

RADNI NASLOV: DIJAGNOSTIKA KOD STROJNE OBRADNE METALA TOKARENJEM

Napomena: Prezentirani rad je isječak iz magistarskog rada mr. sc. Joška Šode, obranjenog na FESB-u, 23. studenoga. 2005, u Splitu [Šoda, 1] (kontakt: jsoda@fesb.hr). Magistarska radnja nastala je kao dio istraživanja iz područja: tehničke dijagnostike i digitalne obrade signala.

Preostali suradnici na istraživanju su:

dr. sc. Barle, Jani, izv. prof.

dr. sc. Mateljan, Ivo, izv. prof.

dr. sc. Beroš, Slobodan Marko, red. prof.

Cilj svake strojne obrade je u što kraćem vremenu skinuti što veći volumen materijala izratka a da se pri tome dimenzijske i površinske vrijednosti zadrže u zadanim vrijednostima. Za vrijeme strojne obrade pojavljuju se vibracije koje ostavljaju tragove na obrađenoj površini. Proces strojne obrade je vrlo složen jer na njega utječu brojni parametri te ne postoji direktna metoda pomoću koje bi se moglo točno predvidjeti njegovo ponašanje.

Površinska hrapavost je najčešće korišten indeks kvalitete obrade u procesima strojne obrade. Na kraju svake zahtjevnije strojne obrade provodi se mjerenje hrapavosti površine i provjerava da li je postignuta kvaliteta sukladna početnim zahtjevima. Pri tome, nije moguće popravljati dobivenu površinu dodatnom obradom jer bi se tako promijenile dimenzije izratka što je također jedan od tehničkih zahtjeva. Takav se dio jedino može prenamijeniti, a proizvođač poučen iskustvom i novim parametrima započeti obradu iz početka.

Svi postupci dijagnostike proizvodnih i eksploatacijskih procesa temelje se na prikupljanju i analizi signala. Signali su fizikalne i kemijske veličine koje se pojavljuju pri funkcioniranju tehničkog sustava. Signali se često, analogno medicinskoj dijagnostici, nazivaju simptomi. Da bi neki signal bio korišten kao simptom u analizama tehničke dijagnostike, nužno mora zadovoljiti uvjete kao što su jednoznačnost, osjetljivost i stabilnost. U postupku tehničke dijagnostike potrebno je: definirati sve očekivane pojave oštećenja i kvara koje je potrebno razlikovati, izabrati skup fizikalnih veličina koji će sadržavati informacije o stanju opreme, utvrditi vezu između analizirane pojave u procesu i izabranog signala. Valjana dijagnostika značajno podiže pouzdanost rada tehničkog sustava, smanjuje proizvodne i eksploatacijske troškove i podiže učinkovitost i sigurnost po ljude i okoliš. Uloga tehničke dijagnostike za vrijeme procesa proizvodnje je višestruka. Dijagnostika može pomoći u razumijevanju procesa rezanja te poboljšati i ubrzati traženje optimalnih parametara rezanja.

Dijagnostički signali koji odstupaju od prosječnih vrijednosti ukazuju na mjesta na površini gdje će kvaliteta površine biti različita, odnosno na mjesto gdje bi se trebala mjeriti površinska hrapavost. Praćenjem i analizom signala mogu se dobiti procijene istrošenja alata prije no što se to odrazi na kvalitetu površine. Pomoću dijagnostičkih signala moguće je automatizirati obradu tako da, promjenom broja okretaja ili posmaka alata postigne željena kvaliteta površine. Površinsku je hrapavost za vrijeme obrade nemoguće zadovoljavajuće točno izmjeriti direktnim metodama ultrazvuka i CCD kamere, pa su mogući dijagnostički signali sile rezanja, buka ili vibracije.

Najbolji signali za procjenu površinske hrapavosti su vibracije alata i izratka. Priroda vibracija nastalih u postupcima strojne obrade materijala je skup slobodnih, prisilnih, periodičkih i slučajnih tipova vibracija. Direktno mjerenje vibracija se otežano postiže jer određujući karakteristično svojstvo, vibracijski mod je frekvencijski ovisan. Vibracije se mjere indirektno preko mjerenja dinamičkih sila po jedinici vremena odnosno akceleracija.

Jedan od najutjecajnijih oblika vibracije na površinsku hrapavost je pojava podrhtavanja (engl. "chatter") koje nastaje kada za vrijeme rezanja alat udara u izradak. Javlja se na frekvencijama većim od 1kHz. Podrhtavanje se može detektirati u spektru vibracije jer alat tada intenzivno vibrira na svojim prirodnim frekvencijama. Pojava se može dogoditi za vrijeme cijeloga procesa ako su: parametri rezanja loše odabrani, promjene presjeka

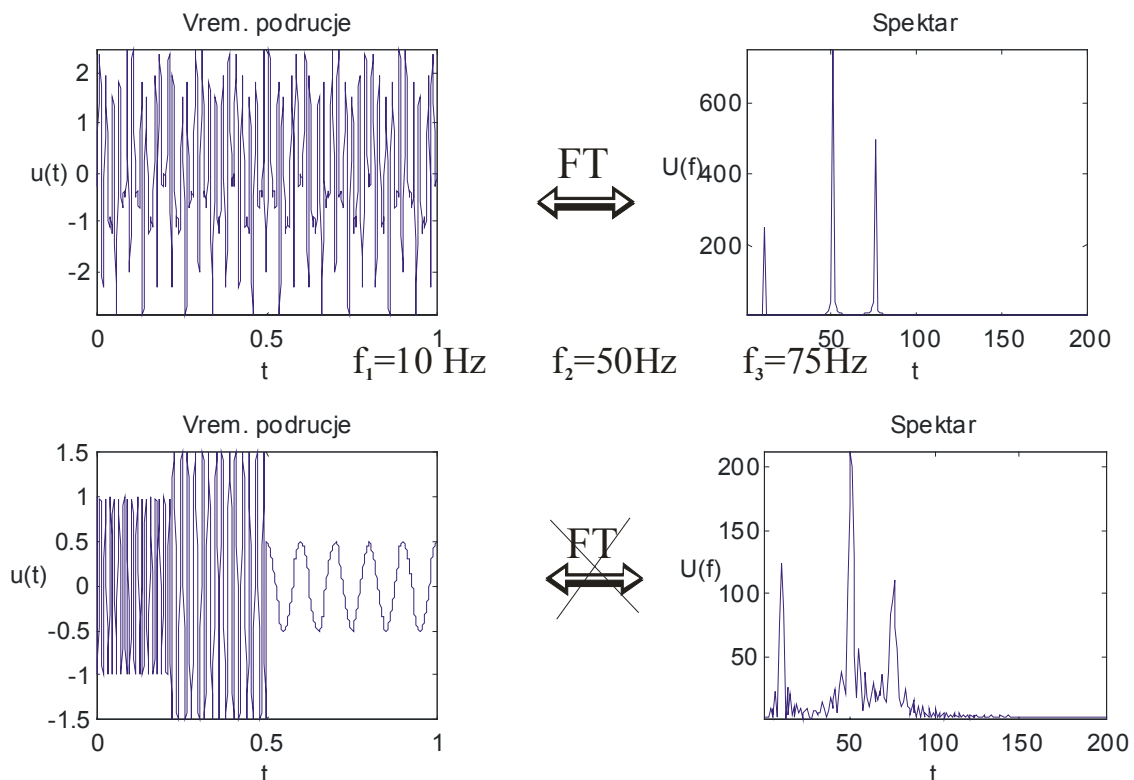
strugotine zbog prethodnog stanja površine ili zbog geometrije izratka promijenjena krutost. Čak se i u slučaju da se ponavlja početno zadovoljavajuća obrada (serijska proizvodnja) pojava podrhtavanja može postupno razviti s istrošenjem alata.

IZBOR METODA ANALIZE

Spektralnom Fourier-ovom analizom (eng. Fourier Transform) mogu se dobiti prosječni udjeli ali se iz njih teško može detektirati podrhtavanje osjetnika. Razlog tomu jest u izrazu (1) i činjenici da Fourierova transformacija nije pogodna za analizu tranzijentnih signala (slika 1.). Signal vibracija koji se dobije mjerenjem akceleracija je tranzijentnog karaktera. Pregledom instrumentacije i postupka provedenog u radovima [Dimla, 2] i [Wong, 3] proizlazi da se spektar korisnog signala dobivenog u postupku strojne obrade metala nalazi u rasponu do 10kHz.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

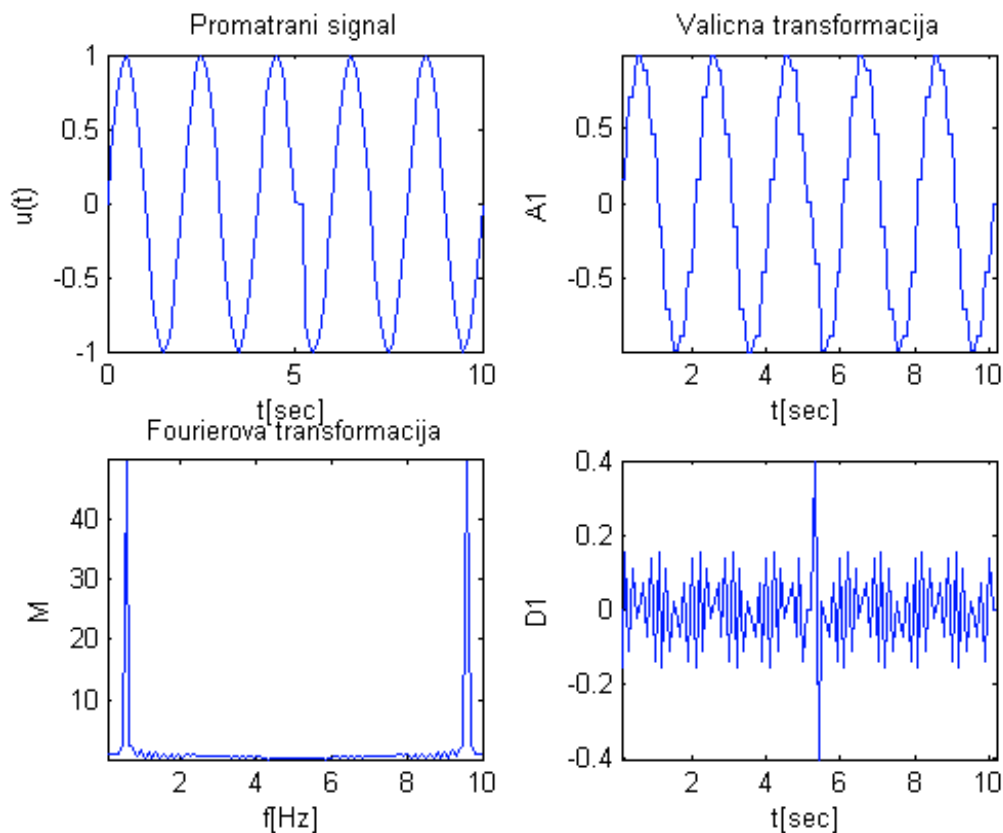
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} d\omega \quad \dots(1)$$



Slika 1. Nedostatak Fourier-ove transformacije – stacionarni i nestacionarni signal

Slika 1.1. predstavlja dva signala koji imaju identičan frekvencijski sadržaj, i to od $f_1=10$ Hz, $f_2=50$ Hz te $f_3=75$ Hz, s razlikom da je prvi signal stacionaran, dok je drugi signal nestacionaran. Iako se radi o dva potpuno različita signala, Fourier-ova transformacija je dala "identičnu" frekvencijsku sliku.

Također, ukoliko je promatrani signal bogat tranzijentnim pojavama kao što su, pukotine, ispupčenja, nagle promjene, trend, Fourier-ova transformacija loše "detektira" te promjene (slika 2.).



Slika 2. Nedostatak Fourier-ove transformacije – diskontinuitet kod $t=5\text{sec}$ u signalu $u(t)$

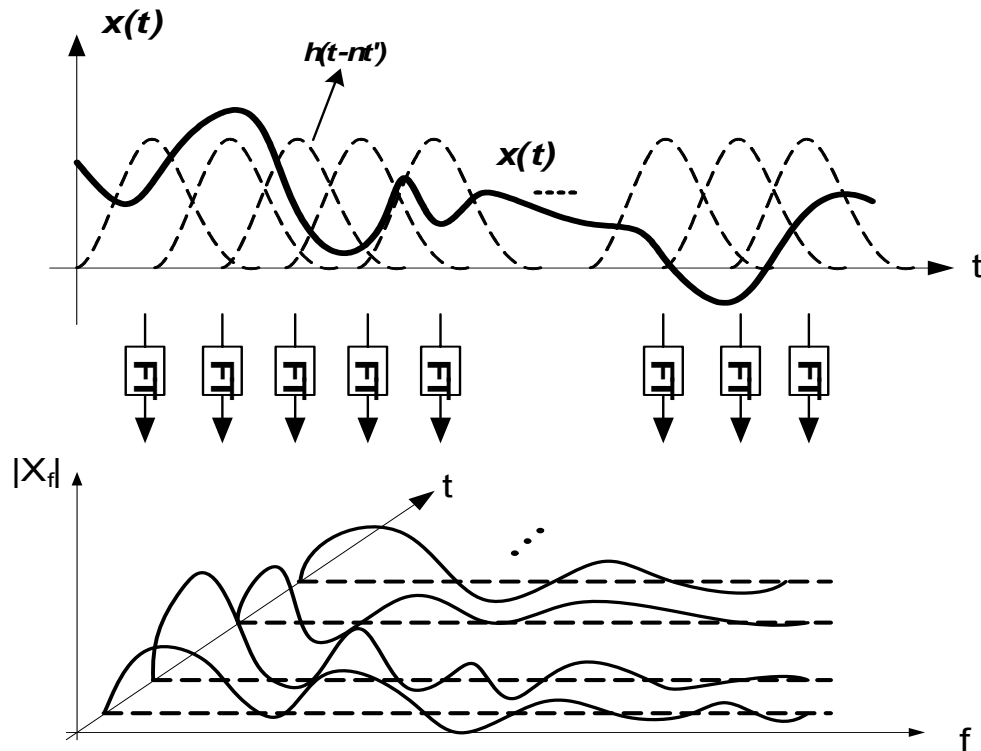
Kako je iz priloženoga razvidno da Fourier-ova transformacija ne daje dobre rezultate kod analize tranzijentnih signala, naredni korak kod tehnika analize bilo bi uvođenje *prozorske Fourier-ove transformacije* (eng. Short-Time Fourier Transform, STFT).

$$X(m\omega, nt') = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot h_{m,n}(t - nt') \cdot e^{-j \cdot m \cdot \omega \cdot t} \cdot dt \quad \dots(2)$$

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X_{m,t} \cdot h_{m,t}(t)$$

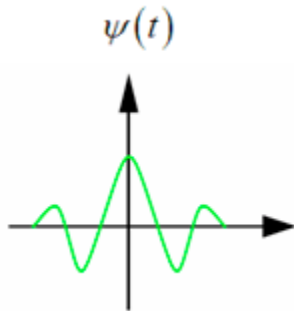
Glavna ideja kod STFT transformacije je prikazana na slici 3, a sastoji se u uvođenju prozorske funkcije $h_{m,n}$ (izraz 3.) gdje se translacijom prozora postiže i vremenska lokalizacija, uz već navedenu frekvencijsku.

$$h_{m,n}(t) = h(t - mT) \cdot e^{j \cdot n \cdot \omega \cdot t} \quad \dots(3)$$



Slika 3. Princip rada STFT algoritma

Međutim, STFT transformacija ima nedostataka koji će biti naknadno objašnjeni (slika 6.). Zbog tih nedostataka razvijena je valićna transformacija (eng. Wavelet Transform, WT). Za razliku od STFT transformacije uvodi se potpuno novi koncept – valića $\psi(t)$ (slika 4.), vremenski ograničene funkcije koja ima svojstvo (4).

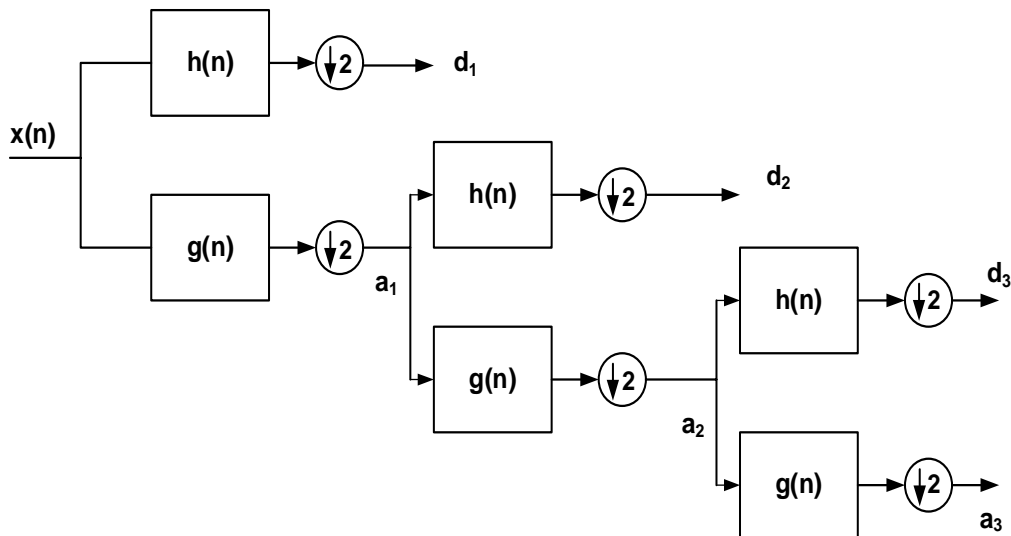


Slika 4. Valić, $\psi(t)$

$$\int \psi(t) \cdot dt = 0 \quad \dots(4)$$

Razvijene su dvije tehnike valićnih transformacija: *kontinuirana* (eng. *Continuous Wavelet Transform, CWT*) i *diskretna valićna transformacija* (eng. *Discrete Wavelet Transform*). Diskretna valićna transformacija posebno je razvijena zbog činjenice da su algoritmi diskretne valićne transformacije primjenljivi kod digitalnih procesora za obradu signala (eng. *digital signal processing*), te posebno kod aplikacija gdje je potrebno u realnom vremenu (eng. *real-time processing*) obraditi te donijeti zaključke.

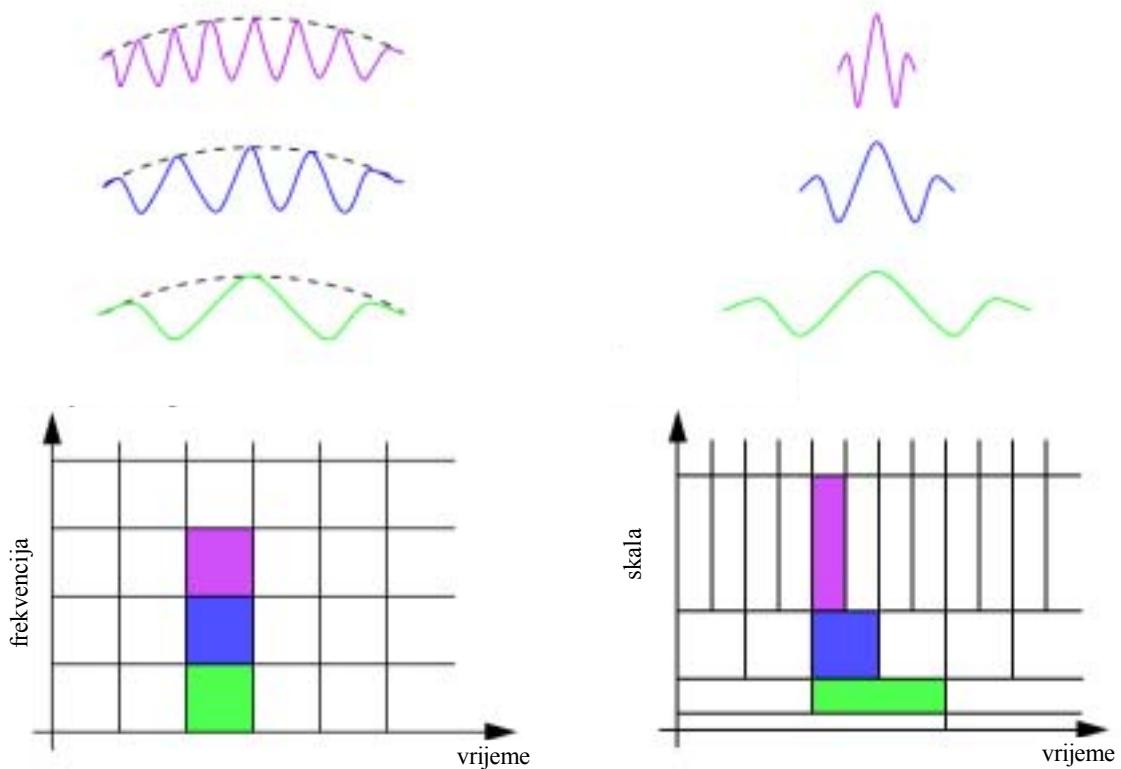
Algoritam diskretne valične, DWT transformacije prikazan je na slici 5.



Slika 5. Algoritam diskretne valične transformacije

Polazni signal, $x(n)$, se dijeli na dva dijela: signal aproksimacija a_1 , koji u sebi sadrži frekvencijske komponente od $0-f_s/2$, dakle niskofrekvencijske komponente, te signala detalja d_1 , koji u sebi sadrži spektar signala od $f_s/2$ do f_s , dakle gornju polovicu spektra. Iteriranje se može nastaviti dok se ne dođe do željene razine.

Prednosti valične transformacije u odnosu na prozorsku Fourier-ovu transformaciju prikazani su slikom 6.

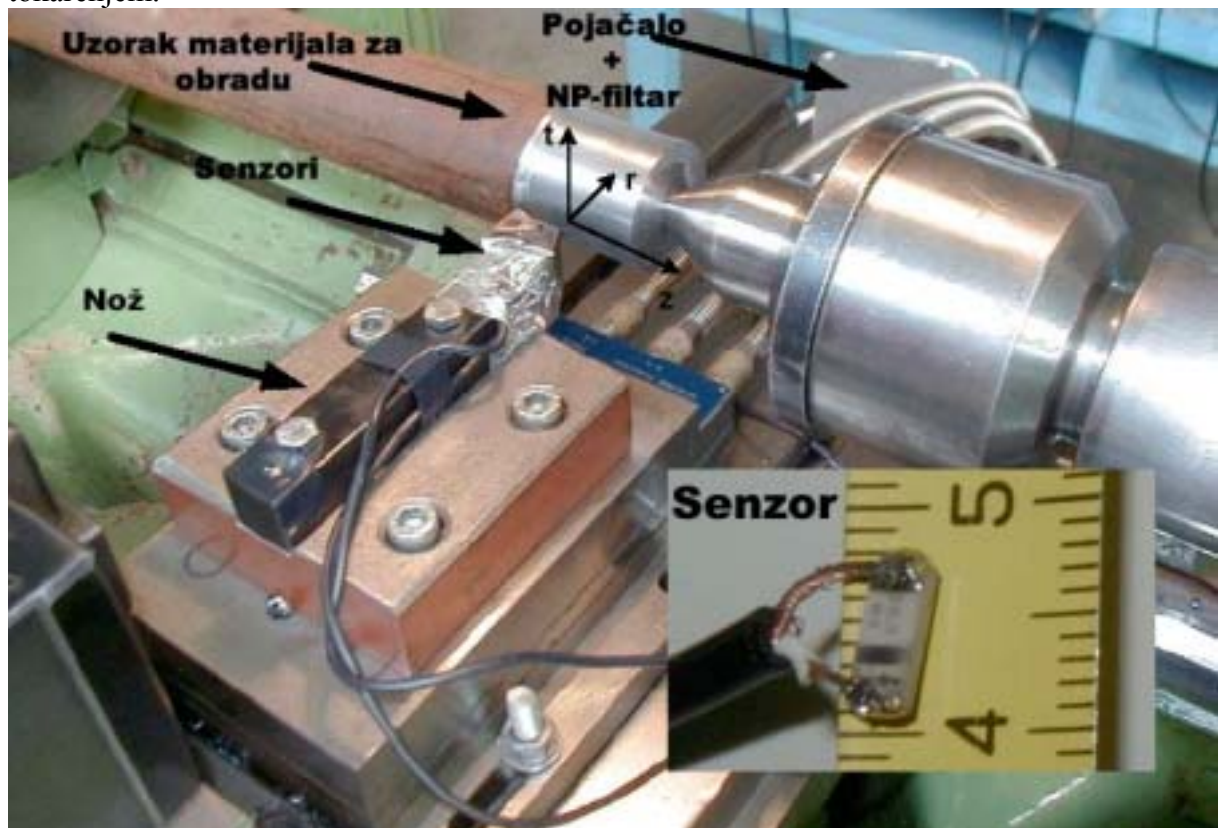


Slika 6. Vremensko – frekvencijski dijagram STFT transformacije i valične transformacije, WT

Kod STFT transformacije odabirom prozorske funkcije $h(t)$ odabire se širina prozorske funkcije kako u vremenskom tako i u frekvencijskom području. Stoga, ukoliko promatrani signal u svojoj strukturi ima dosta i brzih i sporih promjena, širina prozora će biti neodgovarajuća. Kod valične transformacije valić se translacija (dobiva se pomak u vremenskom području) i sklalira (širi i/ili sužava, gdje se dobiva promjena u frekvencijskom području), te na taj način dolazi do promjene prozorske funkcije. Postiže se da na niskim frekvencijama (visoke skale) postiče se dobra razlučivost u frekvencijskom području, a loša vremenska razlučivost, dok u području visokih frekvencija (skala malih vrijednosti) postiče se dobra vremenska razlučivost, a loša frekvencijska.

EKSPERIMENT

Slikom 7 predstavljen je eksperiment mjerenja vibracijskog signala kod strojne obrade metala tokarenjem.



Slika 7. Eksperimentalni sustav, mjerenja vibracijskog signala kod strojne obrade metala tokarenjem

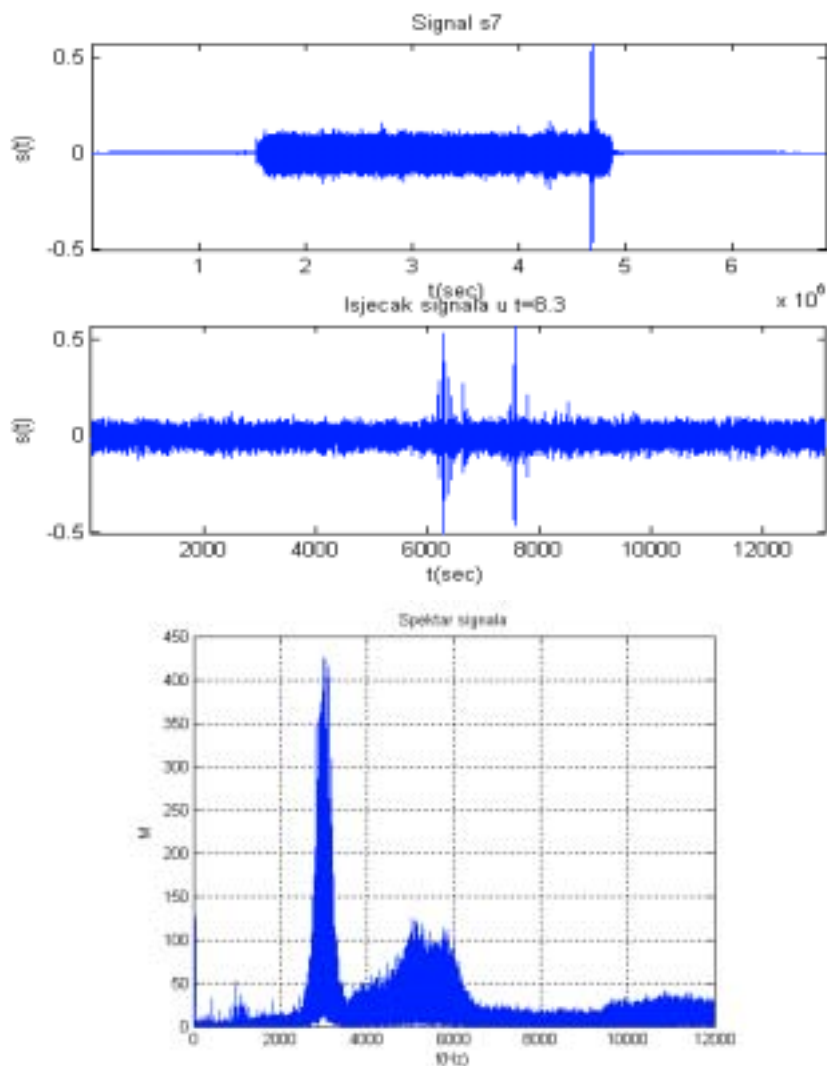
Na hvatište alata se postavljaju se dva laka piezoelektrička osjetila (slika 8.), od kojih jedno mjeri radijalne vibracije, nastale tijekom obrade, u smjeru osi r , a drugo tangencijalne vibracije u smjeru osi t (slika 3.5). Mjereni podaci o vibracijama između alata i izratka se tijekom obrade preko 3-kanalnog pojačala prosljeđuju kartici za prikupljanje podataka. Sound Blaster Extigy zvučna kartica služi kao kartica za prikupljanje podataka (eng. data acquisition card, DAQ). PC računalo opremljeno programom Cool Edit 1.1 prikuplja i sprema podatke u wav (skraćena od eng. wave) datoteku. Podaci se obrađuju u programskom paketu MATLAB.

REZULTATI MJERENJA

Tipični izmjereni vibracijski signali su izrazito nestacionarnog karaktera. Signal se preuzima za trajanja čitavog procesa strojne obrade materijala tokarenjem. Biti će prikazana dva usporedbena signala. Signali će biti numerirani kao što su numerirani u literaturi [Šoda 1]. Preostale signale kao i detalje mogu se pogledati u predloženoj literaturi.

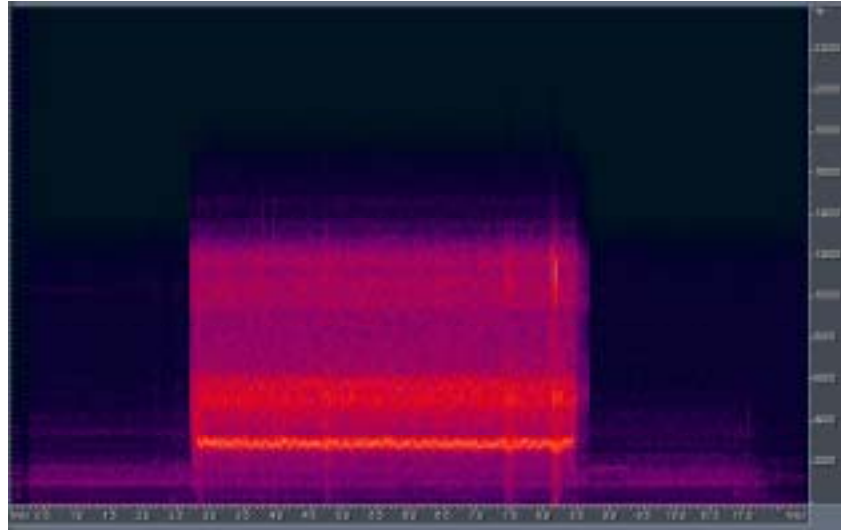
SIGNAL 4 – Gruba obrada

Prilikom dobivanja signala vibracija u procesu grube obradbe, brzina okretaja tokarskog stroja iznosila je 900 o/min. Početni promjer materijala izratka bio je 57 mm. Promjer nakon obradbe izratka iznosio je 50.2 mm. Posmak je iznosio 0.355 mm/o. Srednja površinska hrapavost nakon obradbe iznosila je 3.102 μm .



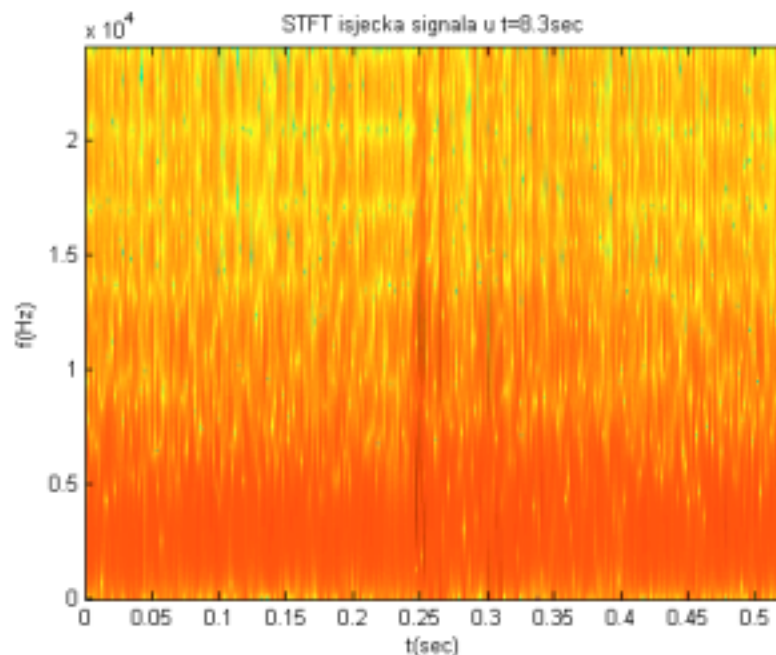
Slika 8. Signal s_7 dobiven u procesu grube obrade, isjecak signala u $s=8.3\text{sec}$, te STFT signala

Iz slike 8 uočava se da signal traje 12.5 sec. Nakon 2.7 sec dolazi do kontakata izratka i alata, te proces obrade izratka traje do 8.7 sec, kada dolazi do odvajanja izratka i alata. Iz vibracijskog signala prikazanog u vremenskom području uočavaju se dosta izražene amplitude signala. U intervalu od 8 sec do 8.4 sec uočava se postojanje više udaraca.



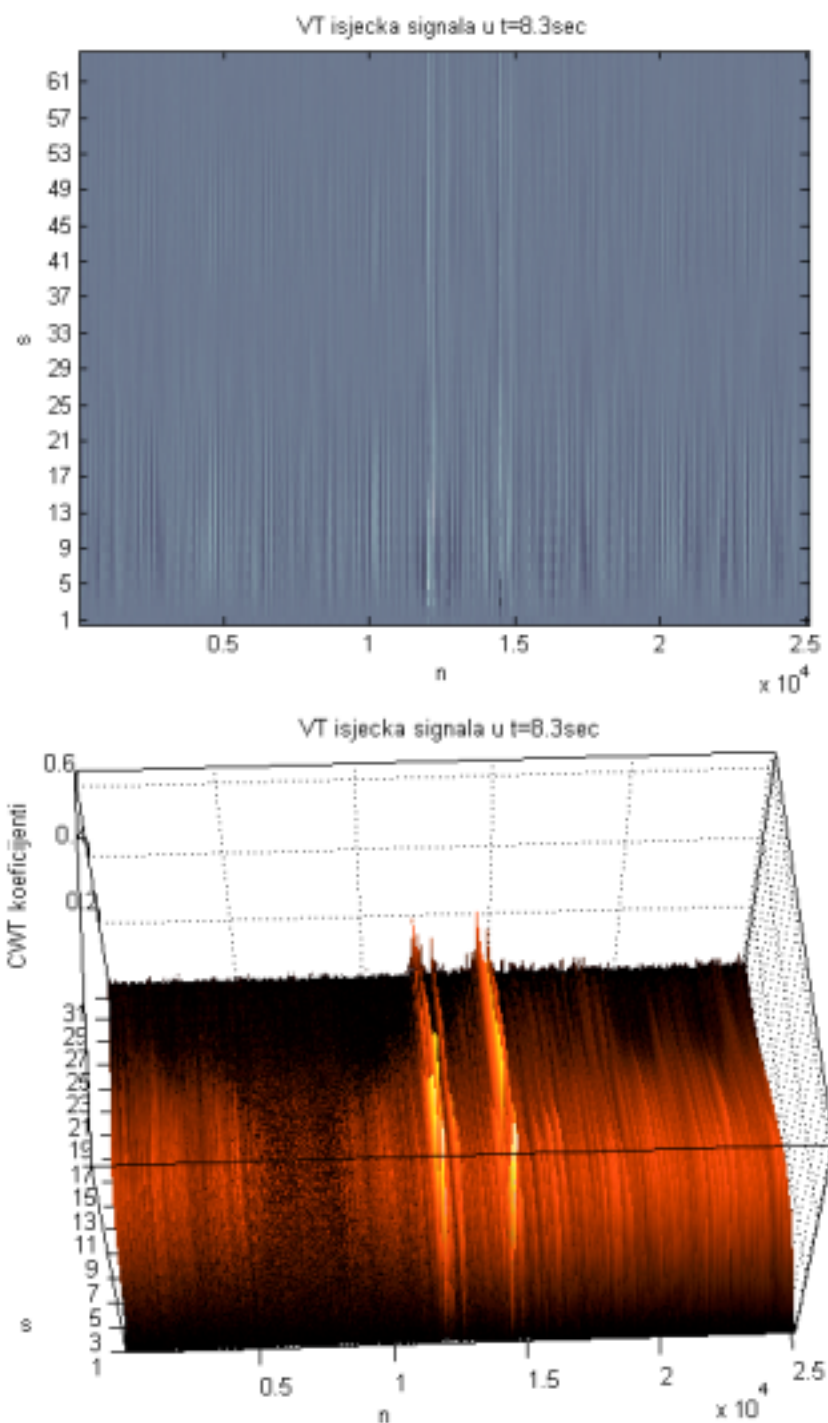
Slika 9. Spektrogram signala s_7 dobivenog u procesu grube obrade

Iz spektrograma vibracijskog signala predstavljenog slikom 9 uočava se pojačano djelovanje signala između 4 i 6 kHz u odnosu na spektre signala dobivenih iz prethodnih procesa obrada što navodi na zaključak da se radi o grubljoj strojnoj obradi. U vremenu 8.3 sec uočava se pojava cijelog frekvencijskog opsega što navodi na zaključak da je na tome mjestu došlo do udarca alata o izradak.



Slika 10. Spektrogram signala s_7 u 8.3 sec dobivenog u procesu grube obrade (pokreni uzorak)

Iz spektrograma vibracijskog signala prikazanog na slici 10 u intervalima od 0.25 sec i 0.3 sec uočava se postojanje više mjesta koja sadrže cijeli spektar što navodi na zaključak da u tim vremenima postoji više od jednog udarca alata o izradak.

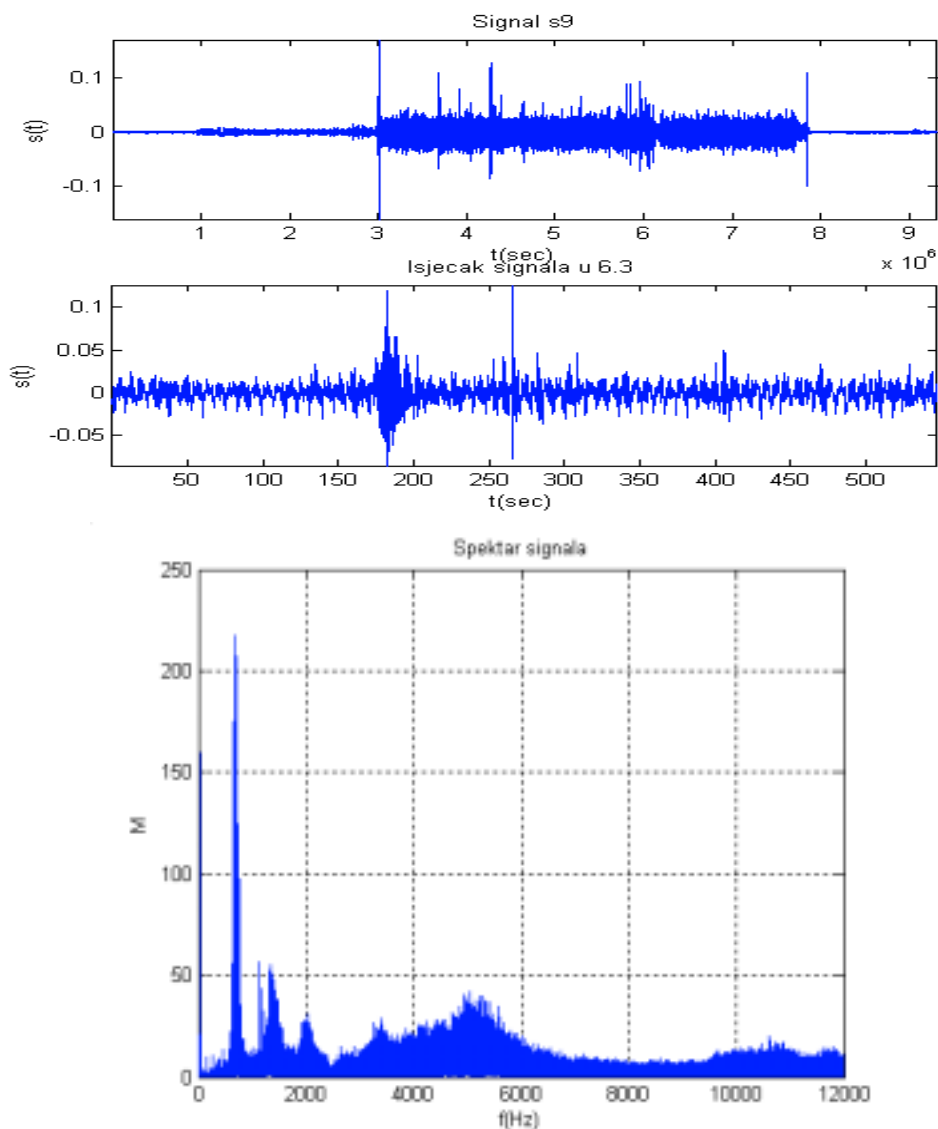


Slika 11. Valična transformacija signala s_7 u 8.3 sec dobivenog u procesu grube obrade

Uvidom u 3D valičnu transformaciju, prikazanu slikom 11 potvrđuju se iznošene sumnje o postojanju više udaraca alata o izradak, čak štoviše uočava se postojanje četiri bliska udarca alata o izradak.

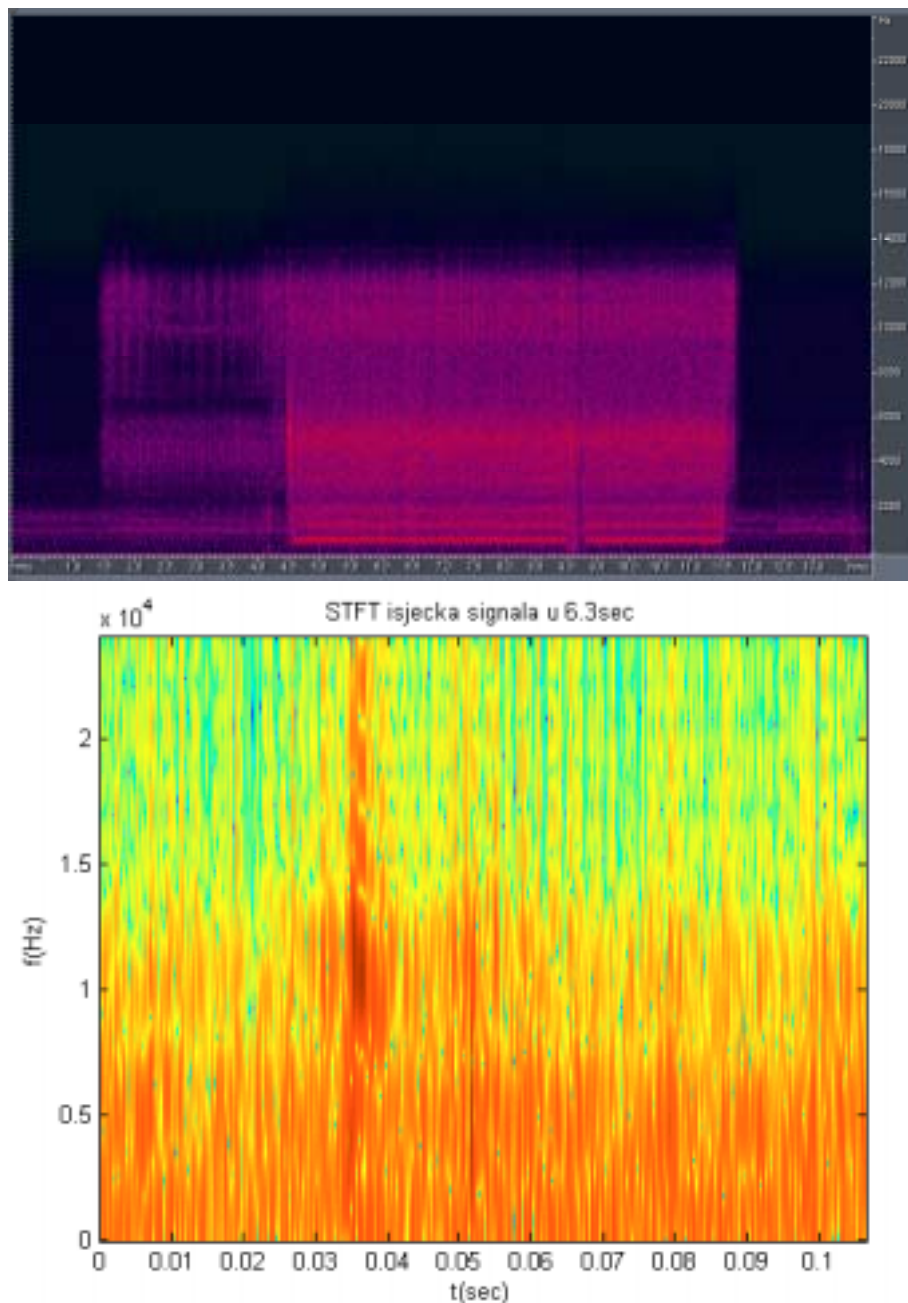
SIGNAL 5 – Izrazito gruba obrada

Prilikom dobivanja signala vibracija u procesu izrazito grube obrade, brzina okretaja tokarskog stroja iznosila je 560 o/min. Početni promjer materijala izratka bio je 43.5 mm. Promjer nakon obrade izratka iznosio je 32.0 mm. Posmak je iznosio 0.45 mm/o. Srednja površinska hrapavost nakon obrade iznosila je 7.2 μm .



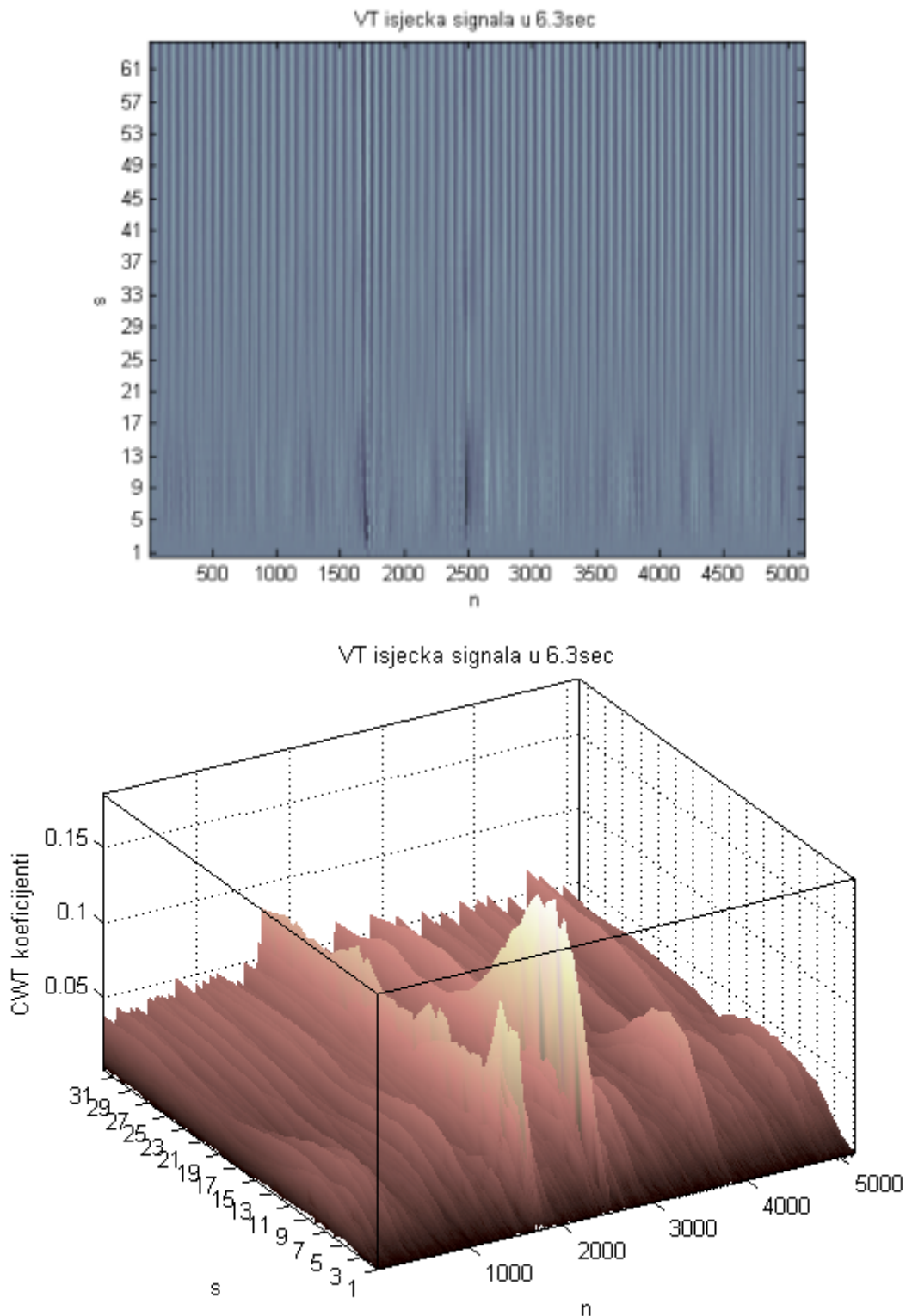
Slika 12. Signal s_9 dobiven u procesu izrazito grube obrade, isjecak signala u $t=6.3$ sec, te spektar

Iz slike 12 uočava se da signal traje 13sec. Iz grafičkog prikaza signala u vremenskom području uočavaju velika osciliranja signala po amplitudi, što navodi na zaključak da je ovaj proces obradbe karakteriziran velikom hrapavošću. Iz grafičkog prikaza spektra signala uočava se velika aktivnost u niskofrekvencijskom dijelu spektra.



Slika 13. Spektrogrami signala s_9 dobivenog u procesu izrazito grube obrade, te isječak signala u 6.3 sec (pokreni uzorak)

Iz spektrograma signala predstavljenog na slici 13 uočava se na 6.3 sec pojava cijelog frekvencijskog spektra što navodi na zaključak da je došlo do kontakta između alata i izratka.



Slika 14. *Spektrogram isječka signala s_9 dobivenog u procesu izrazito grube obrade u 6.3 sec*

Iz skalograma signala predstavljenog slikom 14 uočava se prisutnost cijelog frekvencijskog spektra u vremenima 0.35 sec i 0.5 sec, što navodi na zaključak da je u procesu obradbe došlo do pojave dva bliska udarca između alata i izratka. Dva udarca koji su prikazana na 0.03 i 0.05 sekundi, prema postavljenom broju okretaja bi se pronašla u jednoj trećini okretaja izratka.

Iz prikazanih mjerenja uočava se da je analiza signala valičnom transformacijom bolji izbor od analize metodom STFT transformacije. Zbog svojstva dobre lokalizacije na skalogramima se uočavaju dodatne strukture u signalu kao što su bliski udarci, koje nisu vidljive u drugim predstavljanim analizama.

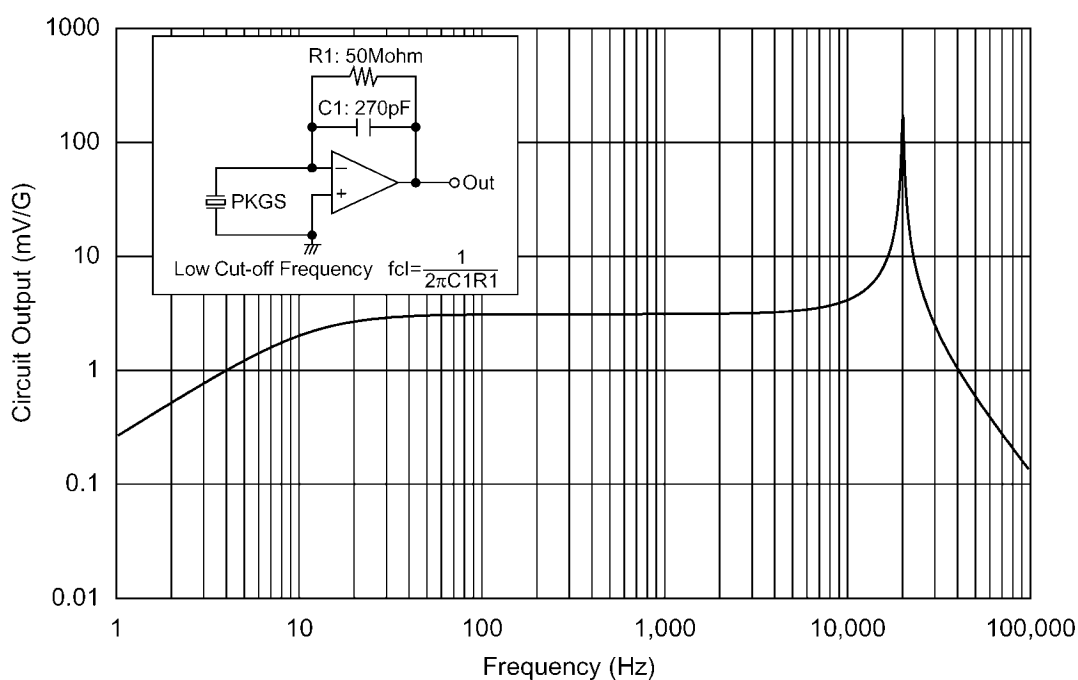
ZAKLJUČCI

Predstavljena metoda daje direktnu korelaciju između površinske hrapavosti i oblika signala.

Realiziran je jednostavni dijagnostički uređaj kod strojne obrade materijala.

Zbog izvornosti predstavljenog eksperimenta otvara se više smjerova za daljnja istraživanja korisnosti i kvalitete vremensko-frekvencijske analize.

Cilj istraživanja je realizacija dijagnostičkog uređaja koji će u realnom vremenu na osnovi praćenja vibracijskih signala, te korištenja prilagođenih tehnika vremensko-frekvencijske analize, kod strojne obrade metala, unaprijediti proizvodni sustav. Zbog karakteristika odabranih osjetila moguće je izvršiti ugradnju osjetila na alat, čime se postiže dobivanje kvalitetnijih vibracijskih signala koji omogućavaju pouzdaniju tehničku dijagnostiku.



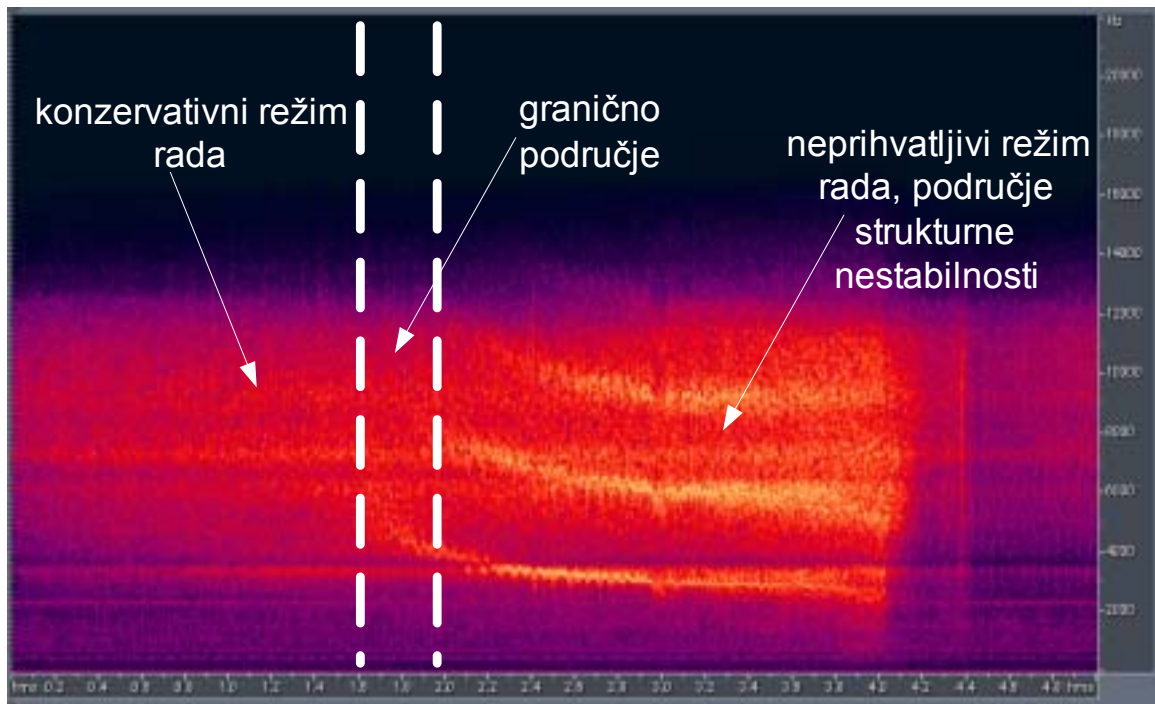
Slika 15. *Frekvencijske karakteristika senzora.*

Iz frekvencijske karakteristike predstavljene na slici 15 uočava se da vlastita, rezonantna frekvencija senzora iznosi 21 kHz. Osjetljivost senzora je 3-4 pC/g, gdje je $g=9.81 \text{ m/s}^2$. Osnovne karakteristike odabranog senzora su mala veličina, niski profil, velika osjetljivost, izvrsna otpornost, izvrsna linearnost, široki frekvencijski opseg (~12 kHz), te velika rezonantna frekvencija (~21 kHz). Kapacitivnost senzora je 770 pF, osjetljivost 0.840 pC/g, za primarnu os – 0°, a tip osjetljivosti je električni naboj.

SMJEROVI ZA DALJNA ISTRAŽIVANJA

Strukturna nestabilnost

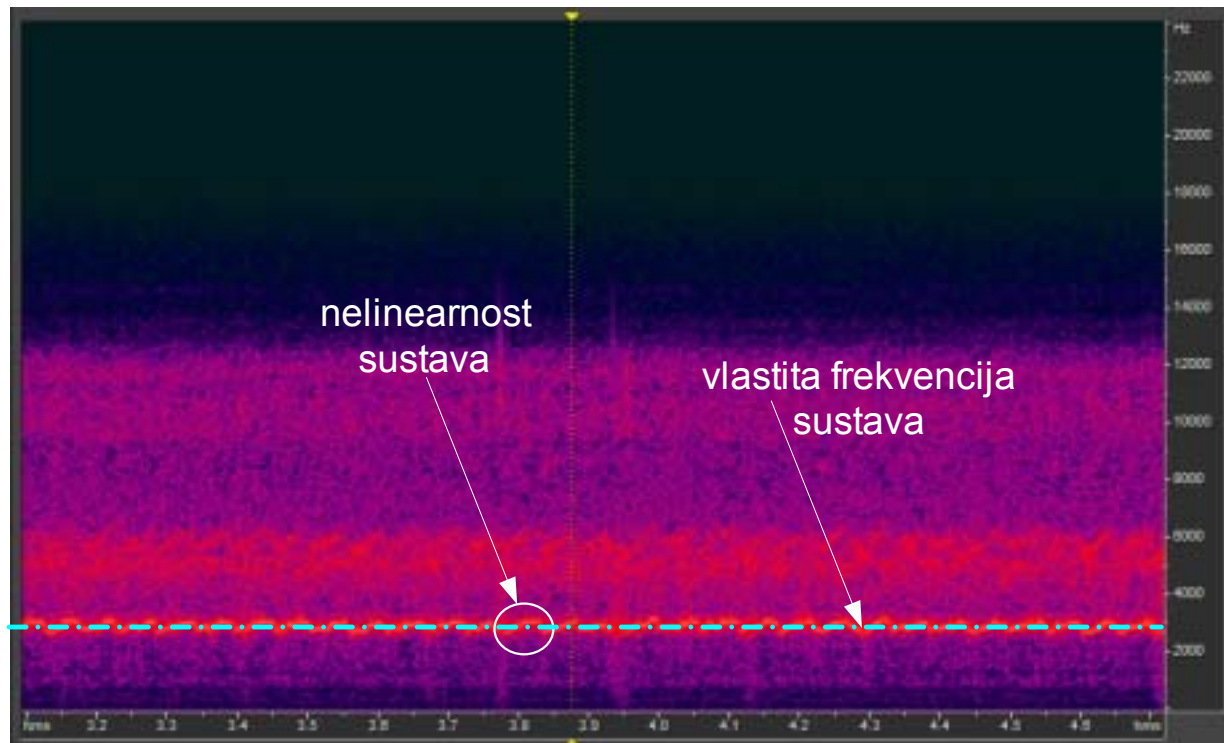
Slikom 16 prikazana je strukturna nestabilnost sustava dobivena postepenim povećanjem dubine rezanja na koničnom izradku. Cilj je čim više "produžiti" konzervativni režim rada, na način da se čim više pokuša smanjiti granično područje – područje koje odvaja konzervativni režim rada i područje strukturne nestabilnosti sustava. Smanjivanje graničnom područja, dobivaju se očite ekonomske uštede, odnosno produžen je "vijek trajanja" alata uz zadržavanje postavljenih zahtjeva za kvalitetu obrade.



Slika 16. *Strukturna nestabilnost sustava kod strojne obrade metala tokarenjem*

Nelinearnost sustava

Slika 17 prikazuje nelinearnost sustava koja nastaje uslijed "kolebanja" sustava tijekom strojne obrade, gdje se nelinearnost sustava (kružni detalj) manifestira kao učestale promjene oko vlastite frekvencije sustava koja je na slici prikazana isprekidanom linijom.



Slika 17. *Nelinearnost sustava*

LITERATURA

[Šoda, 1] J. Šoda, *Vremensko frekvencijska analiza mjernog signala*, Magistarski rad, FESB, Split, 2005,

[Dimla, 2] D. E. Dimla, Sr., *The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts*, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 155-156, 30, (2004), pp. 1708-1715.

[Wong, 3] Li, X. Q., Wong, Y. S., Nee, A. Y. C., *Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37-4, (1997), pp. 425-435.

[Rao, 4] B.C. Rao and Y.C. Shin, *A comprehensive dynamic cutting force model for chatter prediction in turning*, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 39 (1999) (10), pp. 1631–1654.

[Bernardos, 5] P. G. Bernardos and G. Vosniakos, *Predicting surface roughness in machining: a review*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Issue 8, (2003), pp. 833-844.

[Alvin, 6] K. F. Alvin, A. N. Robertson, G. W. Reich and K. C. Park, *Structural system identification: from reality to models*, Computers & Structures, Volume 81, Issue 12, May 2003, Pages 1149-1176,

[Mallat, 7] Mallat S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd Edition, ACADEMIC PRESS, 1999,

[Vetterli, 8] Vetterli M., Kovačević J., *Wavelets and Subband Coding*, PRENTICE-HALL SIGNAL PROCESSING SERIES, 1995,

[Vickerhauser, 9] Vickerhauser M. V., *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*, IEEE Press, USA 1994,

[Daubechie, 10] Daubechie I., *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PE (USA) 1992,

[Strang, 11] Strang G., Nquyen T., *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley - Cambridge Press, MA (USA), 1997,