

# Identifikacija samoizazvanih vibracija pri obradi struganjem primenom savremene dijagnostičke opreme

Aleksandar Košarac<sup>1\*</sup>, Milan Zeljković<sup>2</sup>, Cvijetin Mladenović<sup>2</sup>, Aleksandar Živković<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu,

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

*Pojava samoizazvanih vibracija pri obradi rezanjem je odavno uočena, ali i danas predstavlja vrlo aktuelno polje istraživanja kako sa stanovišta matematičkog modeliranja i predikcije, tako i sa stanovišta eksperimentalnog ispitivanja i upravljanja obradnim procesom. Razvojem NU mašina alatki i sve većom primenom visokobrzinske obrade, pomenuti problemi su postali još izraženiji, pa su detekcija i prevencija nastanka samoizazvanih vibracija postale suštinski važne za eksploataciju ovih obradnih sistema.*

*U radu je prikazan način utvrđivanja trenutka nastanka samoizazvanih vibracija pri obradi struganjem, kao jednog od indikatora dinamičke nestabilnosti obradnog sistema, primenom savremene dijagnostičke opreme National Instruments i LabView i Matlab softvera. Takođe, na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata, primenom metode tangenti, određene su granične vrednosti dubine rezanja pri kojima dolazi do nastanka samoizazvanih vibracija, kao osnove za definisanje karte stabilnosti obradnog sistema, i identifikaciju najosetljivijeg elementa sa stanovišta dinamičkog ponašanja mehaničke strukture mašine alatke.*

**Ključne reči:** Dinamičko ponašanje obradnih sistema, Samoizazvane vibracije, Eksperimentalno ispitivanje, Karta stabilnosti

## 0. UVOD

Najnoviji trendovi u razvoju mašina alatki, bazirani na razvoju računarske i senzorske tehnike, usmereni su ka *on-line* praćenju i kontroli celokupnog procesa rezanja. U tu svrhu razvijen je veliki broj senzora i tehnika obrade signala koji omogućavaju direktnu ili indirektnu dijagnostiku raznih aspekata procesa obrade, kao što su karakteristike obradka (kvalitet obrađene površine, tačnost dimenzija, itd.), stanje alata (pohabanost ili lom), pohabanost ili oštećenje komponenata mašine alatke, itd.

Međutim, i pored pomenutog rapidnog razvoja senzora za nadzor procesa rezanja, intenzivne vibracije u procesu rezanja predstavljaju nepovoljnu pojavu koju je teško detektovati i koja usled neblagovremene intervencije može dovesti čak i do otkaza elemenata mašine, ili mašine alatke kao celine.

U procesu rezanja mogu se javiti tri tipa vibracija koje nastaju usled nedovoljne dinamičke krutosti jednog ili više elemenata sistema mašina alatka – alat – pribor – obradak, i to slobodne (prirodne), prinudne i samoizazvane vibracije [9]. Slobodne vibracije nastaju kada se mehaničkom sistemu, izvedenom iz ravnotežnog položaja, omogući slobodno oscilovanje bez spoljašnjih uticaja. Na primer, u procesu rezanja ovaj tip vibracija nastaje usled neadekvatno definisane putanje alata, odnosno usled kolizije između alata i obradka.

Prinudne vibracije nastaju usled spoljašnje periodične pobude [5]. Primer ovog tipa vibracija je struganje prekinutih površina, npr. ožljebljenog vratila pri kome alat naizmenično ulazi i izlazi iz zahvata obrade. Slobodne i prinudne vibracije se, ukoliko je poznat njihov izvor, mogu efikasno izbeći, redukovati ili ukloniti iz procesa obrade.

Samoizazvane vibracije predstavljaju najnepovoljniji tip vibracija, i energiju za svoj nastanak i rast amplitudne crpe

iz samog procesa rezanja, a mogu nastati usled trenja u sistemu alat – obradak, usled termo – mehaničkih efekata, ili kako posledica regenerativnog efekta tj. variranja poprečnog preseka strugotine tokom obrade. Ove vibracije često dovode do nestabilnog rada mašine alatke, tzv. podrtavanja (*eng. Chatter*), a za posledicu imaju smanjenje kvaliteta obrađene površine, pojavu buke, ubrzano trošenje reznog alata i elemenata mašine alatke, itd. [5].

Da bi se izbegle posledice samoizazvanih vibracija, pri radu mašine alatke često nije moguće koristiti određene režime rezanja jer uzrokuju nestabilan rad mašine. Dijagrami koji prikazuju područje stabilnog i nestabilnog rada mašine alatke nazivaju se karte stabilnosti, a formiraju se na osnovu kritičnih dubina rezanja pri kojima dolazi do pojave samoizazvanih vibracija.

U radu je prikazan način utvrđivanja trenutka nastanka samoizazvanih vibracija pri obradi struganjem, kao jednog od indikatora dinamičke nestabilnosti obradnog sistema, primenom savremene dijagnostičke opreme National Instruments i LabView i Matlab softvera. Takođe, na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata, primenom metode tangenti, određene su granične vrednosti dubine rezanja pri kojima dolazi do nastanka samoizazvanih vibracija, kao osnove za definisanje karte stabilnosti obradnog sistema, i identifikaciju frekvencije elementa najmanje krutosti, i pored ostalog uzročnika nestabilnog dinamičkog ponašanja mehaničke strukture mašine alatke.

## 1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna ispitivanja u cilju identifikacije samoizazvanih vibracija i njihovog uticaja na stabilnost mašina alatki među prvima su ispitivali sredinom prošlog veka Tobias [8] i Tlustý [7], skoro istovremeno ali u

\* Kontakt adresa autora: Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Vuka Karadžića 30, Istočno Sarajevo; BiH, akosarac@gmail.com

potpuno odvojenim istraživanjima. Oni su predložili određene metode za analizu stabilnosti mašina kao što je određivanje granične dubine rezanja i formiranje karte stabilnosti. Pri ispitivanju stabilnosti mašina alatki metodom granične dubine rezanja, veliki uticaj na pojavu samoizazvanih vibracija imaju parametri procesa rezanja. Tako, za ispitivanje univerzalnih strugova Koenigsberger i Tlusty [3] preporučuju tri varijante procesa obrade u kojima su definisani načini stezanja obradka i njegove dimenzije. Za usvojeni pomak postepeno se povećava dubina rezanja dok se ne konstatuje pojava samoizazvanih vibracija. Dubina rezanja na kojoj je došlo do nastanka samoizazvanih vibracija naziva se granična dubina rezanja.

Prema Kudinovu [4] za ispitivanje strugova preporučuju se četiri varijante procesa obrade sa definisanim načinom stezanja i dimenzijama obradka. I kod ovog postupka se postepeno povećava dubina rezanja dok se ne konstatuje pojava samoizazvanih vibracija. Sličnost ovih postupaka je da su obradci cilindrični, te da se dubina rezanja povećava u svakom prolazu radialnim primicanjem alata.

U novije vrijeme, razvojem računarskih tehnologija, istraživačima su omogućene sofisticiranije metode ispitivanja i analize samoizazvanih vibracija.

Tako, Bisu [1] prikazuje rezultate eksperimentalnih merenja pri obradi na strugu, pri čemu se za konstantan broj obrtaja i pomak postepeno povećava dubina rezanja do momenta nastanka samoizazvanih vibracija. Nakon nastanka samoizazvanih vibracija, zadržava se predhodno dostignuta dubina rezanja, kao i broj obrtaja, a merenje se nastavlja pri promeni pomaka. Merenja vibracija se vrše pojedinačno na podsistemu alata i podsistemu obradka-mašina alatka. Na osnovu FFT analize snimljenih signala uspostavlja se korelacija između pomeranja vrha alata i krutosnih karakteristika ispitivanih podsistema mašine alatke.

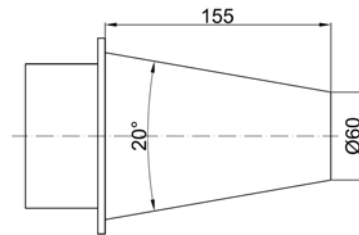
Analiza samoizazvanih vibracija pri rezanju može se vršiti eksperimentalno i analitički. Dok se eksperimentalno ispitivanje svodi na određivanje intervala pojedinih parametara rezanja pri kojima je proces rezanja stabilan, analitički model predikcije samoizazvanih vibracija zahteva određivanje prenosne funkcije mehaničke strukture mašine alatke. Suzuki [6] prikazuje analitički model predikcije samoizazvanih vibracija u procesu obrade. Za definisanje ovog modela koristi se prenosna funkcija koja se određuje inverznom analizom samoizazvanih vibracija, odnosno dijagrama stabilnosti, dobijenih eksperimentalnim putem.

## 2. OPIS EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

Eksperimentalno ispitivanje pojave samoizazvanih vibracija sprovedeno je na univerzalnom strugu PA-22 „Potisje – Ada“, na Departmanu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

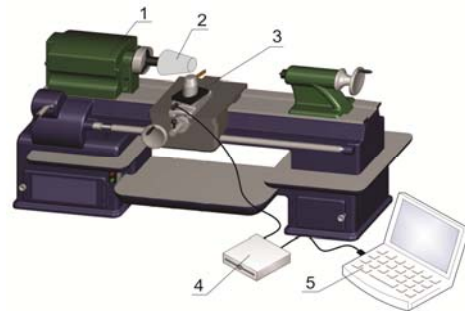
U tu svrhu sproveden je niz eksperimenata pri različitim režimima obrade, odnosno varirani su brojevi obrtaja (330 [o/min], 400 [o/min], 500 [o/min] i 600 [o/min]) i pomaci (0,098 [mm/o]; 0,142 [mm/o] i 0,196 [mm/o]). Za svaki usvojeni broj obrtaja u kombinaciji sa svakim pomakom, kontinualno je povećavana dubina rezanja i pri tome je registrovana veličina amplitude oscilovanja reznog alata. Obradak korišćen pri eksperimentalnim ispitivanjima je konusnog oblika od konstrukcionog čelika E335 (Č.0645) (slika 1), a za obradu je korišćen strugarski nož za grubu

obradu sa zalemljenom pločicom od tvrdog metala L 2020 JUS K.C1.051 P30.



Slika 1. Dimenzije obratka

Na slici 2 je prikazana dispozicija merenja pri ispitivanju samoizazvanih vibracija. Eksperimentalnu opremu čine mašina alatka (1), konusni radni predmet (2), senzor ubrzanja-akcelerometar (3), A/D pretvarač (4) i PC računar (5) sa odgovarajućim programom, dok je na slici 3 prikazan detalj ispitivanja.



Slika 2. Dispozicija merenja pri ispitivanju samoizazvanih vibracija



Slika 3. Detalj ispitivanja samoizazvanih vibracija

Kontinualna promena dubine rezanja obezbeđena je samom konfiguracijom obradka, odnosno njegovim konusnim oblikom. Usled pomenute promene dubine rezanja, dolazi i do vrlo blagog rasta amplitude oscilovanja reznog alata, a u trenutku kada dubina rezanja dostigne neku graničnu vrednost, dolazi do naglog skoka amplitude što ukazuje na pojavu samoizazvanih vibracija. Ovaj trenutak, osim naglog skoka amplitude vibracija, karakteriše i promena reljefa i izgleda strugotine (slika 4), kao i pojava prodornog, intenzivnog zvuka, koji je indikator da mašina radi u nepovoljnom režimu obrade.



#### Slika 4. Izgled strugotine pri nastanku samoizazvanih vibracija

Parametar vibracija koji se direktno meri kontaktnom metodom je ubrzanje, pri čemu se koristi instrumentacija *National Instruments*. Instrumentacija se sastoji od šasije *National Instruments cDAQ 9172*, (slika 5a) i analogne kartice *NI 9233* sa četiri analogna ulaza opsega napona  $\pm 5$  V i maksimalne brzine odabiranja signala po kanalu 50 kS/s (*kilosamples per secon*), (slika 5b). Senzor ubrzanja akcelometar *METRIX Instruments* osjetljivosti 100mV/g sa piezo-keramikom se pomoću magnetnih držača postavlja direktno na alat u pravcu sile prodiranja (normalno na obradenu površinu). Pri akviziciji (prikupljanju) podataka koristi se grafički programski jezik za pravljenje akvizicionih sistema LabVIEW, a pri obradi rezultata merenja Matlab okruženje.

Takođe, treba napomenuti da se, pri obradi rezultata merenja u cilju određivanja granične dubine rezanja, ne uzima u obzir apsolutna vrednost amplitude vibracija jer nije merodavna za utvrđivanje trenutka nastanka samoizazvanih vibracija.



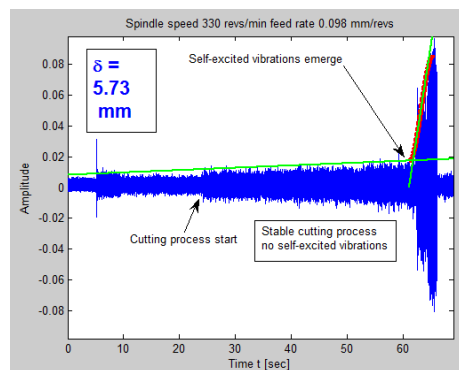
Slika 5. a) Šasija *National Instruments cDAQ 9172*;  
b) Analogna kartica *NI 9233*

### 3. ANALIZA REZULTATA MERENJA

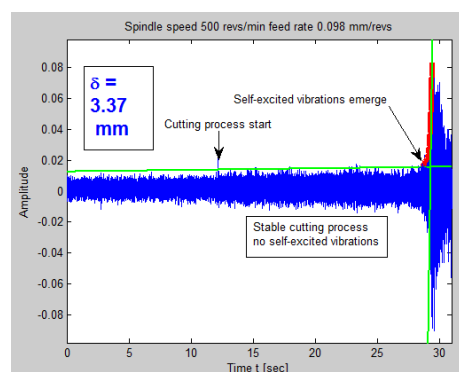
Na osnovu dobijenih rezultata merenja u vremenskom domenu, primenom metode tangenti, određene su granične vrednosti dubine rezanja pri kojima dolazi do nastanka samoizazvanih vibracija, i to na sledeći način. U području naglog skoka amplitude povučen je polinom koji prolazi vrhovima amplitude. U tački u kojoj polinom ima najveću vrednost prvog izvoda povučena je tangenta. Presek tangente sa pravom linijom koja je povučena kroz vrhove amplitude u delu stabilnog procesa obrade (u kom nema pojave samoizazvanih vibracija) predstavlja kritičnu dubinu rezanja  $\delta$  koja se, matematički lako određuje na osnovu poznate geometrije konusa obradka, dužine rezanja do pojave samoizazvanih vibracija, poznatog vremenskog intervala od trenutka nastanka samoizazvanih vibracija do kraja procesa rezanja i pomaka.

Frekventna analiza signala izvršena je primenom programa LabView i Matlab, a dobijeni rezultati pokazuju visok stepen međusobne usaglašenosti.

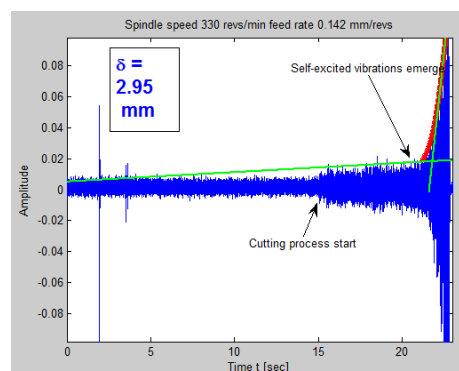
Na slikama 6, 7, 8 i 9, kao ilustracija opisane metode, prikazani su signali u vremenskom domenu i trenutak nastanka samoizazvanih vibracija za različite režime rezanja, kao i određivanje granične dubine rezanja metodom tangenti.



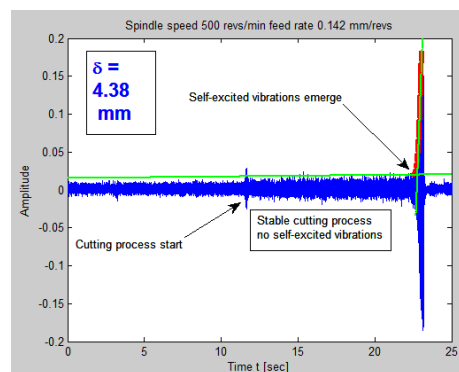
Slika 6. Granična dubina rezanja određena metodom tangenti za broj obrtaja 330 [o/min] i pomak 0,098 [mm/o]



Slika 7. Granična dubina rezanja određena metodom tangenti za broj obrtaja 500 [o/min] i pomak 0,098 [mm/o]

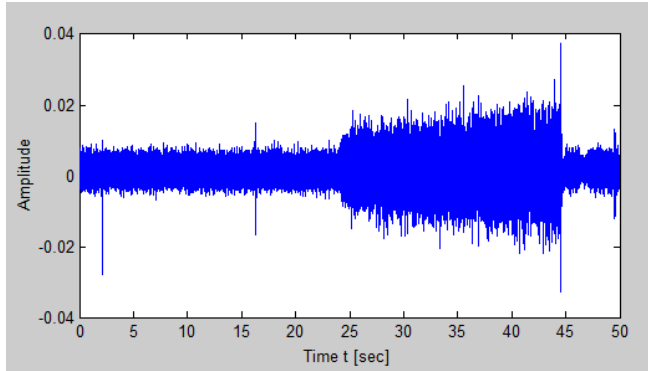


Slika 8. Granična dubina rezanja određena metodom tangenti za broj obrtaja 330 [o/min] i pomak 0,142 [mm/o]



Slika 9. Granična dubina rezanja određena metodom tangenti za broj obrtaja 500 [o/min] i pomak 0,142 [mm/o]

Na slici 10 prikazan je signal u vremenskom domenu za eksperiment sa brojem obrtaja 330 [o/min] i pomakom 0,196 [mm/o], pri kome je mašina alatka sve vreme bila u stabilnom režimu rada, odnosno nije došlo do pojave samoizazvanih vibracija.



Slika 10. Signal u vremenskom domenu za stabilan rad mašine alatke pri broju obrtaja 330 [o/min] i pomaku 0,196 [mm/o]

U slučaju kada nije došlo do samoizazvanih vibracija, eksperiment se prekida u trenutku kada je dostignut maksimalni merodavni obrtni moment, ili kada je došlo do granične dubine rezanja u odnosu na dužinu sečiva alata.

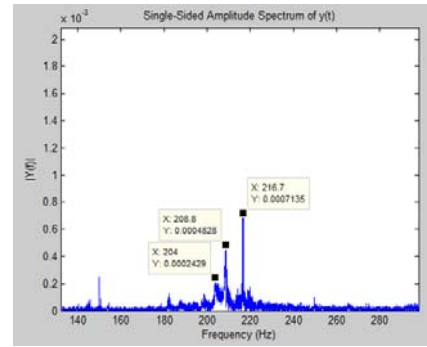
U tabeli 1 su prikazane vrednosti granične dubine rezanja u zavisnosti od broja obrtaja i pomaka za eksperimentalna ispitivanja.

Tabela 1. Vrednosti granične dubine rezanja u zavisnosti od broja obrtaja i pomaka

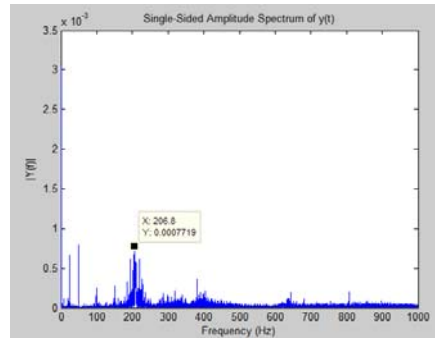
R. br. merenja	s [mm/o]	n [o/min]	$\delta$ [mm]
1.	0,098	145	5,93
2.		180	6,94
3.		225	5,86
4.		265	4,18
5.		330	5,73
6.		400	4,30
7.		500	3,37
8.		600	3,20
9.	0,142	265	4,26
10.		330	2,95
11.		400	3,67
12.		500	4,38
13.	0,196	330	stabilno
14.		500	6,42

Pomoću signala dobijenih ispitivanjem trenutka nastanka samoizazvanih vibracija, moguće je odrediti i frekvenciju samoizazvanih vibracija, odnosno tzv. frekvenciju podrhtavanja. Frekvencija samoizazvanih vibracija određena je brзом Furijeovom transformacijom (FFT) signala u vremenskom domenu.

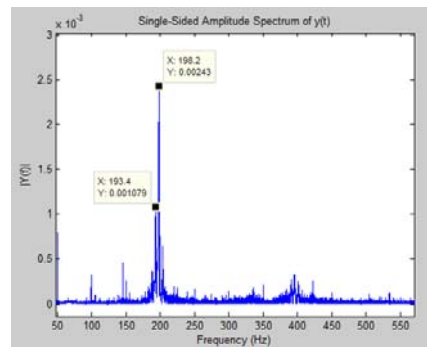
Slike 11, 12, 13 i 14 prikazuju signale u frekventnom domenu za različite vrednosti pomaka i broja obrtaja, dobijene brзом Furijeovom transformacijom signala za nestabilno područje rezanja.



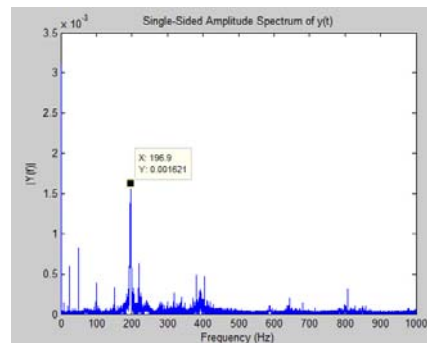
Slika 11. FFT signala za nestabilno područje rezanja za broj obrtaja 330 [o/min] i pomak 0,098 [mm/o]



Slika 12. FFT signala za nestabilno područje rezanja za broj obrtaja 500 [o/min] i pomak 0,098 [mm/o]

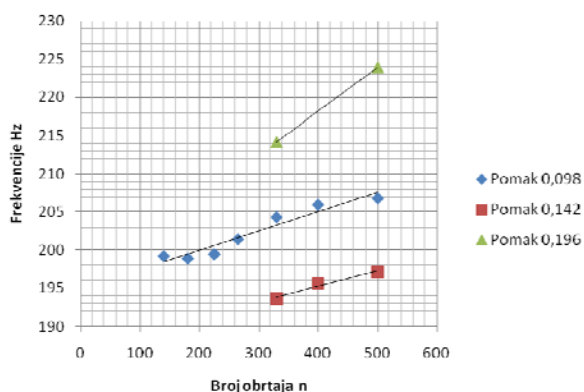


Slika 13. FFT signala za nestabilno područje rezanja za broj obrtaja 330 [o/min] i pomak 0,142 [mm/o]



Slika 14. FFT signala za nestabilno područje rezanja za broj obrtaja 500 [o/min] i pomak 0, 142 [mm/o]

Slika 15 prikazuje frekvencije samoizazvanih vibracija u zavisnosti od broja obrtaja i pomaka za navedena eksperimentalna ispitivanja.



Slika 15. Frekvencije samoizazvanih vibracija u zavisnosti od broja obrtaja i pomaka

Analizom dobijenih rezultata može se konstatovati da pri konstantnom pomaku frekvencija samoizazvanih vibracija blago raste za manje pomake (0,098 [mm/o] i 0,142 [mm/o]), dok je za veći pomak (0,196 [mm/o]) taj porast nešto intenzivniji.

#### 4. ODREĐIVANJE SOPSTVENIH FREKVENCIJA ELEMENATA UNIVERZALNOG STRUGA PA-22

U svrhu određivanja sopstvenih frekvencija elemenata univerzalnog struga PA-22, sprovedeni su eksperimenti u kojima je ispitivano ponašanje podsistema za glavno kretanje i sklopa nosača alata koji predstavljaju dva podsistema u konstrukciji struga neposredno vezana za proces rezanja. U prvom slučaju, strug je impulsno pobuđen u horizontalnom pravcu na steznoj glavi, dok je odziv sistema praćen pomoću akcelerometra postavljenog na steznu glavu takođe u horizontalnom pravcu (slika 16, položaj 1). Pri ovom eksperimentu za prikupljanje podataka korišćena je oprema prikazana na slici 5, dok je za pobudu sistema korišćen čekić za ispitivanje impulsnom pobudom PCB Piezotronics model 086D50 prikazan na slici 17. Analiza prikupljenih podataka sprovedena je primenom ARMAX modela<sup>1</sup> u programskom sistemu Matlab.



Slika 16. Položaj akcelerometara pri eksperimentalnom ispitivanju



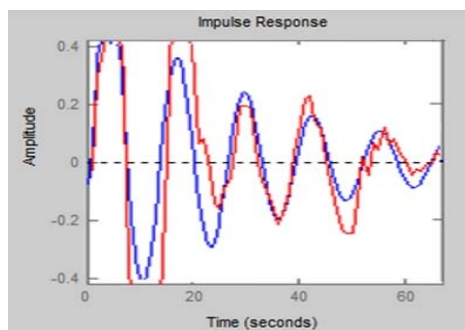
Slika 17. Čekić za ispitivanje impulsnom pobudom PCB Piezotronics model 086D50

<sup>1</sup> ARMAX model – Auto Regressive Moving Average with eXternal input model

ARMAX model predstavlja matematički aparat koji se često koristi za modelovanje diskretnih, vremenski zavisnih sistema. Jednostavnost i efikasnost ovog modela čine od njega alat pogodan za rad sa velikom količinom podataka, što je često slučaj u analizi i aproksimaciji dinamičkog ponašanja raznih struktura, pa tako i mašina alatki.

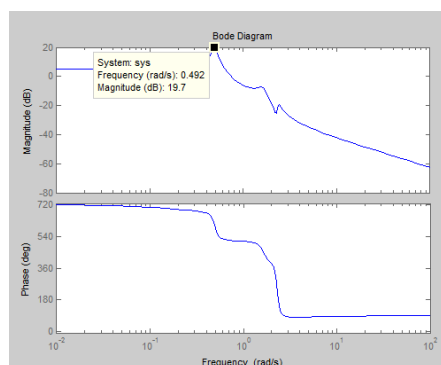
Pomoću ARMAX modela, za definisani ulazni i izlazni vektor (pobuda i odziv sistema), moguće je odrediti dinamičko ponašanje sistema u vidu njegove prenosne funkcije. Pri modelovanju dinamičkog ponašanja struga, kao ulazni vektor u ARMAX model korišćen je signal pobudnog čekića, dok je kao izlazni vektor korišćen signal dobijen pomoću akcelerometra.

Ovako dobijena prenosna funkcija podsistema za glavno kretanje se u velikoj meri poklapa sa izmerenim signalom. Na slici 18 plavom bojom je prikazan odziv matematičkog modela na impulsnu pobudu, dok je crvenom bojom prikazan izmereni odziv sistema na impulsnu pobudu ostvarenu čekićem, meren akcelerometrom.



Slika 18. Odziv sistema na impulsnu pobudu meren akcelerometrom (crveno) i dobijen primenom ARMAX modela (plavo)

Primenom ovako dobijene prenosne funkcije, formiran je Bodeov dijagram, prikazan na slici 19, na kome se jasno uočava prva sopstvena frekvencija oscilovanja podsistema za glavno kretanje, koja iznosi 391,72 [Hz], odnosno 0,492 [rad/s].

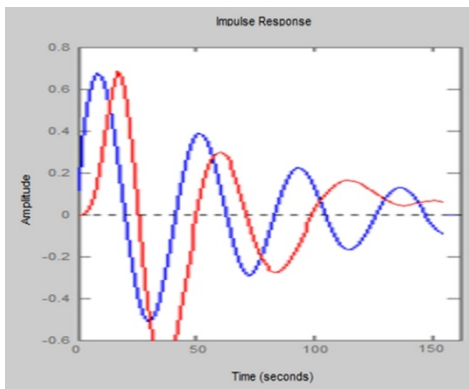


Slika 19. Bodeov dijagram formiran na osnovu dobijene prenosne funkcije

U drugom slučaju, odnosno pri ispitivanju sklopa nosača alata, strug je pobuđen u horizontalnom pravcu na nosaču alata, dok je odziv sistema praćen pomoću akcelerometra postavljenog na alat takođe u horizontalnom pravcu (slika 16, položaj 2).

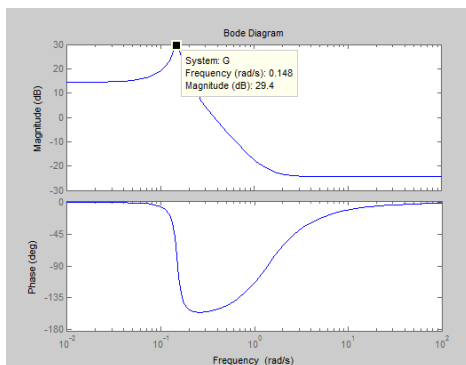
Ovako prikupljeni podaci su analizirani primenom ARMAX modela, i dobijena je prenosna funkcija sklopa nosača alata koja se takođe zadovoljavajuće poklapa sa izmerenim signalom. Na slici 20 plavom bojom je prikazan

odziv matematičkog modela na impulsnu pobudu, dok je crvenom bojom prikazan izmereni odziv sistema na impulsnu pobudu ostvarenu čekićem.



Slika 20. Odziv sistema na impulsnu pobudu meren akcelerometrom (crveno) i dobijen primenom ARMAX modela (plavo)

I u ovom slučaju je, na osnovu dobijene prenosne funkcije, formiran Bodeov dijagram, prikazan na slici 21, na kome se jasno uočava prva sopstvena frekvencija oscilovanja sklopa nosača alata, koja iznosi 235,6 [Hz], odnosno 0,148 [rad/s].



Slika 21. Bodeov dijagram formiran na osnovu dobijene prenosne funkcije

Na osnovu prethodnog, moguće je zaključiti da od dva analizirana podsistema struga PA-22 nižu sastvenu frekvenciju oscilovanja ima sklop nosača alata. Takođe, može se zaključiti i da su frekvencije samoizazvanih vibracija, prethodno određene brzom Furijeovom transformacijom, bliske sopstvenoj frekvenciji elastičnijeg od dva posmatrana podsistema struga, odnosno sopstvenoj frekvenciji nosača alata.

## 5. DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI UNIVERZALNOG STRUGA PA-22

Imajući u vidu činjenicu da se u radioničkim uslovima pojavljuju razne kombinacije režima rezanja, u cilju izbegavanja onih režima koji dovode do samoizazvanih vibracija najjednostavnije je koristiti kartu stabilnosti mašine alatke.

Karta stabilnosti definiše stabilno i nestabilno područje rada mašine alatke u zavisnosti od dubine rezanja, broja obrtaja glavnog vretena i pomaka, a sastoji se od niza

ispresanih talasastih krivih koje predstavljaju granicu stabilnosti mašine alatke.

Karta stabilnosti mašine alatke se može definisati na dva načina, analitičkim i/ili eksperimentalnim metodom. Analitički metod se zasniva na teorijskim osnovama koje su sredinom prošlog veka postavili Tobias [8] i Tlustý [7]. Za definisanje karte stabilnosti ovim metodom potrebno je odrediti prenosnu funkciju elementa sistema sa najmanjom krutošću, tačnije realni deo njegove prenosne funkcije, preko koga je moguće povezati širinu rezanja, direktno zavisnu od dubine rezanja, i broj obrtaja glavnog vretena, odnosno:

$$b = \frac{-1}{2k_s G_r} \quad (1)$$

Gdje je:

$b$ -širina struganja,

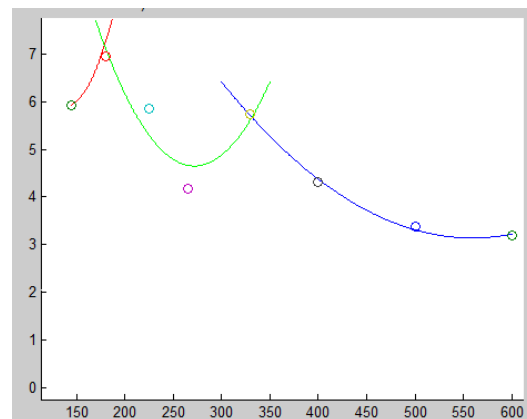
$k_s$ -jedinična sila rezanja,

$G_r$ -realni deo prenosne funkcije.

Što se tiče metoda definisanja karte stabilnosti na bazi eksperimentalnih ispitivanja, u tu svrhu je potrebno sprovesti niz eksperimenata kako bi se dobila zavisnost između granične dubine rezanja i broja obrtaja glavnog vretena.

U okviru eksperimentalnih ispitivanja izvršeno je određivanje graničnih dubina rezanja za određene brojeve obrtaja glavnog vretena struga PA-22, na osnovu kojih je moguće definisati kartu stabilnosti.

Polazeći od dobijenih vrednosti granične dubine rezanja, primenom odgovarajućih funkcija programskog sistema Matlab, nacrtana je karta stabilnosti za pomak 0,098 [mm/o] i posmatrani opseg brojeva obrtaja (slika 22).



Slika 14. Karta stabilnosti struga za pomak 0,098mm/o i analizirani opseg brojeva obrtaja

## 6. ZAKLJUČAK

Relativno oscilovanje između alata i obradka, koje se može javiti tokom procesa obrade rezanjem, može dovesti do gubitka stabilnosti procesa i nastanka samoizazvanih vibracija, odnosno pojave poznate pod nazivom "podrhtavanje".

U poredjenju sa stabilnim procesom rezanja, trenutak pojave samoizazvanih vibracija karakteriše nagli skok

amplitude oscilovanja reznog alata, smanjenje kvaliteta obrađene površine, pojava buke, itd.

U radu je razmatrana dinamika procesa rezanja tokom obrade na strugu, i to praćenjem oscilovanja reznog alata pri obradi primenom davača ubrzanja – akcelerometara. Na ovaj način detektovane su samoizazvane vibracije procesa rezanja u zavisnosti od broja obrtaja glavnog vretena i pomaka alata.

Obradom prikupljenih signala u vremenskom domenu i primenom metode "tangenti", određene su kritične dubine rezanja pri kojima proces obrade postaje nestabilan.

Nakon toga, signal prikupljen pri ispitivanju samoizazvanih vibracija je, primenom brze Furijeove transformacije, iz vremenskog preveden u frekventni domen, čime su detektovane frekvencije samoizazvanih vibracija u zavisnosti od broja obrtaja i pomaka.

Primenom ARMAX modela dobijene su prenosne funkcije podsistema za glavno kretanje i sklopa nosača alata, pomoću kojih su određene sopstvene frekvencije ova dva podsistema, čime je identifikovan element mašine alatke sa najmanjom krutošću, odnosno sklop nosača alata. Poređenjem sopstvenih frekvencija posmatranih podsistema mašine alatke i frekvencija samoizazvanih vibracija zaključeno je da frekvencije samoizazvanih vibracija za konstantan pomak blago rastu i da su bliske sopstvenoj frekvenciji nosača alata.

Na kraju, eksperimentalno dobijene granične dubine rezanja iskorišćene su da bi se formirala karta stabilnosti univerzalnog struga u zavisnosti od posmatranog opsega brojeva obrtaja i pomaka, na kojoj su jasno uočljiva područja stabilnog i nestabilnog rada mašine alatke.

Takođe, treba napomenuti da prenosne funkcije, dobijene ispitivanjem sopstvenih frekvencija elemenata konstrukcije univerzalnog struga, mogu biti iskorišćene za formiranje matematičkog modela za definisanje karte stabilnosti, što predstavlja jedan od pravaca budućih istraživanja.

## 7. LITERATURA

- [1] Bisu, C.F., Darnis, P., Gerard, A, Knevez, J.Y.: Displacements analysis of self-excited vibrations in turning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology September 2009, Volume 44, Issue 1-2, pp 1-16.
- [2] Kayhan, M., Budak, E.: An experimental investigation of chatter effects on tool life, Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol.:214 2009. ISSN: 09544054.
- [3] Koenigsberger, F., Tlusty, J.: Machine Tool Structures, Volume 1, Pergamon Press, 1970.
- [4] Кудинов, В.А.: Динамика станков, Машиностроение, Москва, 1967.
- [5] Quintana, G., Ciurana, J.: Chatter in machining processes: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 51, 363–376, 2011, ISSN: 0890-6955.
- [6] Suzuki, N., Kurata, Y., Kato, T., Hino, R., Shamoto, E.: Identification of transfer function by inverse analysis of self-excited chatter vibration in milling operations, Precision Engineering 36 (2012) 568– 575.
- [7] Tlusty, J., Polacek, M.: The stability of machine tools against self excited vibrations in machining, in: Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference, Pittsburgh, PA, ASME, New York, 1963, pp. 465–474.
- [8] Tobias, S.A., Fishwick, W.: The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions, Transactions of ASME 80 (1958) 1079–1088.
- [9] Tobias, S.A.: Machine Tools Vibrations, URMO, Spain, 1961.
- [10] Yue, J.: Creating Stability Lobe Diagram, Proceedings of the 2006 IJME – INTERTECH Conference, Kean University, New Jersey, October 19-21, 2006.

*Napomena: U radu je prikazan deo rezultata istraživanja na projektu "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici" TR 35025, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.*

