahtjevi za održavanjem, minimalni toplinski utjecaj na mjesto obradbe i dr.



Sl. — Fig. 2. Struktura prigona glavnoga i posmičnog pogona — Main and feed drive scheme

Prema kinematici obradnoga stroja i međusobnom odnosu alata i obratka osim glavnoga gibanja postoji i *pomoćno gibanje*. Ono služi za obavljanje određenih zadaća obradbe bez koje se ne bi moglo obaviti odvajanje čestice. Pomoćno gibanje se prema Šavaru (1990) dijeli na:

a) posmak koji se ostvaruje posmičnom brzinom, a uvijek je okomit na brzinu rezanja,

b) ulazno kretanje koje je potrebno samo na početku rada kada se alat pomiče do potrebne dubine rezanja.

Posmično gibanje pri glodanju, u odnosu na glavno, može biti *nezavisno, uzdužno* i *neprekinuto*. Tijek inženjerskoga djelovanja doveo je do razvoja sljedećih pogonskih sustava: motori s permanentnim magnetima, elektronički komutirani motori, električni servopogoni, koračni motor i dr.

## DEFINIRANJE UČINA ALATNIH STROJEVA DEFINITION OF WOODWORKING MACHINES EFFICIENCY

Teorija optimizacije procesa obradbe drva odvajanjem čestica može se temeljiti na kriteriju najveće proizvodnosti (učina) ili kriteriju najmanjih troškova.

Prema Cebalu (1990), a primijenjeno u uvjetima obradbe drva na viševretnoj glodalici, može se napisati funkcija cilja

$$\Phi = C \cdot \frac{Q_{od}}{T_{od}} \Rightarrow \text{maks.} \quad (1)$$

Optimiranje režima i vremena obradbe podjednako je važno za proizvodni proces na sustavima s klasičnim ili računalnim upravljanjem.

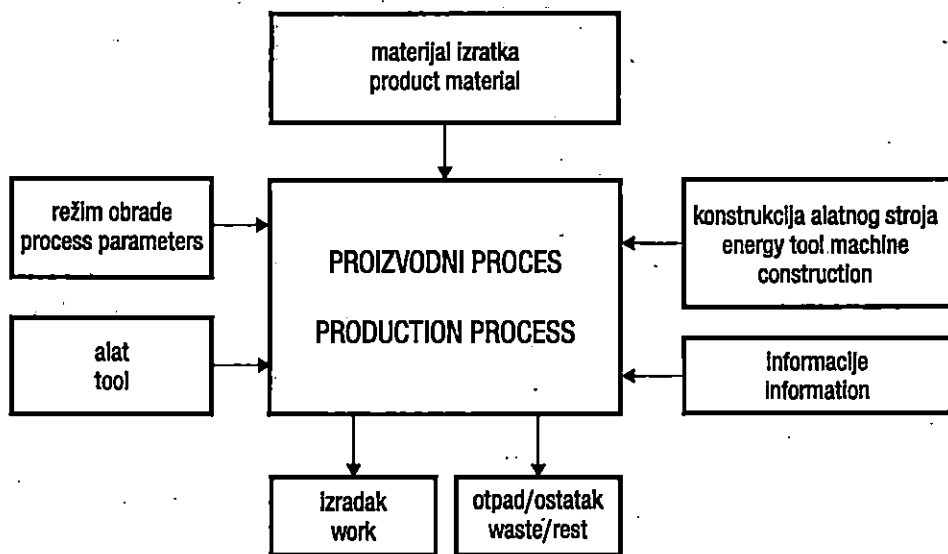
Poznato je da se optimiranje učina može obaviti metodom linearnoga i nelinearnog programiranja. Ako se to čini linearnim programiranjem, model optimizacije, odnosno funkcija cilja, može imati linearnu formu, što važi i za ograničenja.

Funkciju cilja prate i funkcije ograničenja alatnog stroja, alata, pripremla, energije, informacije i dr.

Kako procesi obradbe odvajanjem čestica imaju uglavnom nelinearan oblik, u složenijem je pristupu optimizaciju uputno i potrebno obaviti metodom nelinearnog programiranja.

## KARAKTERISTIČNI ČIMBENICI PROIZVODNOG PROCESA U SVEZI S UČINOM VIŠEVRETENSKIH GLODALICA CHARACTERISTIC FACTORS OF PRODUCTION PROCESS INFLUENCING THE EFFICIENCY OF MULTISPINDLE MILLING MACHINES

Figurić (1987) pod *proizvodnim procesom* razumijeva sve ono što se zbiva s predmetima rada od ulaska tvari (sirovina) u proizvodnju do izlaska tvorevina (gotovih proizvoda) iz proizvodnje, a prema Fijan (1976) proizvodni proces je dio složenijeg procesa, procesa poduzeća ili poslovnog procesa. Za ostvarivanje optimalnih rezultata proizvodnog procesa potrebno je upoznati sve navedene čimbenike i njihove međusobne ovisnosti. Na slici 3 dan je shematski prikaz proizvodnoga procesa obradbe drva.



Sl. — Fig. 3. Shematski prikaz proizvodnog procesa obradbe drva odvajanjem čestica — Schematic representation of the wood working production process by chipping

## ANALIZA UTJECAJA KONSTRUKCIJSKIH ČIMBENIKA UČINA STROJA THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CONSTRUCTION FACTORS ON MACHINE'S EFFICIENCY

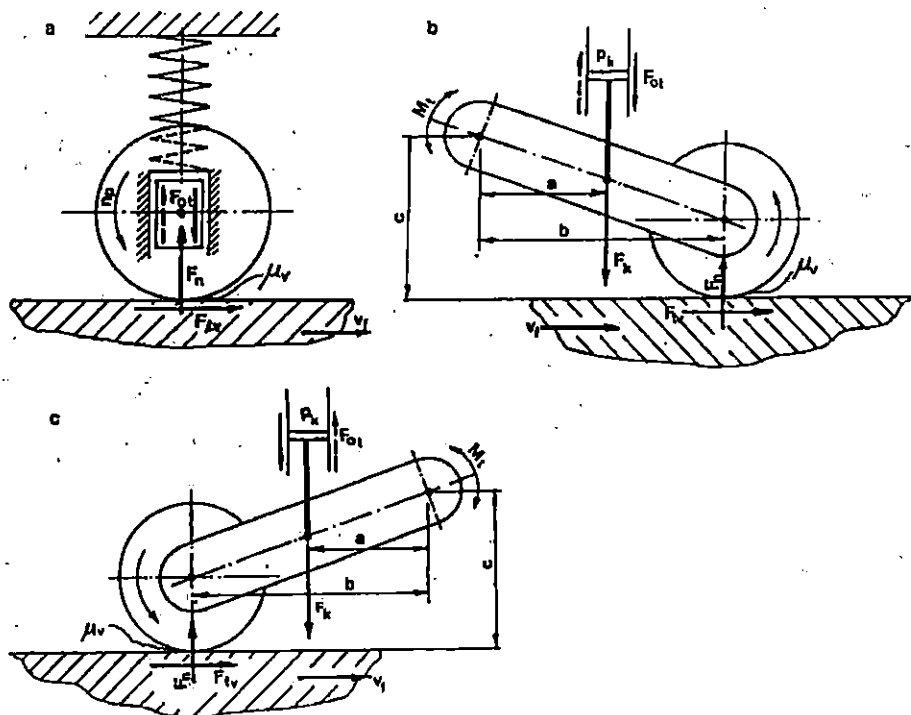
Obradba ravnih ploha na drvnim elementima kod viševretenskih se glodalica redovito ostvaruje »protočnim« gibanjem obratka sa stalnim položajem radnih vretena. U primjeni se za takav način posmičnoga gibanja mogu susresti različite izvedbe. Sve elemente sustava posmičnoga gibanja kod kojih su izvršni (radni) elementi valjci, mogu se podijeliti na pogonske, izvršne i pomoćne.

Analizom su obuhvaćeni samo oni elementi sustava posmičnoga gibanja koji se nalaze u neposrednom dodiru s obratkom, a to su *izvršni i pomoćni elementi*.

### a) *Izvršni elementi sustava posmičnog prigona*

Sve otpore koji se pojavljuju tijekom posmičnoga gibanja nužno je svladati na mjestu dodira posmičnih valjaka i obratka, dakle silom trenja između posmičnih valjaka i obratka. Da bi se postigla potrebna sila trenja između posmičnih valjaka i obratka, nužno treba osigurati dovoljno veliku pritisnu silu valjaka na obradak. Normalna pritisna sila ostvaruje se pomoću stlačenoga zraka u pneumatičkom cilindaru, a kod opružno ovješanih posmičnih valjaka pritisna se sila određuje s krutošću opruge i veličinom priguha.

U primjeni se susreću približno tri ravnomjerno zastupljena ovjesa posmičnih valjaka: vertikalni ovjes (sl. 4. a), zglobni ovjes u smjeru posmičnog kretanja (sl. 4. b) i zglobni ovjes suprotan od smjera posmičnog gibanja (sl. 4. c).



Sl. — Fig. 4. Načini ovjesa posmičnih valjaka: a) vertikalni, b) i c) zglobni — Feed roller suspension: a) vertical, b) and c) joint

### b) Pomoćni elementi sustava posmičnoga gibanja

Pri ostvarivanju gibanja za »umirivanje« se, kao i za vođenje obratka, upotrebljavaju tzv. pomoćni elementi. Za »umirivanje« obratka obično se koriste pritisne papuče smještene na suprotnoj strani od radnih glava. Zadaća pritisnih papučica je uravnoteženje sastavnica sile rezanja u smjeru okomitom na posmičnu brzinu koja nastaje tijekom zahvata rezne oštrice.



## OTPORI PRI POSMIČNOM GIBANJU OBRATKA — FEED SPEED RESISTANCES

Pri posmičnom gibanu obratka pojavljuju se sile suprotno usmjerene od posmične brzine. Te se sile nazivaju otporima posmičnoga gibanja, a mogu se podijeliti na otpore zbog sile rezanja, otpore ispod pritisnih papuča i otpore na kliznim naliježućim ploha-

ma. Zadaća posmičnih valjaka je svladavanje svih otpora koji se pojavljuju tijekom obradbe uz održavanje izabranih kinematskih veličina. Da bi se spriječilo klizanje obratka u odnosu na posmične valjke, sila trenja između posmičnih valjaka i obratka mora zadovoljiti uvjet

$$F_{tr} \geq \sum_{i=1}^n F_{ot_i} \quad (2)$$

gdje je  $\sum F_{ot_i}$  — zbroj svih otpora koji se javljaju pri pomicanju obratka.

Pri radu glodalica za obradbu ravnih ploha obradaka od drva postupkom obodnoga glodanja redovito se primjenjuje postupak protusmjernoga obodnog glodanja. To znači da se u početku zahvata rezne oštrice javlja minimalni iznos sile rezanja.

Tijekom zahvata na duljini luka zahvata raste vrijednost sile rezanja. Ta sila poprima najveću vrijednost neposredno prije izlaska iz zahvata, kada je i površina poprečnog presjeka odvojene čestice maksimalna. Po izlasku iz zahvata vrijednost sile na obodu radne glave pada na nulu te zadržava tu vrijednost do ulaska narednoga reznog brida u zahvat. Stoga se pri svakvoj obradbi razlikuju tri karakteristične vrijednosti sile na obodu radne glave: srednja sila rezanja tijekom zahvata, prosječna sila tijekom rada i maksimalna sila rezanja.

Svaka od navedenih triju vrijednosti ima svoje značenje. U skladu s utvrđenim ograničenjima stroj treba prilagoditi tako da radi optimalno u skladu s prethodno izabranim kriterijem optimalnosti. Samo po sebi je razumljivo da najnepovoljniji uvjeti nastupaju pri maksimalnoj vrijednosti sile rezanja. Najveća vrijednost sile rezanja će se pojaviti pri maksimalnoj debljini odvojene čestice, odnosno pri njezinoj najvećoj ploštini poprečnoga presjeka.

Rezni bridovi se redovito postavljaju kao izvodnice cilindra koji opisuje radna glava, pa će se sile koje nastaju rezanjem analizirati u ravnini koja je okomita na os radne glave. Kako je prethodno već napisano, u spomenutoj se ravnini u punoj veličini projiciraju sila rezanja i odrivna sila, kako je pokazano na slici 5.

Sila rezanja i odrivna sila mogu se rastaviti u sastavnice okomite na pravac posmične brzine i u sastavnice u smjeru brzine posmaka. Prema slici 5. očito je da je

$$F_{r_v} = F_{r_{max}} \cdot \sin\varphi_1, F_{r_h} = F_{r_{max}} \cdot \cos\varphi_1, F_{o_v} = 0,9 \cdot F_{r_{max}} \cdot \cos\varphi_1$$

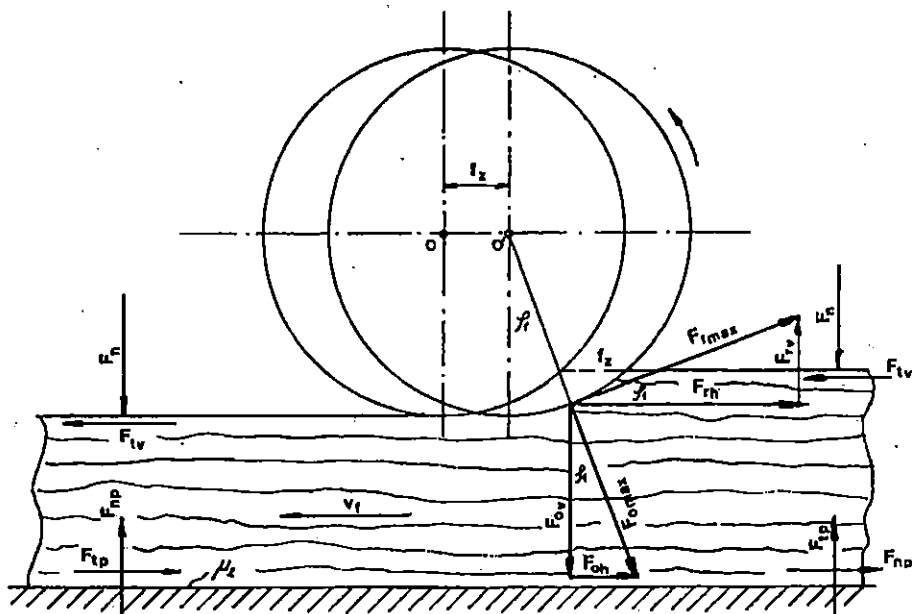
$$F_{o_h} = 0,9 \cdot F_{r_{max}} \cdot \sin\varphi_1 \quad (3)$$

Iz slike 5. se vidi da se normalna sila na naslonu plohe može izračunati iz relacije

$$F_{n_p} = \frac{1}{2} (2F_n + 0,9 \cdot F_{r_{\max}} \cos \varphi_1 - F_{r_{\max}} \sin \varphi_1) \quad (4)$$

uz pretpostavku da se barem dva posmična valjka nalaze u dodiru s obratkom te da su simetrično postavljeni prema radnoj glavi. Sila trenja koja se javlja gibanjem obratka po kliznoj naslonnoj plohi može se odrediti iz

$$F_{tp} = F_{n_p} \cdot \mu_2 = \frac{1}{2} \mu_2 [2F_n + F_{r_{\max}} (0,9 \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)] \quad (5)$$



Sl. — Fig. 5. Sila rezanja i odzivna sila pri maksimalnoj površini poprečnog presjeka odvojene čestice — Cutting force and thrust force at the maximum cross section area of the chip

Ukupna sila na pravcu brzine rezanja može se odrediti iz zbroja horizontalnih komponenti sile rezanja i odzivne sile

$$F_{h_u} = F_{r_h} + F_{oh} = F_{r_{\max}} (0,9 \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1) \quad (6)$$

Za održavanje posmičnoga gibanja mora biti udovoljen uvjet da je sila trenja

$$F_{tp} = \frac{\left( p_k \frac{d_c^2 \cdot \pi}{4} \pm F_{ot} \right) \cdot a \pm M_t}{\mu_v \cdot (b - \mu_v \cdot c)} \quad (7)$$

koja je izračunata postavljanjem jednadžbe ravnoteže s obziromna os zgloba posmičnog valjka (sl. 4. b)

Budući da se pretpostavlja gibanje obratka jednolikom pravocrtnom brzinom, može se postaviti uvjet ravnoteže za horizontalne sile

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow 2F_{tr} - 2F_{tp} - F_{o_n} - F_{r_h} = 0 \quad (8)$$

Na osnovi shematskog prikaza na slici 4. a može se lako pokazati da je veličina normalne sile

$$F_n = c \cdot \omega \pm F_{ot} \quad (9)$$

Pomoću jednadžbe (9) i

$$F_{tp} = F_{np} \cdot \mu_2 \quad (10)$$

dobiva se da je maksimalna sila rezanja

$$F_{r_{max}} = k_s \cdot h_{max} \cdot B_o = k_s \cdot \frac{v_f}{n \cdot i} \cdot B_o \cdot \sin \varphi_1 \quad (11)$$

Literature, a i istraživanja pokazuju da je jedinični otpor rezanja ovisan o debljini odvojene čestice te se može napisati da je  $k_s = f(v_f)$

Analizom rezultata mjerenja, provedenom regresijskom analizom određena je funkcija  $k_s = f(v_f)$  za obje vrste drva za koje su provedena istraživanja. Ovisnost tih dviju veličina opisana je relacijom oblika

$$k_s = A \cdot v_f^B + C \quad (12)$$

pri čemu je  $k_s = f(h)$ , a  $A$ ,  $B$  i  $C$  stalnice poznate na osnovi analize rezultata mjerenja. Uvrštenjem relacije (12) u izraz za maksimalnu silu rezanja (11) dobivamo

$$F_{r_{max}} = (A \cdot v_f^B + C) \frac{v_f}{n \cdot i} \cdot B_o \cdot \sin \varphi_1 \quad (13)$$

Uključenjem posljednje relacije u jednadžbu uvjeta ravnoteže posmičnoga gibanja dobivamo

$$2F_n (\mu_v - \mu_2) - (A \cdot v_f^B + C) \frac{v_f}{n \cdot i} \cdot B_o \sin \varphi_1 [\cos \varphi_1 (0,9\mu_2 + \sin(0,9 - \mu_2))] = 0 \quad (14)$$

Djelomičnim sredjenjem gornje jednadžbe izlazi

$$v_f \cdot (A \cdot v_f^B + C) = \frac{2F_n n \cdot i(\mu_v - \mu_2)}{\sin\varphi_1 B_o (\cos\varphi_1 (0,9\mu_2 + 1) + \sin(0,9 - \mu_2))} \quad (15)$$

Posljednja relacija omogućava izračunavanje granične posmične brzine koja udovoljava uvjetima ravnoteže posmičnog sustava.

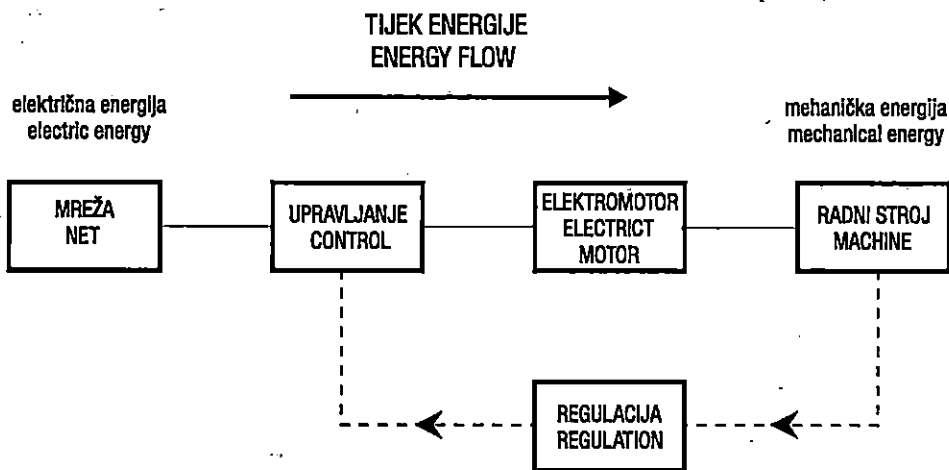
Prethodna analiza provedena je za radnu glavu čija je os smještena iznad površine naliježne plohe. Analiza za donju radnu glavu neće se bitno razlikovati. Kako je vidljivo iz prikaza na slici 5, promijenit će se samo smjer razlike vertikalne sastavnice odrivne sile i vertikalne sastavnice sile rezanja. S obzirom na veličinu razlike može se potpuno slobodno zaključiti da se uvjeti neće značajno promijeniti.

## ANALIZA UTJECAJA ENERGIJSKIH ČIMBENIKA NA UČIN STROJA

### THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENERGY FACTORS ON THE MACHINE'S EFFICIENCY

Današnja razina pogona s elektromotorima istosmjerne struje uvjetovala je u strukturi prigona transformaciju prienosnoga sustava, npr. pogoni izvedeni s ugradbenim asinkronim motorima s pretvaralom napona i frekvencije.

Zadatak elektromotornog pogona je prije svega pretvaranje električne energije u mehaničku, sa što većim stupnjem korisnosti. Pojednostavljeni blok-dijagram suvremenoga elektromotornog pogona koji prikazuje vezu između mreže koja dovodi električnu energiju i radnoga stroja koji treba mehaničku energiju, prikazan je na slici 6.



Sl. — Fig. 6. Blok-dijagram suvremenoga elektromotornog pogona — Block-dijagramm of a modern electro-motor drive

S obzirom na zahtjeve proizvodnog procesa u pogledu promjene frekvencije vrtnje i dinamičkih stanja koristi se upravljačka ili regulacijska tehnika. U tom je slučaju osobito važno optimalno prilagođavanje elektromotora i pripadnih upravljačkih, odnosno reagulacijskih elemenata na zahtjeve radnoga stroja.

## ANALIZA UTJECAJA REŽIMA OBRADBE NA UČIN STROJA THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON THE MACHINE'S EFFICIENCY

Postupak obradbe odvajanjem čestica ostvaruje se određenim režimom rada. Za obradbu odvajanjem čestica izbor režima rada ovisi o mogućnosti primijenjene tehnologije. Za svaki pojedini slučaj moraju se što točnije odrediti vrijednosti elemenata obradbe, jer neposredno utječu na učin stroja. Međutim, učin stroja ne može se povećati jednostranim mijenjanjem tih vrijednosti, jer između pojedinih veličina režima obradbe postoji čvrsta zavisnost. Osnovne karakteristike veličine koje određuju režim obradbe odvajanjem čestica jesu: brzina rezanja, posmična brzina i dubina rezanja / zahvata.

### 1. Utjecaj brzine rezanja — *Speed cutting influence*

Pri glodanju glavno kretanje, koje je kružno, uvijek obavlja glodalo. Prema načinu izvođenja radnoga i posmičnog kretanja, prema položaju koji zauzima os glodala prema obratku, te prema obliku obrađivane površine imamo sljedeće oblike glodanja: obodno glodanje i čeonno glodanje. Radi postizanja optimalnog učina glodalica za obradbu drva teži se postizanju velikih brzina rezanja. Novi materijali reznih oštrica omogućuju takvu brzoreznu obradbu i intenzivno odvajanje čestica.

### 2. Utjecaj posmične brzine — *Feed speed influence*

Posmak je put obratka za jedan okretaj glodala. Za određene uvjete bira se maksimalno moguć posmak. Veličina posmaka ovisi o materijalu obratka, njegovoj dimenziji, dubini rezanja, vijeku trajanja i otpornosti oštrice alata.

Kako navodi Šavar (1990), posmak se pri glodanju definira s tri veličine: posmak po zubu, posmak za jedan okretaj glodala i posmak u jednoj minuti (posmična brzina) predstavlja relativni put glodala ili obratka u smjeru obradbe.

Na izbor veličine posmične brzine za proizvodne operacije glodanja imaju utjecaj: geometrijski parametri odvajane čestice pri glodanju, sile i otpori rezanja i hrapavost obrađene površine

## UTJECAJ DRVA NA UČIN STROJA INFLUENCE WOOD ON THE MACHINE'S EFFICIENCY

Osnovne značajke drva kao materijala jesu: nehomogenost, anizotropnost i nepostojanost.

Sila rezanja je uvijek u nekom odnosu s gustoćom drva. Međutim, vrsta drva, mokrina, prednji kut alata i drugo ovom problemu daju dodatnu težinu.

Velik je broj čimbenika koji utječu na veličinu sile rezanja. Otpor drva koji alat savladava pri nastajanju odreska uvjetovan je fizikalnim svojstvima drva, smjerom rezanja, ploštinom i oblikom poprečnog presjeka odvojenih čestica, geometrijom oštrice alata, brzinom rezanja, polumjerom zaobljenja oštrice alata i dr., mokrinom drva i temperaturom drva.

Značenje tih čimbenika je različito; utjecaj jednih je manji, a drugih veći.

## UTJECAJ KAKVOĆE IZRATKA — PRODUCT QUALITY INFLUENCE

Rajković (1991) navodi iskaz E. Biokela da se definicija hrapavosti može dati samo u negativnom obliku: »Hrapavost je takvo stanje površine koje se ne može u svezi s normiranim jedinicama izraziti jednostavnom matematičkom funkcijom.«

Kakvoću površine određuju mnoge značajke koje se mogu svrstati u pet grupa: fizikalna svojstva, mehanička svojstva, kemijsko-fizikalna svojstva, estetska svojstva i geometrijsko stanje površine ili geometrija površine.

Novo metode proizvodnje, sustavna kontrola kakvoće te prije svega želja za održanjem niskih proizvodnih cijena uvjetovali su, osim dimenzijskih, i druga ograničenja. Ta se ograničenja ponajprije odnose na određivanje najvećih dopuštenih odstupanja geometrijskog oblika i na hrapavost površine.

## PROJEKAT MATEMATIČKOGA MODELA OPTIMIZACIJE UČINA VIŠEVRETENSKIH GLODALICA ZA OBRADBU DRVA

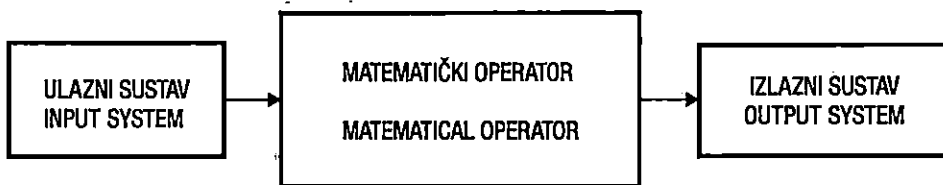
### A PROPOSAL OF THE MATHEMATICAL FOR THE EFFICIENT OPTIMIZATION OF WOODWORKING MULTISPINDLE MILLING MACHINES

Pri optimiranju složenih procesa kakvo je glodanje na visevretenskim glodalicama za obradbu drva, često temeljni problem predstavlja nedefinirana sveza među pojedinim čimbenicima i nedorečeni zahtjevi u samome procesu. Tomu pridonosi i teško određivanje kriterija kakvoće svih parametara, te zahtjevi koji, najčešće, nisu u svezi s provedbom (izvedbom) procesa.

Za rješavanje konkretnih problema optimizacije najviše truda treba uložiti u neprijepornu matematičku formulaciju problema, tj. za definiranje egzaktnoga matematičkog modela.

Matematički model obuhvaća: sustav ulaznih parametara, matematički operator objekta i (ili) procesa i izlazni sustav ili sustav kriterija.

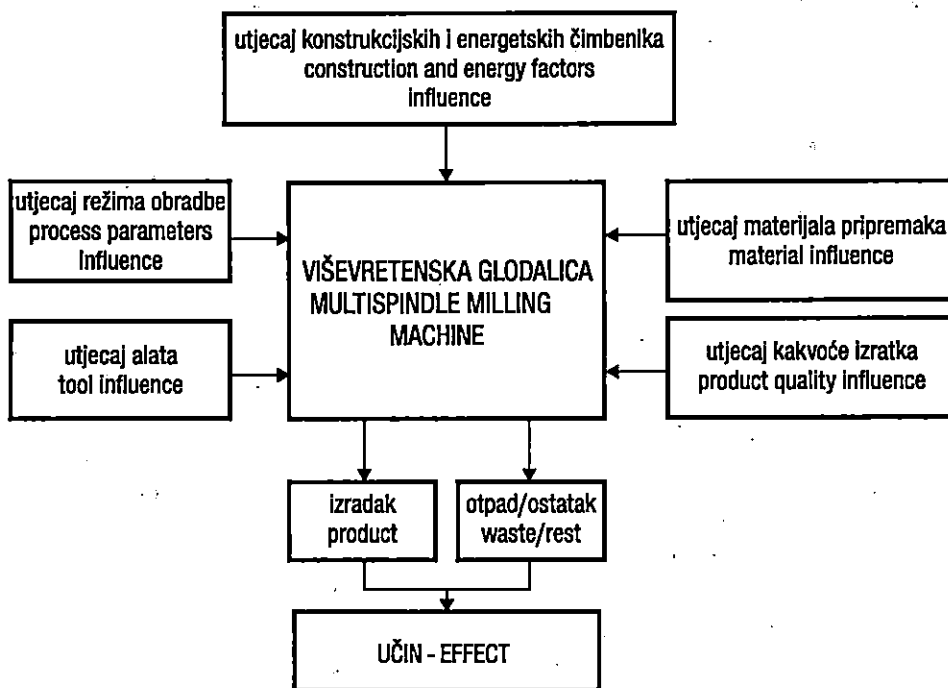
Grafički prikaz strukture poopćenoga matematičkog modela prikazan je na slici 7.



Sl. — Fig. 7. Grafički prikaz poopćenoga matematičkog modela — Schematic representation of the mathematical model

Postupak obodnoga glodanja drva može se pri optimiranju obrađivati kao bilo koji pretvorbeni proces kod kojega se ulazne veličine pretvaraju u koristan izlaz (slika 8).

Da bi se ostvario koristan *izlaz*, procesu se moraju osigurati sve potrebne veličine na *ulazu*. Proces obradbe može se odvijati ako je osiguran obradni stroj, alat i poslužitelji stroja.



Sl. — Fig. 8. Shematski prikaz ulaznih i izlaznih veličina kod viševretenske glodalice — Schematic representation of input and output values at multispindle milling machines

Valjanost pretvorbenog procesa može se iskazati vrijednošću pretvorbene funkcije koja je iskazana odnosom korisnoga izlaza i zbroja ulaznih veličina, odnosno:

$$m = \frac{I_k}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (16)$$

gdje je:  $I_k$  — koristan izlaz ili učin stroja u jedinici vremena, a  $\sum_{i=1}^n U_i$  — vrijednost ulaznih veličina u jedinici vremena.

Razumljivo je da se kao cilj pri postavljanju procesa uzima postizavanje maksimalne vrijednosti pretvorbene funkcije. Većina strojeva za obradu drva odvajanjem čestica radi stalnom glavnom brzinom rezanja. Stoga se pri takvim obradbama problem optimizacije svodi na utvrđivanje optimalne posmične brzine, što će biti detaljno izloženo.

Prije negoli se počne s analizom ulaznih i izlaznih veličina treba postaviti ograničenja koja će se pojaviti u procesu. Svako ograničenje sužava prostor mogućih rješenja te se optimalno rješenje mora potražiti unutar područja koje omeđuju ograničenja.

Kao ograničenja na stroju sa zatečenim konstruktivnim rješenjima susreću se: raspoloživa snaga pogonskoga motora, raspon regulacije posmične brzine, zahtjevana karkvoća obrađene plohe, mogućnosti sustava za posmično kretanje.

Raspoloživa snaga glavnoga pogonskog motora za neposredno rezanje može se iskazati kao:

$$P_m = P_0 + P_r \quad (17)$$

Snaga rezanja može se iskazati relacijom:

$$P_r = k_s \cdot v_f \cdot a \cdot B_o \quad (18)$$

Mjerenjima je ustanovljena ovisnost jediničnog otpora rezanja o posmičnoj brzini. Ovisnost je iskazana jednadžbom oblika:

$$k_s = A \cdot v_f^B + C \quad (19)$$

Uvrštenjem ovisnosti jediničnog otpora rezanja u prethodnu relaciju za određivanje snage rezanja dobivamo:

$$P_r = (A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o \quad (20)$$

Raspon regulacije posmične brzine određen je konstrukcijskim rješenjima zatečenima na stroju.

### a) Koristan izlaz

Kako je već ranije analizirano, koristan se izlaz najčešće izražava obradnom ploštinom u jedinici vremena. Imajući na umu prethodna izlaganja, može se ustvrditi da je:



$$I_k = B_0 \cdot v_f \quad (21)$$

### b) Ukupan ulaz u proces

Od ulaznih vrijednosti koje treba osigurati za nesmetano odvijanje procesa obradbe analizirat će se samo one koje su vezane uz neposrednu zadaću stroja, ne uzimajući u obzir okruženje. Na cijenu obradbe, odnosno obratka, utječu svojom vrijednošću ili cijenom: alat, stroj, poslužitelj i energija.

#### 1. Vrijednost alata

Kako je poznato, postojanost rezne oštrice može se izraziti preko proširene Taylorove jednadžbe (Goglia 1993):

$$v_c \cdot T_p^m = \frac{C'_v}{f^p \cdot B_z^r} \quad (22)$$

Transformacijom gornje relacije može se napisati da je:

$$T_p = C_v^{\frac{1}{m}} \cdot v_c^{-\frac{1}{m}} \cdot f_z^{-\frac{p}{m}} \cdot B^{-\frac{r}{m}} \quad (23)$$

Budući da su vrijednosti  $m$ ,  $p$  i  $r$  za zadani par materijala alata i materijala obratka stalnice koje je moguće utvrditi ispitivanjima, gornja se jednadžba može napisati u obliku:

$$T_p = C_1 \cdot v_c^n \cdot f_z^o \cdot B^q \quad (24)$$

Kako je već ranije spomenuto, viševretenske obodne glodalice za obradu drva rade sa stalnom brzinom rezanja, a duljina reznoga brida u zahvatu je određena širinom obratka. Stoga se i duljinu reznoga brida u zahvatu može smatrati stalnicom te se zadnji izraz značajno pojednostavljuje:

$$T_p = C_z \cdot f_z^o \quad (25)$$

Na osnovi zadnjega izraza izlazi da u uvjetima obradbe drva rezanjem, kakvo se razmatra u ovome radu, postojanost rezne oštrice ovisi samo o jednoj promjenljivoj veličini — posmaku po reznom bridu. Kako je posmak po reznom bridu odnos između posmične brzine i frekvencije ulazaka reznih bridova u zahvat, to se pri stalnom broju okretaja gornja ovisnost svodi na:

$$T_p = C_z \cdot \left( \frac{v_f}{n \cdot i} \right) \quad (26)$$

Međutim, niz je istraživanja pokazao da se u području posmaka po reznome bridu, kakvi se koriste pri obradbi drvna glodanjem, povećava postojanost rezne oštrice s porastom posmaka po reznome bridu. Prema rezultatima spomenutih istraživanja određena je vrijednost stalnice  $C_2$  i eksponenta  $\sigma$ ; one iznose:  $C_2=198$ ,  $\sigma=1,12$

Konačno se ovisnost postojanosti o posmaku po reznom bridu može izraziti:

$$T_p = 198 \cdot f_z^{1,12} \quad (27)$$

Za postupak obradbe obodnim glodanjem gotovo isključivo se koriste radne glave s mehanički pričvršćenim reznim oštricama. Alati se nakon zatupljenja oštrenjem osposobljavaju za ponovnu upotrebu. Smanjenje vrijednosti alata po oštrenju može se odrediti iz relacije:

$$c_a = \frac{C_a}{B_a} + c_o \quad (28)$$

Dopušteni broj oštrenja moguće je izračunati iz odnosa:

$$B_a = \frac{L_u}{L_1} \quad (29)$$

Stoga se po jednom oštrenju, odnosno zatupljenju, vrijednost alata smanjuje za:

$$c_a = \frac{C_a \cdot L_1}{L_u} + c_o \quad (30)$$

Uzme li se u obzir postojanost alata u ovisnosti o posmičnoj brzini te vrijednost alata koja se po jednom zatupljenju prenosi na obradak, može se odrediti vrijednost alata koja se u jedinici vremena prenosi na obradak:

$$U_a = \frac{C_a}{T_p} = \frac{\frac{C_a \cdot L_1}{L_u} + c_o}{C_2 \left( \frac{v_f}{n \cdot i} \right)^\sigma} \quad (31)$$

S obzirom na vrijednost koeficijenta  $C_2$  i  $\sigma$  zadnja se relacija može napisati:

$$U_a = \frac{C_a}{T_p} = \frac{\frac{C_a \cdot L_1}{L_u} + c_o}{\frac{198 \left( \frac{v_f}{n \cdot i} \right)^{1,12}}{60}} \quad (32)$$

Neće se posebno analizirati *vrijednosti stroja i poslužitelja* koje se u jedinici vremena prenose na obradak. Smatra se da izbor razine posmične brzine ne utječe na vijek trajanja stroja. Kalkulacija jedinične cijene stroja i poslužitelja dobro je poznata. Za potrebe ovoga rada te veličine će se smatrati stalnicama pa je:

$$U_s = \text{konst.} \text{ — vrijednost stroja u jedinici vremena}$$

$$U_p = \text{konst.} \text{ — vrijednost poslužitelja u jedinici vremena}$$

Raspravljajući o ograničenjima u postupku optimizacije, izveden je izraz za snagu potrebnu za obradbu rezanjem. Snaga rezanja iznosi:

$$P_r = (A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o \quad (33)$$

Kako je već ranije izloženo, ukupna mehanička snaga koja se s vratila elektromotora predaje glavnom prigonu, dijelom se troši na svladavanje otpora u prijenosu gibanja i snage, a dijelom za neposredno rezanje. Iz približnoga pogonskog dijagrama elektromotora može se odrediti ovisnost ukupne električne snage o snazi rezanja iz relacije:

$$P_{el} = \frac{P_{eln} - P_g}{P_{mn}} \cdot (P_r - P_o) + P_g \quad (34)$$

Konačno, uvrštavanjem izraza za snagu rezanja u prethodnu relaciju te množenjem s jediničnom cijenom energije dobiva se vrijednost cijene energije u jedinici vremena koja ulazi u proces na glavnom prigonu, odnosno:

$$U_c = C_c \left\{ \frac{P_{eln} - P_g}{P_{mn}} \left[ (A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o + P_o \right] + P_g \right\} \quad (35)$$

Treba još napomenuti da su veličine  $P_{eln}$ ,  $P_g$ ,  $P_{mn}$  karakteristike elektromotora na glavnom prigonu.

Energija koja u proces obradbe ulazi preko motora posmičnog prigona može se također rastaviti na dvije sastavnice; na snagu potrebnu za svladavanje vlastitih otpora u prijenosu te na snagu posmičnoga gibanja:

$$P_{pu} = P_{op} + P_p \quad (36)$$

Snaga posmičnoga gibanja može se izraziti preko umnoška ukupne sile koju treba svladati pri posmaku obratka i posmične brzine:

$$P_p = F_p \cdot v_f \quad (37)$$

Ukupna sila posmičnog kretanja sastoji se od dviju komponentata; prosječne obodne sile na radnoj glavi te sile trenja na naliježnoj plohi:

$$F_p = F_{tp} + F_o \quad (38)$$

Prosječna obodna sila jednaka je odnosu snage rezanja i glavne brzine rezanja:

$$F_o = \frac{P_r}{v_c} = \frac{P_r}{D \cdot \pi \cdot n} \quad (39)$$

Uzimajući u obzir sve prethodno, izlazi da je ukupna snaga posmičnog kretanja:

$$P_{pu} = P_{op} + \left[ F_{tp} + \frac{(A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o}{D \cdot \pi \cdot n} \right] \cdot v_f \quad (40)$$

Kao i pri analizi ukupne električne snage glavnoga kretanja, tako se i pri posmičnom prigonu ona može odrediti iz približnoga pogonskog dijagrama elektromotora. Stoga se ukupna snaga posmičnog prigona može odrediti iz relacije:

$$P_{elp} = \left\{ \frac{P_{elnp} - P_{gp}}{P_{mp}} \left[ \left( F_{tp} + \frac{(A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o}{D \cdot \pi \cdot n} \right) \cdot v_f + P_{op} \right] + P_{gp} \right\} \quad (41)$$

Množenjem posljednjeg izraza s jediničnom cijenom energije dobiva se vrijednost energije koja ulazi u proces na posmičnom prigonu u jedinici vremena, odnosno:

$$U_{ep} = P_{elp} \cdot C_e \quad (42)$$

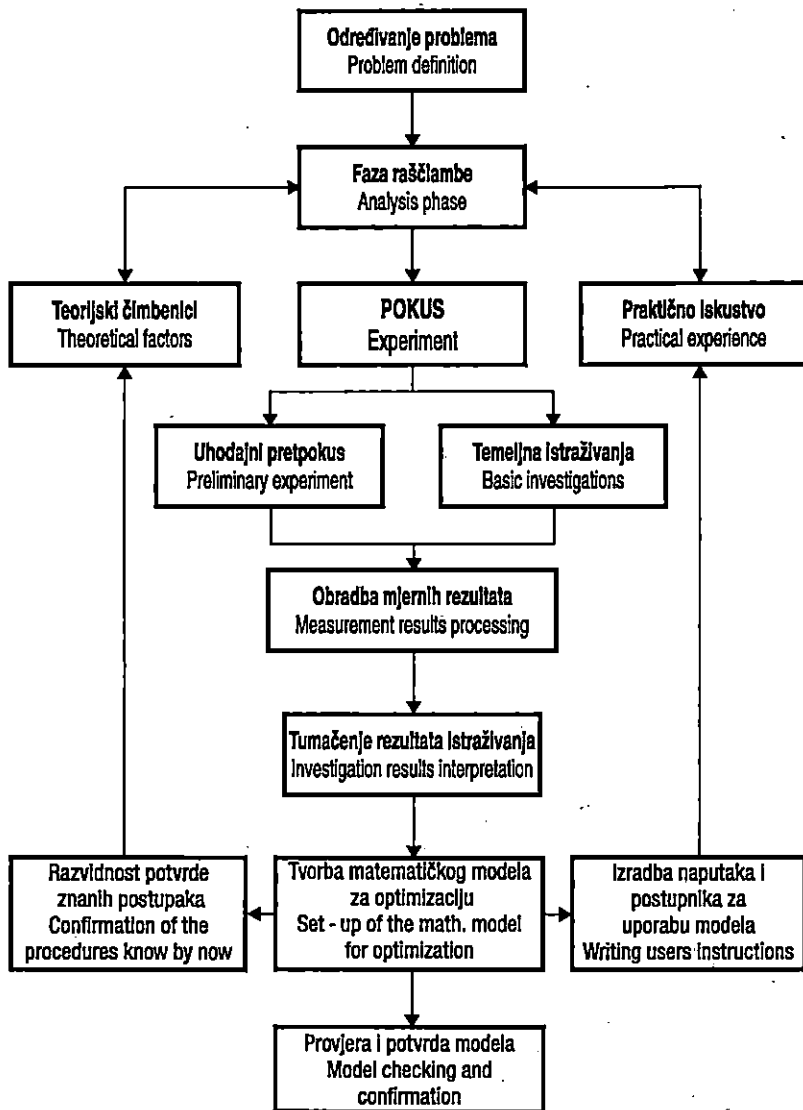
Na osnovi prethodno provedene analize može se vrijednost funkcije kriterija optimalnosti odrediti iz izraza:

$$\mu = \frac{v_f \cdot B_o}{U_a + U_s + U_p + U_c + U_{ep}} \quad (43)$$

Kako je već ranije rečeno, treba odrediti maksimalnu vrijednost funkcije kriterija optimalnosti u prostoru mogućih rješenja. Sve veličine koje ulaze u funkciju kriterija optimalnosti ovise samo o jednoj promjenljivoj veličini — posmičnoj brzini  $v_f$ . Funkcija kriterija optimalnosti isuviše je složena, a da bi se egzaktnim putem tražio optimum. Inkrementalnom metodom na elektroničkom računalu moguće je naći rješenje bez većih poteškoća.

## METODA RADA I OBJEKT ISTRAŽIVANJA WORKING METHOD AND RESEARCH OBJECT

Tijek istraživačkoga rada prilagođen je svrsi i ciljevima određenih zadataka, a u skladu sa znanim sličnim proučavanjem obradbe drva (Cumming 1967). Na slici 9. shematski su prikazani slijed i temeljna čvorišta istraživačkog postupka.



Sl. — Fig. 9. Tok istraživačkog rada pri proučavanju optimizacije učina viševremenskih glodalica za obradbu drva — The course of the research on cutting resistance at milling

Svaka uvodna sastavnica tijeka istraživačkoga rada nastala je vlastitim promišljanjem ili usvajanjem u znanstvu i struci znanih činjenica.

Tako se je pri *određenju problema* uzelo u obzir značenje obradbe drva glodanjem, utjecaj kakvoće glodane površine na konačnu dobrotu finalnih proizvoda, svekoliko planiranje i provedba metoda glodanjem u tehnologiji obradbe masivnog drva te značajne učina glodalice pri projektiranju tehnoloških linija. *Faza raščlambe* je pomogla u konačnom sastavljanju plana pokusa ujedinjujući i pomirujući teorijske osnove s praktičnim iskustvom. Svekoliko razlučivanje čimbenika glodanja odredilo je i provedbu za dvije vrste drva i četiri inačice dubine glodanja. Sam se pokus u slučaju istraživanja glodanja drva mogao svesti na *temeljna istraživanja* proučavanja čimbenika odmah poslije *uhodajnog (pred) pokusa*. *Obradba je mjernih rezultata* obavljena u skladu sa znanim matematičko-statističkim postupcima. Jednako se postupilo i pri *tumačenju rezultata* istraživanja i utvrđenih zavisnosti. U skladu s ciljevima istraživačkog zadatka tvorba je *matematičkoga modela* bila podloga za planiranu optimizaciju učina pri glodanju drva. Takvim se matematičkim modelom može ocjenjivati i učinkovitost važne sastavnice u drvodjelskim tehnološkim procesima. Postignuta je djelotvornost glodanja važan pokazatelj i iskorištenosti drva i drvnih tvoriva u procesu gradbe drvenih i drugih tvorevina. To je i bio razlog da se prvotno uspostavi obavjesnost u znanstvu i strukovnoj činidbi.

Uvođenje računala na rješavanju znanstvenih, proizvodnih, gospodarskih i strukovnih zadaća omogućilo je i pri proučavanju obradbe drva na alatnim strojevima, kakve su i glodalice, jednostavnu tvorbu i uporabu matematičkih modela za optimiziranje učina, iskorištenost tvoriva, utvrđivanje energetske povoljnosti te rješavanje sličnih problema. Najčešće sastavnice takvih modela čine mjeriteljske informacije, ponajprije dobivene mjerenjem.

Brezinščak (1984) definira *mjerenje* skupom djelovanja radi određivanja vrijednosti neke veličine. Prema tomu, područje znanja i djelatnost što se odnosi na mjerenje zove se *mjeriteljstvo* (metrologija). Mjeriteljstvo obuhvaća teorijski i praktično sve pojave oblike što se odnose na mjerenje, bez obzira na razinu točnosti, odnosno područje znanstva, tehnologije i tehnike. Pritom je svekolika mjeriteljska činidba u drvnoj industriji značajna u svim njezinim područjima; preuzimanju drvne tvari i tvoriva od šumarstva ili drugih sirovina i tvorevina koje se koriste u tehnološkim procesima tvorbe drvnoindustrijskih proizvoda, u postupcima sušenja drva, mehaničkoj preradbi drva, postupcima proizvodnje drvnih ploča itd. Svakako je drvnoindustrijsko mjeriteljstvo po svojoj naravi dio zakonskoga mjeriteljstva, kako ih razvrstava Brezinščak (1982). Zato Brezinščak (1979) razlikuje dva bitno različita primjera mjeriteljske informacije; prvi se odnosi na vrhunsku *znanstvenu poruku*, a drugi na *poslovno-proizvodni i gospodarski bitan podatak*. U većini se slučajeva mjerni podaci utvrđuju različitim mjerilima.

U istraživanome slučaju pogon se vretena glodalice obavljao trofaznim asinkronim indukcijskim elektromotorom. Za razumijevanje značajke takva elektromotora potrebno je poznavati osnovne pojmove njegova pogonskoga stanja. Tzv. vanjska karakteristika predstavlja funkciju  $M=f(n)$ .

Za asinkroni je stroj strujni dijagram kružni. Iz njega se može direktno dobiti iznos primarne struje i njezina faznog pomaka prema stalnom primarnom naponu, ali i druge veličine pri raznim opterećenjima, npr.  $\cos\phi_1$  primarni faktori snage, primarne stvarne snage koju motor uzima iz mreže, iznos proizvedene mehaničke snage, iznos ostvare-

nog momenta vrtnje, iznos klizanja odnosno pripadne frekvencije vrtnje te korisnost elektromotora.

## OBRADBA MJERNIH REZULTATA — MEASUREMENT RESULTS ANALYSIS

Dio mjernih rezultata dobiven je kao zapis snimatelja, a dio koji se odnosi na električne veličine kao zapis na mjernoj traci.

Budući da je pri pokusu glodanja električna snaga mjerena na ulazu u elektromotor, ona se morala preračunavati na raspoloživu snagu na vretenu. Za takva se mjerenja obično rabi *grafički prikaz pogonske karakteristike* u tzv. približnom pogonskom dijagramu. Za njegovu su se konstrukciju koristili podaci nazivnih električnih veličina elektromotora za izračunavanje električne snage elektromotora pri nazivnoj mehaničkoj snazi.

Sva obradba zapisanih rezultata  $P$ ,  $I$  i  $U$  obavljena je pomoću računala Hewlett & Packard 9835A s digitizerom kao perifernom jedinicom. U tu je svrhu izrađen i računalni program za podršku ovome poslu.

Uzorci tvrdog drva bukovine pripremljeni za glodanje ispiljeni su iz elemenata priređenih za proizvodnju masivnog namještaja. Drvo je umjetno osušeno na mokrinu od 18 do 21,2 %. Na svim uzorcima mokrina je prije pokusnoga glodanja utvrđena električnim mokrinomjerom RIZ HGR-30FM, koji na temelju promjene otpora drva pri prolazanju istosmjerne struje između elektroda u obliku igala određuje sadržaj vode u drvu. Kod drva s desporativnim gradijentom vlage ovaj mokrinomjer daje pouzdane rezultate u granicama sadržaja vode od 7 do 25 %. Mokrina se daje u standardnom postotku — postotni odnos mase vode sadržane u drvu prema masi drva u standardnom suhom stanju. Vizualnom kontrolom utvrđeno je da uzorci na glodanoj plohi nisu imali kvрге ni druge vidljive nepravilnosti u građi.

Jednako je postupljeno i s jelovim uzorcima. Tek je utvrđena veća kvргavost.

Pokus je glodanja obavljen na viševretonoj glodalici Weinig, Unimat 17A.

## ISPIS REZULTATA ISTRAŽIVANJA I PRORAČUNSKIH PODATAKA RESEARCH RESULTS AND CALCULATED DATA PRINTONTS

Sva provedena istraživanja obavljena su na viševretenskim glodalicama u pogonu D.d. »Drvoproizvod« — Jastrebarsko.

Ispitni stroj je prije pokusa vizualno pregledan, pokusnim je radom utvrđena kakvoća obradbe za različite režime rada, kontrolirane su karakteristične vibracije, statički su uravnoteženi noževi, provjerene su frekvencije vrtnje radnih vretena, obavljena su osnovna energetska električna mjerenja, izrađen je približni pogonski dijagram, pregledane su zaštitne sastavnice stroja.

Istraživanje optimizacije učina obavljeno je za *dvije vrste drva*: bukovinu i jelovinu, dakle za drvo tvrdih listača i drvo četinjača. Mjerna je oprema umjerena i ulančena.

Radi preglednosti rezultati su istraživanja podijeljeni u nekoliko karakterističnih grupa. Kao značajke uzete su temeljne promjene jediničnoga otpora rezanja (glodanja), snage rezanja i jedinične energije glodanja.

Planiranje pokusa i obradba rezultata omogućuju provjeru postavljenoga matematičkog modela, odnosno utvrđivanje funkcijskih zavisnosti mjerenih veličina. Suvremeni se postupci temelje na istovremenoj promjeni više faktora po određenom planu. Zato je moguće proučavanje utjecaja svakog faktora na proučavani proces te njihov međusobni utjecaj.

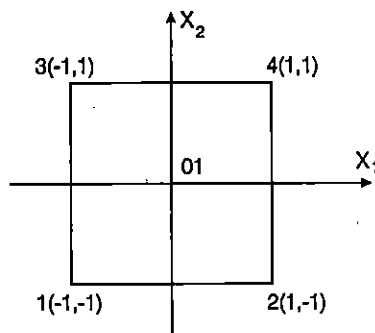
Pokus počinje s polaznim modelom za koji se, na osnovi ranijih istraživanja, pretpostavlja da će dati povoljne rezultate (Cebalo 1985). Pokus se ponavlja toliko puta dok se ne utvrdi uzročno-posljedična sveza između određenih pojava i procesa u sustavu. Svaki prethodni mjerni ciklus treba dati dovoljno informacija za nastavak, odnosno za planiranje i izvođenje narednoga pokusa.

Jednostavni ortogonalni planovi pokusa s najmanje  $k+1$  ponavljanja definirani su kao *faktorski planovi*. Kako navodi Cebalo (1990), razine faktora treba rasporediti tako da plan matrica pokusa zadovolji uvjete ortogonalnosti, normativnosti, simetrije i rotabilnosti. Kod takvih planova pokusa svaka se varijabla mijenja u dva koraka. Ukupan broj pokusa tada iznosi:

$$N = 2^k + n_0 \quad (44)$$

gdje je:  $N$  — broj pokusa,  $k$  — broj varijabli,  $n_0$  — broj pokusa na srednjoj razini.

Planovi ispitivanja označavaju se kao  $2^k$  — faktorski planovi. Na slici 10. prikazan je poredak točaka ispitivanja nekog  $2^2$  faktorskog plana u  $x_1$  i  $x_2$  — prostoru faktora. Točke ispitivanja odgovaraju točkama vrhova kvadrata.



Sl. — Fig. 10. Poredak točaka ispitivanja u  $2^2$  faktorskom planu pokusa — Testing points arrangement in the  $2^2$  faktor plan

Prethodno provedenim istraživanjima utvrđeno je da na proces obradbe drva odvajanjem čestica značajno utječu dva faktora: *posmična brzina* i *dubina glodanja*.

Funkcijska ovisnost između odabranih nezavisnih varijabli i zavisne varijable  $R$  dana je u obliku



$$R = C \cdot v_f^{p_1} \cdot a^{p_2} \tag{45}$$

S obzirom na to da je osnovna jednadžba eksponencijalna, treba je pretvoriti u linearni oblik

$$\ln R = \ln C + p_1 \cdot \ln v_f + p_2 \ln a \tag{46}$$

Zamjenom

$$\ln R = y; \ln C = p_0; \ln v_f = x_1 \text{ i } \ln a = x_2 \tag{47}$$

konačno se nelinearna pojava (46) prevodi u linearni oblik

$$y = p_0 + p_1 x_1 + p_2 x_2 - \varepsilon \tag{48}$$

gdje je » odstupanje koje obuhvaća grešku eksponenata.

Tada je procijenjena vrijednost

$$y = p_0 + p_1 x_1 + p_2 x_2 \tag{49}$$

Na temelju istraživačkih rezultata izrađene su računalom podržane tablice 1. i 2. s ispisom proračunskih veličina.

Tab. 1. Tablični prikaz mjerenih i proračunatih vrijednosti (jelovina)  
 Table 1 — Tabular representation of the measured and calculated values (fir)

Redni broj Ordinal number	Dubina glodanja $a$ Cutting depth $a$	Posmična brzina $v_f$ Feed speed $v_f$	Jedinični otpor rezanja $k_s$ Cutting resistance $k_s$	Jedinična snaga rezanja $P_{r1}$ Specific cutting power $P_{r1}$	Jedinična energija glodanja $E_1$ Specific cutting energy $E_1$
	mm	m/min	N/mm <sup>2</sup>	W/mm	J/mm
1	2	3	4	5	6
1	4	8,22	17,46	9,81	54,6
2	4	8,22	18,46	9,23	50,4
3	4	22,8	8,4	10,04	29,2
4	4	22,8	7,94	11,86	24,6
5	8	8,22	18,83	21,30	113,1
6	8	8,22	14,73	16,28	85,5
7	8	22,8	10,12	29,78	69,2
8	8	22,8	9,74	28,76	63,6
9	5,65	15,51	11,30	18,20	49,8
10	5,65	15,51	10,90	17,80	50,0
11	5,65	15,51	11,10	17,07	48,8
12	5,65	15,51	10,80	17,90	50,3
13	5,65	15,51	11,00	17,40	49,3

Tijek utvrđivanja ovisnosti veličina iskazanih u tablicama 1. i 2. odnosi se na njihovu regresijsku analizu, sve za četiri inačice i dvije vrste drva, kako slijedi:  $k_s = f(v_f, a)$ ,  $P_{r1} = f(v_f, a)$ ,  $E_1 = f(v_f, a)$

Korištenjem programa STATGRAPHICS utvrđeni su rezultati faktorskoga plana pokusa.

Tab. 2. Tablični prikaz mjerenih i proračunatih vrijednosti (bukovina)  
 Table 2 — Tabular representation of the measured and calculated values (beech)

Redni broj Ordinal number	Dubina glodanja $a$ Cutting depth $a$	Posmična brzina $v_f$ Feed speed $v_f$	Jedinični otpor rezanja $k_s$ Cutting resistance $k_s$	Jedinična snaga rezanja $P_{r1}$ Specific cutting power $P_{r1}$	Jedinična energija glodanja $E_1$ Specific cutting energy $E_1$
	mm	m/min	N/mm <sup>2</sup>	W/mm	J/mm
1	2	3	4	5	6
1	4,5	8,51	23,20	15,43	81,3
2	4,5	8,51	19,56	12,81	69,9
3	4,5	21,45	21,98	37,09	73,7
4	4,5	21,45	17,80	22,43	47,7
5	7,5	8,51	21,69	23,02	120,1
6	7,5	8,51	18,39	23,76	120,3
7	7,5	21,45	15,10	33,62	77,0
8	7,5	21,45	14,02	31,90	79,0
9	5,8	14,98	19,80	30,40	91,8
10	5,8	14,98	19,00	30,10	91,5
11	5,8	14,98	20,16	29,30	91,0
12	5,8	14,98	20,85	29,10	90,4
13	5,8	14,98	20,43	28,40	90,0

### OVISNOST JEDINIČNE SNAGE GLO DANJA JELOVINE O POSMIČNOJ BRZINI I DUBINI ZAHVATA THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC MILLING POWER AND THE FEED SPEED AND MILLING DEPTH FOR FIR

Ovisnost jedinične snage glodanja jelovine o dubini glodanja i posmičnoj brzini predočuje izraz

$$P_{r1} = C \cdot a^{p_1} \cdot v_f^{p_2} \quad (50)$$

Tablica 3. a, b i c pokazuje izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkog modela ovisnosti obračunatog a programom Statgraphics.

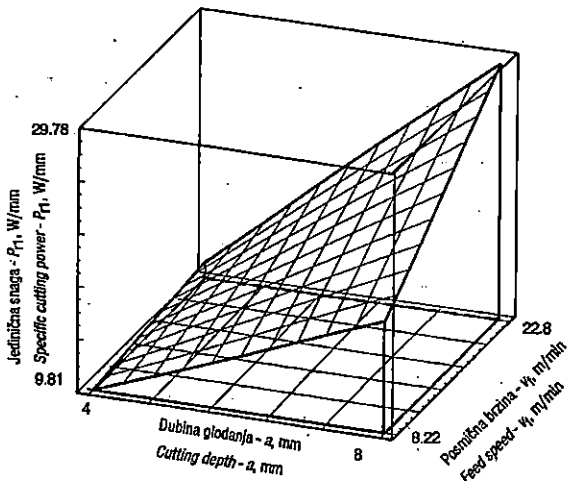
U tablici 3. a prikazana je utvrđena veoma jaka utjecajna sveza svake od nezavisnih inačica, kao i njihovo međudjelovanje na jediničnu snagu glodanja. To potvrđuje i utvrđeni koeficijent korelacije.

Utvrdjena kakvoća regresijskog modela prikazana je u tablici 3. b, gdje je vrlo visok koeficijent determinacije. U tablici 3. c testom F je potvrđen veći utjecaj dubine glodanja na jediničnu snagu negoli posmične brzine. Najmanji, ali još uvijek značajni utjecaj na jediničnu snagu ima njihova interakcija.

Radi lakšeg očitavanja traženih vrijednosti matematičkoga modela pomoću prije navedenoga *softverskog* programa iz prostornih je dijagrama iscrtan rezultatni sloj u dvoosnom dijagramu, gdje tijekom treće, zavisne varijable čine slojnice s vrijednostima promatrane veličine. Takav linijski grafikon na osima x i y nosi nezavisne varijable, a na linijama — slojnicama vrijednosti zavisne varijable.

Tab. 3. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkoga modela  
 The original computer outprint of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for: BUM.jela sn					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	16,728	0,015 289	80,0198	0,0000	
BUM.dubina	0,182 995	0,022 934	7,9792	0,0005	
BUM.brzina	0,060 925	0,022 934	2,6565	0,0451	
BUM.brzina*BUM.dubina	0,035 86	0,022 934	1,5636	0,1787	
R-SQ. (ADJ.)=0,8977		SE=0,045 868	MAE=0,032 677	DurbWat=0,603	
Previously: 0,8816		0,036 929	0,026 922	0,346	
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	0,153 940	3	0,051 3133	24,3898	0,0021
Error	0,010 5194	5	0,002 103 88		
Total (Corr.)	0,164 459	8			
R-squared=0,936 036		Std. error of est.=0,045 8681			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,897 658		Durbin-Watson statistic=0,602 613			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-value
BUM.dubina	0,133 948 68	1	0,133 9487	63,67	0,0005
BUM.brzina	0,014 847 42	1	0,014 8474	7,06	0,0451
BUM.brzina*BUM.dubina	0,005 143 76	1	0,005 1438	2,44	0,1787
Model	0,153 939 86	3			



Sl. — Fig. 11. Ovisnost jedinične snage glodanja o posmičnoj brzini i dubini glodanja za jelovinu  
 The relation between the specific milling power and the feed speed and milling depth for fir

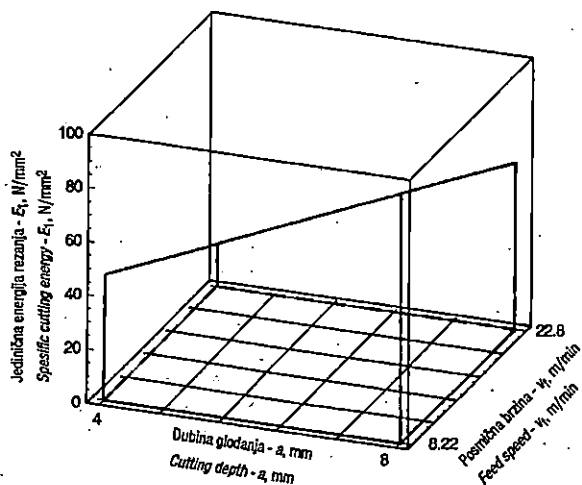
## OVISNOST JEDINIČNE ENERGIJE GLODANJA O POSMIČNOJ BRZINI I DUBINI ZAHVATA ZA JELOVINU THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC MILLING ENERGY AND THE FEED SPEED AND MILLING DEPTH FOR FIR

Jedinična energija glodanja pokazuje prosječnu potrebu energije za obradbu jedinice širine neke obradne plohe. Iz dijagrama na slici 12. vidljiv je utjecaj dubine glodanja i posmične brzine na zahtjevanu jediničnu energiju obradbe. Primjetno je smanjenje jedinične energije glodanja po milimetru širine glodane plohe s povećanjem posmične brzine. Kao i kod jedinične snage glodanja, tako je i u ovom slučaju utvrđena ovisnost u skladu sa znanim postavkama u teoriji rezanja. Za opis ovisnosti jedinične energije glodanja o dubini glodanja i posmičnoj brzini, za navedene uvjete, pokazala se najprikladnija jednadžba

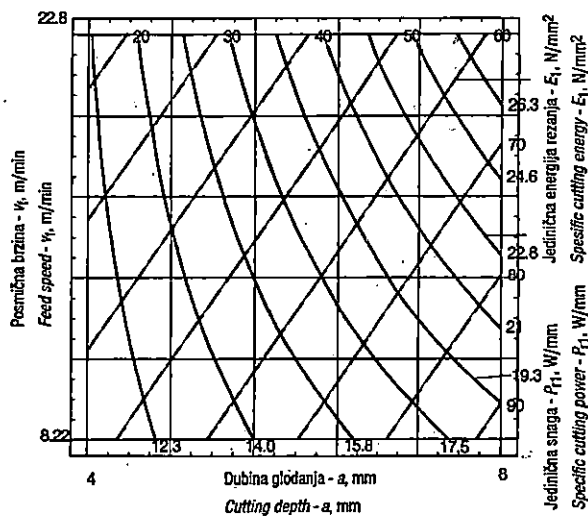
$$E_1 = C \cdot a^{p_1} \cdot v_f^{p_2} \quad (51)$$

Zasebni utjecaj nezavisnih varijabli kao pokusnih inačica na jediničnu energiju glodanja vidljiv je u tablici 4. a. Utvrđeni koeficijent korelacije vrlo je visok, što potvrđuje jaku povezanost mjernih veličina u pokusnim inačicama.

Pouzdanost matematičkog modela u koji je uključena i interakcija inačica prikazana je u tablici 4. b. U tablici 4. c potvrđen je najveći utjecaj dubine glodanja na jediničnu energiju glodanja po milimetru glodne širine. Utjecaj interakcije dubine glodanja i posmične brzine je zanemariv.



Sl. — Fig. 12. Ovisnost jedinične energije glodanja o posmičnoj brzini i dubini glodanja za jelovinu  
 The relation between the specific milling power and the feed spee and milling depth for fir



Sl. — Fig. 13 Ovisnost jedinične snage i jedinične energije o posmičnoj brzini i dubini glodanja za jelovinu  
 The relation between the specific milling power and specific milling energy and the feed spee and milling depth for fir

Slika 13. nastala je »preklapanjem slojnica« sa slika 11. i 12, gdje se istovremeno mogu očitati vrijednosti jedinične snage i jedinične energije glodanja ovisne o posmičnoj brzini i dubini glodanja.

Tab. 4. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkoga modela  
 Table 4 — The original computer output of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for: BUM.jela_en					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	50,89	0,006 331	269,5653	0,0000	
BUM.dubina	0,5382	0,009 497	19,6425	0,0000	
BUM.brzina	-0,26558	0,009 497	-14,2654	0,0000	
BUM.brzina*BUM.dubina	0,14226	0,009 497	5,1923	0,0035	
R-SQ. (ADJ.)=0,9871	SE=0,018 993	MAE=0,013 622	DurbWat=0,492		
Previously: 0,0000	0,000 000	0,000 000	0,000		
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	0,222 328	3	0,074 1095	205,431	0,0000
Error	0,001 803 76	5	0,000 360 752		
Total (Corr.)	0,224 132	8			
R-squared=0,991 952		Std. error of est.=0,0189 935			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,987 124		Durbin-Watson statistic=0,491 532			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Sq.	F- Ratio	P- value
BUM.dubina	0,139 188 69	1	0,139 1887	385,83	0,0000
BUM.brzina	0,073 413 90	1	0,073 4139	203,50	0,0000
BUM.brzina*BUM.dubina	0,009 725 90	1	0,009 7259	26,96	0,0035
Model	0,222 328 49	3			

## OVISNOST JEDINIČNOGA OTPORA REZANJA JELOVINE O POSMIČNOJ BRZINI I DUBINI GLODANJA ZA JELOVINU

### THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC CUTTING RESISTANCE AND THE FEED SPEED AND MILLING DEPTH FOR FIR

Za zadani je smjer rezanja pri obradbi drva pokazano da na jedinični otpor rezanja najznačajnije utječe srednja debljina odvojene čestice. Lako se može pokazati da je u zadanim uvjetima srednja debljina odvojene čestice

$$h_{sr} = \frac{v_f}{n \cdot z} \cdot \arccos \frac{D - 2a}{D} \quad (52)$$

(jednadžba vrijedi u slučaju ako je kut zahvata glodala iskazan u radijanima).

Na osnovi rezultata analize modela (tablica 5. a) može se ustvrditi da je gornja pretpostavka (52) potvrđena koeficijentom determinacije koji upućuje na kakvoću modela, a u kojemu je sadržano i međusobno djelovanje pojedinih veličina (vidi tablicu 5. b).

Prema prikazanim rezultatima u tablici 5. c najutjecajniji čimbenik je dubina glodanja, što samo potvrđuje prije iznesenu tvrdnju da jedinični otpor rezanja u najvećoj mjeri ovisi o dubini glodanja.

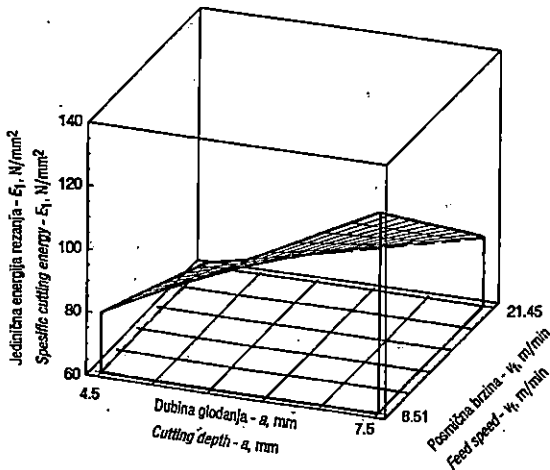
Tab. 5. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkog modela  
 Table 5 — The original computer outprint of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for: BUM; jela ks					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	54,76	0,012 31	86,6582	0,0000	
BUM.dubina	-0,947 17	0,018 465	0,7562	0,4836	
BUM.brzina	0,063	0,018 465	-7,7206	0,0006	
BUM.brzina*BUM.dubina	-0,4618	0,018 465	1,5534	0,1810	
R-SQ. (ADJ.)=0,8816		SE=0,036 929	MAE=0,026 922	DurbWat=0,346	
Previously: 0,9871		0,018 993	0,013 622	0,492	
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	0,222 328	3	0,074 1095	205,431	0,0000
Error	0,001 803 76	5	0,000 360 752		
Total (Corr.)	0,224 132	8			
R-squared=0,991 952		Std. error of est.=0,0189 935			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,987 124		Durbin-Watson statistic=0,491 532			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Sq.	F- Ratio	P- value
BUM.dubina	0,000 779 81	1	0,000 7798	0,57	0,4913
BUM.brzina	0,081 290 56	1	0,081 2906	59,61	0,0006
BUM.brzina*BUM.dubina	0,003 290 74	1	0,003 2907	2,41	0,1810
Model	0,085 361 11	3			

## OVISNOST JEDINIČNE ENERGIJE GLO DANJA O POSMIČNOJ BRZINI I DUBINI GLO DANJA ZA BUKOVINU THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC MILL ENERGY AND THE FEED SPEED AND MILLING DEPTH FOR BEECH

Iz dijagrama na slici 14. vidljiva je ovisnost jedinične energije glodanja o dubini zahvata i posmičnoj brzini za dane uvjete obradbe bukovine. Energiju glodanja po milimetru glodne širine iskazuje jednadžba

$$E_1 = C \cdot a^{P_1} \cdot v_f^{P_2} \quad (53)$$



Sl. — Fig. 14 Ovisnost jedinične energije glodanja o posmičnoj brzini i dubini glodanja za bukovinu  
 The relation between the specific milling energy and the feed speed and milling depth for beech

Rezultati jedinične energije glodanja u skladu su s teorijskim postavkama, a prema modelu vrijednosti se odzivne funkcije ( $E_1$ ) kreću od minimalnih 60,66 J/mm do maksimalnih 123,18 J/mm.

Utjecaj je glodne dubine i posmične brzine glodanja najveći za tako postavljeni model, dok je njihovo međusobno djelovanje relativno malo.

Kakvoća izraza (53) pokazuje i vrlo visoki koeficijent korelacije (vidi tablicu 6. a), a dobrota je modela pokazana s koeficijentom determinacije  $R^2=0,8232$ .

Analiza varijabli pomoću testa F također potvrđuje da na jediničnu energiju glodanja bukovine ima najveći utjecaj glodna dubina, a nešto manji posmična brzina.



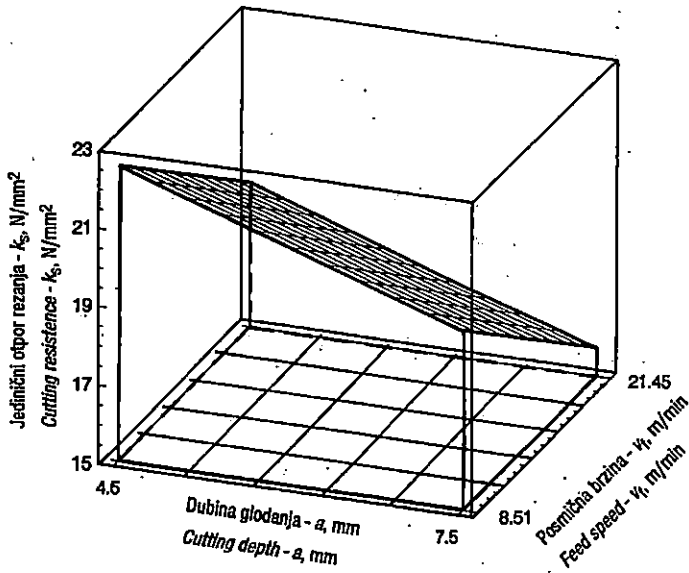
Tab. 6. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkoga modela  
 Table 6. The original computer output of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for: BUM.bukva_en					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	86,34	0,011 313	171,1459	0,0000	
BUM.dubina	0,303	0,016 97	4,5719	0,0060	
BUM.brzina	-0,15	0,016 97	-4,1833	0,0086	
BUM.brzina*BUM.dubina	-0,0899	0,016 97	-1,3580	0,2325	
R-SQ. (ADJ.)=0,8232	SE=0,033 940	MAE=0,025 029	DurbWat=0,531		
Previously: 0,6853	0,061 478	0,044 859	0,594		
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	0,046 3603	3	0,015 4534	13,4155	0,0079
Error	0,005 75954	5	0,001 151 91		
Total (Corr.)	0,052 1199	8			
R-squared=0,889 494		Std. error of est.=0,033 9398			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,823 191		Durbin-Watson statistic=0,530 822			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Sq.	F- Ratio	P- valur
BUM.dubina	0,024 077 73	1	0,024 0777	20,90	0,0060
BUM.brzina	0,020 158 32	1	0,020 1583	17,50	0,0086
BUM.brzina*BUM.dubina	0,002 124 29	1	0,002 1243	1,84	0,2325
Model	0,046 360 34	3			

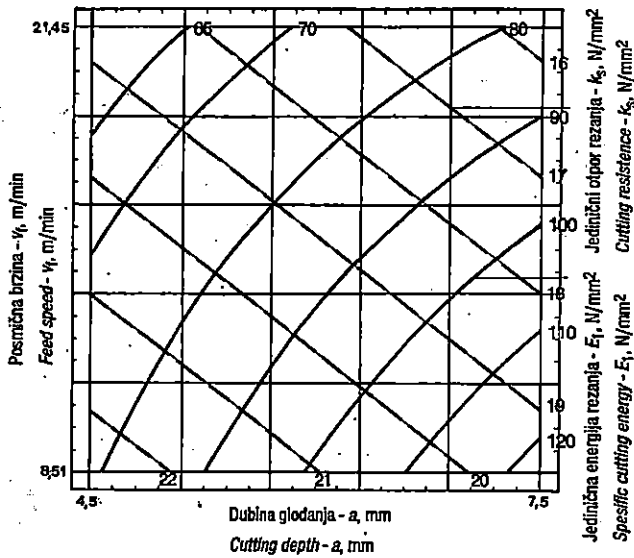
OVISNOST JEDINIČNOGA OTPORA REZANJA O  
 POSMIČNOJ BRZINI I DUBINI GLODANJA ZA BUKOVINU  
 THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC CUTTING  
 RESISTANCE AND THE FEED SPEED AND MILLING  
 DEPTH FOR BEECH

Na slici 15. i jednadžbi (54) prikazana je ovisnost jediničnoga otpora rezanja o dubini glodanja i posmičnoj brzini. Ovisnost jediničnoga otpora rezanja u skladu je sa znanim postavkama iz teorije rezanja.

$$k_s = C \cdot a^{p_1} \cdot v_f^{p_2} \quad (54)$$



Sl. — Fig. 15 Ovisnost jediničnog otpora o posmičnoj brzini i dubini glodanja za bukovinu  
 The relation between the specific cutting resistance end the feed spee and milling depth for beech



Sl. — Fig. 16 Ovisnost jediničnog otpora rezanja i jedinične energije o posmičnoj brzini i dubini glodanja za bukovinu  
 The relation between the specific cutting resistance and specific milling energy and the feed spee and milling depth for beech

Maksimalna vrijednost jediničnoga otpora rezanja od 22,54 N/mm<sup>2</sup> ustanovljena je kod minimalne dubine glodanja i posmične brzine, dok je minimalna vrijednost od 15,71 N/mm<sup>2</sup> utvrđena kod najveće dubine i posmične brzine.

U tablici 7. a vidljiv je najveći utjecaj posmične brzine, a potom dubine glodanja, pri čemu je koeficijent korelacije jediničnoga otpora rezanja prikazan izrazom (54) zadovoljavajuće visok, a koeficijent determinacije sukladnoga je iznosa.

I analiza varijanci (tablica 7. c) samo potvrđuje redosljed utjecaja pojedinih čimbenika.

Na slici 16. istovremeno se može očitati vrijednost jediničnoga otpora rezanja i jedinične energije rezanja za bukoviinu. Najveća je vrijednost jediničnoga otpora rezanja kod minimalne dubine i posmične brzine. Maksimalna jedinična energija glodanja uočljiva je kod najmanje posmične brzine i najveće dubine glodanja.

Tab. 7. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkoga modela  
 Table 7. The original computer outprint of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for BUM.bukva-ks					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	1,287 361	0,008 562	150,3549	0,0000	
BUM.dubina	-0,036 715	0,012 843	-2,8587	0,0355	
BUM.brzina	-0,046 76	0,012 843	-3,6408	0,0149	
BUM.brzina*BUM.dubina	-0,022 61	0,012 843	-1,7605	0,1386	
R-SQ. (ADJ.)=0,7291		SE=0,025 686	MAE=0,018 017	DurbWat=0,614	
Previously: 0,8232		0,033 940	0,025 029	0,531	
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	D	Mean Square	F-Ratio	P-value
		F			
Model	0,016 1828	3	0,005 394 27	8,175 69	0,0225
Error	0,003 298 97	5	0,000 659 794		
Total (Corr.)	0,019 4818	8			
R-squared=0,830 664		Std. error of est.=0,025 6864			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,729 062		Durbin-Watson statistic=0,614 228			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	D	Mean Sq.	F-Ratio	P-value
		F			
BUM.dubina	0,005 391 96	1	0,005 3920	8,17	0,0355
BUM.brzina	0,008 745 99	1	0,008 7460	13,26	0,0149
BUM.brzina*BUM.dubina	0,002 044 85	1	0,002 0448	3,10	0,1386
Model	0,016 182 80	3			

OVISNOST JEDINIČNE SNAGE GLO DANJA O POSMIČNOJ  
BRZINI I DUBINI GLO DANJA ZA BUKOVINU  
THE RELATION BETWEEN THE SPECIFIC MILLING POWER  
AND THE FEED SPEED AND MILLING DEPTH FOR BEECH

U zadanim je uvjetima rezanja snaga rezanja iskazana jednadžbom (55).

$$P_r = k_s \cdot v_f \cdot a \cdot B_o \quad (55)$$

Na osnovi provedene analize utvrđena je ovisnost jediničnoga otpora o posmičnoj brzini obratka (19)  $k_s = A \cdot v_f^B + C$

Uvrštenjem iznosa jediničnoga otpora rezanja (19) u izraz za snagu rezanja (55) dobiva se jednadžba (56)

$$P_r = (A \cdot v_f^B + C) \cdot v_f \cdot a \cdot B_o \quad (56)$$

Tab. 8. Izvorni računalni ispis pretpostavljenoga matematičkog modela  
Table 8. The original computer outprint of the proposed mathematical model

a) Model fitting results for: BUM; jela; ks					
Independent variable	Coefficient	Std. error	t-value	Sig. level	
CONSTANT	26,8365	0,020 493	69,7187	0,0000	
BUM.dubina	0,064 905	0,030 739	2,078 9	0,0922	
BUM.brzina	0,115 745	0,030 739	3,7654	0,0131	
BUM.brzina*BUM.dubina	-0,04 259	0,030 739	-1,3855	0,2245	
R-SQ. (ADJ.)=0,6853	SE=0,06 1478	MAE=0,044 859	DurbWat=0,594		
Previously: 0,8977	0,045 868	0,032 677	0,603		
9 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.					
b) Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	0,077 186	3	0,025 7262	6,806-65	0,0324
Error	0,018 8978	5	0,003 779 57		
Total (Corr.)	0,096 0765	8			
R-squared=0,803 304		Std. error of est.=0,061 4782			
R-squared (Adj, for d. f.)=0,685 287		Durbin-Watson statistic=0,593 68			
c) Further ANOVA for Variables in the Order Fitted					
Source	Sum of Squares	D F	Mean Sq.	F- Ratio	P- value
BUM.dubina	0,016 335 40	1	0,016 3354	4,32	0,0922
BUM.brzina	0,053 587 62	1	0,053 5876	14,18	0,0131
BUM.brzina*BUM.dubina	0,007 255 63	1	0,007 2556	1,92	0,2245
Model	0,077 178 65	3			

Analizom mjernih rezultata mjerenja utvrđeno je da posmična brzina ponajviše utječe na snagu rezanja, što je i očekivano prema izrazu (33).

Za glodanje bukovine znakovito je veće rasipanje mjernih rezultata, što je primjetno i u tablici 8. gdje su pojedini koeficijenti niži.

## ZAKLJUČCI — CONCLUSIONS

U skladu s usvojenim ciljevima istraživanja prihvaćene teme rada provedeno je obuhvatno proučavanje problema. Može se izdvojiti nekoliko sastavnica koje povezuju metode istraživanja, postupak proučavanja, način iskaza i dr. Tako zaokružene cjeline čine sljedeći naslovi:

- položaj drvodjeljstva u sustavu drvna industrija i nadsustavu okoliš;
  - opći pregled istraživanja obradbe drva;
  - neke značajke proučavanja obradbe drva glodanjem;
  - sustavi prigona viševretenskih glodalica za obradbu drva;
  - značajni obradbeni čimbenici pri procesima odvajanja čestica:
    - definicija korištenih pojmova,
    - konstrukcijski, energetski i informacijski čimbenici,
    - režimi obradbe,
    - utjecaj alata,
    - vrsta drva i obradbe;
  - matematički model kao pomoć pri rješavanju problema optimizacije;
  - osvrt na optimizaciju učina viševretenskih glodalica za obradbu drva;
  - rezultati pokusa obradbe drva glodanjem;
  - moguće preporuke u svezi s glodanjem drva viševretenskim glodalicama.
- (1) Tipično za posmično gibanje drvenog obratka pri glodanju viševretenskim glodalicama je i za obradbu ravnih ploha i rubova ploča stalnost posmaka uz nepromijenjeni položaj rotirajućih glodala. To nije značajka glodanja kovina. Redovito se zbog promjenljivih dimenzija i svojstava obratka traži stupnjevana ili nestupnjevana promjena posmične brzine.
  - (2) Uz stalnu frekvenciju vrtnje glodala i promjenljivu posmičnu brzinu, pri obradbi drvnih površina može se spoznati obradbeno kakvoća. Proračunska hrpavost drvnog obratka kretala se za uvjete provedenih pokusa od 4  $\mu\text{m}$  do 29  $\mu\text{m}$ . Pojedinačna mjerenja potvrdila su navedene veličine.
  - (3) Studij svojstava drva utjecao je na plan pokusa. Uz jelovinu kao meko drvo odabrana je za drugu vrstu bukovina i kao predstavnik tvrdoga drva i kao prevladavajuće drvo hrvatskih šuma. Zbog bitnog utjecaja smjera obradbe, temperature i mokrine drva navedeni čimbenici kontrolirani su tijekom pokusa.
  - (4) Nisu poznati matematički modeli za opis obradbe drva glodanjem. Kao osnova vlastitoga modela uzeta su opća načela poznata iz rada Golje (1987). U funkciju kriterija optimalnosti glodanja ušla je posmična brzina kao jedina nezavisno promjenjiva veličina, koju i proizvođači strojeva postojeće generacije viševretenskih glodalica smatraju bitnim čimbenikom učina i kakvoće glodanja. Uz svekoliku korisnost glodanja koja određuje optimum obradbe može se ustvrditi

- da je proporcionalna s posmičnom brzinom i jediničnom širinom obratka, a obrnuto proporcionalna sa zbrojem vrijednosti ulaznih procesnih veličina (alata, stroja, poslužitelja i energije) u jedinici vremena.
- (5) Svi planirani i provedeni pokusi obradbe drva glodanjem bitno se ne razlikuju od općepoznatih načina energetske mjerenja na alatnim strojevima. Tek održavanje dubine glodanja te kontrola posmične brzine i svojstava drva zahtijeva dodatne radnje. To je bilo i razlogom statističke obradbe dijela ovih rezultata mjerenja, npr. postavna i stvarna dubina glodanja i sl.
  - (6) Jedinični otpor glodanja u ovisnosti o posmičnoj brzini pokazuje čvršću svezu pri obradbi jelovine negoli glodanju bukovine. Utvrđeni jedinični otpori glodanja bukovine veći su za oko 55 % od utvrđenih za jelovinu pri približno istim posmičnim brzinama.
  - (7) Jedinični otpor glodanja i srednje debljine odvojene čestice pokazuju u slučaju jelovine ujednačenost korelacijski utvrđenih ovisnosti u odnosu na one kod bukovine koje se kreću u širem rasponu. Pritom je granična asimptotska vrijednost jediničnoga otpora rezanja za gotovo 78 % veća od one za jelovinu. Sa smanjenjem dubine glodanja jelovine jedinični otpor rezanja opada s rastom debljine odvojene čestice (od oko  $9,2 \text{ N/mm}^2$  na  $6,8 \text{ N/mm}^2$ ). Pri glodanju bukovine nisu utvrđene slične zakonitosti.
  - (8) Ovisnost snage rezanja o srednjoj debljini odvojenih čestica čvrsta je za jelovinu, a nešto slabija za obradbu bukovine. U svim slučajevima odabran je pravac za izjednačenje pokusom utvrđenih veličina. Kao i u drugim pojedinim slučajevima, i u ovome se dio kolebanja mjernih podataka može pripisati anizotropnosti drvene tvari obratka.
  - (9) Proučavanje energije glodanja o posmičnoj brzini provedeno je regresijskom analizom s eksponencijalnim oblikom funkcije. Najveći utrošak energije pri dubini glodanja od 8 mm iznosi  $113,1 \text{ J/mm}$ , a za bukovinu pri dubini od 7,5 mm  $120,3 \text{ J/mm}$ .
  - (11) Ovisnost energije glodanja o srednjoj debljini odvojene čestice pokazala je za jelovinu čvrstu svezu i gotovo istu i za bukovinu. Dok za jelovinu nagli rast energije počinje za debljine odvojenih čestica oko 0,07 mm, za bukovinu je to pri dvostruko manjoj vrijednosti (oko 0,03 mm i manje).

#### LITERATURA — REFERENCES

- Čatić, I., 1992: Prijedlog nastavnog plana proizvodnog smjera. Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Interna studija, Zagreb.
- Brezinščak, M., 1979: Mjeriteljstvo kao dio informacijskog sustava. Zbornik Jugoslavenskog savjetovanja o nastavi mjerenja, Novi Sad, 1.01-1.18.
- Brezinščak, M., 1982: Mjerna nesigurnost. Tehnička enciklopedija, 8. svezak, JLZ »Miroslav Krleža«, Zagreb, 604-610.
- Brezinščak, M., 1984: Međunarodni definicijski rječnik (Hrvatsko-englesko-francuski). Mjeriteljsko društvo Hrvatske, Zagreb, str. 1-36.
- Cebalo, R., 1985: Optimalno područje brušenja u puno vatrootpornih Ni-legura za plinske turbine. Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, str. 1-202.
- Cebalo, R., 1990: Duboko brušenje. Školska knjiga — Zagreb, str. 1-89.
- Cebalo, R., 1990: Suvremena tehnologija brušenja. Zagreb, str. 1-118.

- Cumming, J.D., 1967: Control of band saw behavior. Wood machining seminar F.P.L. Richmond.
- Endersby, H.J., 1964: The planing of home-grown softwoods. Scottish Forestry.
- Figurić, M., 1985: Kriteriji optimizacije kod oblikovanja organizacijskih sistema. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. BILTEN — Zavoda za istraživanja u drvnj industriji, 13 (3-4): 81-91.
- Figurić, M., 1987: Organizacija rada u Drvnj industriji. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 1-364.
- Fijan, Z., 1976: Optimizacija proizvodnih procesa oponašanjem na elektroničkom računalu. Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
- Goggia, V., 1993: Strojevi i alati za obradu drva II. — rukopis.
- Golja, V., 1986: Energy standards and productivity at Wood cutting by Laser. IUFRO, Division 5. Ljubljana, 1-9.
- Golja, V., 1987: Optimizacija režima rada na strojevima za obradu drva sa stalnom glavnom brzinom rezanja. Drvna industrija, 28 (11-12): 263-267, Zagreb.
- Goodchild, R., 1967: Factors affecting the power user in planing. Reprinted from Woodworking Industry.
- Goodchild, R., 1962: Factors affecting high speed rotary planing. Reprinted for Forest Products Research Laboratory from WOODWORKING INDUSTRY, pp. 1-7.
- Hribar, J., 1968: Sile na alatu za obradu drveta. »IV Savjetovanje proizvodnog mašinstva«, Sarajevo, 1-26
- Lisičan, J., 1965: Niektoré problémy a cesty k znizovaniu nadmiery na opracovanie reziva frézovaním. Sbornik Vedeckych Prac, 77-97, Zvolen.
- Ljuljka, B., 1985: Optimizacija proizvodnih procesa u preradi drva. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. BILTEN — Zavoda za istraživanja u drvnj industriji, 13 (3-4): 1-1.
- Maijer, G., 1985: Rechnerische Bestimmung der Schnittleistung beim Fräsen. Holz- und Kunststoffverarbeitung (11): 50-53, Stuttgart.
- Mulc, T., 1991: Projektiranje manipulacijskog robota s posebnim osvrtom na optimiranje prigona. Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, str 1-115.
- Pahlitzsch, G., & K. Puttkammer, 1972: Die Beanspruchungen von Bandsägeblättern: Spannungen und Festigkeitsgrenzen. Holz als Roh- und Werkstoff, 30: 165-174, Berlin — Heidelberg.
- Pahlitzsch, G., & K. Puttkammer, 1973: Ermittlung der Steifheit von Bandsägeblättern. Holz als Roh- und Werkstoff, 31: 161-167.
- Pahlitzsch, G., & K. Puttkammer, 1974: Beurteilungskriterien für die Auslenkungen von Bandsägeblättern. Holz als Roh- und Werkstoff, 32: 52-57, Berlin — Heidelberg.
- Pavlin, Z., 1985: Optimizacija hidrotermičke obrade drva i drugih energetskih procesa. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. BILTEN — Zavoda za istraživanja u drvnj industriji, 13 (3-4): 35-44.
- Rajković, V.J., 1991: Režimi brušenja ravnih furnirnih ploha i njihov utjecaj na površinsku obradu. Magistarski rad, Šumarski fakultet Zagreb, str. 1-153.
- Rosenheim, K., 1985: Flexibel automatisierte Fertigungskonzepte für die Holzverarbeitung. Holz- und Kunststoffverarbeitung, (12): 48-53, Stuttgart.
- Saljé, E., W. Stühmeier & E. Drückhammer, 1985: Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Schrägfräsen mit großen Achswinkeln. Holz- und Kunststoffverarbeitung, (12): 58-64, Stuttgart.
- Saljé, E., & E. Drückhammer, 1987: Körperschallmessungen an einem Doppelendprofiler. Holz als Roh- und Werkstoff, 45: 371-374, Berlin — Heidelberg.
- Sertić, V., 1985: Optimizacija procesa mehaničko-kemijske tehnologije. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. BILTEN — Zavoda za istraživanja u drvnj industriji, 13 (3-4): 27-34.
- Šavar, Š., 1990: Obrada metala odvajanjem čestica. I. dio — teorijske osnove, Školska knjiga, Zagreb, str. 1-194.
- Witman, H.W., 1983 Schleifen oder Hobeln? Holz- und Kunststoffverarbeitung, (6): 604-605, Stuttgart.

## OPTIMIZATION OF THE WOODWORKING MULTISPINDLE MILLING MACHINES EFFICIENCY

### *Summary*

According to the accepted research intentions a comprehensive study of the problem has been carried out. The following subtitles are elements providing link between the method and procedure of the investigation, the chosen statement etc.:

- the position of the woodworking in the woodworking industry system and environmental supersystem;
- general review of the woodworking research work;
- some characteristics of woodworking by milling;
- drive systems for woodworking multispindle milling machines;
- relevant woodworking factors at chipping processes;
- mathematical model as an aid in solving the optimization problem;
- a note the optimization of the woodworking multispindle milling machines efficiency;
- test results of woodworking by milling;
- possible recommendations for woodmilling by multispindle milling machines.

Constant feed speed and fixed position of rotational milling cutters is typical for the feed movement of the wooden work piece at milling by multispindle milling machines. This is not a characteristics of milling metal work pieces. Due to varying dimensions and work piece qualities a graduated or non-graduated change of the feed speed is generally required.

At the constant milling cutter rotation frequency and variable feed speed, the quality of the milled surface can be determined. The calculated roughness of the wooden work piece in our test condition ranged between 4  $\mu\text{m}$  and 29  $\mu\text{m}$ . Individual measurements have confirmed the quantities mentioned above.

Mathematical models describing woodworking by milling are not known to exist so far. This model was based on the general principles stated (Golja 1987). The milling optimization was done by the feed speed functioning as the optimization criterion as it is the only independent by variable quantity and the producers of today's generation of multisprindle milling machines consider it as an essential factor of milling efficiency and quality. The general milling efficiency is, on the one hand, determining the woodworking optimum, and on the other hand it is proportionate to the feed speed and specific width of the work piece, and inversely proportionate to the sum of the process input quantities (tools, machines, operators and energy) in a unit of time.

All woodworking tests planned and performed in this research do not essentially differ from other generally known measurements carried out on machine tools.

The correlation between the specific cutting resistance and the feed speed is stronger at milling fir than at milling beech. The specific cutting resistances for beech



are by about 55 % higher from those determined for fir at the approximatively same feed speeds.

The specific cutting resistance and the average chip depths show approximatively the same correlation for fir, but not for beech where their range is much wider. The asymptotic value of the specific cutting resistance is higher for beech than for fir (almost 78 %). At milling fir as the cutting depth decreases, the specific cutting resistance becomes lower with the increase of the chip depth (from about 9,2 N/mm<sup>2</sup> to 6,8 N/mm<sup>2</sup>), which is not the case when milling beech.

The regression analysis has shown a very strong correlation between the cutting power and the feed speed for fir, while the same correlation for beech is medium and showing the already mentioned dispersion of the measurement values.

The correlation of the cutting power and the average chip thickness is very strong for fir, and a bit less strong for beech. In all cases the straight line has been chosen for fitting the measurement results. As in some other individual cases, a part of the measurement data dispersion can in this case be attributed to the anisotropism of the wood.

The correlation between the milling energy and the average chip thickness is strong for fir and nearly the same for beech. The steep energy increase for fir begins at chip thicknesses of about 0,07 mm, and for beech at about 0,03 mm or less.

Author's address:  
Stjepan Risović  
Faculty of Forestry  
41 001 Zagreb, P.O. Box 178  
Croatia