

## UTICAJ PROCESA FORMIRANJA STRUGOTINE NA OSCILOVANJE I DINAMIKU HABANJA ALATA

Aco Antić, Milan Zeljković, Aleksandar Živković, Slobodan Tabaković,  
Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000, Novi Sad

**Sadržaj** – U radu se prikazuje deo rezultata istraživanja vezanih za identifikaciju uticaja procesa segmentacije strugotine u procesu obrade rezanjem i „slobodnog“ dela spektra signala ubrzanja vibracija u cilju koncipiranja i laboratorijske verifikacije predložene metoda za prepoznavanje stanja pohabanosti alata pri obradi struganjem. Daje se uporedni prikaz oscilacija izračunatih metodom konačnih elemenata (MKE) i izmerenih vibracija elemenata obradnog sistema u toku obrade. Analizom mikroskopske strukture strugotine nastale u procesu rezanja određuje se frekvencija segmentacije strugotine i saglasnost sa izmerenim vibracijama sistem. Cilj je da se dokaže da u visokofrekventnom delu spektra postoji dominantan uticaj procesa formiranja strugotine sa zanemarljivim učešćem viših sopstvenih frekvencija elemenata obradnog sistema.

**Abstract** - The paper presents a segment of research results concerned with the identification of the influence of the chip segmentation process during the turning process and the “free” segment of the vibration acceleration signal specter with the aim of creation and laboratory verification of the proposed method for recognizing tool wear condition in turning. There is a comparative survey of the oscillations calculated by utilizing the finite element method (FEM) and the measured vibrations of the cutting system elements during the machining operation. The analysis of the microscopic structure of the chip generated in the turning process is employed to determine the chip segmentation frequency and the agreement with the measured system vibrations. The aim of the paper is to prove that there exists a dominant influence of the chip formation process in the high-frequency specter segment with the neglectable participation of the proper higher frequencies of the cutting system.

### 1. UVOD

Izvori vibracija koji se javljaju na alatu su različite prirode, a uzroci se mogu svrstati u determinističke i ne determinističke. Među determinističke spadaju: deformacija materijala, trenje alata i obratka i odvajanje strugotine, a njihova osnovna odlika je inherentna nelinearnosti, koja za posledicu ima pojavu samopobudnih vibracija u procesu rezanja [1].

Porast otpor rezanja, koji je rezultat sabijanja materijala u zoni rezanja, kao direktan uticaj izaziva na dršci noža povećanje potencijalne energije zbog prisustva elastičnih deformacija iste. Povećana opterećenja dovode do prekoračenja granice elastičnosti materijala što se ogleda kroz skokovit prelaz u zonu plastičnog deformisanja i razaranja materijala. Pri ovome se oslobađa akumulirana energija koja se impulsno pojavljuje svaki put kada se desi proces smicanja lamela tj. formiranje strugotine. Navedena pojava se može objasniti na taj način da se u materijalu, koji poseduje kristalnu strukturu, pri razbijanju kristala stvara mikro pukotina koja se brzo premešta stvarajući lom materijala tj. pucanje međukristalnih veza i oslobađanje energije. Ovi kratkotrajni pojedinačni događaji pobuđuju elastoviskoznu strukturu elemenata obradnog sistema koja generiše vibracije u širokom frekventnom spektru [2].

Trenje na kontaktnim površinama alata i obradka izaziva "stick-slip" efekat. Ovaj efekat unosi u obradni sistem aperiodičnu oscilatornu pobudu, koja se kao i u slučaju formiranja lamela strugotine može posmatrati kao niz

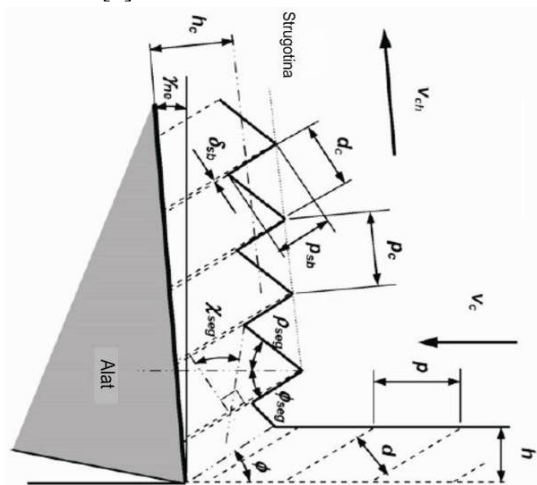
diskretnih impulsa energije koji pobuđuju elemente obradnog sistema, takođe, u širokom frekventnom spektru. Kompleksnost zajedničkih uticaja navedenih pojava na proces obrade ogledaju se kroz povećavaju mehaničke energije.

### 2. PROCES SEGMENTACIJE STRUGOTINE

Segmentno nastajanja lamela strugotine sastoji se od dve faze u kojima se materijal obratka plastično deformiše ispred alata prouzrokujući ispupčenja materijala na slobodnoj površini strugotine. Kada se dostigne kritični nivo napretka deformacije formira se pukotina koja se pod pritiskom alata produžava do površine materijala obratka. Rezultat deformacije materijala u procesu nastajanja lamela strugotine se sastoji od umereno deformisanih segmenata strugotine odvojenih uskim pojasom u kojem je izražena intenzivna deformacija materijala. Opisani model formiranja lamela strugotine prikazan je na slici 1 [3].

Jedan od bitnih mehanizama pobude koji izaziva vibracije u procesu obrade jeste stvaranje lamela strugotine. Cotterell i Byrne [3] su u svojim istraživanjima određivali frekvenciju nastanka lamela  $f_{seg}$  analizama video snimaka formiranja strugotine. Učestanost formiranja lamela strugotine linearno je porasla sa porastom brzine rezanja, a smanjuje se povećanjem dubine. Frekvencija strugotine može da bude u rasponu od 3,8 kHz do 250 kHz, pri obradi tvrdih materijala [4], što dovodi do velike frekvencije variranja sila na reznoj ivici alata. Uticaj segmentacije strugotine na habanje alata i

kvalitet obradene površine još nije detaljno razjašnjen, ali je utvrđeno da utiče na intenzitet sila u procesu rezanja i na postojanost alata [5]. Kratersko habanje i pojas habanja su primarni procesi habanja alata pri brzinama rezanja u rasponu 50-800 m/min [6].

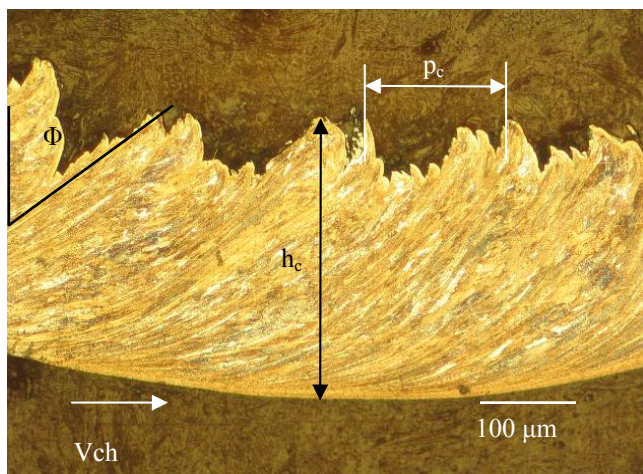


Sl. 1 Model formiranja strugotine [1]

Stvaranje lamela u procesu rezanja karakteriše njihova frekvencija nastajanja. Frekvencija nastajanja lamela strugotine se može izračunati na osnovu koraka nastajanja lamela  $p_c$ , dubina rezanja (debljina ne deformisanog dela strugotine)  $h$ , visine deformisanog dela strugotine  $h_{ch}$  i brzine rezanja  $v_c$ , primenom izraza:

$$f_{lam} = \frac{v_{ch} \cdot h_{ch}}{h \cdot p_c} = \frac{v_{ch}}{\lambda \cdot p_c} \quad (1)$$

Na osnovu izraza (1) može se uočiti da se sa porastom debljine ne deformisane strugotine smanjuje frekvencija stvaranja lamela što se direktno ogleda kroz smanjenje koeficijenta deformacije strugotine. Na slici 2 prikazani su parametri potrebni za izračunavanje frekvencije nastajanja lamela strugotine [1, 2].



Sl. 2 Mikrostruktura strugotine i njene karakteristične veličine merene na mikroskopu

Karakteristične veličine prikazane na slici su:

- $\Phi$  - ugao smicanja lamela
- $h$  - debljina nedeformisane strugotine (dubina rezanja)
- $p_c$  - korak nastajanja lamela
- $v_c$  - brzina rezanja
- $v_{ch}$  - brzina oticanja strugotine

- $f$  - pomak
- $\kappa$  - napadni ugao noža

Na osnovu navedenih parametara može se izračunati frekvencija nastajanja lamela koja sadrži i parametre režima obrade i njihov uticaj na elemente mehaničke strukture obradnog sistema..

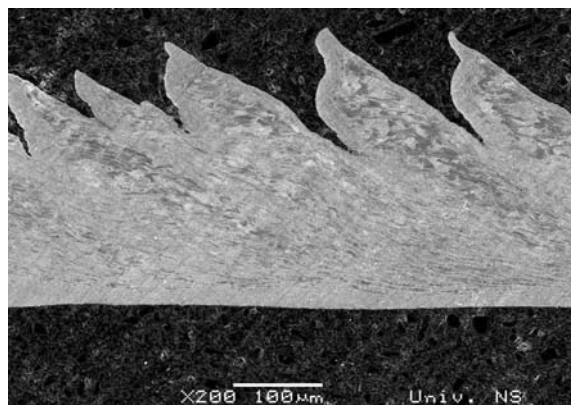
$$f_{lam} = \frac{v_c \cdot f \cdot \sin \kappa}{h_c \cdot p_c} \quad (2)$$

Relacija 2 u sebi sadrži parametre vezane za rezu geometriju alata i tehnološke parametre brzinu, pomak i dubinu rezanja. Na osnovu toga može se zaključiti da je frekvencija nastajanja lamela direktno proporcionalna brzini obrade i pomaku a obrnuto proporcionalna dubini. Porast brzine rezanja direktno utiče na frekvenciju nastajanja lamela strugotine, povećanje energije koje se ogleda kroz povećano oslobađanja toplote i smanjenje koraka lamela, jednom rečju povećava se ukupna dinamika habanja. U izvedenim eksperimentalnim istraživanjima sa pločicom od tvrdog metala i opsegom brzine rezanja od 200 do 250 m/min javljale su frekvencije segmentacije strugotine od oko 8 - 100 kHz. Područje srednjih frekvencija nastajanja lamela, na osnovu matematičkog izračunavanja po formuli Bähre, približava se izmerenim frekvencijama oscilovanja drške alata tj. sopstvenim frekvencijama od 8,5 kHz do 88 kHz.

### 3. FREKVENCIJA NASTAJANJA LAMELA STRUGOTINE

Većina istraživanja obradivosti materijale usmerena je na mehanizam formiranja strugotine i karakterizaciju habanja alata. Od značaja za proučavanje efekata habanja alata i morfologiju stvaranja strugotine imaju i režimi obrade. Primećeno je da promena stepena pohabanosti alata i uslova obrade menja oblik natalih lamela strugotine [7].

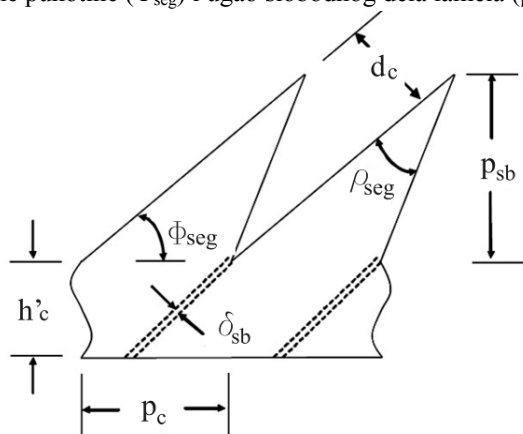
Habanja alata, parametri procesa rezanja i njihov uticaj na nastanak i oblik strugotine su praćeni pri eksperimentalnom ispitivanju izvršenim na Departmanu za proizvodno mašinstvo. Oblik strugotine je meren na mikroskopu u zavisnosti od stepena pohabanosti alata, pri različitim režimima obrade (brzini rezanja, pomaku i dubinu rezanja). Merene dimenzija strugotine su: korak (razmaka između lamela), visina zuba (neravnine na slobodnom kraju strugotine), visina kontinualnog dela, ukupna debljina strugotine i širina lamela. Tokom obrade merene se vibracije na dršci alata a frekvencija segmentacije je izračunata na osnovu izmerenih parametara poprečnog preseka strugotine na elektronskom mikroskopu.



Sl. 3 Mikroskopski snimak poprečnog preseka strugotine pri obradi pohabanim alatom

Slika 3 prikazuje poprečni presek strugotine, na elektronskom mikroskopu, pri obradi pohabanim alatom snimljen na elektronskom mikroskopu.

Na slici 4 je prikazana morfologija testerastog oblika strugotine sa karakterističnim dimenzijama: korak lamela ( $p_c$ ), visina slobodnog dela lamela strugotine ( $p_{sb}$ ), visina kontinualnog (sabijenog) dela strugotine ( $h'_c$ ), širina smicanja lamela ( $d_c$ ), pojas zone smicanja ( $\delta_{sb}$ ), ugao u pravcu inicijalne pukotine ( $\Phi_{seg}$ ) i ugao slobodnog dela lamela ( $\rho_{seg}$ ).



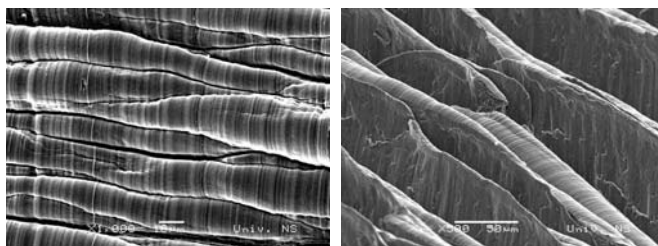
Sl. 4 Karakteristične dimenzije za izračunavanje frekvencije nastajanja strugotine

Na osnovu obrađenih rezultata eksperimentalnog ispitivanja mogu se izvesti sledeći zaključci, koji su rezultat praćenja morfologije strugotine i stanja pohabanosti alata:

- Srednja vrednost segmentacije slobodnog dela strugotine (korak lamela) ( $p_c$ ) i visine slobodnog dela (zuba) ( $p_{bs}$ ) se povećavaju sa povećanjem habanja alata.
- Korak segmentacije, razmak između lamela ( $p_c$ ) raste sa brzinom rezanja.
- Visina kontinualnog dela strugotine ( $h'_c$ ) je veća kod novog alata.
- Frekvencija segmentacije se povećava sa povećanjem brzine rezanja a opada sa povećanjem stepena pohabanosti alata.

Istraživanja nastajanja lamela strugotine doprinose otkrivanju mehanizma formiranja lamela strugotine, kao i definisanju najpogodnije tehnologije obrade. Dodatni uticaji koje je potrebno razmotriti su ispitivanje uticaja obrade pohabanim alatom na razvoj termičkih efekta i dali su ti uticaji odgovorni za smanjenje frekvencije nastanka lamela.

Porast kratera na grudnoj površini alata ima veoma važan uticaj na mehanizam formiranja lamela strugotine, a takođe i na frekvenciju nastajanja lamela i oblik strugotine.



a) nov alat

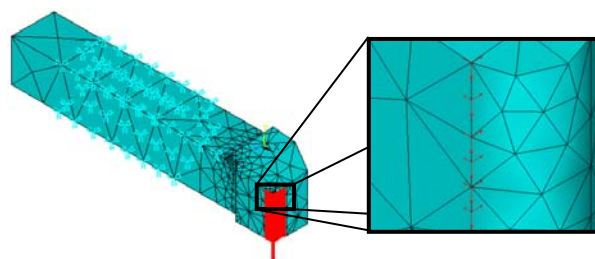
b) pohaban alat

Sl. 5 Izgled slobodne površine strugotine nastale pri obradi alatom različitog stepena pohabanosti

Kratersko habanje se direktno odražava na osnovnu početnu strukturu stvaranja lamela strugotine koja uvek teže da ima karakter kontinualne neprekidne strugotine. Ledna strana strugotine pri izrazito formiranom krateru dovodi do početka stvaranja naslaga na reznoj ivici alata. Izgled slobodne površine strugotine nastale pri obradi novim alatom i alatom sa razvijenim kraterom na grudnoj površini prikazan je na slici 5.

#### 4. MODELIRANJE DINAMIČKOG PONAŠANJA ALATA

U okviru ovih istraživanja, analizirano je dinamičko ponašanje strugarskog noža, primenom metode konačnih elemenata. Drška noža i pločica za rezanje su modelirani kao monolitna struktura. Na delu drške koji se koristi za pričvršćivanje u držač alata (gornja i donja površina) oduzeti su svi stepeni slobode, dok su na vrhu zadata opterećenja koja odgovaraju otporima rezanja (slika 6).



Sl. 6 Način ukleštenja i pravci delovanja sila na nožu

Pored analize dinamičkog ponašanja, može se izvesti i statička analiza sa ciljem identifikacije ekvivalentne krutosti strugarskog noža u pravcu koordinatnih osa obradnog sistema. Informacija o krutosti je neophodna za analizu samopobudnih vibracija koje nastaju pod dejstvom nelinearnih fenomena trenja u zoni rezanja, a manifestuju se kroz pojavu karakterističnog „stkick-slip“ efekta. Ova problematika se ne razmatra u radu.

Analizom dinamičkog ponašanja strugarskog noža generiše se jedan vrlo važan apriorni skup znanja koji se može iskoristiti za gradnju neuro-fazi sistema za inteligentno prepoznavanje stanja pohabanosti alata. Prisustvo sopstvenih frekvencija alata u gornjem delu spektra, u konkretnom primeru preko 15 kHz predstavlja problem pri praćenju stanja pohabanosti alata, jer se u tom delu spektra nalaze i frekvencije nastale od procesa nastajanja lamela strugotine. Sopstvene frekvencije alata mogu dovesti do pojave rezonancije i kontaminacije korisnog dela informacija, odnosno vibracija koje nastaju direktno od procesa formiranja strugotine. U ovakvoj „deformisanoj slici“ praćenje procesa stvaranja strugotine, kroz analizu pripadajućeg frekventnog sadržaja, biće značajno otežano čak i onemogućeno. Apriorna informacija o dinamičkom ponašanju alata može se iskoristiti za izdvajanje dela spektra koji nije kontaminiran i čijim se praćenjem može, sa velikom pouzdanošću, uspostaviti jednoznačna korelacija između stanja alata i signala vibracija alata merenih odgovarajućim senzorom.

Važno je napomenuti da, zbog karakteristika nosača alata i ostalih elemenata obradnog sistema vezanih za masu, njihov uticaj na dinamički odziv obradnog sistema meren na dršci alata nije kritičan. Sopstvene frekvencije ovih elemenata se nalaze u donjem delu spektra, koji je značajno udaljen od dela spektra u kome se nalaze frekvencije koje generiše

proces nastajanja strugotine. Iz tog razloga, analiza dinamičkog ponašanja mehaničke strukture obradnog sistema je ograničena samo na analizu ponašanja alata.

Signali vibracija koji potiču od samog procesa rezanja su teško merljivi direktnim metodama i za definisanje stvarnog uticaja tehnički i praktično veoma nedostupni za merenja. U praktičnom smislu merljive su reakcije ukupnog sistema "Alat-obradak-mašina" na samom alatu. Pri izvođenju merenju javljaju se određena ograničenja pri identifikaciji i razdvajanju mehanizma pobude i prenosa vibracija sa ostalih elemenata mašine. To praktično znači da je za pojedine zahvate obrade moguće samo fenomenološko objašnjenje. Može se konstatovati da je određivanje uticaja parametara procesa obrade na sadržaj vibracija alata veoma kompleksan. Određivanje tačnog sadržaja izmerenih vibracija iz procesa rezanja u izlaznom senzorskom signalu predstavlja veoma važan zadatak. Dominantni uticaj sopstvenih frekvencija alata u spektru signala može se u relativno tačno izračunati primenom određenih računskih metoda. Takvi proračuni umnogome mogu da olakšaju raščlanjavanje spektra, što će u nastavku biti i pokazano.

Analiza dinamičkog ponašanja drške strugarskog noža, metodom konačnih elemenata ima za cilj određivanje sopstvenih frekvencija i amplituda oscilovanja drške noža u procesu obrade. Takođe analiza metodom konačnih elemenata omogućava uspostavljanje veze između eksperimentalnih istraživanja i određenih modela procesa obrade, koji su povezani sa habanjem alata i promenom rezne geometrije.

Analizom signala vibracija potrebno je uočiti razliku između sopstvenih i samopobudnih vibracije alata u toku zahvata obrade od vibracija celokupnog sistema.

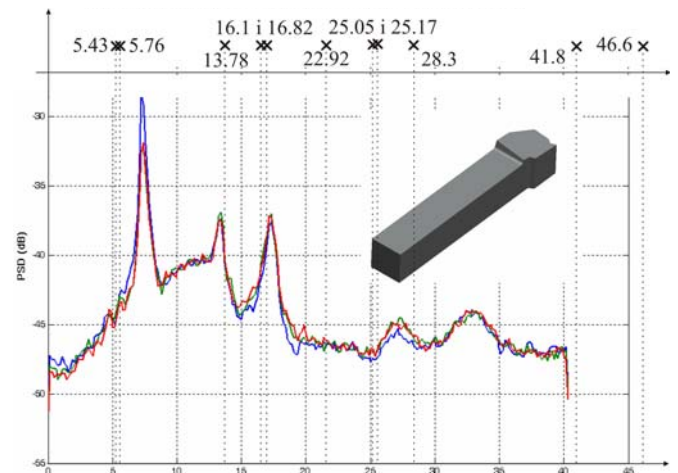
#### 4.1 SOPSTVENE FREKVENCIJE OSCILOVANJA ALATA

Na slici 7 dat je uporedni prikaz izračunatih sopstvenih frekvencija alata i spektra signala ubrzanja vibracija dobijenog eksperimentalnim ispitivanjem za tri režima obrade. Izračunate sopstvene frekvencije noža su prikazane isprekidanim linijama. U okviru eksperimentalnog ispitivanja pored ubrzanja drške strugarskog noža istovremeno su vršena merenja i sile rezanja, pa je iz tog razloga strugarski nož pričvršćen na dinamometar čija je krutost manja od krutosti nosača alata.

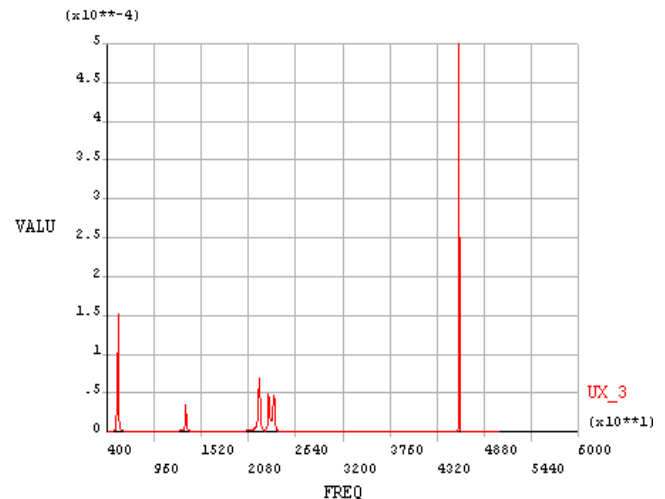
Na osnovu prikazanih rezultata konstatuje se da se skoro sve sopstvene frekvencije oscilovanja alata nalaze u gornjem domenu frekventnog spektra. Ova činjenica se može iskoristiti za tumačenje pojave dominantnih komponenti u eksperimentalno dobijenom spektru, posebno što se ove komponente nalaze vrlo blizu izračunatim sopstvenim frekvencijama oscilovanja alata. Ovim se potvrđuje upotrebljivost usvojenog pristupa u modeliranju i analizi dinamičkog ponašanja alata. U ovom slučaju značajne aproksimacije u postavci modela nisu potisnule dominantne efekte vibracija u procesu obrade.

Za izračunavanje karakterističnih amplituda oscilovanja drške noža korišćen je i metod harmonijske analize oscilovanja. Harmonijskom analizom obuhvaćen je opseg frekvencija od 4 do 60 kHz. Slike od 8 do 10 prikazuju amplitudno frekventne karakteristike noža u pravcu osa X, Y i Z. Analizom dobijenih rezultata može se zapaziti da su amplitude oscilovanja u pravcu Y i Z ose istog reda veličina

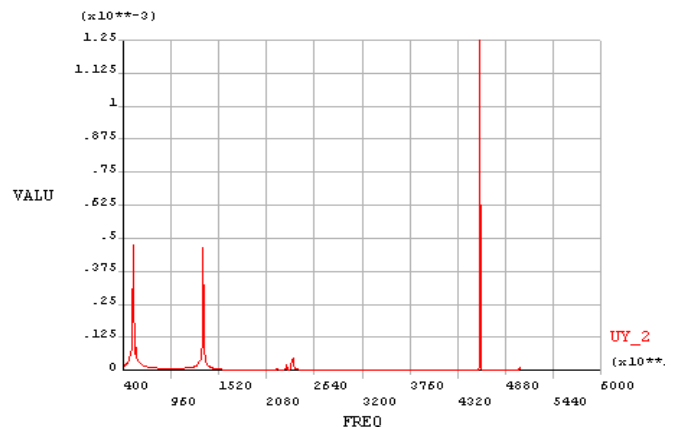
kod većeg broja sopstvenih frekvencija, dok su u pravcu X ose znatno manje, čak i na frekvenciji 46.6 kHz gde je najveća frekvencija u pravcu ove ose.



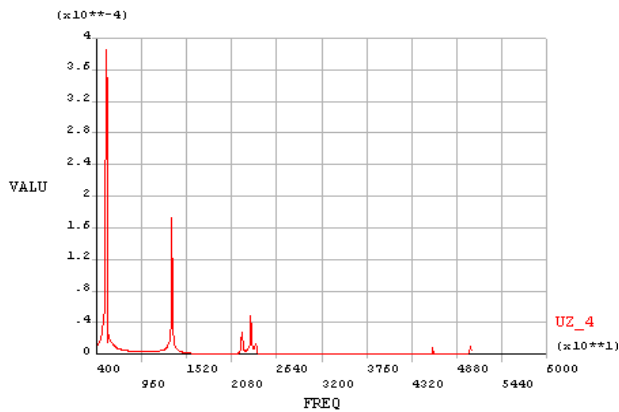
Sl. 7 Spektri signala vibracija dobijeni eksperimentalnim ispitivanjem i izračunate sopstvene frekvencije oscilovanja alata metodom konačnih elemenata



Sl. 8 Amplitudno frekventna karakteristika noža u pravcu X ose

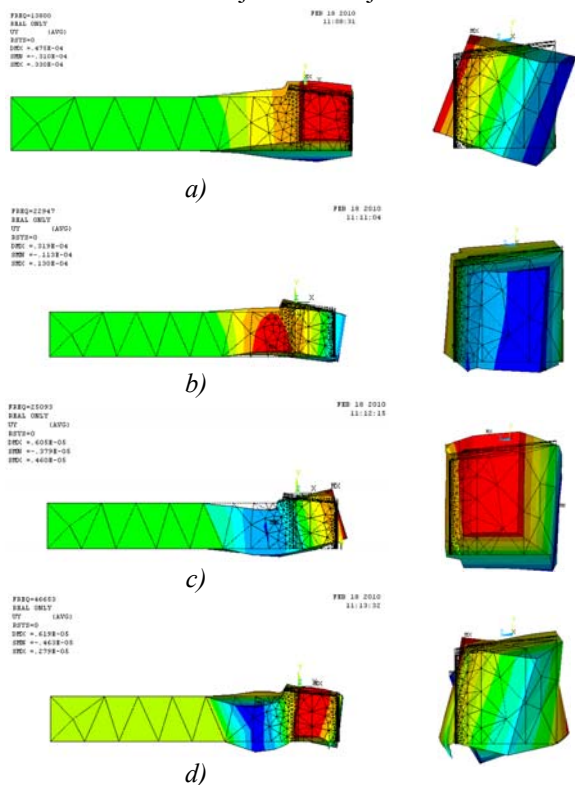


Sl. 9 Amplitudno frekventna karakteristika noža u pravcu Y ose



Sl. 10 Amplitudno frekventna karakteristika noža u pravcu Z ose

Primenom modalne i harmonijske analize sistema oscilovanja strugarskog noža dobijeni su podudarni rezultati karakterističnih frekvencija oscilovanja drške noža.



Sl. 11 Glavni oblici oscilovanja alata u pravcu Y ose na frekvencijama: a) 13,8 kHz; b) 22,95 kHz; c) 25,09 kHz d) 46,65 kHz [1]

Slika 11 prikazuje glavne oblike oscilovanja alata u opsegu frekvencija od 4 kHz do 50 kHz.

Analizom eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih proračunom metodom konačnih elemenata mogu se povezati oblici oscilovanja na izračunatim i izmerenim frekvencijama sa uzrocima njihovog nastajanja:

1. na 13,8 kHz dolazi do oscilovanja noža u pravcu Y i Z-ose noža pri čemu se najveće amplitude javljaju na vrhu noža i iznose oko 30 do 35 [μm];
2. pri 22,95 kHz su amplitude pomeranja u pravcu navedenih osa iznose oko 10-20 [μm] i javljaju se na dršci (vratu) noža;
3. na ostalim frekvencijama 23,09 i 46,5 kHz maksimalne amplitude pomranje se takođe javljaju na vratu strugarskog noža.

Maksimalne amplitude na dršci noža se poklapaju sa mestima postavljanja akselerometra pri eksperimentalnom ispitivanju. Navedene sopstvene frekvencije u potpunosti pokrivaju deo frekventnog opsega u kome se nalaze dominantne komponente pobude generisane diskontinuitetima u procesu nastajanja strugotine.

## 5. ZAKLJUČAK

U opsegu od 10 do 50 kHz nalazi se veći broj sopstvenih frekvencija alata, što stvara prostor za pojavu rezonance pod dejstvom pobudne sile koja nastaje stvaranjem lamela strugotine. Povećanje intenziteta oscilacija izazvano rezonancom alata na većem broju frekvencija ima veći intenzitet i deformiše sadržaj signala koji potiče od procesa nastajanja lamela strugotine. Ovakva situacija je prepoznata u eksperimentalnim istraživanjima i rešenje ovog problema nameće potrebu razvoja metoda i tehnologije za rad na višim frekventnim opsezima, od preko 50 ili čak preko 200 kHz. Ispitivanjima na višim frekvencijama, na kojima je deformacija sadržaja signala koji dolaze od procesa nastajanja lamela strugotine minimalan, može se preciznije odrediti trend frekvencije nastajanja strugotine.

## 6. NAPOMENA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Istraživanje i razvoj kotrljajnih i ležajnih sklopova i njihovih komponenti" broj projekta TR 14048 (Istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2008. - 2010.) koje finansira Ministarstvo nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Antić, A., Petrović, P., Zeljković, M., Dinamika obradnog sistema i njena implementacija na indirektno prepoznavanje stanja reznog alata, *32. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem*, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, str. 341-346, 2008.
- [2] Antić, A., Prepoznavanje stanja pohabanosti alata za obradu rezanjem primenom neuro-fazi klasifikatora, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, *doktorska teza u izradi*.
- [3] Cotterell, M., Byrne, G., Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57, pp 93-96, 2008.
- [4] Ekinović, S., Dolinšek, S., Jawahir, I.S., Some observations of the chip formation process and the white layer formation in high speed milling of hardened steel. *Journal of Machining Science and Technology* 8, pp 327-340, 2004.
- [5] Morehead, M.D., Huang, Y., Luo, J., Chip Morphology Characterization and Modeling in Machining Hardened 52100 Steels, *Machining Science and Technology* 11, pp 335-354, 2007.
- [6] Katuku, K., Koursaris, A., Sigalas, I., Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp 2412-2420, 2009.
- [7] Poulachon, G., Moisan, A., Jawahir, I.S., Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. *Wear*, 250 pp 576-586, 2001.