

Ružica Beljo-Lučić, Vlado Goglia

Prilog istraživanju bočne stabilnosti lista kružne pile II

Istraživanje utjecaja nekih čimbenika
na razinu buke i frekventni spektar
buke pri praznome hodu kružnih pila

A contribution to the research of
circular saw lateral stability II
Research of some influencing factors
on circular saw idling noise levels
and noise frequency spectrum

Original scientific paper • Izvorni znanstveni rad

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

*UDK: 634*822.33*

SAŽETAK • U radu se iznose rezultati istraživanja ukupnih razina buke i njezine frekventne analize pri radu kružnih pila različitih izvedaba lista te u promjenjivim pogonskim uvjetima. Istraživanje je ograničeno na mjerenja pri praznome hodu. Istraženi su ovi utjecajni čimbenici: 1. tip ozubljenja, 2. frekvencija vrtnje pile, 3. omjer pričvršćenja lista, 4. prigušna podloga između lista pile i prirubnice, 5. izvedba prigušenja lista. Pri istraživanju je uporabljena mjerna oprema u skladu s međunarodnim normama. Za uzorke s ozubljenjem najviša je razina zvuka izmjerena u srednjem rasponu frekvencija (1 - 5 kHz), koje su najštetnije za ljudski sluh. Usporedba razina zvuka za pojedine raspone frekvencija između uzoraka s ozubljenjem i bez njega pokazuje da je zvuk nižih frekvencija pri praznome hodu pile posljedica vibracija lista, a zvuk srednjih i osobito visokih frekvencija rezultat aerodinamičkih pojava vezanih uz ozubljenje lista. Spektar buke prigušenih uzoraka ne mijenja se značajno dodatnim prigušenjem. Najveće su promjene spektra emitirane buke uz postavljanje prigušne podloge zabilježene za list pile s četiri radijalna utora i bez posebnih izvedbi prigušenja. Na tom se uzorku gumenom prigušnom podlogom između lista i prirubnice potpuno uklanja rezonantna buka. Istraživanja su upozorila na značajan utjecaj radijalnih utora na razinu stvarane buke kružnih pila. Ovisnost razine buke o frekvenciji vrtnje može se opisati jednadžbom $y = A \cdot \ln(x) - B$ s visokim koeficijentom korelacije.

Ključne riječi: kružna pila, emisija buke, frekventna analiza, razina buke, prigušenje

ABSTRACT • In this study the measurement results of the noise level and noise frequency analyses of differently designed circular saw blades in variable conditions are presented. The measurement was carried out at idling. The influences of the following parameters were investigated: 1. tooth type, 2. rotational frequency, 3. clamping ratio, 4. damping layer in the contact area between saw and clamp, 5. dampening. The standard measuring equipment was used. The highest level of noise was measured in the medium range of frequency (1 - 5 kHz) for all the samples with teeth. The comparison of the noise level for specific frequency ranges between samples with teeth and those without teeth shows that the noise of lower frequencies (at the idling of the saw) was the result of the saw blade vibration, and the noise of the medium and especially higher frequencies was the result of the aerodynamic occurrences connected to the teeth of the blade. The biggest changes in the spectrum of emitted noise with placing a damping layer between sawblade and clamp were recorded with the blade that has four radial slots and without any special realizations of damping. With that sample the use of a rubber damping layer completely removes the resonant (screaming) noise. The noise spectrum of the damped samples does not change with additional damping. The dependency of the noise level on the rotational frequency can be described with the equation $y = A \cdot \ln(x) - B$ with a high correlation coefficient. For a complete comparison of the tested saws this research should be supplemented by measurements when sawing.

Key words: circular saw, emitted sound, noise frequency analyses, noise level, damping

1. UVOD

1. Introduction

Današnji se postupci mehaničke obrade drva zasnivaju na velikim brzinama rezanja uz visoku učinkovitost uporabljenih sredstava rada. Strojevi i alati za obradu drva izrađuju su tako da prije svega udovolje tim zahtjevima. Pritom se nedovoljno brine o popratnim pojavama. Posljedice toga su vrlo ozbiljni problemi nastali djelovanjem buke i vibracija. Kružne pile za obradu drva često rade obodnim brzinama od 50 do 85 m/s. Buka obično raste s porastom brzine vrtnje i pri većim brzinama postaje vrlo neugodna i štetna za ljudsko zdravlje. Ona ne uzrokuje samo oštećenje sluha već i fizički i psihički opterećuje radnika. Oštećenje sluha bukom ovisi o intenzitetu buke, vremenu izlaganja i osjetljivosti osobe koja je izložena buci.

Općenito se buka kružnih pila dijeli na buku u praznome hodu i buku pri piljenju. Buka praznoga hoda nastaje u dodiru lista pile i zraka koji ga okružuje dok je izvor buke pri piljenju udar zubi u obradak. Buka praznoga hoda posljedica je aerodinamičkoga zvuka i zvuka nastalog zbog vibracija lista. Aerodinamički zvuk proizvodi nestalna struja zraka koja se stvara oko rotirajućeg lista odnosno u pazuhu zuba, a buka vibracija posljedica je bočnih oscilacija lista

(Leu i Mote, 1979; Cheng i dr., 1995).

Miklaszewski i Grobelny (1995) navode tri izvora buke kružnih pila:

1. dodir zuba s obratkom,
2. vibracije tijela lista pile i vibracije obratka,
3. aerodinamičke pojave povezane s velikom brzinom rezanja.

Huber (1985) dijeli emisiju buke na dva dijela: 1. dio koji potječe neposredno od zuba (iz aerodinamičkih izvora tijekom praznoga hoda i od udaraca zubi u obradak tijekom piljenja); 2. dio emitiran posredno zbog vibracija tijela pile. Prema njemu, obradak kao izvor buke nema praktičnu važnost.

Temeljnoznanje opisivanje zvukanarubu rotirajuće ploče predmet je mnogih istraživanja više od dva desetljeća. Međutim, uzroci nastajanja buke nisu ni danas potpuno razjašnjeni.

2. PROBLEMATIKA I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2. Problem definition and background

List pile koji u praznome hodu rotira rezonantnom brzinom vrtnje odašilje u okolinu prodornu buku intenzivnih diskretnih tonova poznatu pod nazivom *zvižduća* ili *vrišteća buka* (*whistling, screaming noise*).

Leu i Mote (1979) istraživali su rezonantnu buku praznoga hoda i zaključuju da rezonancija pile uglavnom potječe od međudnosa lista pile i zračne struje oko njega. Ta se pojava uočava kod uobičajenih kružnih pila koje imaju mali faktor prigušenja.

Buka u praznome hodu uvelike je uvjetovana geometrijom ozubljenja, prigušnim svojstvima tijela lista pile i obodnom brzinom lista.

Vrtnjom lista pile u rezonantnom području, tijekom praznoga hoda emitira se buka često mnogo više razine od buke pri piljenju. Istraživanja su pokazala da se zviždući zvuk tijekom rezonancije može ukloniti prigušenjem lista (Leu i Mote, 1979; Plester, 1985; Rhemrev i Cano, 1989; Miklaszewski i Grobelny, 1995).

2.1. Čimbenici koji utječu na emisiju buke 2.1. Noise emission influencing factors

Nastanak buke znatno ovisi o geometriji ozubljenja. Dosta je proturječnih mišljenja i rezultata istraživanja u svezi s utjecajem pojedinih obličnih geometrijskih značajki lista na razinu emitirane buke. Vjerojatno je uzrok tomu što se pri proučavanju jednoga utjecajnog čimbenika nedovoljno izolira mogući utjecaj drugih čimbenika.

Huber (1985) je istraživao utjecaj geometrije ozubljenja na emisiju buke pri praznome hodu i pri piljenju. U tu je svrhu ispitao 65 uzoraka. Istraživani su utjecajni čimbenici i dobiveni ovi rezultati:

- *visina zuba* - s porastom visine zuba raste i emitirana buka
- *prednji (prsni) kut oštrice* - pri praznome hodu pile s povećanjem prsnoga kuta smanjuje se razina buke, dok se pri rezanju s povećanjem prsnoga kuta povećava i razina buke
- *stražnji kut oštrice* - pri praznome se hodu pile smanjenjem leđnoga kuta smanjuje razina buke, dok se pri rezanju razina buke smanjuje s povećanjem leđnoga kuta
- *broj zubi* - s porastom broja zubi raste i razina emitirane buke
- *visina alata iznad obratka* - manja visina daje manju buku
- *oblik zuba* - KV oblik zuba slomljenih leđa proizvodi manju buku od NV oblika zuba ravnih leđa.

Szymani i Mote (1977) pokazali su da jakost buke raste s porastom frekvencije vrtnje, promjera lista, debljine lista i broja zubi. Emisija buke nenapetih listova pila mnogo je veća negoli napetih listova (Huber, 1985). Rezultati su eksperimenta pokazali (Leu i Mote, 1979) da uporaba prirubnica

velikih promjera nije djelotvoran način uklanjanja prodornog zvuka u praznome hodu.

2.2. Mjere sniženja razine buke 2.2. Noise level decrease efforts

Općenito se smanjenje razine emitirane buke kružnih pila može postići uporabom tanjih listova manjega promjera i s manjim brojem zubi. Pritom treba paziti da se ne naruši kakvoća obrade i proizvodnost.

Imajući na umu izvore buke kružnih pila, dva su osnovna načina smanjenja njezine razine:

1. optimalna geometrija lista pile i ozubljenja i 2. poboljšanje prigušnih svojstava lista pile.

Nakon istraživanja utjecaja pojedinih parametara geometrije lista pile Huber (1985) daje preporuke za smanjenje emisije buke: broj zuba 50; visina zuba do 9 mm; prsni kut oko 18°; leđni kut oko 26°; što je moguće manja visina alata iznad obratka; KV oblik zuba poželjniji je nego NV oblik.

Kao mjere sniženja razine buke promjenom geometrije ozubljenja kružnih pila Szymani i Mote (1977) navode promjenjivi korak zuba i skošavanje obje strane oštrice zuba (obostrani bočni kut). Cheng i dr. (1995) pokazali su da kružna pila s tanjim rubnim dijelom, a debljim unutrašnjem dijelom lista (tzv. konusni list), ima manje vibracije i nižu buku tijekom praznoga hoda.

Poboljšanje prigušnih karakteristika lista kružne pile postiže se različitim izvedbama prigušenja, koje se mogu svrstati u tri osnovne skupine.

1. **Izrada utora i provrta** (štancani ili izrađeni laserom) koji "kidaju" rezonantne modove.

Premda su mišljenja o značenju radijalnih utora za sniženje razine buke proturječna, Mote (1979) i Münz (1985) kao jedan od razloga za izradu utora navode i smanjenje razine buke. Uz radijalne utore koji se sve češće izrađuju laserom, izrađuju se i ornamenti te provrti različitih oblika, veličina i položaja na tijelu pile. Provrti se zapunjuju materijalima koji imaju bolja prigušna svojstva od čelika, te osim što lome rezonantne modove, prigušuju i energiju vibracija.

2. **Viskoelastični materijal** na čeličnoj jezgri. Leu i Mote (1979) pokazali su da se lijepljenjem tankoga prionljivoga tzv. viskoelastičnoga prigušnoga materijala na jednu stranu pile, koja inače pri praznome hodu emitira prodorni zvuk, mogu potpuno ukloniti rezonantne vibracije, a time i rezonantna zvižduća buka.

3. Slojeviti (lamelirani) listovi pila s unutrašnjim prigušenjem pomoću slojeva posebnoga materijala umetnutog između čeličnih ploča.

Szymani i Mote (1977) pripisuju takvim listovima sniženje razine buke za 10-20 dB(A). Miklaszewski i Grobelny (1995) istražuju kako primjena lameliranih listova pila s unutarnjim slojem bakra utječe na emisiju buke tijekom praznoga hoda uz različite frekvencije vrtnje. Istraživanja su pokazala smanjenje razine zvučne snage za 0,5 do 19 dB u odnosu prema običnoj pili, ovisno o brzini vrtnje.

Marui i dr. (1994) istražuju utjecaj dodirne plohe između lista pile i prirubnice na kapacitet prigušenja sustava ispitivanjem modela izrađenog od tanke pravokutne ploče (debljine 2 mm) koja je na jednom kraju pričvršćena dvjema pločicama (prirubnicama). Mjerena je čvrstoća savijanja i kapacitet prigušenja ploče. Različite dodirne plohe ostvarene su lijepljenjem traka, žica i sličnih materijala između ploče i prirubnica. Najbolji su rezultati postignuti u modela s dodirnom plohom ostvarenom dvostrano ljepljivom trakom.

Hattori i dr. (1993) razvili su novu slitinu (sastava 13Cr-3Al-2Ni-Fe) pod nazivom CSK, za izradu tijela pile, koja ima dovoljno dobra mehanička i prigušna svojstva. Mjerenja su pokazala da se izradom pila od te slitine može izbjeći zvižduća buka pri praznome hodu.

Yanagimoto i dr. (1995) pokušavaju smanjiti razinu buke kružnih pila posebnim oblikovanjem zuba. Oni na zubu izrađuju provrt od prednje strane ka leđima zuba kako bi se smanjila aerodinamička buka izazvana vrtloženjem zraka iza leđa zuba pri velikim brzinama rezanja. Obavljena su opsežna istraživanja uz mijenjanje veličine provrta u odnosu prema veličini zuba, uz promjenjivu frekvenciju vrtnje i različiti korak zuba. Rezultati pokazuju da zubi s provrtom (*slit-tooth*) omogućuju sniženje razine buke za 4 dB te da je smanjenje razine buke veće pri većim frekvencijama vrtnje.

Ta i još neka istraživanja upozoravaju na nove mogućnosti oblikovanja i proizvodnje listova kružnih pila koje pri radu neće stvarati zaglušujuću buku.

3. CILJ ISTRAŽIVANJA 3. Aim of research

Prema postojećim državnim propisima (u Njemačkoj DIN norme, VDI preporuke; u nas još uvijek važeći *Pravilnik o općim mjerama i normativima zaštite na*

radu od buke u radnim prostorijama - SL 29/71, te *Zakon o zaštiti na radu* - NN 19/83, 17/86, 47/89, 46/92, 26/93) proizvođač mora deklarirati razinu buke koju emitira njegovo radno sredstvo. Srž svih propisa sadržana je u obvezi poslodavca da primijeni tehničke mjere za sniženje razine buke kako bi se smanjilo i ograničilo izlaganje radnika buci u radnim prostorijama.

Prema propisanoj maksimalnoj imisiji buke, ocjenska razina (energijska srednja vrijednost razine buke L_{eq} koja tijekom osam sati djeluje na osobu na radnome mjestu) mora biti niža od 55; 70; 85/90 dB(A), ovisno o radnoj djelatnosti, no nikako ne smije prelaziti 90 dB(A).

Istraživanja su pokazala da se razina buke može smanjiti modifikacijom frekventijskog spektra lista pile i prigušenjem amplituda dominirajućih modova titranja. Koristeći se istraživačkim spoznajama, proizvođači alata za obradu drva nude različite izvedbe listova kružnih pila kojima se postiže smanjenje razine buke u praznome hodu i pri radu kružne pile.

Stoga se smatra svrsishodnim istražiti učinak pojedinih rješenja na smanjenje emisije buke. U cilju toga potrebno je utvrditi razinu buke i njezin frekventijski spektar pri različitim izvedbama lista pile i promje-njivim pogonskim uvjetima. Radi opsežnosti zadatka, ali često i zbog više razine buke, istraživanja se ograničavaju na prazni hod alata.

Istražit će se ovi utjecajni čimbenici:

- tip ozubljenja
- broj okretaja (frekvencija vrtnje) lista pile
- omjer promjera prirubnice za pričvršćenje lista i promjera lista (omjer pričvršćenja)
- prigušna podloga između lista pile i prirubnice
- izvedba prigušenja energije vibracija.

Poseban je cilj istražiti mogućnosti jednostavnijega i jeftinijeg načina smanjenja razine buke standardnih listova kružnih pila, a posebno prigušenja rezonantne buke tijekom praznoga hoda alata.

4. OBJEKT ISTRAŽIVANJA 4. Object of research

Za istraživanja je izabran stroj jednolisne kružne pile čija su tehnička obilježja dana u tablici 1. Uzorci listova pila izabrani su u skladu s trendom proizvođača da se različitim izvedbama prigušenja lista postigne veća stabilnost lista i manja razina odašiljane buke.

Opis geometrijskih značajki ispitivanih listova pila s ozubljenjem dan je u tablici 2, a ispitivane kružne ploče bez ozubljenja (uz8 i uz9) promjera su 300 mm i debljine 2,2 mm. *Uzorak 8* ima laserom izrađene ornamente i četiri radijalna utora, jednako kao *uzorak 2* i *uzorak 5*, a *uzorak 9* ima viskoelastičnu foliju, kao *uzorak 4* i *uzorak 6*. Prikaz osnovnih geometrijskih značajki lista pile, kojih se vrijednosti navode u tablici 2, dan je na slici 1, a svi su

uzorci prikazani na slici 2.

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

Za istraživanje razine buke što je kružne pile odašilju u okolinu većina se autora koristi preciznim zvukomjerom s FFT analizatorom (Leu i Mote, 1979; Rhemrev i Cano, 1989; Huber, 1985; Hattori i dr., 1993; Cheng i dr., 1995). Provedena se istraživanja,

Tehnička obilježja - Technical features	Vrijednost - Value
proizvođač i godina proizvodnje - Producer	"Bratstvo", Tvornica strojeva Zagreb, 1994.
tip stroja - Machine type	SC - 10
veličina radnog stola - Work table size	940 mm x 870 mm
maksimalni promjer lista pile - Max. saw diameter	300 mm
promjer radnog vretena - Shaft diameter	30 mm
najveća visina reza s pilom Ø300 mm (90°) Maximum sawing depth with saw Ø300 mm (90°)	95 mm
najveća visina reza s pilom Ø300 mm (45°) Maximum sawing depth with saw Ø300 mm (45°)	68 mm
najveća širina reza s vodilicom Maximum sawing width with guide	1270 mm
gabaritne dimenzije - Overall dimensions	1020 mm x 1970 mm x 850 mm
masa stroja - Machine mass	320 kg
trofazni elektromotor - Electromotor	$P = 3 \text{ kW}$, $n = 2870 \text{ min}^{-1}$, $\cos\varphi = 0,84$

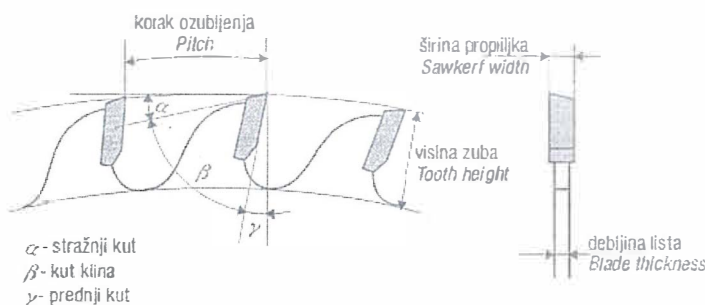
Tablica 1.

Tehnička obilježja stroja na kojemu je obavljeno istraživanje • Technical characteristics of the machine

Značajka Characteristic	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
proizvođač - Producer	-	LEITZ	LEITZ	LEITZ	LEITZ	LEITZ	LEITZ
broj zubi - Tooth number	80	96	96	96	60	60	60
tip zubi - Tooth type	WZ	FZ/TR	WZ	WZ	FZ/TR	FZ/TR	FZ/TR
korak zuba, mm Pitch, mm	11,98	9,82	9,82	9,82	11,93- 19,47	15,71	15,71
visina zuba, mm Tooth height, mm	7	8	9	8	9	12	13
geometrija ozubljenja Tooth geometry	$\alpha = 36^\circ$ $\beta = 46^\circ$ $\gamma = 8^\circ$	$\alpha = 13^\circ$ $\beta = 65^\circ$ $\gamma = 12^\circ$	$\alpha = 16^\circ$ $\beta = 66^\circ$ $\gamma = 8^\circ$	$\alpha = 22^\circ$ $\beta = 61^\circ$ $\gamma = 7^\circ$	$\alpha = 19^\circ$ $\beta = 58^\circ$ $\gamma = 13^\circ$	$\alpha = 21^\circ$ $\beta = 54^\circ$ $\gamma = 15^\circ$	$\alpha = 16^\circ$ $\beta = 59^\circ$ $\gamma = 15^\circ$
promjer lista, mm Saw 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
širina propiljka, mm Sawkerf width, mm	2,8	3,2	3,2	3,5	4,4	4,4	4,4
izvedba prigušenja lista Damping	bez prigušenja without damping	ornamenti laserom laser ornaments	štancani utori radial slots	prigušna folija damping foil	ornamenti laserom laser ornaments	prigušna folija damping foil	bakreni čepovi slots with cooper cork

Tablica 2.

Opis ispitivanih uzoraka s ozubljenjem • Description of toothed circular saw samples



Slika 1.

Osnovne geometrijske značajke ozubljenja • Characteristics of saw tooth geometry

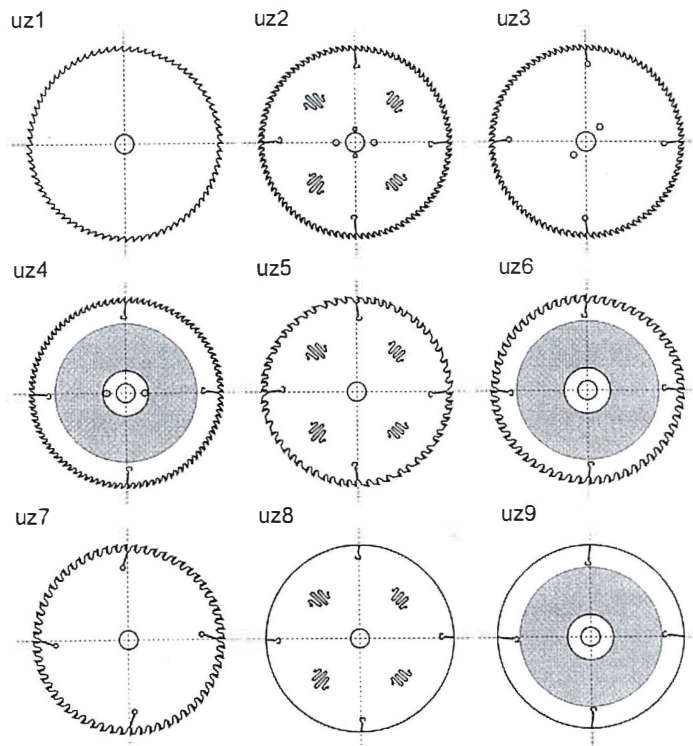
osim po mjernim uzorcima, razlikuju po mjestu postavljanja mikrofona i prostoru u kojemu su provedena te mjerni rezultati nisu međusobno usporedivi. Miklaszewski i Grobelny (1995) rabe mjernu metodu opisanu u ISO-u 9614. Stroj je okružen mjernim prostorom podijeljenim na 105 jednakih elemenata, mjerenja su obavljena u središtu svakog elementa i izračunana je aritmetička sredina, čime mjerni rezultati postaju usporedivi.

Postoje mnogi sustavi za mjerenje zvuka, no svi se sastoje od mikrofona, jedinice za obradu i izlazne jedinice. Mikrofon pretvara zvučni signal u odgovarajuću električnu veličinu koju prije obrade treba pojačati. Signal može biti obrađen na nekoliko načina. Međunarodnim je normama predviđeno vrednovanje zvuka prema kri-

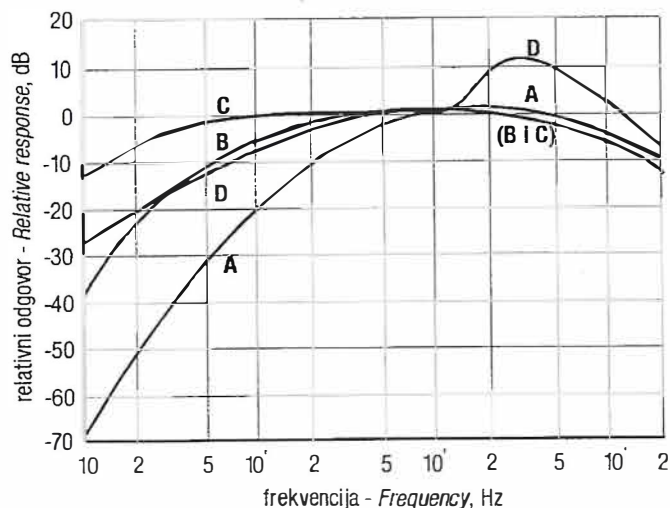
vuljama za vrednovanje A, B, C ili D (sl. 3). Najčešće se upotrebljava A-krivulja (filter) za vrednovanje zvuka, koja je najbliža načinu reagiranja ljudskoga uha na zvuk, a brojčana jedinica ima oznaku dB(A). Zvukomjer obično ima i Lin. krivulju, koja omogućuje prolaz zvuka bez vrednovanja.

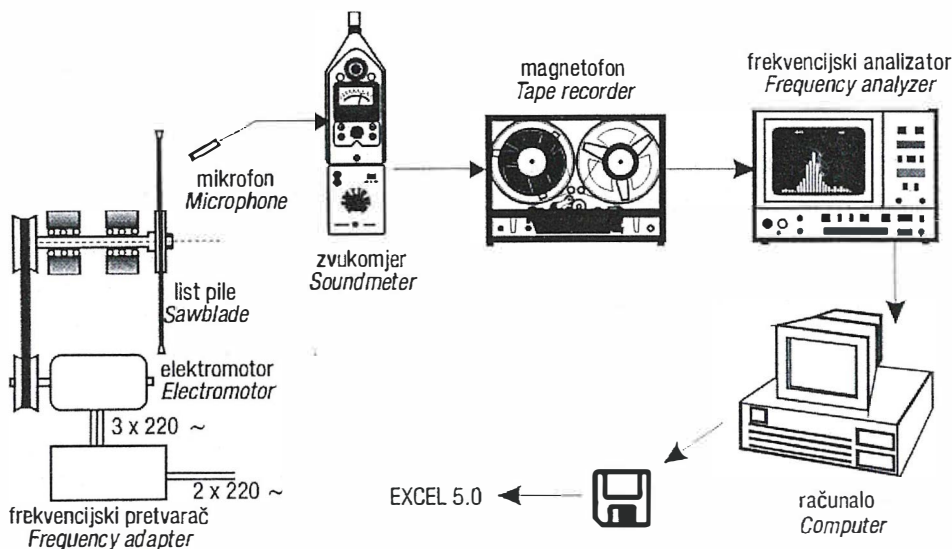
Kad se želi dobiti više informacija o mjerenom zvuku, raspon frekvencija u mjeranom području može se podijeliti na manje intervale, tzv. pojaseve, što se postiže elektroničkim filtrima. Širina je tih pojasa najčešće jedna oktava ili trećina jedne oktave. Jedna je oktava raspon frekvencija pri kojemu je najviša frekvencija dva puta veća od najniže. Trećina oktave (terca) pokriva raspon frekvencija u kojemu je najviša frekvencija 1,26 puta veća od najniže frekvencije.

Slika 2.
Uzorci listova pile •
Circular saw samples



Slika 3.
Krivulje za
vrednovanje zvuka •
Sound analysis networks





Slika 4.
Mjerni lanac •
Measuring equipment

Često je razina zvuka promjenjiva i kazaljka instrumenta zbog svoje tromosti ne može slijediti brze promjene. Zbog toga se pokazni instrumenti umjetno prigušuju. Po pravilu, postoje dva mjerna položaja: S (*slow - sporo*) i F (*fast - brzo*). Položaj S ima vremensku stalnicu jednu sekundu, a F položaj 125 milisekunda. Mjernim je normama propisan mjerni položaj F ili S.

Mjerenja razine zvučnoga tlaka obavljena su u skladu s međunarodnim normama ISO 1996, ISO 1999 i ISO 2204, i to mikrofonom proizvođača Brüel & Kjær, tip 4165 te zvukomjerom istog proizvođača, tip 2209. Mikrofon i zvukomjer udovoljavaju zahtjevima iz IEC publikacije 651 i IEC publikacije 12 za instrumente tipa 1.

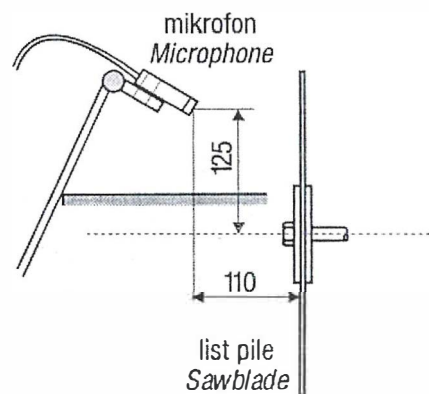
Frekvencijske karakteristike izvora buke dobivene su frekvencijskim analizatorom (*Digital Frequency Analyzer*, tip 2131, Brüel & Kjær). Podaci s frekvencijskog analizatora učitani su programom napisanim u BASIC-u te zapisani u tekstualne datoteke.

Mjerni je lanac prikazan na slici 4.

Zvukomjer je prije mjerenja potrebno umjeriti. Umjeravanje je provedeno pomoću prenosivoga akustičnog kalibratora (*pistonphone*). Zvukomjer je umjeren prije i nakon svakog mjerenja.

Položaj mikrofona u odnosu prema listu pile prikazuje slika 5. Udaljenost mikrofona od poda iznosi 93 cm. Pri mjerenju se pazilo da mikrofon za svaki uzorak bude uvijek na istome mjestu te da su okolni uvjeti uvijek jednaki. Na taj je način osigurana usporedivost mjernih rezultata za različite uzorke i ispitivane radne uvjete, ali ne i s rezultatima drugih istraživanja jer uvjeti mjerenja nisu potpuno normirani. Razina zvučnoga tlaka mjerena je linearno, uz vremensku konstantu F.

Svi su listovi ispitivanih pila pričvršćeni na radno vratilo na jednak način te potom pogonjeni promjenjivim brojem okretaja u rasponu od 25 do 70 s⁻¹ (što daje raspon brzina rezanja od 23,5 do 66 m/s). Za regulaciju frekvencije vrtnje radnoga vratila rabljen je frekvencijski pretvarač (*REGATRON regadrive FVR G5*). Frekvencija je



Slika 5.
Položaj mikrofona •
Microphone placement

vrtnje radnoga vratila stupnjevana u koracima od 1 Hz. Pri svakoj frekvenciji vrtnje mjerena je frekvencijska karakteristika emitirane buke.

Učitavane su razine zvučnoga tlaka u rasponu frekvencija od 1,25 Hz do 16000 Hz, a zatim su rezultati analizirani. Uzimajući u obzir granice čujnosti i štetnost pojedinih frekvencija zvuka, razina je emitirane buke uzoraka kružnih pila analizirana u rasponu od 25 Hz do 10000 Hz. Iz frekvencijskog spektra razine zvučnoga tlaka za svaki uzorak i pojedinu frekvenciju vrtnje izračunana je i ukupna razina buke vrednovana prema A- filtru i izražena u dB(A). Pri tom je rabljena jednadžba:

$$L_A = 10 \cdot \log \sum 10^{\left(\frac{L_i + F_i}{10}\right)} \quad (2)$$

gdje je L_A - A vrednovana razina buke,

dB(A); L_i - linearno izmjerena razina zvučnoga tlaka pri pojedinoj frekvenciji terci, dB; F_i - korekcijska veličina u dB.

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

Raščlambom dobivenih razina zvučnoga tlaka po srednjim frekvencijama terci izrađeni su dijagrami koji prikazuju maksimalnu razinu zvučnoga tlaka za raspone frekvencija 25 - 1000 Hz (sl. 6), 1000 - 5000 Hz (sl. 7) i 5000 - 10000 Hz (sl. 8) u ovisnosti o frekvenciji vrtnje lista za sve uzorke pri omjeru pričvršćenja $i = 0,27$, bez prigušne podloge.

Uzorci bez ozubljenja imaju vrlo slične frekventne spektre emitirane buke. Na slici 9. prikazani su mjerni rezultati za uzorak 8, analizirani prema navedenim rasponima frekvencija.

Frekventni je spektar buke podijeljen na tri dijela koji se u daljnjem tekstu spominju kao niske frekvencije (25-1000 Hz), srednje frekvencije (1000-5000 Hz) i visoke frekvencije (5000-10000 Hz). Treba napomenuti da se iz razmatranja izuzima

frekvencija vrtnje 53 Hz jer je za gotovo sve uzorke zabilježena rezonancija s vibracijama stroja.

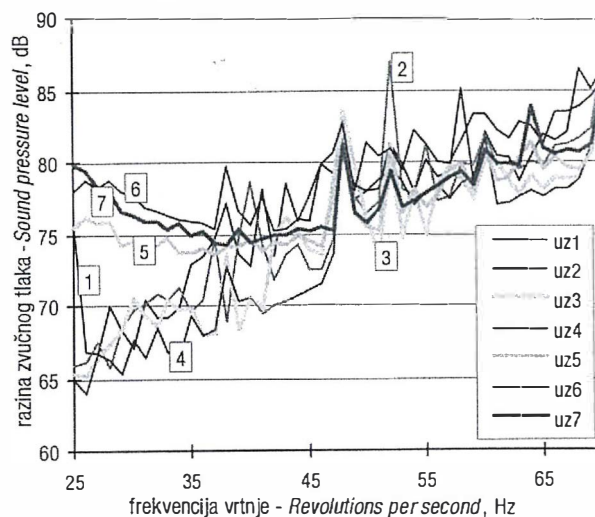
Kao što je i očekivano, mjerni su rezultati pokazali povećanje razine zvučnoga tlaka s porastom frekvencije vrtnje za sve raspone frekvencija.

Za niske je frekvencije zabilježena maksimalna razina buke u granicama od 65 do 85 dB za sve uzorke (i s ozubljenjem i bez ozubljenja) te ona ni po veličini ni po frekvenciji nije problematična. Za neke uzorke (uz5, uz6 i uz7) nije ni zabilježen porast razine zvučnoga tlaka s povećanjem frekvencije vrtnje u tom rasponu frekvencija.

Maksimalna razina zvučnoga tlaka za visoke frekvencije raste s promjenom frekvencije vrtnje lista za sve uzorke po krivulji koja se s visokim stupnjem korelacije može opisati jednadžbom $y = A \cdot \ln x - B$. Za uzorke 1 i 3 zabilježena je razina zvučnoga tlaka u rasponu od 60 do 95 dB, a za ostale uzorke s ozubljenjem maksimalna razina zvuka nije prelazila 90 dB. Za uzorke bez ozubljenja razina je zvuka u tom rasponu frekvencija dosegala 75 dB.

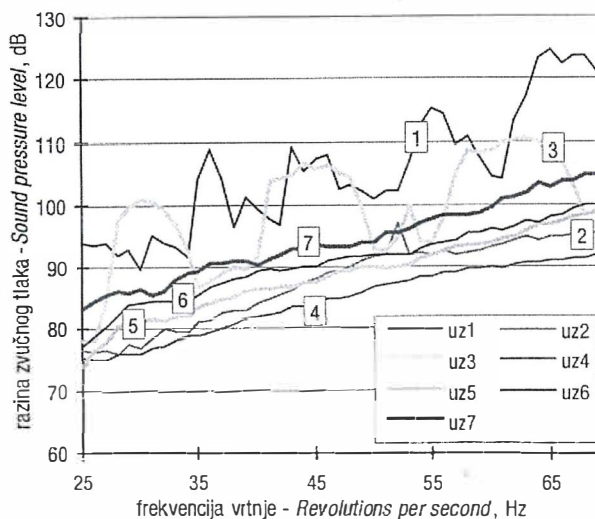
Slika 6.

Maksimalna razina zvučnog tlaka za raspon frekvencija 25 - 1000 Hz u ovisnosti o frekvenciji vrtnje • Maximum sound pressure level for frequency range 25 - 1000 Hz depending on revolutions



Slika 7.

Maksimalna razina zvučnog tlaka za raspon frekvencija 1000 - 5000 Hz u ovisnosti o frekvenciji vrtnje • Maximum sound pressure level for frequency range 1000 - 5000 Hz depending on revolutions



Najzanimljiviji su mjerni rezultati srednjega raspona frekvencija jer su njime obuhvaćene frekvencije koje najviše štete ljudskome sluhu. Za sve uzorke s ozubljenjem u srednjem je rasponu frekvencija zabilježena najviša razina zvuka. Nadalje, zabilježeno je i povećanje razine zvuka s porastom frekvencije vrtnje, no nešto sporije negoli pri visokim frekvencijama.

Za uzorke bez ozubljenja (uz8, uz9) razina je zvuka srednjih frekvencija slična onoj niskih frekvencija i ne prelazi 85 dB.

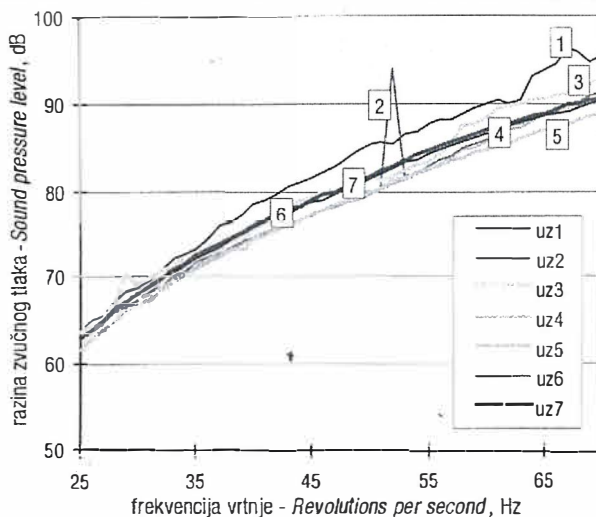
Promjene razine zvuka s porastom frekvencije vrtnje za uzorke s ozubljenjem ovise o sposobnosti prigušenja vibracija. Za uzorke bez dodatnih izvedbi prigušenja (uz1 i uz3) razina zvuka raste uz stalne vrhove, tj. značajno je povećanje razine zvuka pri ulasku pile u rezonantno stanje pobuđeno frekvencijom vrtnje. Nakon izlaska iz područja rezonancije, razina se zvuka smanjuje. Za uzorke s većim prigušenjem (uz2, uz4, uz5, uz6, uz7) nema vrhova no mogu se primijetiti blagi "brjegovi" koji označavaju modove titranja.

Usporedba razina zvuka za pojedine raspone frekvencija uzoraka s ozubljenjem i

bez njega dovodi do zaključka da su zvukovi nižih frekvencija u praznome hodu pile posljedica vibracija lista, a zvukovi srednjih i osobito visokih frekvencija rezultat aerodinamičkih pojava vezanih uz ozubljenje lista. Naime, zubi kružne pile i njihov periodični prolaz kroz zrak uzrokuju određene aerodinamičke pojave koje tijelo lista pile dodatno pobuđuju na titranje i stvaranje zvuka.

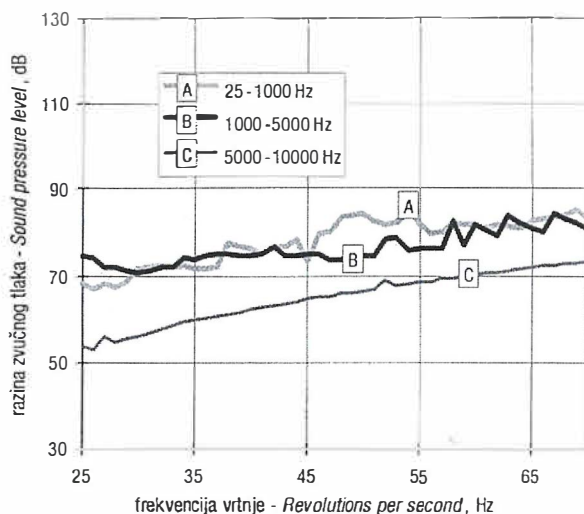
S promjenom omjera pričvršćenja i postavljanjem prigušne podloge najveće su promjene spektra emitirane buke zabilježene za uzorak 3. Usporedbom slike 10.a) sa slikom 10.b) može se vidjeti da se postavljanjem prigušne podloge između lista i pribornice potpuno uklanja rezonantna buka, tj. nestaju istaknuti vrhovi u analiziranom frekventnom spektru buke.

Slika 11. prikazuje frekventne spektre buke uzorka 3 bez prigušenja i s prigušenjem pri tri frekvencije vrtnje pile (30, 45 i 60 Hz) iz kojih se vidi da se prigušenjem smanjuje samo vrijednost pri frekvencijama s najvišom razinom zvučnoga tlaka, a ostali dio spektra ostaje praktično nepromijenjen. Dugdale (1977b) je dobio rezultate koji, s obzirom na frekventni spektar buke, također



Slika 8.

Maksimalna razina zvučnog tlaka za raspon frekvencija 5000 - 10000 Hz u ovisnosti o frekvenciji vrtnje • Maximum sound pressure level for frequency range 5000 - 10000 Hz depending on revolutions



Slika 9.

Frekventna analiza emitirane buke uzorka bez ozubljenja • Noise frequency analysis for samples without teeth

pokazuju da se prigušenjem lista snižava vršna vrijednost, tzv. pik, tj. najizrazitija razina zvuka pri kojoj frekvenciji.

Iz frekventnog spektra buke pri određenim frekvencijama vrtnje izračunana je vrednovana razina buke prema krivulji A te analizirana i uspoređena njezina ovisnost o frekvenciji vrtnje za sve ispitivane uzorke.

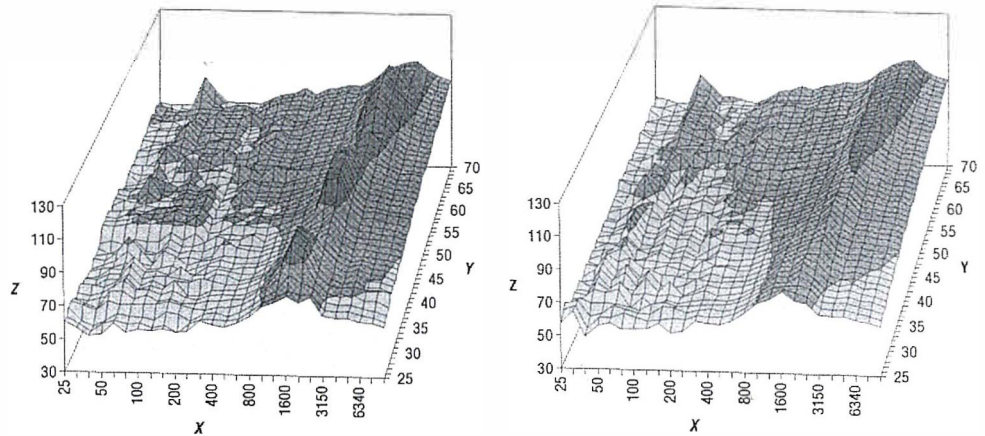
Na slici 12. prikazane su ovisnosti vrednovane razine buke o frekvenciji vrtnje za uzorke s ozubljenjem. Usporedbom s frekventnom analizom emitiranog zvuka (sl. 6, 7. i 8) može se zaključiti da je razina buke

određena razinom zvuka pri srednjem rasponu frekvencija (1000-5000 Hz) te se izračunavanjem vrednovane razine buke dobiju jednaki odnosi između ispitanih uzoraka kao i na slici 7.

Uzorak 1 emitira najvišu razinu buke, koja pri gornjim frekvencijama vrtnje doseže gotovo granicu bola. U cijelom je rasponu frekvencija vrtnje razina buke iznad 90 dB(A). Zatim slijedi uzorak 3, koji u pojedinim intervalima frekvencije vrtnje doseže ili premašuje razinu buke uzorka 1. Najnižu razinu buke emitira uzorak 4, koji ima

Slika 10.

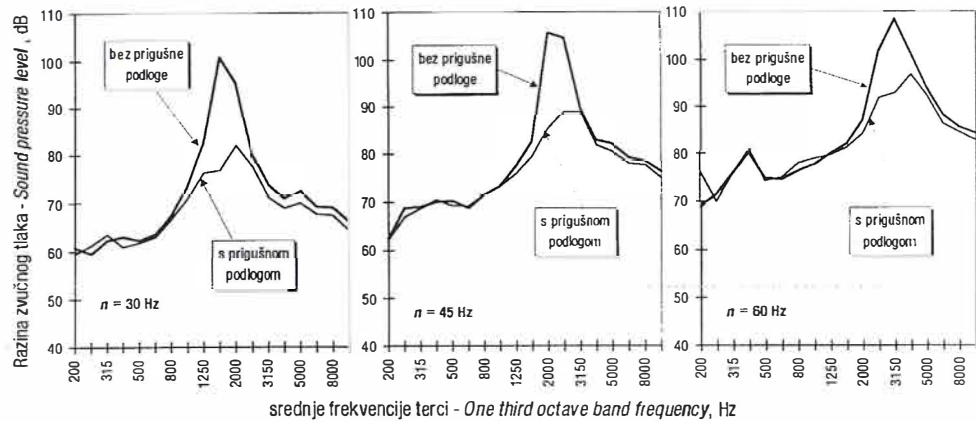
Rezultati frekventne analize buke u ovisnosti o frekvenciji vrtnje lista za uzorak 3 (pri omjeru pričvršćenja $i = 0,27$): a) bez prigušene podloge, b) s gumenom prigušnom podlogom • Noise frequency analysis for sample 3 (clamping ratio $i = 0,27$): a) without damping, b) with rubber damping layer



x - srednje frekvencije terci (One third octave band), Hz; y - frekvencija vrtnje lista (Revolution per second), Hz; z - razina zvučnog tlaka (Sound pressure level), dB

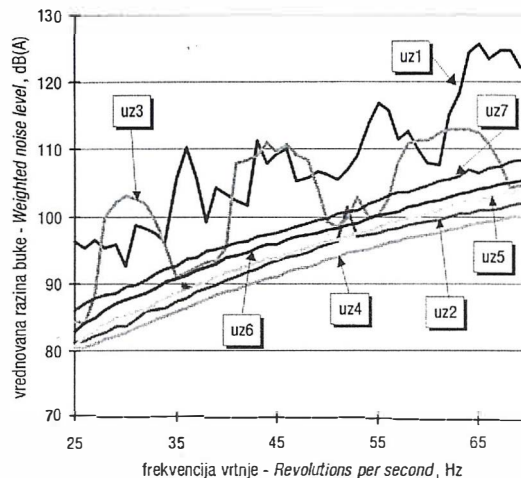
Slika 11.

Frekventni spektar buke uzorka 3 pri različitim frekvencijama vrtnje lista (30, 45 i 60 Hz) bez prigušenja i s prigušenjem • Noise frequency spectrum of sample 3 for different revolutions (30, 45 i 60 Hz) without and with dampening



Slika 12.

Ovisnost vrednovanja razine buke o frekvenciji vrtnje lista (omjer pričvršćenja $i = 0,27$, bez prigušne podloge) • Weighted noise level depending on revolutions (clamping ratio $i = 0,27$, without damping layer)



prigušnu foliju, a malo višu buku ima uzorak 2, s ornamentima. Razlog višoj buci uzorka 2 može biti ili izvedba prigušenja ili tip zubi jer su im ostali parametri jednaki. Uzorak 6 ima jednaku izvedbu prigušenja kao uzorak 4, no mnogo višu razinu buke u cijelom rasponu frekvencija vrtnje. Viša je buka posljedica veće debljine uzorka 6, kao i veće visine zuba, a neki rezultati upućuju na to da i oblik ozubljenja FZ/TR utječe na povećanje razine buke.

Ako se usporede uzorci 2 i 5, koji imaju jednaku izvedbu prigušenja, viša razina buke uzorka 5 također se može objasniti većom debljinom lista i većom visinom zuba. Razina buke uzorka 7 relativno je visoka, što je u skladu s obilježjima lista (debljinom lista, visinom zuba i tipom ozubljenja), a ako se uspoređi s razinom buke uzorka 3 (s kojim ima najviše sličnosti), može se vidjeti da bakreni čepovi u provrtima radijalnih utora dobro prigušuju energiju vibracija i sprječavaju rezonantnu buku tijekom praznoga hoda.

Postavljanjem prigušne podloge između lista pile i prirubnice odnosi se uzoraka prema razini buke ne mijenjaju, osim što se prigušenjem rezonantne buke uzorka 3 njegova krivulja ovisnosti razine buke o frekvenciji vrtnje smješta ispod krivulje uzorka 6 i uzorka 7, što je u skladu s dimenzijama lista i tipom ozubljenja.

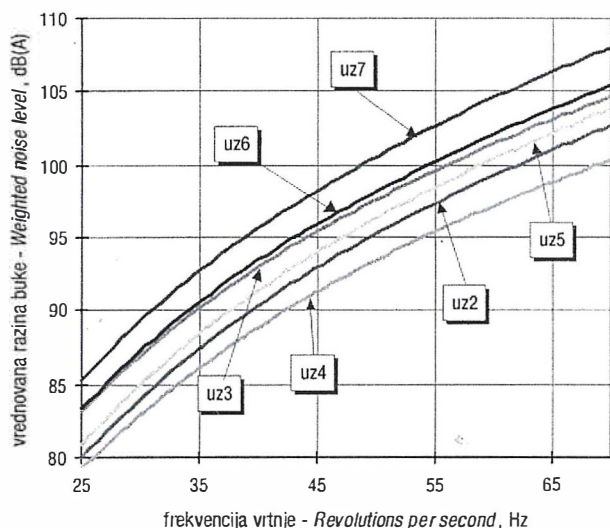
Na slici 13. nacrtane su krivulje izjednačenja za promjene vrednovane razine zvuka s porastom frekvencije vrtnje prigušenih listova pila (uključujući i uzorak 3 s prigušnom podlogom), a u tablici 3. navode se jednadžbe korelacijske sveze te kvadrat koeficijenta korelacije R^2 .

Postavljanjem prigušne podloge za uzorke s ugrađenim prigušenjem nije postignuto dodatno smanjenje razine buke. Prigušna je podloga između lista i prirubnice značajno utjecala na smanjenje razine buke samo uzorka 3, što je pokazano i pri spektralnoj analizi buke. Poseban je slučaj uzorak 1, koji nema ugrađeno prigušenje, a postavljanjem prigušne podloge ne smanjuje se razina buke.

U rasponu ispitivanih omjera pričvršćenja (od 0,24 do 0,33) nisu zabilježene značajne promjene razine buke koje bi se sa sigurnošću obrazložile promjenom promjera prirubnice. Rezultati istraživanja potvrđuju navode nekih autora koja pokazuju da povećanje omjera pričvršćenja nije djelotvoran način smanjenja razine buke u praznome hodu pile.

Ako se usporede razine buke uzoraka bez ozubljenja (uz 8 i uz 9) s odgovarajućim uzorcima s ozubljenjem (uz 2 i uz 4), dobiju se odnosi prikazani na slici 14.

Uzorci s ozubljenjem emitiraju, ovisno



Slika 13.

Ovisnost razine buke L_A o frekvenciji vrtnje n u praznom hodu za uzorke s ugrađenim prigušenjem (pile 2, 4, 5, 6 i 7) te za uzorak 3 s prigušnom podlogom između prirubnice i lista • Correlation between noise level L_A and revolutions n at idling for damped circular saws

Oznaka uzorka Sample mark	Korelacijska jednadžba Correlation equation	R^2
uz2	$L_A = 21,927 \ln(n) + 9,4585$	0,9963
uz3	$L_A = 20,829 \ln(n) + 16,111$	0,9978
uz4	$L_A = 20,53 \ln(n) + 13,097$	0,9983
uz5	$L_A = 22,205 \ln(n) + 9,4589$	0,9989
uz6	$L_A = 21,35 \ln(n) + 14,655$	0,9986
uz7	$L_A = 22,031 \ln(n) + 14,36$	0,9943

Tablica 3.

Jednadžbe ovisnosti vrednovane razine buke o frekvenciji vrtnje • Noise level in correlation with rotational frequency

2. Beslin, O., Nicolas, J. 1996: Modal radiation from an unbaffled rotating disk. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(5):3192-3202.
3. 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.
4. Cheng, W., Yokochi, H., Kimura, S. 1995: Vibration characteristics of circular sawblade with step thickness. The 12th International Wood Machining Seminar, Kyoto, Japan, October 2-4, 179-188.
5. Cho, H. S., Mote, C. D., Jr. 1977: Aerodynamically induced vibration and noise in circular saws. Fifth Wood Machining Seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 207-245.
6. Dugdale, D. S. 1977a: Practical analysis of saw noise. Proceedings of a conference held at the University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 198-206.
7. Dugdale, D. S. 1977b: Circular saw noise related to vibration nodal patterns. Proceedings of a conference held at the University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, March 28-30, 246-254.
8. Ellis, R. W., Mote, C. D., Jr. 1978: Increased lateral saw stiffness and vibration damping with feedback control. *Wood science* 11(1):56-64.
9. Goglia, V., Beljo, R., 1995: Istraživanje razine buke u okolini dvovretenih globalica, *Drvena industrija* 46, (2):69-74.
10. Goglia, V., Beljo, R., Gnjilac, D., 1995: Measurement of the airborne noise and the noise at the operator's position emitted by the ECOTRAC V-1033F forest tractor, *Archives* 46, (1):45-53.
11. Goglia, V., Beljo-Lučić, R., 1996: Utjecaj odnosa vlastite frekvencije i frekvencije pobude na buku kružnih pila, *Drvena industrija* 47, (1):11-17.
12. Goglia, V., Beljo-Lučić, R., 1997: Operator exposure to noise in woodworking plants, *Rad i sigurnost*, 1(1):1-11.
13. Hattori, N., Ando, K., Kitayama, S., Nakashima, K. 1993: Suppression of the whistling noise in circular saws using a newly-developed high-damping alloy. *Mokuzai Gakkaishi* 39(8): 891-896.
14. Huber, H. 1985: Noise emission of circular saw blades: Influenced by tooth shape. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 166-177.
15. Ikegiwa, H., Matsui, T., Fujii, Y., Okumura, S. 1997: Air flow around the rotating circular saw blade. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar, June 17-20, Vancouver, Canada, str. 161-172.
16. Ingemansson, S., Elvhammar, H., 1995: Zaštita od buke - načela i primjena. ZIRS, Zagreb.
17. Leu, M. C., Mote, C. D., Jr. 1979: Noise generation by circular saws. Wood machining seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 169-188.
18. 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.
19. Miklaszewski, S., Grobelny, T. 1995: Sound power determination of two circular saws with different constructions of the blades. I. međunarodna konferencija "Stroj-nastroj-obrobok", 4-6. Oktober 1995, Nitra, Slovensko.
20. 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.
21. Mote, C. D., Jr., Wen Hua Zhu 1984: Aerodynamic far field noise idling circular sawblades. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 106:441-446.
22. Münz, U.V. 1985: Dampening of circular saws with different constructed blades. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 109-129.
23. 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.
24. Plester, J. 1985: Origin of noise and noise reduction at circular sawing. Proceedings Circular Sawblade Technology, June 17-18, Oslo, 178-188.
25. Rhemrev, J., Cano, T. 1989: Noise studies of various damped circular crosscut saws. *Forest Product Journal* 39(11/12):65-69.
26. Salje, E., Bartsch, U. Polster, J. 1979: Noise reduction with compound circular saws. Wood machining seminar, University of California, Forest Product Laboratory, Richmond, October 15-17, 189-193.
27. 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.
28. Yanagimoto, K., Mote, C. D. Jr., Ichimiya, R. 1995: Reduction of vortex shedding noise in idling circular saws using self-jets of air through saw teeth. *Journal of Sound and Vibration*, 188(5):745-752.
29. Yokochi, H., Kimura, S., Tsuchikawa, S. 1994: Vibration characteristics of rotating circular saw V. Effects of number of teeth and slots on vibration and radiated sound, *Mokuzai Gakkaishi* 40, (2):148-157.
30. *****IEC Publication 651 - Sound level meters.
31. *****IEC Publication 12 - Recommendations for sound level meters.
32. *****ISO 1999 - Acoustics - Assessment of occupational noise exposure for hearing conservation purposes, 1975.
33. *****ISO 2204 - Acoustics - Guide to International Standards on the measurement of airborne acoustical noise and evolution of its effects on Human beings, 1979.



Trgomont Kolar

ZAGREB, AVENIJA DUBROVNIK 15

TELEFONI 385 (01) FAX : 6554-355
UPRAVA I RAČUNOVODSTVO : 6554-369
MALOPRODAJA : 6525-336
VELEPRODAJA : 6520-288
OPREMA OBJEKATA : 6528-546
SKLADIŠTE I VELEPRODAJA : 700-811
PROIZVODNJA NAMJEŠTAJA : 033/721-134

TRGOVAČKO DRUŠTVO NA VELIKO I MALO, VANJSKOTRGOVINSKI PROMET, ZASTUPSTVA, INŽENJERING d.o.o.



TRGOMONT KOLAR-JAVOR

Program sistemskog višenamjenskog
namještaja po mjeri
(iz vlastite proizvodnje)

KUHINJSKI NAMJEŠTAJ
KUPAONSKI NAMJEŠTAJ
PREDSOBNE STIJENE
PISAĆI STOLIĆI
MINI BLOK KUHINJE
KUĆICE ZA KUĆNE LJUBIMCE
OPREMANJA



SLAVONIJARADNOST d.d.

proizvodnja namještaja

35 400 NOVA GRADIŠKA, Bedem bb
centrala: ++385 (035) 362-044, fax: +385 (035) 362-365

MASIVNI NAMJEŠTAJ



DRVOMETAL d.d.

Dioničko društvo za proizvodnju proizvoda od drva i metala
49247 Zlatar Blstrica, Lovrečan 116
Tel: 049/461-738; Fax: 049/461-404

GRAĐEVINSKA STOLARIJA I METALNA GALANTERIJA