

Ružica Beljo-Lučić, Vlado Goglia

Prilog istraživanju bočne stabilnosti lista kružne pile I

Utjecajni čimbenici na razdiobu vlastitih frekvencija lista kružne pile

A contribution to the research of circular saw lateral stability I Influencing parameters on the circular saw natural frequencies

Original scientific paper • Izvorni znanstveni rad

Received - primljeno: 26. 07. 1998. • Accepted - prihvaćeno: 24. 09. 1998.

*UDK: 634*822.33*

SAŽETAK • Glavni je problem kružnih pila stabilnost lista u procesu piljenja a problemi postaju izraženiji s povećanjem posmične brzine, brzine rezanja i promjera lista te sa smanjenjem debljine lista. Ponašanje lista pile tijekom vrtnje i piljenja umnogome je određeno razdiobom vlastitih frekvencija u mirovanju. U radu se iznose mjerni rezultati istraživanja spektara vlastitih frekvencija, nekih utjecajnih čimbenika te prigušnih svojstava kružnih pila pri različitim izvedbama lista. Ispitano je sedam uzoraka pila promjera 300 mm. Razdioba vlastitih frekvencija mjerena je pri mirovanju lista. Istraženi su ovi utjecajni parametri: 1. omjer pričvršćenja lista, 2. inačice pričvršćenja lista prirubnicom, 3. prigušenje energije vibracija. Pri istraživanju je uporabljena mjerna oprema propisana međunarodnim normama. Istraživanja su pokazala da se spektar vlastitih frekvencija prigušenih listova pila ne mijenja bitno dodatnim smanjenjem energije vibracija postavljanjem prigušne podloge između pile i prirubnice, dok se u neprigušenih listova smanjuje veličina ubrzanja značajnih frekvencija spektra. Na temelju rezultata istraživanja ne mogu se donositi uopćeni zaključci o utjecaju omjera pričvršćenja (u granicama od 0,24 do 0,33) na vlastiti spektar pile. U radu je upozoreno na mogućnost uporabe faktora restitucije (pokazatelja mogućnosti uspostave prijašnjeg stanja) između pile i kuglice kao mjere prigušnih svojstava pile.

Ključne riječi: kružna pila, stabilnost, vibracije, razdioba vlastitih frekvencija pile, prigušna svojstva pila.

Abstract • *The circular saw is the most frequently used woodworking machine. The main problem of using the circular saw is the lateral stability of the sawblade and the problems grow bigger with increased cutting speed and feed speed, and with decreased sawblade thickness. Sawblade behaviour during rotation and cutting is significantly determined by the natural frequency spectrum of the standing sawblade.*

In this study the research results of the natural frequency spectrum, some influencing parameters and damping characteristics of differently designed circular saw blades in variable conditions are presented. The natural frequency spectrum was determined by using a standing sawblade. The influences of the following parameters were investigated: 1. clamping ratio, 2. the characteristics of the contact area between the saw and the clamp, 3. damping. The standard measuring equipment for vibration and noise was used. One of the aims of this study was to develop a measuring method for the determination of circular saw blade damping characteristics. The measurement results show that the natural frequency spectrum of damped saws does not significantly change with additional damping (with a damping layer between the saw blade and clamp), but the accelerations of specific frequencies of undamped saws are reduced. Based on the measuring results it cannot be generally concluded what the influence of the clamping ratio (0,24 to 0,33) on the saw frequency spectrum is. It is shown that the restitution factor between the saw and a small ball can be used for the determination of the saw blade damping characteristics.

Key words: circular saw, stability, vibration, natural frequencies, damping.

1. UVOD

1. Introduction

Zbog jednostavnog prijenosa snage i gibanja od pogonskog motora do rezne oštrice, kružna je pila najčešće rabljeni stroj za piljenje drva. Međutim, proizvodnja je i održavanje kružnih pila složena te je predmet mnogih istraživanja. Mote (1985a) opisuje list kružne pile kao mehanički sustav s vrlo visokom frekvencijom a s malim prigušenjem, što je vrlo rijedak slučaj, a uzrok je mnogim problemima. Birkeland (1985) kao glavni problem kružnih pila navodi stabilnost lista u procesu piljenja te naglašava rast teškoća s povećanjem posmične brzine, brzine rezanja i promjera lista te sa smanjenjem debljine lista.

Mnogi autori istražuju utjecajne čimbenike na stabilnost lista kružne pile. Istražuje se utjecaj dimenzija i izvedbe lista pile, zatim veličina napinjanja lista, omjer pričvršćenja, vodilice, frekvencija pobude i dr. No mnogo je više znanih pitanja negoli odgovora.

Vibracije i buka kružnih pila kao posljedica nestabilnosti alata, dva su osnovna problema koji utječu na kakvoću obrađene plohe, točnost piljenja, radnu okolicu itd. Danas, pri svakodnevnom smanjenju šumskih površina na Zemlji, rješavanje problema stabilnosti kružnih pila

vrlo je važno radi smanjenja količine nastale piljevine te energije koja se utroši na rezanje, a sve u svrhu razboritoga korištenja sirovine i energije.

2. PROBLEMATIKA I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2. Problem definition and background

Schajer i Kishimoto (1995) osnovnim, međusobno oprečnim čimbenicima u procesu piljenja smatraju:

1. učinak (posmičnu brzinu obratka),
2. iskorištenje (količinu piljevine),
3. kakvoću piljenja (točnost dimenzija i finoću rezne/piljene površine).

Ta su tri čimbenika međusobno usko povezana, a poboljšanjem jednoga mijenjaju se ostali. Učinak raste s povećanjem posmične brzine, međutim ako se želi zadržati potrebna kakvoća obrade, treba razmjerno povećati glavnu brzinu rezanja odnosno frekvenciju vrtnje pile. No frekvencija vrtnje pile može se povećavati samo do kritične vrijednosti, tj. do frekvencije vrtnje pri kojoj pila gubi stabilnost u lateralnome smjeru, a rez postaje vijugav. Deblji listovi pila imaju veću kritičnu frekvenciju, no njihovom se uporabom bitno smanjuje iskorištenje sirovine. Dakle, cilj je povećanje stabilnosti lista kružne pile odnosno povećanje kritične frekvencije lista, a u svrhu

poboljšanja rezultata obrade (učinka, iskorištenja ili kakvoće), uz što manje narušavanje ograničavajućih stalnica.

2.1. Spoznaje o vibracijama lista kružne pile
2.1. Circular sawblade vibrations

Vibracije su lista kružne pile bočno gibanje lista oko njegova ravnotežnog položaja. Problemom vibracija kružnoga diska bavilo se mnogo autora, a velik doprinos temeljnim spoznajama dao je Southwell (1922) opisom ovisnosti vlastite frekvencije diska o frekvenciji vrtnje. Značajna su istraživanja dinamičkog ponašanja lista kružne pile Pahlitzscha i Rowinskog (1967) te C. D. Mota Jr. opisana u brojnim radovima.

Mote (1967) matematički pokazuje da se bočni odmak w vibrirajućeg lista koji ne rotira, u bilo kojoj točki lista (r, θ) može napisati u obliku beskonačnoga niza:

$$w(r, \theta) = f_0(r) + f_1(r) \sin \theta + f_2(r) \sin 2\theta + f_3(r) \sin 3\theta + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(r) \sin n\theta + f_0(r)$$

gdje je r polumjer položaja točke, θ kutni položaj od čvornoga promjera, a $f(r)$ funkcija bočnog odmaka u radijalnome smjeru.

Takav niz, poznat kao *Fourierov niz*, dijeli bočni otklon lista na zbroj određenoga broja svojstvenih harmoničkih oblika.

Mote i Szymani (1977) objašnjavaju vibracije lista pile kao zbroj zasebnih modova (načina) titranja, koji imaju poseban oblik, amplitudu i frekvenciju. Svaki oblik moda karakterizira kombinacija broja čvornih kružnica M i broja čvornih promjera N (sl. 1). Čvorni promjer odnosno čvorna kružnica predočuje zamišljena mjesta na pili na kojima nema bočnog odmaka lista.

Određena frekvencija svakog moda f_{MN} (Hz), nazvana je *vlastitom frekvencijom* i ovisi o geometriji lista pile, omjeru promjera prirubnice i promjera lista (omjer pričvršćenja), svojstvima materijala i naprezanjima u listu pile. Teorijski, sve kom-

binacije M i N modova postoje istodobno. Međutim, pri vibracijama kružne pile prevladavaju modovi titranja koji nemaju čvornih kružnica i imaju do šest čvornih promjera.

Mjerni pretvornik pričvršćen na rotirajući list pile zabilježit će stvarnu vlastitu frekvenciju određenog moda titranja f_{MN} (Hz), koja se, u ovisnosti o frekvenciji vrtnje lista n (min^{-1}), može izraziti jednadžbom (Southwell, 1922):

$$f_{MN}^2 = f_{MN}^{(0)2} + K \cdot (n/60)^2 \quad (2)$$

gdje je $f_{MN}^{(0)}$ vlastita frekvencija mirujućeg lista, a K faktor povećanja vlastite frekvencije lista zbog vrtnje. Povećanje vlastite frekvencije zbog rotacije iznosi do 5 % (Mote i Szymani, 1977).

Svaki mod titranja pile sastoji se od dva vala koji se šire kružno po pili u suprotnim smjerovima vlastitom frekvencijom tog moda titranja. Kad list pile rotira, frekvencija vala koji se širi u smjeru vrtnje povećava se u odnosu prema mirujućem promatraču ili obratku i taj se val naziva *naprijed putujući val*. Pri suprotno putujućem valu frekvencija se smanjuje i on se naziva *natrag putujući val*. U fizici je ta pojava poznata kao klasični Dopplerov efekt.

Frekvencije naprijed i natrag putujućeg vala mogu se iskazati (Nishio i Marui, 1995):

naprijed putujući val

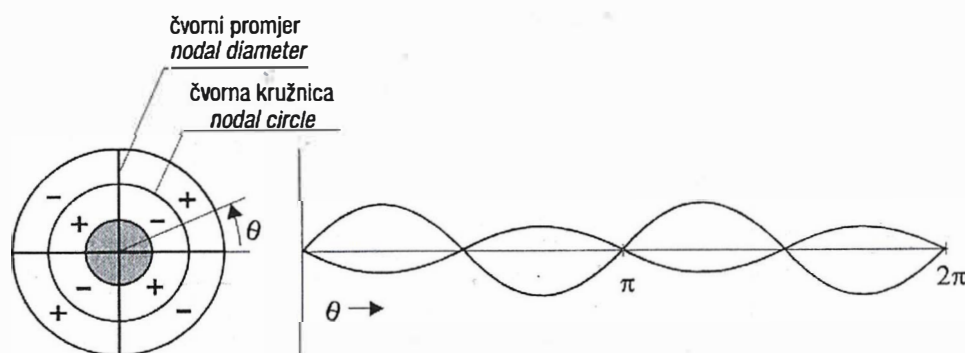
$$f_{MN}^{(F)}(n) = f_{MN}(n) + Nn/60 \quad (3)$$

natrag putujući val

$$f_{MN}^{(B)}(n) = f_{MN}(n) - nN/60 \quad (4)$$

Mirujući mjerni pretvornik zabilježit će te dvije frekvencije. Amplitude tih dvaju valova uglavnom nisu jednake. Mod M, N može biti doveden u rezonantno stanje pobudom bilo koje od te dvije frekvencije.

Gotovo svi problemi u svezi s radom kružne pile na neki su način povezani s



Slika 1.

Primjer moda titranja s dva čvorna promjera i jednom čvornom kružnicom •
Example of a mode with two nodal diameters and one nodal circle

kritičnom frekvencijom vrtnje pile. Mote (1967) definira kritičnu frekvenciju vrtnje kao frekvenciju rotacije diska pri kojoj se oblikuje mirujući val u prostoru te djelovanjem i vrlo male aksijalne sile dolazi do velikih bočnih amplituda. Pri kritičnoj frekvenciji disk potpuno izgubi stabilnost u određenome modu titranja.

Pri toj su *kritičnoj frekvenciji vrtnje* frekvencija vrtnje lista pile i frekvencija širenja vala na listu pile jednake, te se taj natrag putujući val čini kao zaustavljen u prostoru.

Prema tome, uzme li se da je frekvencija natrag putujućeg vala nula, iz (4) slijedi da je kritična frekvencija vrtnje $n_{krit.}$ (min^{-1}) za određeni mod titranja:

$$n_{krit.} = \frac{60 \cdot f_{MN}(n)}{N} \quad (5)$$

gdje je $f_{MN}(n)$ vlastita frekvencija određenog moda titranja pri vrtnji lista, a N broj čvornih promjera toga moda.

2.2. Utjecajni čimbenici na vlastite frekvencije i stabilnost lista
2.2. Influencing factors on sawblade natural frequencies and stability

Što je viša vlastita frekvencija lista u kritičnome modu titranja, veći je kritični broj okretaja, a time je veća i stabilnost lista u radu.

Vlastite frekvencije lista i kritične frekvencije ovise o više čimbenika, a Schajer (1986) navodi ove: 1. dimenzije lista, 2. svojstva materijala, 3. unutarnja naprezanja, 4. vodilice.

Povećanje omjera pričvršćenja mijenja sve vlastite frekvencije naviše (Mote i Szymani, 1977; Schajer, 1986), što je poželjno za stabilnost lista. Osim toga, sa stajališta stabilnosti lista, bitno je da slobodni dio lista (od ruba do prirubnice) nije mnogo veći od visine piljenja.

Chabrier i dr. (1997) navode četiri osnovna utjecajna čimbenika na stabilnost lista:

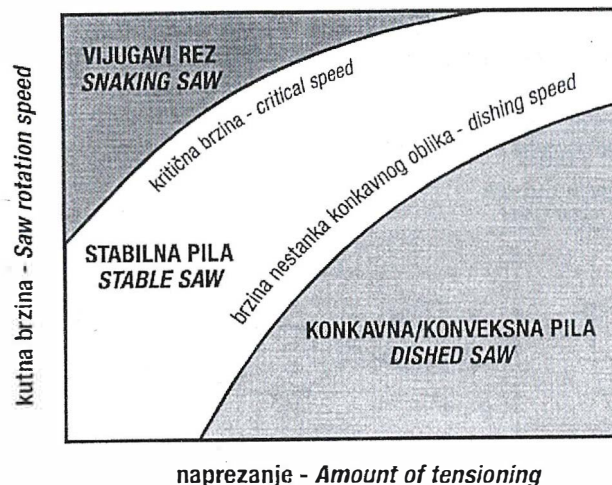
1. frekvenciju vrtnje (utjecaj centrifugalne sile),
2. raspored naprezanja u listu pile,
3. raspodjelu temperature,
4. utjecaj bočnih sastavnica sile rezanja.

Sva naprezanja u listu pile (naprezanja unesena pri proizvodnji, naprezanja unesena napinjanjem lista, naprezanje zbog rotacije lista, toplinska naprezanja zbog razlike temperature na obodu pile i kod ruba prirubnice) utječu na promjenu vlastite frekvencije lista, a time i na kritičnu frekvenciju vrtnje. Promijenjeni radni uvjeti mijenjaju naprezanja u listu pa prema tomu i vlastitu frekvenciju svakoga moda. Dogodi li se bilo što loše u sustavu piljenja (zatupljenje alata, grijanje rubnoga dijela pile, nejednaka razvraka ili stlačenje zuba, neporavnani zubi, gubitak napetosti lista, smanjenje proširenja propiljka), smanjuje se kritična frekvencija vrtnje pile.

Mote i Holøyen (1973) smatraju da je najvažniji utjecajni čimbenik na kritičnu frekvenciju rezanja tijekom rada kružne pile promjena razlike temperature između središnjega i rubnoga dijela pile. Oni su utvrdili da je bitna samo razlika temperatura, a ne apsolutne temperature na rubnome i središnjemu dijelu.

Poznavanje naprezanja prisutnih u listu pile nužno je za računanje i analizu stabilnosti lista. U tu je svrhu Mote (1967) još prije 30 godina primijenio matematički model - *metodu konačnih elemenata* i napisao računalni program pod nazivom CDM23. Konačni elementi tvore mrežu koja opisuje dio ili cijeli list pile. Ulazni su podaci broj elemenata mreže, debljina lista, svojstva materijala, inicijalna naprezanja, naprezanja

Slika 2.
Ovisnost kritične brzine o napetosti lista (Schajer i Kishimoto, 1995) • Critical speed versus sawblade tension (Schajer i Kishimoto, 1995)



unesena napinjanjem, raspodjela temperature i frekvencija vrtnje. Izlazni su podaci raspodjela naprezanja, frekvencije modova titranja i amplitude vibracija.

2.3. Mjere povećanja stabilnosti lista pile 2.3. Improvement of sawblade stability

Pritezanje lista pile na radno vreteno *prirubnicom* mijenja sve vlastite frekvencije naviše i povećava stabilnost lista.

Napinjanje lista jest njegovo naprezanje plastičnim deformiranjem lista udarcima čekića ili valjanjem i lokalnim zagrijavanjem. Napinjanjem lista povećava se kritična frekvencija vrtnje, čime se omogućuje veća brzina rezanja i postizanje bolje kakvoće obrađene površine te većeg učinka u jedinici vremena. Schajer i Kishimoto (1995) daju shematski prikaz ovisnosti kritične brzine o napetosti lista pile prikazan na slici 2.

Da se izbjegnu bočne vibracije i buka kružnih pila, često se izrađuju *radijalni utori po obodu lista te provrti* različitih veličina po tijelu pile. Cilj je izrade utora i provrta smanjiti nastala naprezanja zbog raspodjele temperature. Naime, utori omogućuju nesmetano širenje lista pile pri povećanju temperature i smanjenje naprezanja, a provrti pridonose boljem hlađenju. Nishio i Marui (1996) smatraju ih korisnima za smanjenje bočnih vibracija pri praznome hodu i pri rezanju, no naglašavaju nedovoljnu istraženost njihova utjecaja (duljine i broja) na vlastite frekvencije i kritičnu frekvenciju vrtnje. Broj i duljina utora najčešće se određuje na temelju pokušaja i proba no, u većini slučajeva izrađuje se četiri ili pet utora duljine 1/6 polumjera pile. Nishio i Marui (1996) navode da je raspon nestabilnih frekvencija vrtnje kružne pile najuži u pila s četiri utora za jednake duljine utora.

Mote (1979) teorijski je pokazao da pile s utorima zbog nesimetričnosti ne stvaraju mirujući val u prostoru pri kritičnoj frekvenciji vrtnje.

Jedna od mjera povećanja stabilnosti lista jest postavljanje *vodilica*. Vodilice lista mogu biti kontaktne i beskontaktne. Kontaktne vodilice neposredno dodiruju list pile a dodir se može ostvariti klizanjem ili kotrljanjem vodilica po listu. Preporučljivije su kotrljajuće vodilice radi smanjenja trenja i dodatnog zagrijavanja lista. Beskontaktne se vodilice izrađuju kao zračna ili aerostatička ležišta. One se mogu slobodno gibati u aksijalnome smjeru, nema bočnih sila na list pile ni trenja i zagrijavanja lista.

Plester (1985) navodi ove uloge vodilica lista kružne pile: smanjenje debljine

lista pile, a time i širine propiljka, povećanje statičke i dinamičke krutosti u aksijalnome smjeru, povećanje kritične brzine lista pile te prigušenje vibracija.

Djelotvoran način povećanja stabilnosti lista može biti *stalna (on-line) kontrola stabilnosti*. Mote (1985) razlikuje dvije mogućnosti kontrole vibracija lista kružne pile:

1. kontrolom vanjskih sila koje uzrokuju vibracije lista,
2. kontrolom dinamike lista pile.

Sustav *kontrole vibracija pomoću vanjskih sila* temelji se na činjenici da je kružna pila sustav s vrlo malim prigušenjem te da obično vibrira dominantno u jednom ili dva moda u bilo kojem trenutku. Osnovna je zamisao pronalaženje dominantnoga moda te uspostavljanje nadzora nad njime, što je za praksu neprihvatljivo.

Metoda *kontrole dinamike lista* kružne pile (kontrola frekventnog spektra pile) postavlja spektar vlastite frekvencije lista pile u odnos prema spektru uzbuđene tako da se minimiziraju vibracije pile. Ta je metoda jednostavnija i učinkovitija od prethodne (Radcliffe i Mote, 1981).

Ellis i Mote (1978) razvijaju ideju povratne (*feedback*) kontrole - automatske prilagodbe utjecajnih parametara na stabilnost lista utemeljene na trenutačnom stanju kontrolnih veličina. Kontrolni parametri mogu biti vibracije lista, hrapavost obrađene površine, točnost piljenja, a može se mijenjati frekvencija vrtnje, posmična brzina, raspodjela temperature, prilagoditi vodilice, provesti hlađenje itd.

Jedna od metoda kontrole stabilnosti lista jest i kontrola toplinskih naprezanja (hlađenje oboda lista, grijanje središnjeg dijela lista). Idejom kontrole stabilnosti lista pomoću toplinskog napinjanja bavilo se više autora (Mote i Høloyen, 1977; Mote, Schajer i Høloyen, 1979; Mote, 1985), međutim, ostaje pitanje kakva je raspodjela temperature najpoželjnija.

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

3. Aim of research

Poznato je da su vibracije najnepoželjnija pojava vezana uz rad kružnih pila. Posljedice su vibracija lista, uz energetske gubitke, smanjeno iskorištenje i lošija kakvoća obrade te vrlo visoka razina buke koja opterećuje radnu okolicu. Cilj je mnogih istraživanja pronaći suglasje između proturječnih parametara piljenja.

Budući da je dinamičko ponašanje lista kružne pile često istraživana tema, postignuto je dobro temeljno razumijevanje

problema vezanih uz vibracije standardnih listova kružnih pila. Međutim, te spoznaje treba primijeniti pri proizvodnji i uporabi kružnih pila kako bi se postigli što bolji rezultati postupka piljenja.

Cilj je ovoga rada razviti metodu za određivanje spektra vlastitih frekvencija lista pile te ispitati utjecaj nekih čimbenika na spektar vlastitih frekvencija listova kružnih pila s posebnim izvedbama prigušenja energije vibracija. Ispitat će se utjecaj izvedbe prigušenja lista, nekih inačica pričvršćenja lista prirubnicom te omjera pričvršćenja.

Poseban je cilj ovih istraživanja ispitati mogućnost opisa prigušnih svojstava lista pomoću faktora restitucije između lista pile i pobudne kuglice te istražiti ovisnost frekventnog spektra o faktoru restitucije.

4. OBJEKT ISTRAŽIVANJA I PLAN RADA

4. Research object and test plan

Opis značajki ispitivanih listova pila dan je u tablici 1. *Uzorak 1* standardna je kružna pila bez utora za rasterećenje naprezanja ili bilo kojeg drugog načina prigušenja vibracija. *Uzorak 3* označuje list kružne pile koji je u našim drvnoindustrijskim pogonima najčešće u uporabi. Ta pila ima četiri izrezana radijalna utora duljine 25 mm (1/6 polumjera pile). *Uzorci 2 i 5* imaju laserom izrađena četiri radijalna utora duljine 28 mm te laserom izrađene "ornamente" na tijelu lista pile na simetrali kutova između radijalnih utora. *Uzorci 4 i 6* imaju s

jedne strane priliječnu prigušnu foliju od viskoelastičnog materijala u obliku kružnog vijenca vanjskog promjera 220 i unutarnjeg promjera 72 mm te po obodu laserom izrađena četiri radijalna utora duljine 26 mm. *Uzorak 7* u osnovi je jednak *uzorku 3*, no provrti su na kraju radijalnih utora ispunjeni bakrom koji ima bolja prigušna svojstva negoli čelik od kojega je izrađena pila. Utori su mehanički izrezani, duljina im je 30 mm, a promjer bakrenoga čepa 6 mm.

Istraživanje je provedeno u dva niza mjerenja. U prvom nizu mjerenja list je pile pobuđivan drvenom kuglicom i mjerene su maksimalne veličine ubrzanja na frekvencijama trećina oktave. Mjerenja su provedena na uzorcima pričvršćenim s prirubnicom promjera 72 mm bez prigušne podloge između lista i prirubnice te s dvije različite prigušne podloge. Prigušne su podloge izrađene od plastike (debljine 0,2 mm) i od gume (debljine 0,3 mm) promjera jednakog promjeru prirubnice. U drugom nizu mjerenja list je pobuđivan plastičnom kuglicom, a mjerene su veličine ubrzanja 2 sekunde nakon pobude. Mjerenje je obavljeno na uzorcima pričvršćenim uz tri različita omjera pričvršćenja (promjeri prirubnica 80, 90 i 100 mm), bez prigušne podloge i s gumenom podlogom. U svim slučajevima mjerenja vlastitoga frekventnog spektra lista određen je i faktor restitucije između lista i pobudne kuglice. U tablici 2. navedene su značajke upotrijebljenih sustava za pobudu lista pile.

Tablica 1.

Opis ispitivanih uzoraka • Sample characteristics

Značajka Properties	Uzorak 1 Sample 1	Uzorak 2 Sample 2	Uzorak 3 Sample 3	Uzorak 4 Sample 4	Uzorak 5 Sample 5	Uzorak 6 Sample 6	Uzorak 7 Sample 7
oznaka uzorka Sample mark	uz1	uz2	uz3	uz4	uz5	uz6	uz7
broj zubi Tooth number	80	96	96	96	60	60	60
promjer lista, mm Blade diameter, mm	305	300	300	300	300	300	300
debljina lista, mm Blade thickness, mm	2,2	2,2	2,2	2,5	3,0	2,8	3,0

Tablica 2.

Značajke dvaju sustava za pobudu titranja lista pile • Characteristics of two sawblade exciting system

Značajke - Items	Oznaka Symbol	Jedinica Unit	KUGLICA 1 BALL 1	KUGLICA 2 BALL 2
vrsta materijala - Material			drvo - wood	plastika - plastic
promjer - Diameter	d_k	mm	19,6	14
masa - Mass	m	g	3,66	1,45
udarna energija - Energy	W	mJ	1	1,84
otklon iz ravnotežnog položaja Displacement	x	mm	100	210
duljina pamučne niti - Thread lenght	h	mm	185	235

5. MJERNE METODE I PRIBOR
5. Measuring method and equipment

5.1. Određivanje spektra vlastitih frekvencija lista pile

5.1. Natural frequency determination

Frekvencijski spektar pile predočuje sliku značajnih frekvencija titranja lista kao posljedicu vanjske pobude.

Razdioba vlastitih frekvencija najčešće se određuje mjerenjem amplitude bočnog odmaka lista pile u vremenskoj domeni. Razvijena je bezdodirna metoda mjerenja oscilacija lista pomoću induktivnog davača koji se najčešće rabi u takvim mjerenjima (Schajer i Kishimoto, 1997; Nakamura i dr., 1995; Chabrier i dr., 1997). Pomoću FFT analize (Fast Fourier Transformation) vibriranje pile prenosi se u frekvencijsku domenu i značajna amplituda (tzv. *pik*) pri pojedinim frekvencijama označava vlastite frekvencije lista pile.

Münz (1985b) za određivanje vlastite frekvencije rabi malen piezoelektrični pobudni sustav i akcelerometar zalijepljen na list pile, kojime mjeri odgovor pile na pojedinu pobudnu frekvenciju. Uobičajeno je da se frekvencije pojedinih modova titranja u odnosu prema listu pile određuju pomoću akcelerometra, a u odnosu prema mirujućem promatraču induktivnim davačem pomaka (Münz, 1985b; Münz, 1997; Yokochi i Kimura, 1993).

Vlastiti modovi titranja lista mogu se zamijetiti i tako da se list pile prekrije piljevinom i pobudi generatorom pobude promjenjive frekvencije. Na površini će se lista pri određenim frekvencijama oblikovati određeni mod titranja.

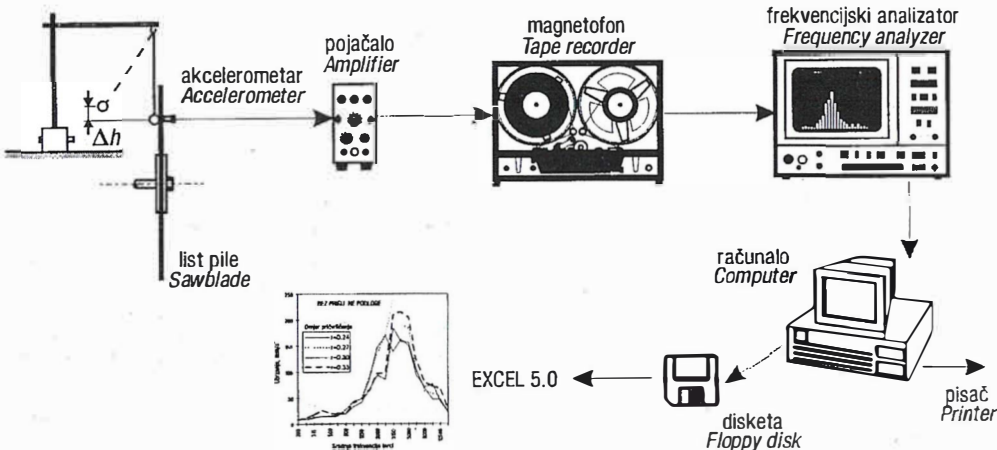
Ovim je istraživanjima obuhvaćeno samo određivanje vlastitoga spektra mirujućeg lista pile. Spektar vlastitih frekvencija mirujućeg lista može poslužiti samo kao približni pokazatelj dinamičkog ponašanja pile pri radu jer u radu dolazi do promjene vlastitih frekvencija.

Pri određivanju spektra vlastitih frekvencija list je pile pobuđen jednostavnim mehanizmom za pobudu (sl. 3). Kuglica je slobodno ovješena o magnetni stalak pomoću pamučne niti zanemarive mase. Da bi se osigurala energija pobude, kuglica se odmicala iz ravnotežnoga položaja tako da joj je težište podignuto za h , čime je osigurana kinetička energija kuglice približno uvijek jednake veličine u trenutku sudara s listom pile.

Da bi se ustanovila razina vibracija lista pile nakon pobude udarnim radom kuglice, na list je pile pričvršćen piezoakcelerometar mase 0,5 g. Akcelerometar je na svim listovima pila pričvršćen na udaljenosti 90 mm od središta lista. Pritom je pretpostavljeno da je masa akcelerometra zanemariva u odnosu prema masi lista pile te da ne utječe na njezine vibracije. Razina je vibracija registrirana i analizirana mjernim lancem prikazanim na slici 3.

List pile pobuđen je na titranje udarom kuglice, odziv se pile registrira mjernim pretvornikom, pojačava i bilježi na magnetofonskoj vrpici, a zatim obrađuje na frekvencijskom analizatoru (*Digital Frequency Analyzer*, type 2131, Brüel & Kjær). Programom napisanim u BASIC-u učitavaju se podaci s frekvencijskog analizatora i zapisuju u obliku tekstualne datoteke.

Program zapisuje veličine ubrzanja za srednje frekvencije terci u rasponu od 1,25 Hz do 16000 Hz. Podaci zapisani u tekstualnoj datoteci učitani su u EXCEL 5.0 te je spektar frekvencija lista analiziran između 200 Hz i 16000 Hz. Za svaki je uzorak pile mjereno sedam nezavisnih uzoraka mjerenja na osnovi kojih je nacrtan zajednički spektrogram svih sedam mjerenja. Dva mjerenja koja najviše odstupaju izuzeta su iz daljnje obrade. Iz preostalih pet mjerenja izračunana je aritmetička sredina veličine ubrzanja za srednje frekvencije terca, a dobiveni podaci daju spektar vlastitih frekvencija uzorka.



Slika 3.
 Mjerni lanac za određivanje frekvencijskog spektra lista pile • Measuring equipment for natural frequency determination

5.2. Mjerenje prigušnih svojstava lista pile
5.2. Sawblade dampening characteristics determination

Standardna metoda određivanja prigušnih svojstava jest logaritamski dekrement. Rezultat je te metode *koeficijent prigušenja* koji služi kao mjera prigušnih sposobnosti lista pile. Ingemansson i Elvhammar (1995) definiraju logaritamski dekrement kao prirodni logaritam omjera dvaju uzastopnih vrhova istog predznaka pri slabljenju titranja na jednoj frekvenciji. Premda je ta metoda normirana, malo se kad rabi za opis prigušnih svojstava listova kružnih pila i njihove učinkovitosti u smanjenju vibracija.

U ovome su radu prigušna svojstva listovakružnih pila ispitana određivanjem faktora restitucije između lista pile i pobudne kuglice.

Prigušna svojstva ispitivanih listova pila definirana su na osnovi pojednostavnjene teorije sudara dvaju tijela bez djelovanja vanjskih sila. Faktor restitucije definiran je kao omjer normalnih sastavnica brzina čestica nakon sudara i prije sudara (Jecić, 1989).

Pri udaru čestice u nepomični zid faktor restitucije svodi se na omjer brzine čestice nakon sudara i prije sudara u pravcu normale. Faktor restitucije pojednostavnjeno se može

odrediti ispuštanjem kuglice mase m s visine h da slobodno pada na ravnu nepomičnu podlogu beskonačne mase u odnosu prema kuglici (sl. 4).

Pri prvom udaru kuglice o podlogu brzina prije udara iznosi:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6)$$

Faktor restitucije u tom je slučaju $k = c/v$, pa je brzina nakon sudara $c = k \cdot v$.

Zbog te će brzine čestica dosegnuti visinu $h_1 = c^2/2g$, pa je brzina nakon sudara

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad (7)$$

gdje je g težno ubrzanje, a h_1 visina do koje kuglica odskoči nakon udara.

Iz (6) i (7) proizlazi da je faktor restitucije

$$k = \sqrt{\frac{h_1}{h}} \quad (8)$$

Za određivanje sposobnosti pojedinih listova pila da priguše energiju vanjske pobude upotrijebljen je jednak pobudni sustav kao pri određivanju spektra vlastitih frekvencija pile. Za određivanje faktora restitucije uporabljene su dvije različite kuglice čije su značajke dane u tablici 2.

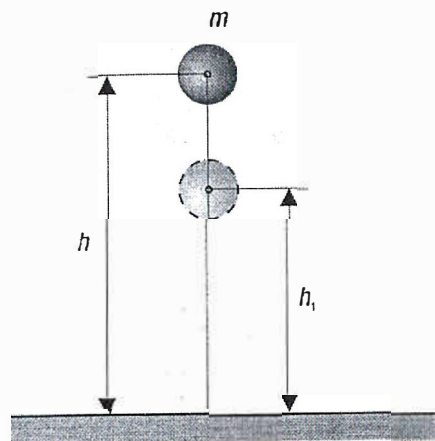
Faktor restitucije određen je prema sljedećoj proceduri.

Pila se pobuđuje udarnim radom kuglice i pritom kamerom (TELEFUNKEN Video Movie 2892) snima odskok kuglice. Za pozadinu snimke rabi se milimetarski papir radi lakšeg odčitavanja vodoravne udaljenosti kuglice od pile nakon odskoka. Za svaki se uzorak snimaju četiri postupka pobude lista pile.

Polaganim pregledavanjem snimke (PANASONIC Video Casette Recorder NV-FS 100 HQ) pri pobudi kuglicom 1 odčitava se horizontalna udaljenost prvog odskoka

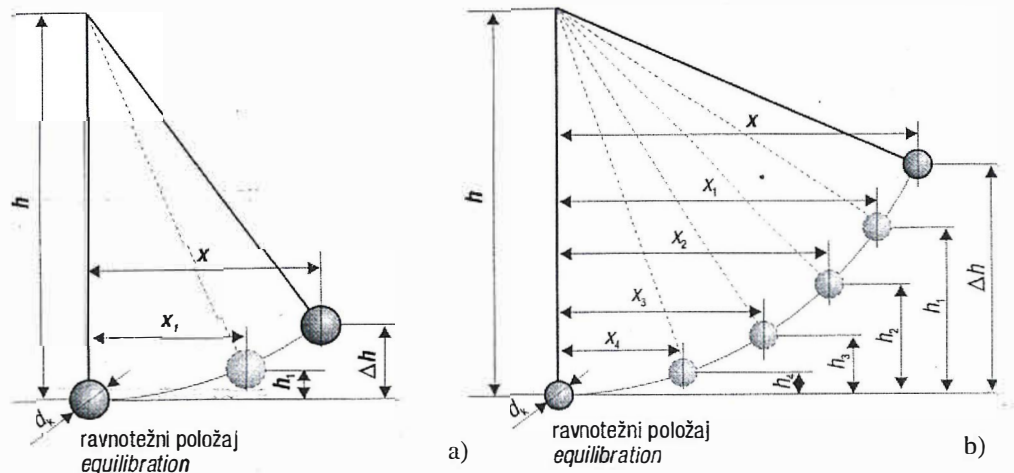
Slika 4.

Slobodni pad kuglice na ravnu podlogu • Free fall of a ball at the flat surface



Slika 5.

Značenje oznaka pri računanju faktora prigušenja: a) pobuda s kuglicom 1, b) pobuda s kuglicom 2 • Symbol means for restitution factor determination: a) ball 1, b) ball 2



kuglice, a pri pobudi kuglicom 2, horizontalne udaljenosti četiriju uzastopnih odskoka kuglice nakon odmaka iz ravnotežnoga položaja i sudara s listom pile.

Visina odskoka kuglice izračuna se prema izrazu:

$$h_i = h - \left[h \cdot \cos \left(\arcsin \frac{x_i}{h} \right) \right] \quad (9)$$

za $i = 1 \dots 4$

Faktor restitucije između lista pile i kuglice kao mjera prigušnih svojstava lista pile izračunan je kao:

$$k_{i+1} = \sqrt{\frac{h_{i+1}}{h_i}} \quad (10)$$

za $i = 0 \dots 3$

Značenje oznaka u jednadžbama (9) i (10) vidi se iz slike 5. i tablice 2.

6. MJERNI REZULTATI S DISKUSIJOM 6. Measurement results and discussion

Pri analizi spektra vlastitih frekvencija lista pile i utjecajnih čimbenika bitna je širina spektra (područje rezonantnih frekvencija, tj. odziv lista pile na pobudu) te veličina ubrzanja na pojedinim frekvencijama (u našem su primjeru to srednje vrijednosti terci).

S gledišta emisije buke, poželjno je da list kružne pile ima što širi spektar, bez istaknutih vrhova (jer je šum manje štetan od čistih tonova), te spektar s prigušenim vibracijama na frekvencijama u rasponu od 1000 Hz do 5000 Hz jer one najviše štete ljudskome sluhu.

Na slici 6. dan je skupni prikaz vlastitih frekvencijskih spektara svih sedam uzoraka listova pila pričvršćenih bez prigušne podloge i s njom, mjerenih akcelerometrom u prvom nizu mjerenja. Na slici 6. nisu prikazani frekventni spektri uzoraka

s plastičnom prigušnom podlogom jer se ne razlikuju bitno od spektara listova bez prigušne podloge.

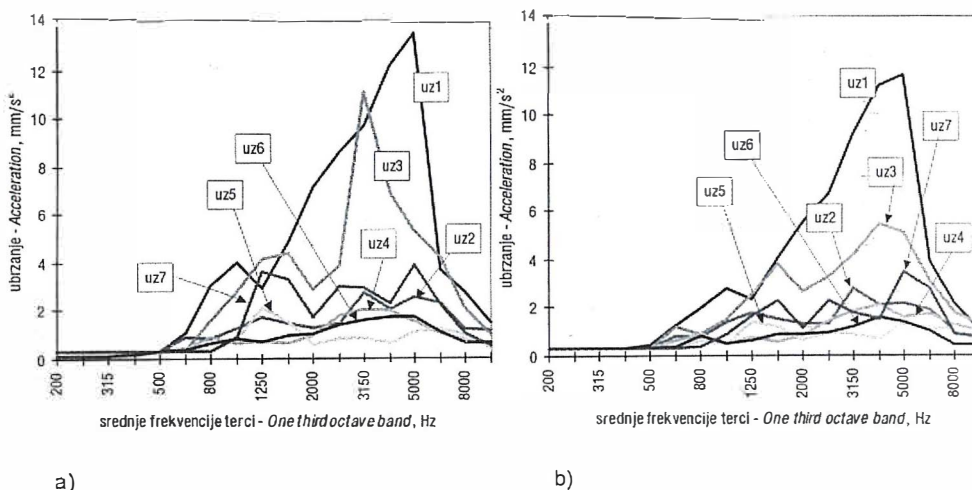
Kao što se vidi iz slike 6, svi su spektri podjednake širine odnosno imaju jednak raspon frekvencija sa značajnim veličinama ubrzanja. Uzorak 1 u spektru vlastitih frekvencija u području od 640 Hz do 8000 Hz ima izrazito velika ubrzanja na 4000 Hz i 5000 Hz. Postavljanjem gumene prigušne podloge između pile i prirubnice postiže se malo smanjenje veličine ubrzanja na tim frekvencijama.

U jednako širokom frekventnom spektru uzorak 2 nema istaknutih vrijednosti ubrzanja. Utjecaj prigušne podloge na spektar te pile je neznan.

Spektar vlastitih frekvencija uzorka 3 ima najveće ubrzanje na frekvenciji 3150 Hz. Postavljanjem prigušne podloge postiže se njegovo značajno smanjenje, a da se pritom ne mijenjaju bitno veličine ubrzanja na ostalim frekvencijama spektra.

Veličine ubrzanja u frekvencijskom spektru uzorka 4 neznatno se mijenjaju postavljanjem prigušnih podloga između prirubnice i lista. To upućuje na činjenicu da je riječ o listu na kojemu su već prigušene određene frekvencije i dodatno prigušenje ne mijenja bitno spektar. Najniže vrijednosti ubrzanja pokazuje spektar uzorka 6 pri mjeranju bez prigušne podloge između lista pile i prirubnice, a postavljanjem prigušne podloge spektar uzorka 5 postaje najniži. Omjer maksimalnih ubrzanja najnižega i najvišeg spektra iznosi 1 : 7,89 (bez prigušne podloge), odnosno 1 : 8,21 (s prigušnom podlogom).

Frekvencijski su spektri pila uz jednake uvjete mjereni osim akcelerometrom (kako je uobičajeno) i zvukomjerom, sa svrhom da se ispituju mogućnosti njegove uporabe u takvim mjerenjima. Mjerni rezultati dobiveni akcelerometrom iskazani u



Slika 6.

Spektri vlastitih frekvencija svih sedam uzoraka: a) bez prigušne podloge, b) s gumenom prigušnom podlogom • Natural frequency spectrum for all samples: a) without a damping layer, b) with rubber layer

m/s^2 mogu se pretvoriti u decibele prema izrazu:

$$L_a = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 10^6}{a_0}\right) \quad (11)$$

gdje je L_a razina ubrzanja (dB), a izmjereno ubrzanje (m/s^2), a_0 referentna vrijednost ubrzanja koja iznosi $1 m/s^2$.

Nakon što su mjerni podaci dobiveni akcelerometrom pretvoreni u decibele, korelirani su za svaki pojedini uzorak s vrijednostima izmjerenim zvukomjerom. U tablici 3. dane su korelacijske jednadžbe koje opisuju vezu podataka dobivenih akcelerometrom i onih dobivenih zvukomjerom te koeficijenti korelacije koji mogu poslužiti za prosudbu jakosti iskazane korelacije. Na slici 7. pokazan je primjer linearne korelacijske sveze mjernih rezultata za uzorak 1.

Iz slike 7, kao i iz korelacijske jednadžbe, u tablici 3. za uzorak 1 može se vidjeti da rezultati dobiveni zvukomjerom dobro koreliraju ($R = 0,9154$) s podacima dobivenim akcelerometrom te da su gotovo jednaki po apsolutnom iznosu (korelacijska je sveza približno pravac $y = x$).

Međutim, za uzorke s manjim veličinama ubrzanja, u spektru vlastitih frekvencija korelacijska je sveza nešto lošija (npr. za uzorak 5). Osim manjega koeficijenta korelacije, jednadžba pravca za te uzorke ima manji koeficijent nagiba pravca,

a veći odsječak na osi ordinate. No premda se zvukomjerom ne dobivaju apsolutno jednaki iznosi kao pri mjerenju akcelerometrom, relativno visoki koeficijenti korelacije upućuju na to da rezultati mjerenja zvukomjerom dobro "prate" mjerenja akcelerometrom i mogu poslužiti za snimanje i analizu frekvencijskog spektra nekog titrajućeg sustava.

U drugom je nizu mjerenja spektar vlastitih frekvencija mjeren akcelerometrom na jednakom uzorku od sedam listova pila pričvršćenih prirubnicama triju različitih promjera. To daje tri razine omjera pričvršćenja lista: $i_1=0,27$, $i_2=0,30$ i $i_3=0,33$. Na slici 8. prikazani su frekventni spektri za omjer pričvršćenja 0,27 bez prigušne podloge i s njom.

Rezultati toga niza mjerenja potvrdili su utjecaj prigušne podloge na najveća ubrzanja u spektru, kako je utvrđeno i u prvom nizu mjerenja. Najveće smanjenje ubrzanja postavljanjem gumenog filtra postiže se na uzorku 1, uzorku 2 i uzorku 3, dok se na drugim uzorcima ne primjećuju bitne promjene.

Ako se razmatra utjecaj izvedbe prigušenja na frekventni spektar lista može se vidjeti (sl. 8) da i pri mjerenju bez prigušne podloge i s prigušnom podlogom najniži spektar imaju uzorci s prigušnom folijom prilijepljenom na jednoj strani lista (uz6 i

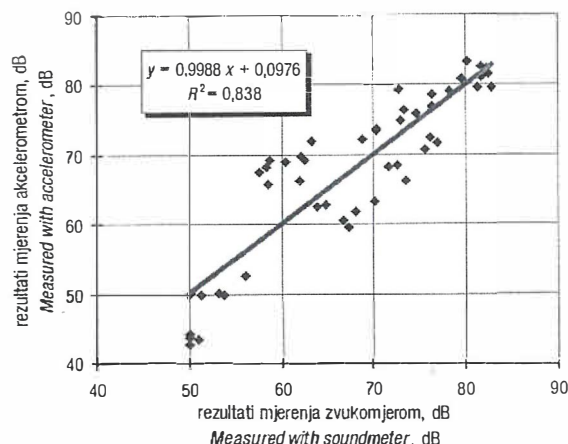
Tablica 3.

Korelacijske sveze između mjerenja zvukomjerom i mjerenja akcelerometrom • Correlation between measurement data obtained with soundmeter and accelerometer

Uzorak Sample	Jednadžba korelacije Correlation equation	R^2	R
uz1	$y = 0,9988 x + 0,0976$	0,8380	0,9154
uz2	$y = 0,548 x + 24,787$	0,7365	0,8582
uz3	$y = 0,7238 x + 15,038$	0,8558	0,9251
uz4	$y = 0,5417 x + 23,645$	0,8379	0,9154
uz5	$y = 0,3928 x + 31,274$	0,5899	0,7680
uz6	$y = 0,493 x + 25,911$	0,8594	0,9270
uz7	$y = 0,5971 x + 20,294$	0,8586	0,9266

Slika 7.

Korelacijska sveza između mjerenja akcelerometrom i mjerenja zvukomjerom • Correlation between measurement with accelerometer and with soundmeter



uz4). Potom slijede uzorci s laserom izrađenim ornamentima na tijelu lista pile (uz5 i uz2) te list pile s umetnutim bakrenim čepovima u izreze radialnih utora (uz7). Najviše spektre s izrazitim vršnim vrijednostima ubrzanja imaju standardni listovi pila (uz3 i uz1) koji nemaju dodatne izvedbe prigušenja vibracija i buke. Ako se usporede uzorci s istom izvedbom prigušenja (npr. uz6 i uz4, uz5 i uz2), niži spektar, odnosno manju veličinu ubrzanja na značajnoj frekvenciji ima uzorak koji ima veću debljinu lista.

Promjena omjera pričvršćenja u istraživanome rasponu nije značajno utjecala na vlastite spektre ispitivanih listova pila te se zaključci ne mogu poopćiti.

Uz relativno malo smanjenje ubrzanja na značajnim frekvencijama (sl. 9) u spektru pojedinih uzoraka (uz2, uz3, uz5 i uz7) povećanjem omjera pričvršćenja od 0,27 do 0,33 u nekih se uzoraka (uz1, uz3, uz6 i uz7) bilježi porast značajne frekvencije (frekvencije s najvećim ubrzanjem) za jednu ili dvije trećine oktave.

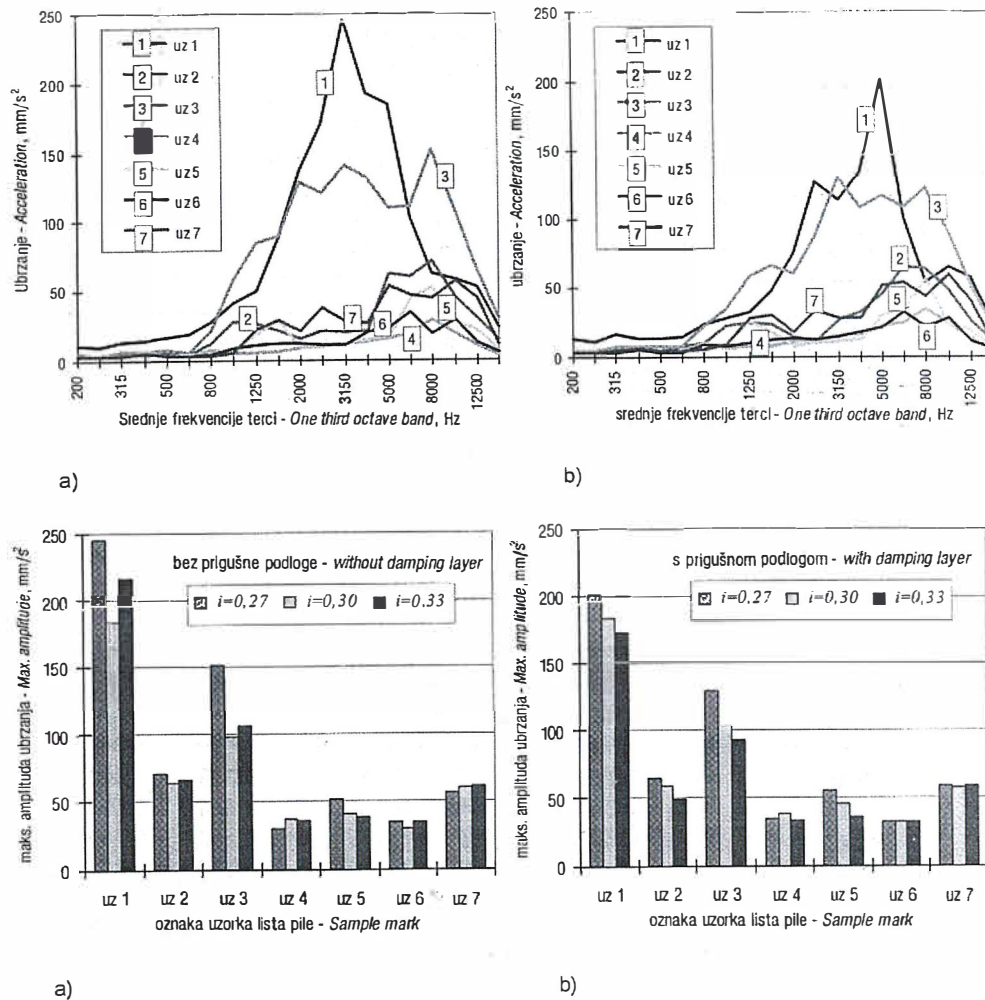
Budući da se s povećanjem omjera pričvršćenja očekuje veća stabilnost lista i bolje prigušenje vibracija, objašnjenje prikazanih rezultata zahtijeva dodatna is-

traživanja. Naime, raspon ispitivanih omjera pričvršćenja relativno je malen.

Metode određivanja spektra vlastitih frekvencija u prvom i drugom nizu mjerenja razlikuju se po trenutku uzimanja podataka i pobudnom radu te stoga vrijednosti ubrzanja dobivene objema mjernim metodama treba kvalitativno razmatrati i, kako je već naglašeno, mogu se rabiti samo kao relativni pokazatelji za usporedbu frekvencijskih spektara pojedinih uzoraka pila u jednakim ispitnim uvjetima.

Usporedbom rezultata prvoga i drugog niza mjerenja uočavaju se razlike u širini dobivenih frekventnih spektara za isti uzorak. Značajne se frekvencije spektra dobivenog prvom mjernom metodom nalaze između 500 Hz i 8 kHz, a drugom su mjernom metodom ustanovljene značajne veličine ubrzanja i na frekvencijama oktavu višima (do 16 kHz). Međutim, frekvencije s maksimalnim ubrzanjem, kao i relativni odnos spektara, ne razlikuju se bitno pri te dvije mjerne metode.

Prema izloženim se rezultatima može vidjeti da je kružna pila mehanički sustav koji različite pobude tijekom rada može is-



Slika 8.
Spektri vlastitih frekvencija svih sedam uzoraka s omjerom pričvršćenja $i = 0,27$: a) bez prigušne podloge, b) s prigušnom podlogom • Natural frequency spectrum for all samples (clamping ratio $i = 0,27$): a) without a damping layer, b) with a rubber layer

Slika 9.
Odnos maksimalnih ubrzanja frekvencijskih spektara sedam uzoraka kružnih pila: a) bez prigušne podloge, b) s prigušnom podlogom • Relation of maximum measured acceleration in sawblade frequency spectrum for all samples: a) without a damping layer, b) with a rubber layer

okvirno 200 Hz do 16 kHz. Cijeli frekvencijski raspon u kojemu pila može titrati značajno velikim amplitudama može se promatrati i kao zbroj titranja na pojedinačnim frekvencijama. Titranje na svakoj od tih frekvencija može se promatrati kao titranje *prigušenoga harmoničkog oscilatora*.

Utjecaj filtra na titranje pile te na oblik i razinu zvuka u vremenskoj je domeni. Međutim, utjecaj filtriranja na frekvencijski spektar pile najbolje se vidi ako se radi u frekvencijskoj domeni. Svaki se filter može promatrati kao poseban sustav s vlastitim frekvencijskim spektrom iz kojega se vidi na kojim frekvencijama filter može, a na kojima ne može titrati. Povezivanjem filtra sa sustavom (prigušne-podloge s pilom) dobije se novi sustav koji može titrati (sa značajnim amplitudama) samo na onim frekvencijama na kojima sa značajnim amplitudama mogu titrati i pila i filter sami za sebe. To znači da se spektar novoga-(složenog) sustava $P'(f)$ dobije množenjem frekvencijskog spektra pile $P(f)$ frekvencijskim spektrom filtra $F(f)$:

$$P'(f) = P(f) \cdot F(f) \quad (12)$$

Ako se napravi inverzna Fourierova transformacija složenog spektra (pila i filter) $P'(f)$, dobije se titranje u vremenskoj domeni koje je različito od titranja same pile. Stoga treba odabrati filter s takvim frekvencijskim spektrom koji ima pojaseve većega ili manjeg propuštanja i gušenja na unaprijed utvrđenim frekvencijskim područjima. Na taj se način u spektru pile mogu smanjiti (ili potpuno ukloniti) titranja na nepoželjnim frekvencijama.

U tablici 4. navedeni su faktori restitucije dobiveni u prvom nizu mjerenja, a u tablici 5. rezultati dobiveni u drugom nizu mjerenja.

Faktori restitucije između lista pile i plastične kuglice određeni za svaki uzorak i njegove inačice iz prvoga niza mjerenja korelirani su s veličinama ubrzanja izmjerjenima na pojedinim frekvencijama terci odgovarajućeg spektra vlastitih frekvencija. Dobivene su krivulje korelacije prikazane na slici 10, a jednadžbe i koeficijenti korelacije dani su u tablici 6.

Budući da su obje veličine mjerene, koeficijent korelacije smatra se dovoljno vi-

Tablica 4.

Faktori restitucije između lista pile i pobudne kuglice iz prvog niza mjerenja • Restitution factors between sawblade and exciting ball for the first test

Vrsta prigušne podloge <i>Layer between saw and clamp</i>	Faktor restitucije - <i>Restitution factor</i>						
	uz1	uz2	uz3	uz4	uz5	uz6	uz7
<i>pila - plastična kuglica (saw - plastic ball)</i>							
bez podloge - <i>without layer</i>	0,673	0,771	0,766	0,787	0,837	0,814	0,827
plastična podloga - <i>plastic layer</i>	0,623	0,768	0,758	0,776	0,826	0,804	0,828
gumena podloga - <i>rubber layer</i>	0,659	0,748	0,768	0,774	0,831	0,814	0,831
<i>pila - drvena kuglica (saw - wooden ball)</i>							
bez podloge - <i>without layer</i>	0,393	0,497	0,497	0,521	0,571	0,494	0,596
plastična podloga - <i>plastic layer</i>	0,460	0,479	0,519	0,531	0,579	0,526	0,574
gumena podloga - <i>rubber layer</i>	0,423	0,452	0,521	0,526	0,546	0,529	0,554

Tablica 5.

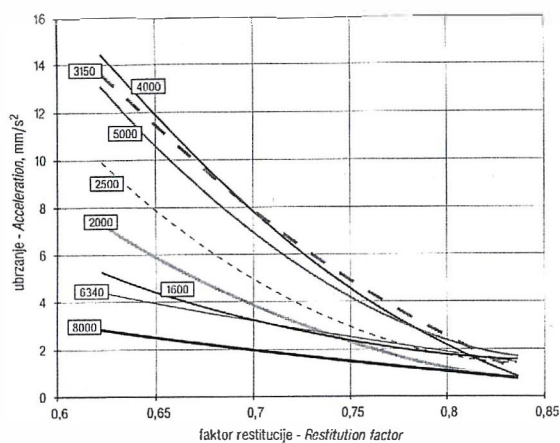
Faktori restitucije između lista pile i plastične kuglice iz drugog niza mjerenja • Restitution factors between sawblade and plastic exciting ball for the second test

Omjer pričvršćenja <i>Clamping ratio</i>	Faktor restitucije - <i>Restitution factor</i>						
	uz1	uz2	uz3	uz4	uz5	uz6	uz7
<i>pila - plastična kuglica (saw - plastic ball)</i>							
i_1 - bez podloge (<i>without layer</i>)	0,665	0,745	0,752	0,768	0,809	0,786	0,814
i_1 - s podlogom (<i>with layer</i>)	0,659	0,752	0,737	0,765	0,805	0,790	0,808
i_2 - bez podloge (<i>without layer</i>)	0,644	0,755	0,755	0,763	0,808	0,789	0,809
i_2 - s podlogom (<i>with layer</i>)	0,648	0,751	0,754	0,758	0,809	0,793	0,810
i_3 - bez podloge (<i>without layer</i>)	0,642	0,749	0,749	0,756	0,807	0,791	0,811
i_3 - s podlogom (<i>with layer</i>)	0,626	0,746	0,753	0,762	0,810	0,789	0,806

Tablica 6.

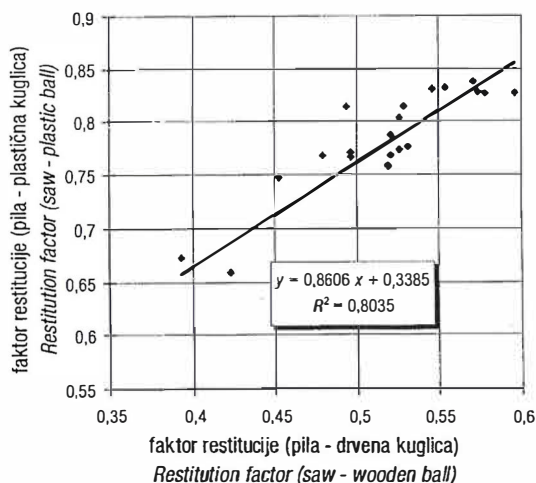
Korelacijska sveza između veličine ubrzanja na pojedinoj frekvenciji terci a i faktora restitucije k (između pile i plastične kuglice) • Acceleration a in correlation with restitution factor k (between saw and plastic ball)

Frekvencija, Hz <i>Frequency, Hz</i>	Jednadžba korelacije <i>Correlation equation</i>	R^2	R
1600	$a = 517,28 k^2 - 991,22 k + 481,1$	0,358	0,598
2000	$a = 146,93 k^2 - 658,64 k + 446,86$	0,484	0,695
2500	$a = 1280,6 k^2 - 2434,3 k + 1146,7$	0,547	0,740
3150	$a = 2446,4 k^2 - 4510,6 k + 2061,6$	0,686	0,828
4000	$a = 1182,3 k^2 - 2520,1 k + 1280,5$	0,659	0,812
5000	$a = 3667,7 k^2 - 6279,4 k + 2707,9$	0,803	0,896
6340	$a = 1229,2 k^2 - 2260,5 k + 1063,4$	0,590	0,768



Slika 10.

Ovisnost ubrzanja pojedinih frekvencija spektra pila (iz prvog niza mjerenja) o faktoru restitucije (između pile i plastične kuglice) • Acceleration of specific frequency in sawblade spectrum (for the first test) depending on restitution factor (between sawblade and ball 2)



Slika 11.

Međuovisnost faktora restitucije pile i dviju različitih kuglica • Correlation between restitution factors obtained between sawblade and two different balls

sokim da se može ustvrditi međuovisnost tih varijabli. Drugim riječima, veći faktor restitucije (kuglica je jače odskočila pri sudaru s pilom) znači da list pile "upija" manje energije zbog dobrih prigušnih svojstava te su i izmjerena ubrzanja vibracija po pojedinim frekvencijama manja.

Takva je međuovisnost po frekvencijama moguća kad su svi spektri pila u istom rasponu frekvencija, što je slučaj s ispitivanim uzorcima.

Viši koeficijenti korelacije zabilježeni su pri frekvencijama koje su značajnije u spektrima (imaju veće izmjereno ubrzanje), što je vrlo bitno da se s povećanjem prigušnih sposobnosti lista prigušuju frekvencije na kojima su izmjerena najveća ubrzanja.

Faktori restitucije između pile i plastične kuglice korelirani su s mjernim rezultatima dobivenim između drvene kuglice i lista pile te je utvrđena međuovisnost prikazana pravcem i jednadžbom na slici 11. Iz dobivene se međuovisnosti može zaključiti kako se bez obzira na materijal kuglice dobivaju faktori restitucije koji, iako različiti po apsolutnom iznosu, mogu poslužiti kao relativni pokazatelji prigušnih svojstava lista pile.

To su pokazale i slične međuovisnosti dobivene korelacijom veličina ubrzanja na

pojedinim frekvencijama terci i faktora restitucije određenih između uzoraka i drvene kuglice s onima na slici 12. i u tablici 6.

I korelacija faktora restitucije i veličina ubrzanja u spektrima vlastitih frekvencija pila dobivenih u drugom nizu mjerenja potvrdila su dobivene međuovisnosti s podacima iz prvoga niza mjerenja.

Faktor restitucije može se definirati i kao pokazatelj količine kinetičke energije koju je kuglica sačuvala nakon udara u pilu odnosno kao pokazatelj količine udarne energije koju je pila "upila". Pri vrlo kratkom sudaru s pilom kuglica omogućuje da pila "upije" energiju u vrlo širokom spektru frekvencija. O spektru pile i prigušnim svojstvima ovisi koliko će energije po pojedinim frekvencijama pila "upiti", što će se odraziti na veličine ubrzanja vibracija. Dakle, što je veći faktor restitucije, to znači da je pila primila manje energije, odnosno da ima bolja prigušna svojstva te su ubrzanja vibracija manja, što su i pokazali mjerni rezultati.

Poznavajući značenje faktora restitucije, točnije bi bilo tražiti ovisnost površine ispod frekventnog spektra lista o vrijednosti faktora, no budući da promjene veličina ubrzanja značajnih frekvencija određuju promjene površine, dobivene se ovisnosti smatraju dovoljno točnima.

7. ZAKLJUČCI

7. Conclusion

Mjerni se rezultati mogu sažeti u nekoliko zaključaka.

1. Novim se izvedbama listova kružnih pila uspjela mijenjati sposobnost prigušenja udarne energije. Odziv je takve pile na pobudu širokoga frekventnoga spektra (kakvim se smatra vrlo kratki udar pobudne kuglice) u širokom frekventnom rasponu od 800 Hz do 16 kHz, bez izraženih veličina ubrzanja, tzv. pikova.

2. Spektar vlastitih frekvencija već prigušenih listova pila (uz2, uz4, uz5, uz6 i uz7) ne mijenja se bitno postavljanjem prigušne podloge između pile i prirubnice.

Dodatnim se prigušenjem (postavljanjem filtra između pile i prirubnice) smanjuju veličine ubrzanja značajnih frekvencija u vlastitom spektru neprigušenih listova pila.

3. Utjecaj se povećanog omjera pričvršćenja u ispitanim granicama ne može poopćiti. Prema mnogim objavljenim istraživanjima, s povećanjem promjera prirubnice odnosno omjera pričvršćenja, povećava se stabilnost lista. No pritom treba imati na umu da se povećanjem omjera pričvršćenja smanjuje raspoloživi dio lista za piljenje, a time se ograničava visina piljenja koja je i inače sporna za kružne pile. Goglia (1994) navodi Mikolašikovu preporuku da promjer prirubnice bude $D_0 = (0,25 \text{ do } 0,30) \cdot D$, dakle u granicama pokrivenim rasponom ovih istraživanja. Stoga treba provjeriti postižu li se zadovoljavajući učinci ako se za piljenje određene visine rabe listovi pila većega promjera, s većim omjerom pričvršćenja (radi veće stabilnosti lista), jer su poznati svi negativni utjecaji piljenja listovima većega promjera. Prema tomu, pri odabiru alata i prirubnice pozitivni se učinci većeg omjera pričvršćenja ne smiju gledati jednostrano.

4. Rezultati mjerenja spektra vlastitih frekvencija zvukomjerom dobro "prate" mjerenja akcelerometrom i mogu poslužiti za snimanje i analizu frekvencijskog spektra nekog titrajućeg sustava.

5. Faktori restitucije određeni za pojedine uzorke i njihove inačice dobro koreliraju s veličinama ubrzanja u odgovarajućim spektrima vlastitih frekvencija uzorka. S povećanjem faktora restitucije smanjuju se iznosi ubrzanja većine frekvencija iz spektra pile. Viši koeficijenti korelacije i veće smanjenje zabilježeni su pri značajnijim frekvencijama u spektrima (onima koje imaju veću vrijednost ubrzanja), što potvrđuje već dokazana činjenica da se povećanjem prigušnih sposobnosti lista najviše prigušuju ubrzanja pri frekvencijama pri kojima su

izmjerene najveće vrijednosti.

Rad je prilog istraživanju bočne stabilnosti kružne pile ispitivanjem utjecajnih čimbenika na spektar vlastitih frekvencija lista pile. U daljnjim se istraživanjima očekuje proširenje skupa utjecajnih čimbenika na stabilnost lista, te uključivanje i čimbenika vezanih uz proces piljenja. Potrebno je razviti i nove mjerne metode, odnosno poboljšati postojeće, kako bi se dobili iscrpniji podaci o dinamičkom ponašanju lista pile (definirati modove titranja, kritične frekvencije i sl.) u praznome hodu i pri piljenju.

8. LITERATURA

8. References

1. Berolzheimer, C. P., Best, C. H. 1959: Thin circular saw blades. *Forest Product Journal* 9:404-412.
2. Birkeland, R. 1985: Thoughts on the merit and technology of the circular saw. *Proceedings Circular Sawblade Technology*, June 17-18, Oslo, 1-4.
3. Brežnjak, M., Moen, K. 1970: On the vibration of the circular saw blade under sawing conditions. *Særtrykk av Norsk Skogindustri* 9:1-8.
4. Dugdale, D. S. 1979: Effect of holes and slots on vibration of circular saws. *Sixth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 194-208.*
5. Dutina, H. 1985: Floating sawguides in circular sawing systems. *Proceedings Circular Sawblade Technology*, June 17-18, Oslo, 77-86.
6. Ellis, R. W., Mote, C. D., Jr. 1978: Increased lateral saw stiffness and vibration damping with feedback control. *Wood science* 11(1):56-64.
7. Goglia, V. 1994: Strojevi i alati za obradu drva, I dio, Šumarski fakultet Zagreb.
8. Goglia, V., Beljo, R., 1995: Lateral Movement of the Band Saw Blade and Machine's Own Resistance Power in Relation to the Strain Force, invited poster, IUFRO XX. World Congress, 6.-12.8.1995., Tampere, Finska.
9. Goglia, V., Risović, S., Beljo, R., 1995: Hand transmitted vibrations caused by orbital hand sanding machines, *Archives* 46, (1):33-44.
10. Goglia, V., Beljo-Lučić, R., 1996: Utjecaj odnosa vlastite frekvencije i frekvencije pobude na buku kružnih pila, *Drvna industrija* 47, (1):11-17.
11. Goglia, V., Beljo, R. 1997: Lateral movement of the band saw blade in relation to the cutting velocity, 4th International Conference on Production Engineering CIM '97, Opatija, str. B-51.
12. Holøyen, S. 1985: Vibration patterns in unsymmetrical circular saws. *Proceedings Circular Sawblade Technology*, June 17-18, Oslo, 130-151.
13. Holøyen, S. 1987: Vibrations and natural frequencies of angular slot circular saws. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45:101-104.
14. Huber, H. 1977: Residual stresses in circular saws introduced by mechanical and thermal means. *Fifth Wood Machining Seminar, Uni-*

- versity of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 44-58.
15. Jecić, S. 1989: Mehanika II (Kinematika i dinamika). Tehnička knjiga, Zagreb.
 16. Lister, P. F., Hutton, G. S., Kishimoto, J. K. 1997: Experimental sawing performance results for industrial supercritical speed circular saws. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar, June 17-20, Vancouver, Canada, str. 129-147.
 17. Marui, E., Ema, S., Miyachi, R. 1994: An experimental investigation of circular saw vibration via a thin plate model. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 34(7):893-905.
 18. Mote, C. D., Jr. 1967: Saw blade behavior. Wood machining seminar, Proceedings of a conference held at the University of California Forest Product Laboratory, Richmond, October 10-11, 9-20.
 19. Mote, C. D., Jr. 1979: Overview of saw design and operations research: results and priorities. Sixth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 11-25.
 20. Mote, C. D. 1985: Real time vibration control of circular saws by temperature control and system identification. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 11-21.
 21. Mote, C. D., Jr., Holoyen, S. 1973: The temperature distribution in circular saws during cutting. Meddelelse nr. 49, Norsk Treteknisk Institutt, Blindern.
 22. Mote, C. D., Jr., Holoyen, S. 1977: Feedback control of circular saw temperature using induction heating. Fifth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 81-98.
 23. Mote, C. D., Jr., Schajer, G.S., Holoyen, S. 1979: Saw stability control by thermal tensioning. Wood machining seminar, Proceedings of a conference held at the University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 239-256.
 24. Mote, C. D., Jr., Szymani, R. 1977: Principal developments in thin circular saw vibration and control research. Part 1: Vibration of Circular Saws. Holz als Roh- und Werkstoff 35:189-196.
 25. Münz, U. V. 1985a: Tensions and vibrations of circular saws with different constructed blades. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 38-58.
 26. Münz, U. V. 1985b: Dampening of circular saws with different constructed blades. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 109-129.
 27. Münz, U. V. 1997: Means of testing and designing circular saw blades. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar, June 17-20, Vancouver, Canada, str. 105-116.
 28. Nakamura, K., Yokochi, H., Kimura, S. 1995: Vibration of circular saws during cutting: Cause of self-excited vibration. The 12th International Wood Machining Seminar, Kyoto, Japan, October 2-4, 169-178.
 29. Nicoletti, N., Fendeledur, D., Nilly, L., Renner, M. 1996: Using finite elements to model circular saw roll tensioning. Holz Als Roh-und Werkstoff, 54(2):99-104.
 30. Nishio, S., Marui, E. 1996: Effects of slots on the lateral vibration of a circular saw blade. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 36 (7):771-787.
 31. Pahlitzsch, G., Rowinski, B. 1966: Über das Schwingungsverhalten von Kreissägeblättern - Zweite Mitteilung: Ermittlung und Auswirkungen der kritischen Drehzahlen und Eigenfrequenzen der Sägeblätter. Holz als Roh- und Werkstoff, 24(8):341-346.
 32. Pahlitzsch, G., Rowinski, B. 1967: Über das Schwingungsverhalten von Kreissägeblättern - Dritte Mitteilung: Schwingungen der Sägeblätter im Schnitt und ihre Dämpfung. Holz als Roh- und Werkstoff, 25. Jg. Heft 9:348-357.
 33. Plester, J. 1985: Passive guides for circular sawblades. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 59-76.
 34. Prokeš, S. 1982: Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva. III izdanje, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 292-318.
 35. Radcliffe, C. J., Mote, C. D., Jr. 1979: On line control of saw vibration: active guides. Sixth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 257-275.
 36. Radcliffe, C. J., Mote, C. D., Jr. 1981: Active control of circular saw vibration using spectral analysis. Wood science 13(3):129-139.
 37. Schajer, G. S. 1986: Simple formulas for natural frequencies and critical speeds of circular saws. Forest Product Journal, 36(2):37-43.
 38. Schajer, G. S., Kishimoto, K. J. 1996: High-speed circular sawing using temporary tensioning. Holz Als Roh-und Werkstoff, 54:361-367.
 39. Southwell, R. V. 1922: On the free transverse vibrations of a uniform circular disk clamped at its centre, and on the effects of rotation. Proceedings of the Royal Society of London, Series A 101.
 40. Strzelecki, A. 1977: Vibration of the circular saw. Fifth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 33-43.
 41. Szymani, R., Mote, C. D., Jr. 1977: Principal developments in thin circular saw vibration and control research. Part 2: Reduction and control of saw vibration. Holz als Roh-und Werkstoff 35:219-225.
 42. Szymani, R., Rhemrev, J. 1984: Latest developments in circular saw tensioning. Forest Product Journal 34(5):64-68.
 43. Yokochi, H., Tsuchikawa, S., Kimura, S. 1993: Vibration characteristics of a rotating circular saw III. Non-linear vibration and coupled vibration, Mokuzai Gakkaishi 39, (7):776-782.
 44. Yokochi, H., Tsuchikawa, S., Kimura, S. 1993: Vibration characteristics of a rotating circular saw IV. Non-linear resonant frequency, Mokuzai Gakkaishi 39, (7):783-787.
 45. Bučar, B. Kopač, J. 1996: Dynamic model for the determination of instability of periodic circular cutting of wood tissue. Holz als Roh und Werkstoff, 54:19-25



euroinspekt d.d.

euroinspekt - drvokontrola

Preradovićeva 31a, 10000 Zagreb, Croatia
Tel/Fax 4817-187

Žiro račun: 30105-601-18096 ZAP Zagreb

Dioničko društvo za
kontrolu robe i inženjering

Cargo Superintendence
Corporation & Engineering

Koncern "Euroinspekt" danas je vodeći kontrolni sustav Republike Hrvatske koja se bavi kontrolom kakvoće i količine roba u prometu. U okviru Koncerna djeluje tvrtka "Euroinspekt - drvokontrola" specijalizirana za kontrolu kakvoće i količine proizvoda gospodarske grane šumarstva i drvne industrije. Djelatnost "Euroinspekta - drvokontrole" temeljena je na primjeni hrvatskih normi ili internacionalnih ovisno da li se kontrola obavlja u okviru Republike Hrvatske ili diljem svijeta.

DJELATNOST "EUROINSPEKTA - DRVOKONTROLE"

- kontrola kakvoće i količine roba - proizvoda na temelju obveznih kontrola po važećim zakonima i pravilnicima Republike Hrvatske ili ugovornih kontrola urvrđenih između partnera - pojedinačni nalozi;
- ispitivanje i atestiranje proizvoda pri uvozu i izvozu koji podliježu predcarinskoj kontroli, a na temelju ovlaštenja od Ministarstva gospodarstva Republike Hrvatske i Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo;
 - ispitivanje i atestiranje - certificiranje kakvoće u ovlaštenom laboratoriju namještaja i dijelova za namještaj;

U suradnji sa Institutom u Rosenheimu obavljamo

- laboratorijsko ispitivanje građevinske stolarije, dijelova za građevinsku stolariju i krovnih konstrukcija
 - ispitivanje podnih konstrukcija sportskih dvorana
- ispitivanje toplinske i zvučne izolacije građevinske stolarije
 - ispitivanje vatrootpornosti
- laboratorijsko ispitivanje proizvoda od drva i to:
 - trupci i drvena građa
 - parket
 - lamperija - zidne obloge
 - brodarski pod
 - ploče na bazi drva
 - furnir
- laboratorijsko ispitivanje i određivanje emisije slobodnog formaldehida iz ploča na bazi drva, tekstila i papira (posebno ovlaštenje od strane IKEA)
 - fitopatološke analize drva i proizvoda od drva.

Višegodišnjim iskustvom u obavljanju navedenih djelatnosti i stručnim znanjem više od 40 diplomiranih inženjera šumarstva i drvne industrije kao djelatnika "Euroinspekt - drvokontrole" nudimo vam slijedeće usluge koje su bitne za uspješnu proizvodnju i trgovinsko poslovanje u zemlji i inozemstvu:

- stručni savjeti kod razvoja novih proizvoda, tehnologija i organizacije poslovanja; izrada projekata drvno-industrijskih poduzeća odnosno tvornica i nadzor pri izgradnji drvno-industrijskih pogona;
- stručni savjeti i posredovanje kod nabave strojne opreme za drvnu industriju;
- suradnja kod izbora sirovina i poluproizvoda glede kakvoće gotovog proizvoda;
 - edukacija i nadzor kod interne kontrole kakvoće gotovog proizvoda;
 - izrada projekata za izgradnju i razvoj internih kontrolnih laboratorija;
- kontrola kakvoće i količine proizvoda od drva u tranzitu (dugogodišnje iskustvo u kontroli i preuzimanju trupaca, piljene građe i drvnih elemenata za i iz potrebe drugih država (Italija, Njemačka, Austrija, Belgija, Francuska, Rusija, Slovačka, Egipat, Izrael, Alžir i zemlje dalekog istoka);
 - arbitraže, vještačenja i ekspertize od naših ovlaštenih sudskih vještaka,
- suradnja kod edukacije i certifikacije tvrtki ili pogona u okviru ISO 9000 normi koje provode 14 ovlaštenih auditora djelatnika Koncerna "Euroinspekt".

Sve naše dosadašnje i buduće poslovne partnere pozivamo na uspješnu suradnju uz garanciju da će naša stručna pomoć znatno pridonijeti njihovom poslovnom uspjehu.