

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI ZADATAK**

Stipe Skroče

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI ZADATAK**

Mentor:  
Prof. dr. sc. Josip Kasač

Student:  
Stipe Skroče

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **STIPE SKROČE**

Mat. br.: 0035172739

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA SIGNALA AKUSTIČNE EMISIJE I VIBRACIJA U POSTUPCIMA BUŠENJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ACOUSTIC EMISSION AND VIBRATIONS SIGNAL ANALYSIS IN DRILLING PROCESSES**

Opis zadatka:

Akustična emisija koristi se u raznim primjenama poput detekcije kvarova rotacijskih strojeva, nadzoru istrošenosti reznog alata, nerazornim ispitivanjima, estimaciji i karakterizaciji materijala, itd. Glavni zadatak ovog rada je utvrđivanje značajki signala akustične emisije i vibracija tijekom procesa bušenja materijala, na temelji kojih bi se mogli klasificirati materijali različitih tvrdoća.

U radu je potrebno:

- Na eksperimentalnom postavu potrebno je snimiti signale akustične emisije i vibracija tijekom bušenja dva materijala različitih tvrdoća. Signali trebaju biti snimljeni za barem dvije različite kutne brzine bušilice.
- Provesti spektralnu analizu signala s ciljem određivanja dominantnih frekvencijskih raspona signala koji karakteriziraju materijale različitih tvrdoća. Potrebno je također odrediti i frekvencijski raspon šuma mjerenja.
- Na temelju spektralne analize odrediti kriterije na temelju kojih je moguće provesti klasifikaciju materijala na temelju mjerenja akustične emisije i vibracija signala tijekom bušenja materijala različitih tvrdoća.
- Provesti sintezu odgovarajućih pojasno propusnih filtera akustične emisije i vibracija koji će omogućiti klasifikaciju materijala u realnom vremenu.
- Usporediti klasifikaciju na temelju signala akustične emisije s klasifikacijom na temelju signala vibracija.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

*Kasac Josip*  
Prof. dr. sc. Josip Kasac

Predsjednik Povjerenstva:

*Cajner*  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, služeći se isključivo znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, navedenim izvorima literature i uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Josipa Kasaća.

U Zagrebu, studeni 2015.

---

Stipe Skroče

Zahvaljujem prof. dr. sc. Josipu Kasaću na ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva za ovaj rad i savjetima pri izradi istog.

Dr.sc. Tomislavu Staroveškom zahvaljujem na vođenju kroz procese bušenja kao i na korisnim savjetima o strukturiranju diplomske.

Zahvaljujem se mag. ing. Mihi Klaiću za pomoć u postavljanju i provedbi eksperimentalnog dijela.

Svojim roditeljima dugujem posebnu zahvalnost za svu potporu i ljubav tijekom studiranja.

Hvala prijateljima i djevojci na moralnoj podršci tijekom studiranja te posebice u periodu izrade diplomskog rada

# Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Ključne riječi	V
Popis oznaka	VI
Sažetak	VII
Summary	VIII
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
1.1 Uvodna riječ . . . . .	1
1.2 Proces bušenja . . . . .	1
1.3 Signal: definicija i karakteristike . . . . .	3
1.4 Vibracija: definicija i primjena . . . . .	4
1.5 Akustična emisija . . . . .	5
<b>2 Filteri</b>	<b>6</b>
2.1 Idealni filteri . . . . .	7
2.1.1 Niskopropusni filter . . . . .	7
2.1.2 Visokopropusni filter . . . . .	7
2.1.3 Pojasnopropusni filter . . . . .	8
2.1.4 Pojasna brana . . . . .	8
2.2 Ne-idealni filteri . . . . .	9
2.3 Frekvencija prekida $\omega_c$ . . . . .	11
2.4 Glavna podjela digitalnih filtera . . . . .	11
2.4.1 IIR filteri . . . . .	11
2.4.2 FIR filteri . . . . .	12
2.5 Korišteni filteri za analizu . . . . .	13
2.5.1 Anti aliasing filter za akustičnu emisiju . . . . .	13
2.5.2 Anti aliasing filter za vibracije . . . . .	15
<b>3 Eksperimentalni dio diplomskog rada</b>	<b>16</b>
3.1 Razvoj eksperimentalnog postava . . . . .	16

3.2	Plan pokusa . . . . .	17
3.3	Parametri bušenja . . . . .	18
3.3.1	Brzina vrtnje . . . . .	18
3.3.2	Brzina posmaka . . . . .	18
3.4	Opis postupka bušenja . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Mjerenje i analiza signala</b>	<b>19</b>
4.1	Mjerenja akustične emisije . . . . .	19
4.1.1	Signali nastali bušenjem aluminija . . . . .	19
4.1.2	Signali nastali bušenjem čelika . . . . .	22
4.1.3	Usporedba obrađenih signala čelika i aluminija . . . . .	24
4.2	Mjerenja vibracija . . . . .	26
4.2.1	Signali nastali bušenjem aluminija . . . . .	26
4.2.2	Signali nastali bušenjem čelika . . . . .	29
4.2.3	Usporedba signala čelika i aluminija . . . . .	31
4.3	Analiza dobivenih rezultata . . . . .	32
4.3.1	Akustične emisija materijala . . . . .	32
4.3.2	Vibracije materijala . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>Dodatak</b>	<b>35</b>

## Popis slika

1	Prikaz postupka bušenja . . . . .	2
2	Grafički prikaz odnosa binarnih i analognih signala. . . . .	3
3	Princip rada senzora za vibraciju . . . . .	4
4	Vrste akustične emisije . . . . .	5
5	Opći prikaz digitalnog filtera . . . . .	6
6	Idealni digitalni filteri . . . . .	9
7	Praktični filteri . . . . .	10
8	Prikaz IIR filtera . . . . .	12
9	Prikaz odnosa širine lukova i parametara . . . . .	12
10	Određivanje frekvencije prekida za Butterworth-ov filter . . . . .	13
11	Prikaz faznog odziva i pojačanja Butterworth-ovog filtera . . . . .	14
13	Prikaz faznog odziva i pojačanja Butterworth-ovog filtera . . . . .	15
14	Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja . . . . .	16
15	Korišteno svrdlo . . . . .	17
16	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	19
17	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	19
18	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	20
19	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	20
20	Prikaz oštrice svrdla . . . . .	21
21	Prikaz plastičnih deformacija . . . . .	21
22	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	22
23	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	22
24	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	23
25	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	23
26	Prikaz oštrice svrdla . . . . .	24
27	Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminijska $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	24
28	Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminijska $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	25
29	Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminijska $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	25
30	Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminijska $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	26
31	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	26
32	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	27
33	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	27



34	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	28
35	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	29
36	Karakterističan prikaz mjerenja $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	29
37	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	30
38	Karakterističan prikaz mjerenja $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	30
39	Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	31
40	Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	32
41	Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	32
42	Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . . . . .	33

## Ključne riječi

- Bušenje
- Neizravna mjerenja
- Akustična emisija
- Vibracije
- Spektralna analiza
- Digitalni filteri
- Karakterizacija materijala

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A		Amplituda pojačanja filtera
$\beta$		Parametar oblika u Kaiser-Window filteru
$\delta_p$		Koeficijent oscilacija propusnog pojasa filtera
$\delta_s$		Koeficijent oscilacija zaustavnog pojasa filtera
f	$s^{-1}$	Frekvencija
$f_n$	$\frac{mm}{okr}$	Posmak po okretaju
$f_c$	$s^{-1}$	Prekidna frekvencija.
$f_s$	$s^{-1}$	Frekvencija uzorkovanja.
$H_\omega$		Prenosna funkcija filtera
$v_c$	$\frac{m}{min}$	Brzina rezanja. Obodna brzina na svrdlu
$v_f$	$\frac{mm}{min}$	Drugačiji zapis posmaka.
t	s	Vrijeme
$\omega$	$s^{-1}$	Drugi zapis frekvencije
$\omega_c$	$s^{-1}$	Drugi zapis frekvencije prekida

## Sažetak

U okviru ovog diplomskog rada analizirani su signali vibracija i akustične emisije nastalih prilikom bušenja čelika i aluminija, u svrhu karakterizacije materijala koji se buši i/ili stupnja istrošenosti svrdla.

Pri bušenju, kao postupku obrade odvajanjem čestica (rezanjem), dolazi do prodiranja svrdla u materijal, pri čemu se dio energije bušenja pretvara u vibracije i akustično emisiju. Signali su snimljeni pri naizmjeničnom bušenju rupa aluminija i čelika prilikom čega su korišteni različiti režimi rada.

Pomoću programskog paketa Matlab, signali su filtrirani za korekciju šuma te naknadno uz pomoć Furierovih transformacija prikazani i analizirani na mogućnost postojanja korelacije frekvencijskih karakteristika i tvrdoće materijala. Prikazane su pojedinačne nefiltrirane i filtrirane snimke pojedinih mjerenja te srednja vrijednost snimki određenog režima bušenja.

Na temelju analize vidljivo je da se može odrediti tvrdoća materijala putem vibracija, dok akustična emisija nije pružila dovoljno parametara za karakteriziranje materijala. Glavni nedostatak ove metode je problematika odabira optimalnog režima rada neovisno o materijalu i posljedice krivo odabranih režima.

## Summary

In this thesis acoustic emission and vibration signals, produced during drilling into steel and aluminum, were analyzed for the purpose of characterization of material that is being drilled and/or the stage of auger deterioration.

When drilling, cutting process, the auger penetrates the material and part of the energy used for drilling is being converted into vibrations and acoustic emissions. Signals were recorded during random drilling of holes in aluminum and steel, while using different work patterns.

With the help of Matlab program, signals were filtered for noise correction. Later they were shown using Fourier's transformations and analyzed for the possibility of existence of the correlation between frequency characteristics and hardness of the material. Single unfiltered and filtered recordings are shown, as well as the arithmetic mean of recordings of distinct drill pattern.

Based on the analysis it is clear that the hardness of the materials can be determined by vibrations, while acoustic emission didn't provide enough parameters for material characterization. The main disadvantage of this method is the issue of selection of the optimal work pattern regardless of the material, and the consequences of wrongly selected patterns.

# 1 Uvod

## 1.1 Uvodna riječ

Bušenje je jedan od najstarijih i najvažnijih postupaka obrade odvajanjem čestica. Rani oblici bušenja započeli su prije 35,000 godina te su prošli zavidan razvojni put od prve industrijske revolucije i ručne bušilice do digitalne revolucije i današnjih CNC strojeva. Danas se razvojem novih tehnologija javljaju ideje implementacija dodatnih sposobnosti tom prastarom postupku. Premda je dokazana povezanost stanja istrošenosti svrdla i akustične emisije, ta se činjenica ne koristi dovoljno u praksi.[1]

Glavni zadatak ovog diplomskog rada je utvrđivanje značajki signala akustične emisije i vibracija tijekom procesa bušenja materijala, na temelju kojih bi se mogli klasificirati materijali različitih tvrdoća. U svrhu toga će se bušiti aluminijske i čelične ploče s različitim režimima rada.

U prvom dijelu rada su objašnjeni pojmovi bušenja, vibracija i akustične emisije.

Drugi dio pobliže objašnjava funkcioniranje digitalnih filtera. Odabran je optimalani filter kao i njegovi parametri.

U trećem dijelu se prikazuje i opisuje eksperimentalni dio rada. Objašnjava se izbor korištenih režima i temeljne postavke eksperimenta.

Četvrti dio rada prikazuje grafove karakteristične za svaki režim te razliku između filtriranog i nefiltriranog signala dobivenu mjerenjem.

U petom dijelu su analizirane dobivene vrijednosti i dovedene u korelaciju s parametrima tvrdoće materijala.

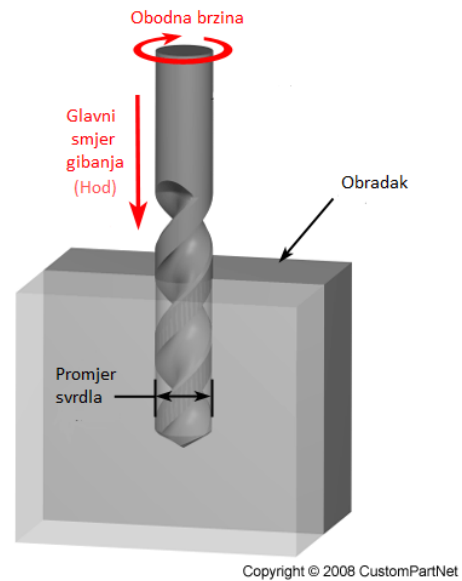
Šesti dio sadrži zaključak.

Sedmi i završni dio sadrži kodove korištene u Matlab-u za transformaciju parametara i obradu istih.

## 1.2 Proces bušenja

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera ili za proširivanje provrta većih promjera.[2] Iako je iznimno proširena u raznim granama gospodarstva, malo je primjenjena aktivna zaštita od umora materijala. Smatramo da bi s jeftinim senzorima omogućila optimizacija procesa bušenja te veći vijek trajanja svrdla.

Glavno gibanje je kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje.[3] Glavni alat pri bušenju je svrdlo koje svojom rotacijom i vertikalnim prilaženjem podlozi, dovodi u kontakt podlogu sa oštricama svrdla. Pri tom kontaktu i rotaciji svrdla dolazi do odvajanja čestica podloge ali i u maloj mjeri svrdla. Primjenom odgovarajućeg svrdla mogu se izraditi prolazni i neprolazni provrti ili proširiti provrti manjeg promjera.



Slika 1: Prikaz postupka bušenja

Zbog toga što se pri bušenju prodire u materijal s svrdlom, izrazito je teško mjeriti ikakve podatke o trenutnom stanju bušenja.

Ipak pri bušenju se mogu pratiti nusproizvodi i sile potrebne za rad kao što su vibracije, akustična emisija, sila pritiska, jakost struje... Pri kraju ovog rada nadamo se da će biti određena jasna funkcija zavisnosti između tvrdoće materijala i jednog od neizravnih mjerenja. Također se nadamo primjetiti korelaciju između stanja svrdla i ostalih mjerenja.

Pri svakom bušenju moraju biti određeni primarni parametri za režim rada. Ti parametri su brzina rezanja, brzina okretanja svrdla, posmak, promjer svrdla i dubina bušenja[4].

- Brzina rezanja  $v_c$

Obodna brzina svrdla. Ovisi o materijalu koji se obrađuje.

- Posmak  $v_f$

Relativna brzina okomitog gibanja prema materijalu koji se obrađuje. Kod bušenja je ta brzina uvijek u pravcu osi rotacije.

- Posmak po okretaju  $f_n$

Aksijalni pomak alata tijekom jednog okretaja. Koristi se za računanje dubine penetracije, te za definiranje posmaka bušenja.

### 1.3 Signal: definicija i karakteristike

Signal je funkcija koja prenosi informacije o ponašanju ili svojstvima neke pojave. U kontekstu obrade signala, proizvoljni tokovi binarnih podataka, ne smatraju se signalima, već samo analogni i digitalni signali koji predstavljaju analogne fizikalne veličine.

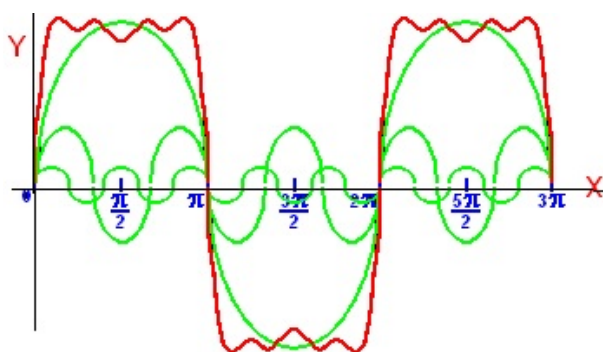
Najvažnija podjela kod signala jest između diskretnih i kontinuiranih domena u kojima se funkcije definiraju:

- Analogni (kontinuirani) signal - bilo koji kontinuirani signal.
- Diskretni signal - vremenski niz koji se sastoji od kvantitativnog niza.

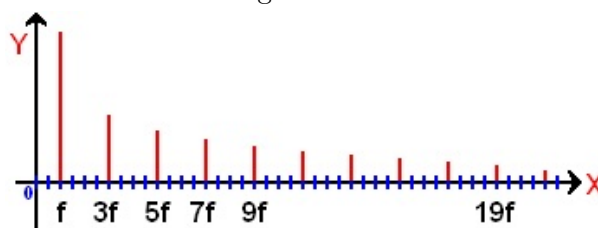
Teorija kaže da pravokutni impulsi sadrže velik broj harmoničnih komponenti i zauzimaju opseg frekvencija koji je vrlo širok (teoretski - beskonačno).[5] U praksi se smatra da je signal po obliku 'gotovo' originalan (pravokutan) ako se iz predajnika u prijamnik prenese prvih sedam harmoničnih komponenti. Jednadžba, koja po Fourier-ovom razvoju u red, opisuje pravokutni signal i njegove komponente je:

$$y(t) = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot (2 \cdot n - 1) \cdot t)}{2 \cdot n - 1} \quad (1)$$

Na Slici 2. je prikazana poveznica između digitalnog i analognog signala, da se bolje razumije pretvorba iz analognih IIR filtera u digitalne IIR filtere.



(a) Binaran signal prikazan analognim signalima



(b) Frekvencijska domena tih signala.

Slika 2: Grafički prikaz odnosa binarnih i analognih signala.

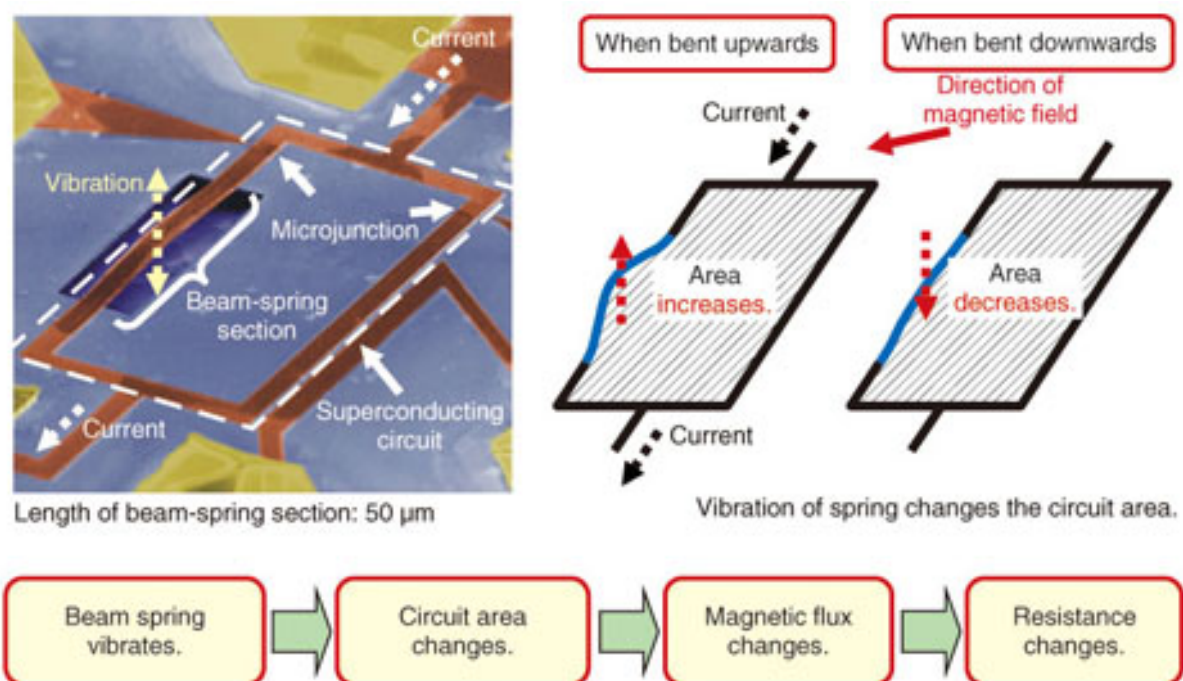


## 1.4 Vibracija: definicija i primjena

Vibracija je gibanje čestice, tijela ili sustava povezanih tijela koje nije u ravnotežnoj poziciji. Većina vibracija je nepoželjna u strojevima i strukturama jer proizvode povećana naprezanja, energetske gubitke, povećano trošenje... Vibracije najčešće nastaju neravnotežom sustava (neravnomjerna masa rotirajućih djelova, nejednako trenje, asinkronost sustava...)

Mjerenje vibracija je izrazito pogodan način za praćenje stanja rotirajućih strojnih djelova. Pogodan je zbog jednostavnosti ugradnje odgovarajućih senzora, te pri tome nisu potrebne nikakve modifikacije na alatnom stroju. No to i dalje nije praksa u području nadzora stanja alata zbog izrazite osjetljivosti signala senzora na obrađivani materijal.[6]

Vibracije nastaju pri kontaktu svrdla i podloge. Pri procesu odvajanja čestica oštrom, kad popusti veza koja je te čestice držala na elementu koji se obrađuje, dolazi do neravnomjernog oslobađanja energije. Također i zbog ne-homogenosti materijala koji se buši svrdlo ima raznolik otpor pri obradi te zbog toga dolazi do vibracija. Piezoelektrični element u senzoru zbog vibracija stvara električan naboj. Te promjene se bilježe te tako dobijamo zapis vibracija.



Slika 3: Princip rada senzora za vibraciju

## 1.5 Akustična emisija

Akustična emisija se može definirati kao fenomen pojave zvuka ili ultrazvuka u materijalima uslijed deformiranja ili razvoja pukotina, odnosno uslijed oslobađanja elastične energije. Akustična emisija spada u metode ispitivanja nerazornim metodama. Posljednjih godina primjetna je intenzivnija upotreba akustične emisije za ispitivanje raznoraznih svojstva materijala. Valja istaknuti korištenje akustične emisije u građevini, pri ispitivanju betona, gdje se koristi već preko 30 godina.[7] U istraživanju plastičnih deformacija materijala, akustična emisija daje detaljne i trenutne informacije o ponašanju mikrostrukture ispitivanog uzorka ili elementa izloženog određenom opterećenju. S sve boljim i suvremenijim tehnologijama, očekuje se izrazit napredak ovakve vrste ispitivanja.

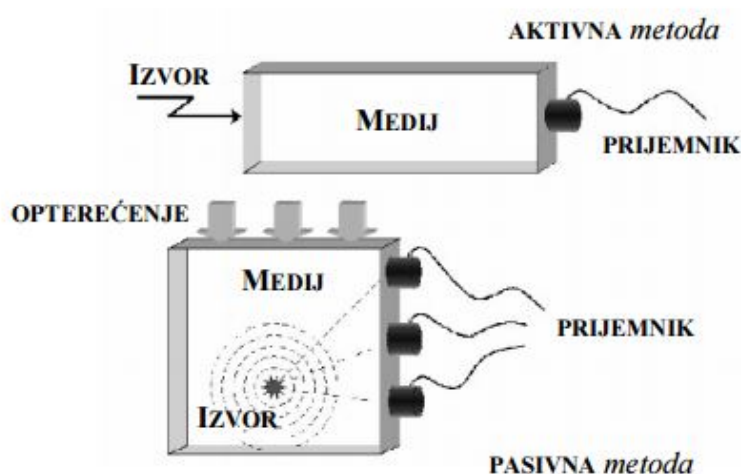
Vrste akustične emisije

- Aktivna akustična emisija

Kod aktivne akustične emisije izvor pojave nije u samom materijalu, već se konstrukcija prisilno pobuđuje. Pritom je važno istaknuti da se ispitivanje aktivnom akustičnom emisijom provodi bez nametanja bilo kakvog vanjskog opterećenja na ispitivani sustav.

- Pasivna akustična emisija

Pasivna akustična emisija se odnosi na zvukove, koji su u većini slučajeva ljudskom uhu nečujni, a nastau unutar materijala uslijed fizikalnih i kemijskih promjena ili kao rezultat ireverzibilnih promjena njegove strukture uslijed opterećenja.



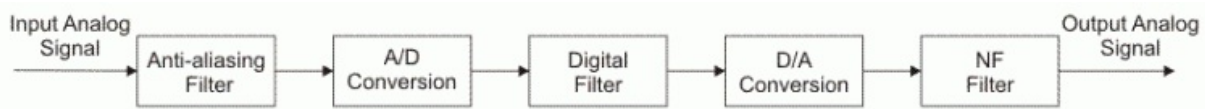
Slika 4: Vrste akustične emisije

## 2 Filteri

Filteri su izrazito bitna klasa linearnih vremensko invarijantnih sustava. U suštini, izraz frekvencijsko selektivni filter, je sustav koji propušta odabrane djelove frekvencije i u potpunosti zaustavlja ostale dijelove, ali u širem smislu svaki sustav koji mijenja određene frekvencije u odnosu na druge se isto zove filter. Iako se u mnogim slučajevima traže ne-uzročni filteri, bitno je znati konstrukciju uzročnih filtera, jer se često ne-uzročni filteri konstruiraju i implementiraju modificiranjem uzročnih filtera. Kod konstruiranja filtera bitni su sljedeći koraci:

- Specifikacije željenih osobnosti sustava
- Aproksimacija tih specifikacija koristeći uzročno-diskretni vremenski sustav.
- Realizacija sustava

Prvi korak ovisi o specifičnim potrebama pojedinog problema, dok korak broj tri, na osnovu prvog koraka, ovisi o tehnologiji *hardware-a* kojeg koristimo. Zbog tih razloga je najvažnije kvalitetno aproksimirati specifikacije.



Slika 5: Opći prikaz digitalnog filtera

Da bi se signal mogao obraditi digitalnim filterom mora se prevesti u digitalan oblik. Izrazito je bitno naglasiti da se mora odabrati ispravna frekvencija uzorkovanja. Signal koji se filtrira nesmiije sadržavati frekvencije koje su više od polovice frekvencije uzorkovanja ( $\frac{f_s}{2}$ ). Zbog toga se prije A/D pretvorbe koristi anti-aliasing filter (nisko propusni filter) koji eliminira elemente s visokom frekvencijom.[8]

Nakon filtriranja i uzorkovanja tek slijedi filtriranje odabranim digitalnim filterom. Izlazni signal nakon obrade filterom je digitalni signal kojeg u ponekim slučajevima treba vratiti u analogni oblik. Ovdje opet nakon A/D pretvorbe moramo primjeniti anti-aliasing filter da maknemo slučajne visoke frekvencije (šum). Dakle opet koristimo niskopropusni filter s frekvencijom uzorkovanja ( $\frac{f_s}{2}$ ).

Pojačanje digitalnog filtera se izražava u logaritamskoj jedinici dB putem sljedeće formule:

$$A = 20 \cdot \log(H(\omega)) \quad (2)$$

## 2.1 Idealni filteri

Idealni frekvencijsko prijenosni filter je sustav koji propušta točno određen spektar frekvencija, bez ikakvog prigušenja, a pritom u potpunosti ne propušta ostale frekvencije. Spektar frekvencija koji prolaskom kroz filter ostane nepromijenjen, se zove propusni pojas filtera, dok se ulazne frekvencije koje nemogu proći filter zovu pojasna brana filtera. Apsolutna vrijednost funkcije prijenosa  $|H(\omega)|$  se kreće između vrijednosti  $A$  i  $0$ , kao funkcija frekvencije  $\omega$ . Pojačanje  $|H(\omega)|$  je  $A$ , najčešće poprima vrijednost  $A = 1$  kod propusnog pojasa, dok kod pojasne brane prima vrijednost nula. Na osnovu pojasa frekvencija koje se propuštaju i guše, idealni filter se dijeli na četiri kategorije koje ćemo sad pobliže opisati.

### 2.1.1 Niskopropusni filter

Prijenosna funkcija niskopropusnog filtera  $H_{np}(\omega)$  kao idealnog filtera se definira:

$$H_{np}(\omega) = \begin{cases} A & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (3)$$

Gdje  $\omega_c$  označava frekvenciju odsjecanja filtera. Propusni pojas niskopropusnog filtera je dan relacijom  $|\omega| \leq \omega_c$  a pojasna brana je dana relacijom  $\omega_c < |\omega| < \infty$ . Frekvencijske karakteristike idealnog niskopropusnog filtera, su nacrtane na Slici 3.(a), gdje se vidi da  $|H_{np}(\omega)|$  skače između vrijednosti  $A$ , unutar propusnog pojasa na nulu, unutar pojasne brane. Faza prijelaza između  $A$  i nule je u idealnim filterima uvijek jednak nuli.[9]

### 2.1.2 Visokopropusni filter

Prijenosna funkcija visokopropusnog filtera  $H_{vp}(\omega)$  kao idealnog filtera se definira:

$$H_{vp}(\omega) = \begin{cases} 0 & |\omega| \leq \omega_c \\ A & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (4)$$

Naravno  $\omega_c$  opet označava frekvenciju odsjecanja filtera. Prijenosna funkcija idealnog filtera  $H_{vp}(\omega)$  je usko povezana s prijenosnom funkcijom idealnog niskopropusnog filtera  $|H_{np}(\omega)|$  sljedećom relacijom:

$$H_{vp}(\omega) = A - H_{np}(\omega) \quad (5)$$

Frekvencijska karakteristika idealnog visokopropusnog filtera je nacrtan na Slici 3.(b).

### 2.1.3 Pojasnopropusni filter

Prijenosna funkcija idealnog pojasnopropusnog filtera  $H_{pp}(\omega)$  je definirana kako slijedi:

$$H_{pp}(\omega) \begin{cases} A & \omega_{c1} \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \omega_{c1} < |\omega| \text{ i } \omega_{c2} < |\omega| < \infty \end{cases} \quad (6)$$

$\omega_{c1}$  i  $\omega_{c2}$  su frekvencije prekida idealnog pojasnopropusnog filtera.

### 2.1.4 Pojasna brana

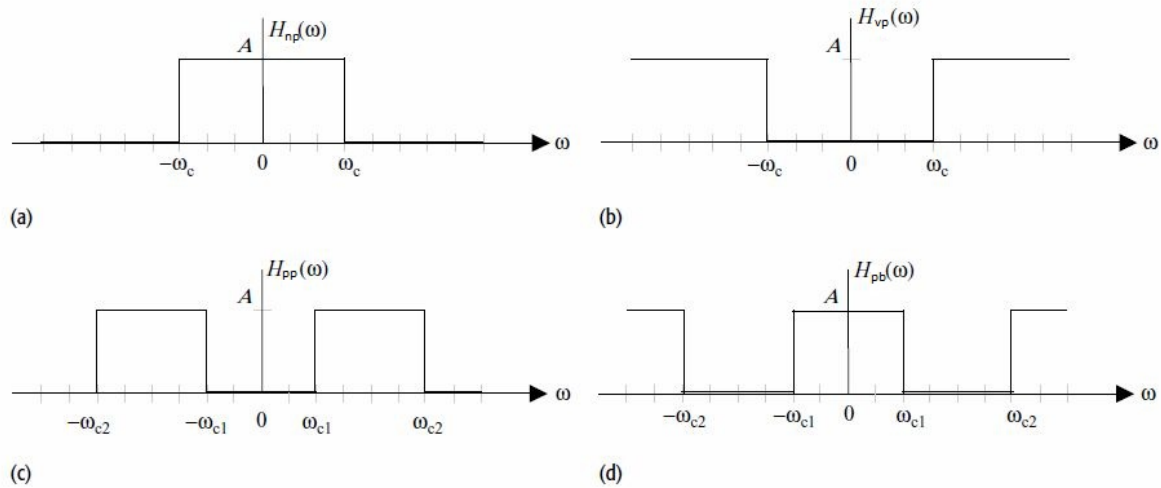
Prijenosna funkcija pojasne brane  $H_{pb}(\omega)$  kao idealnog filtera se definira:

$$H_{pb}(\omega) \begin{cases} 0 & \omega_{c1} \leq |\omega| \leq \omega_c \\ A & \omega_{c1} < |\omega| \text{ i } \omega_{c2} < |\omega| < \infty \end{cases} \quad (7)$$

$\omega_{c1}$  i  $\omega_{c2}$  su frekvencije prekida idealnog pojasnopropusnog filtera. Ovdje isto vrijedi relacija:

$$H_{pb}(\omega) = A - H_{pp}(\omega) \quad (8)$$

kao i s visoko/niskopropusnim filterima.



Slika 6: Idealni digitalni filteri

## 2.2 Ne-idealni filteri

Kao i za svaki idealni sustav, idealni frekvencijsko-selektivni filteri nisu fizički provedivi zbog više razloga. Kod frekvencijskih karakteristika idealnog filtera, primjećujemo da je pojačanje  $A$  konstantno u propusnom pojasu, dok je kod brane pojačanje nula. Drugi pak problem je kod prijenosne funkcije  $H(\omega)$ , gdje je prelaz između propusnog filtera i brane takav da imamo diskontinuiranu funkciju u  $\omega = \omega_c$ . U praksi je nemoguće implementirati filtere s konstantnim pojačanjem unutar propusnog pojasa i brane kao ni diskontinuirane promjene frekvencija. U suprotnome držanje konstantnog pojačanja i/ili izvođenje velikih promjena frekvencije (diskontinuirane), najčešće dovodi do impulsnih reakcija koje su beskonačne duljine.

Da bi se realizirali filter u stvarnom svijetu, potrebno je promijeniti pretpostavke idealnih filtera. Slika 4. prikazuje frekvencijsku karakteristiku fizički izvedivih oblika prijašnjih filtera sa Slike 3. Viša i niža granica pojačanja je prikazana osjenčanom linijom, dok su primjeri frekvencijskih karakteristika fizički izvedivih filtera prikazani podebljanim linijama. [10]

Praktični (izvedivi) filteri se razlikuju od idealnih filtera po sljedećim karakteristikama:

- Pojačanje praktičnih filtera unutar propusnog i zaustavnog dijela nije konstantno, već odstupa od idealnog pojačanja unutar zadanih uvjeta:

Propusni pojas:

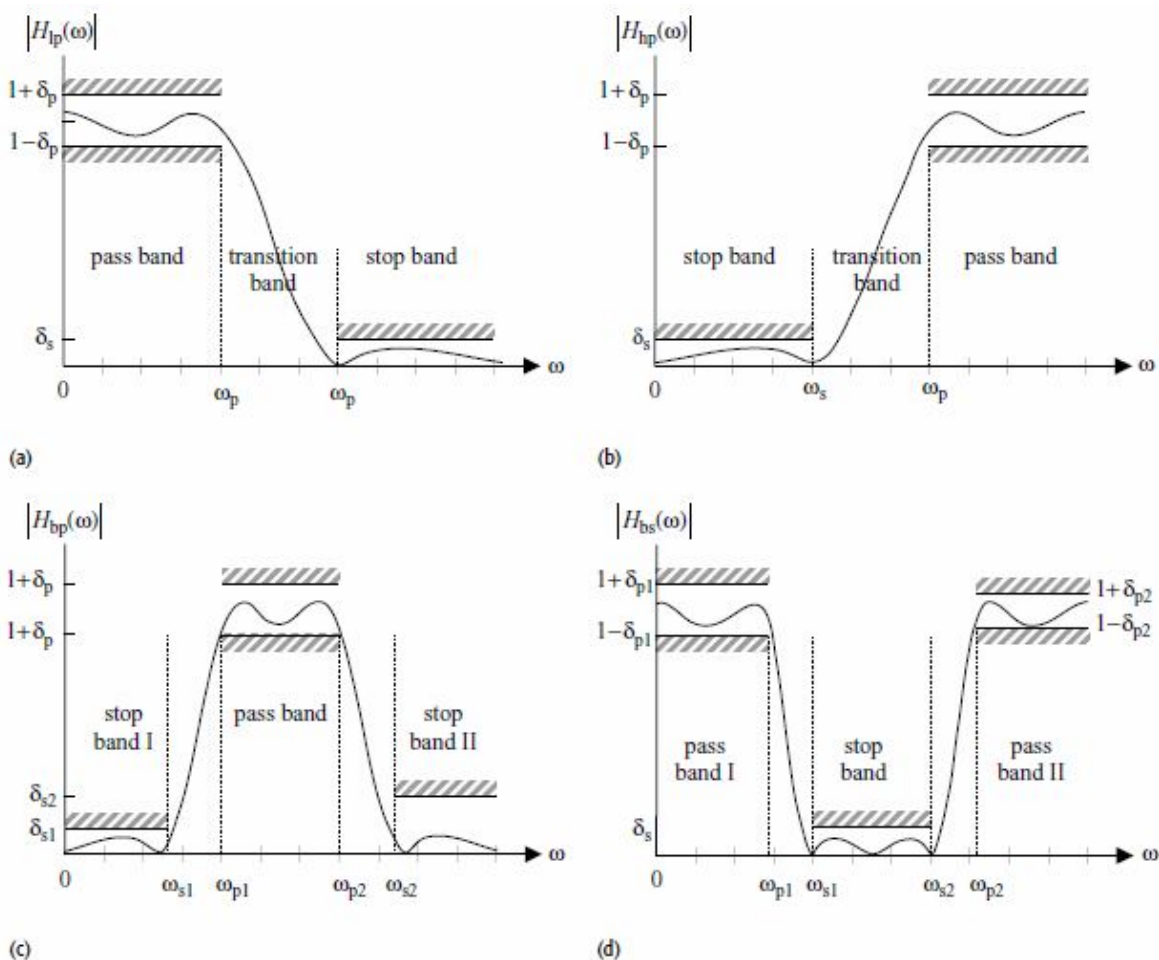
$$1 - \delta_p \leq |H(\omega)| \leq 1 + \delta_p \quad (9)$$

Pojasna brana

$$0 \leq |H(\omega)| \leq \delta_s \quad (10)$$

Oscilacije unutar propusnog i zaustavnog pojasa se nazivaju valovima. Na Slici 4. se valovi propusnog pojasa ograničavaju na vrijednost  $\delta_p$  za nisko, visoko i pojasno-propusne filtere. u slučaju pojasne brane je val propusnog pojasa ograničen na  $\delta_{p1}$  i  $\delta_{p2}$  za oba propusna pojasa. Isto tako s zaustavnim dijelom su valovi ograničeni na  $\delta_s$  za nisko, visoko i pojasnopropusne filtere. U slučaju pojasne brane, valovi zaustavnog pojasa su ograničeni na  $\delta_{s1}$  i  $\delta_{s2}$  za oba zaustavna pojasa.

- Uvedeni su prijelazni pojasi koji su veći od nule. Eliminirana je diskontinuiranost kod prekidne frekvencije  $\omega_c$ .



Slika 7: Praktični filteri

Na Slici 4. se nalaze slike koje sadrže samo pozitivne vrijednosti  $\omega$  no podrazumijeva se da su simetrični u odnosu na ishodište te stoga nije potrebno crtati i negativnu i pozitivnu vrijednost  $\omega$ -e.

### 2.3 Frekvencija prekida $\omega_c$

Bitan parametar u konstruiranju filtera je frekvencija prekida  $\omega_c$ , koja je dana izrazom:

$$\omega_c = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \omega_{max} \quad (11)$$

Pretpostavljajući da je maksimalno pojačanje unutar propusnog pojasa jedinično, pojačanje na frekvencija prekida  $\omega_c$  je dan vrijednošću 0.3031 ili -3 dB na logaritamskoj ljestvici od -100 do 0. Pošto se frekvencija prekida uvijek nalazi unutar prijelaznog pojasa filtera za niskopropusni filter npr vrijedi:  $\omega_p \leq \omega_c \leq \omega_s$ . Pošto jednakost  $\omega_p = \omega_c = \omega$  implicira da je prijenosni pojas jednak nuli. Ta jednakost vrijedi samo za idealne filtere.

### 2.4 Glavna podjela digitalnih filtera

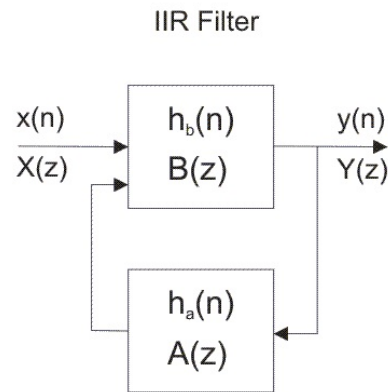
Glavna podjela filtera jest podjela na IIR i FIR. Obje metode imaju svoje prednosti i mane te se moraju analizirati sve karakteristike koje će najbolje odgovarati zadanome problemu. U većini slučaja je najvažnija samo jedna karakteristika: potreba linearne faze signala. Linearna faza je svojstvo filtera, gdje je reakcija filtera linearna funkcija frekvencije. Govorni signal se može obrađivati s nelinearnom faznom karakteristikom. Fazna karakteristika govornog signala nije bitna te se zbog toga može zanemariti. Zbog toga se može koristiti širi spektar sustava za obradu. Tu je na primjer bolje koristiti IIR filter jer dobijemo bolji rezultat s nižim redom filtera. IIR filteri imaju integriranu povratnu vezu, te zbog toga dobijemo točnije rezultate s nižim redom filtera od FIR.[11] Također postoje sustavi u kojima je fazna karakteristika esencijalna. Tipičan primjer za to bi bili signali dobijeni od raznolikih senzora u industriji. Zbog gubitka bitnih informacija tu se mora koristiti FIR jer je linearnost fazne karakteristike jedini bitni aspekt obrade tih signala.

#### 2.4.1 IIR filteri

IIR( (Infinite Impulse Response) filteri su digitalni filteri koji se primjenjuju na mnoge vremenski invarijantne (LTI) sustave. Njihova glavna karakteristika jest da njihova impulsna reakcija traje beskonačno za tehnilke sustave. Mnogi IIR filteri su se razvili prije korištenja digitalne tehnologije te su se kao takvi koristili na vremenski kontinuiranim signalima. U tijeku digitalne revolucije IIR filteri su prešli s kontinuiranog signala na diskretni signal. Zbog dugog korištenja vremenski kontinuiranih IIR filtera prije digita-



lizacije, njihovo konstruiranje je izrazito napredno, te je obrađena široka problematika filtera.

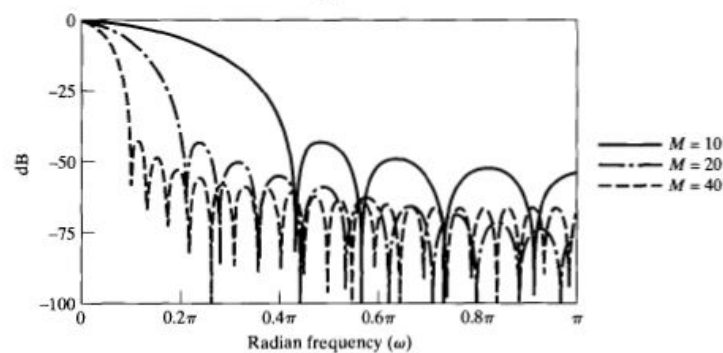


Slika 8: Prikaz IIR filtera

### 2.4.2 FIR filteri

Suprotno od IIR filtera, FIR (Finite Impulse Response) filteri su u potpunosti ograničeni na diskretnu domenu. Zbog toga se konstrukcija FIR filtera temelji na direktnim aproksimacijama željenih frekvencijskih odziva diskretnog sustava. Nadalje većina tehnika za aproksimaciju veličine odziva FIR sustava pretpostavlja linearnu faznu konstantu, pri tome izbjegavajući problem spektralne faktorizacije koja komplicira direktnu konstrukciju IIR filtera.

Jedan od optimalnijih FIR filtera je Kaiser-ov filter oblikovan pomoću "Windowing teorema". Glavna prednost mu je optimalan odnos širine glavnog i sporednog parabolnog luka funkcije. Također se ističe po sveobuhvatnom testiranju odnosa parametra duljine  $(M+1)$  i parametra oblika  $(\beta)$ . Prilikom tih testiranja su izvedene formule pomoću kojih se može unaprijed odrediti  $M$  i  $\beta$ , za optimalan odabir frekvencijskog selektivnog filtera.[12]



Slika 9: Prikaz odnosa širine lukova i parametara

## 2.5 Korišteni filteri za analizu

### 2.5.1 Anti aliasing filter za akustičnu emisiju

Da bi se mogao filtrirati signal koji je snimljen pri ispitivanjima, prvo se funkcija mora prefiltrirati analognim anti-aliasing filterom. Najpogodniji i najpopularniji filter za to je Butterworthov niskopropusni filter. Kod Butterworth-ovog filtera su dvije varijable bitne za izradu filtera. Red filtera ( $N$ ) te frekvencija prekida ( $f_c$ ). Nyquist-Shannon-ov teorem uzorkovanja nalaže da frekvencija prekida nesmiye biti veća od polovine frekvencije uzorkovanja:

$$f_c \leq \frac{f_s}{2} \quad (12)$$

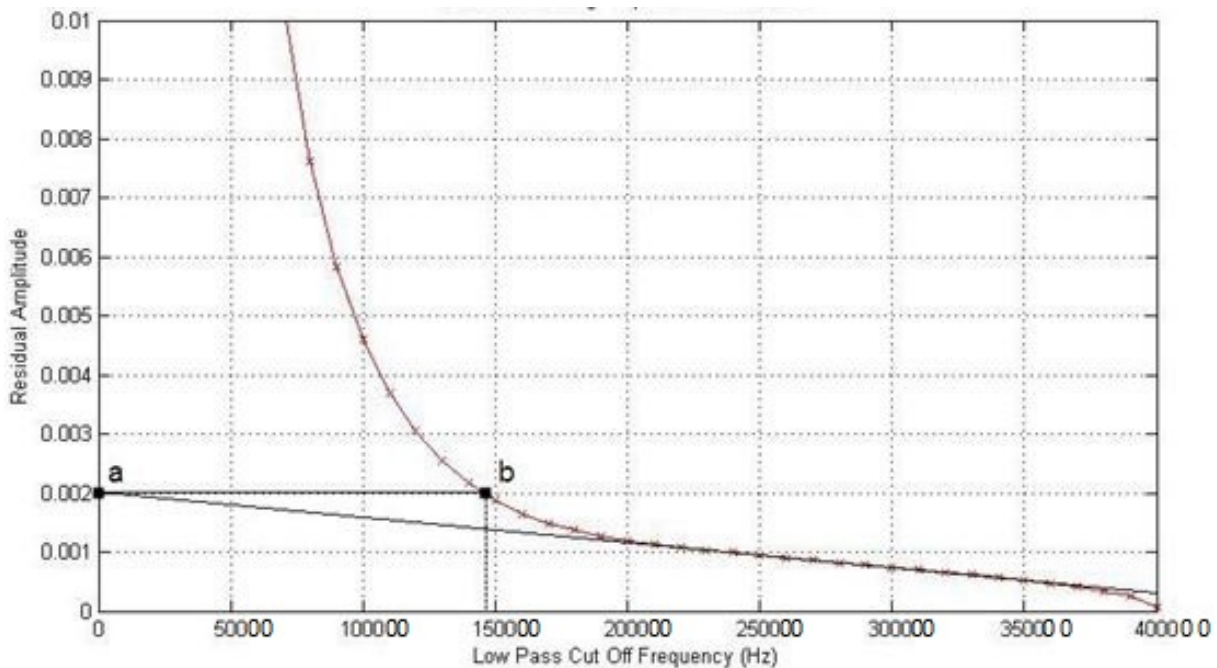
Da bi se odredio optimalni niskopropusni filter, potrebno je interpolirati prekidnu frekvenciju sa sljedećim vrijednostima:  $f_c = 0.01 * f_s, 0.02 * f_s \dots 0.5 * f_s$

Nakon filtriranja s testnim filterima, izračunava se preostala srednja vrijednost signala. [13] Matematički se ta vrijednost definira:

$$R_{a_x} = \sqrt{\sum_n x^2[n]} \quad (13)$$

$$R_a = R_{a_{filt}} - R_{a_{ne-filt}} \quad (14)$$

Dobijanjem tih srednjih vrijednosti za pojedinu vrijednost filtera, crta se sljedeći graf:



Slika 10: Određivanje frekvencije prekida za Butterworth-ov filter

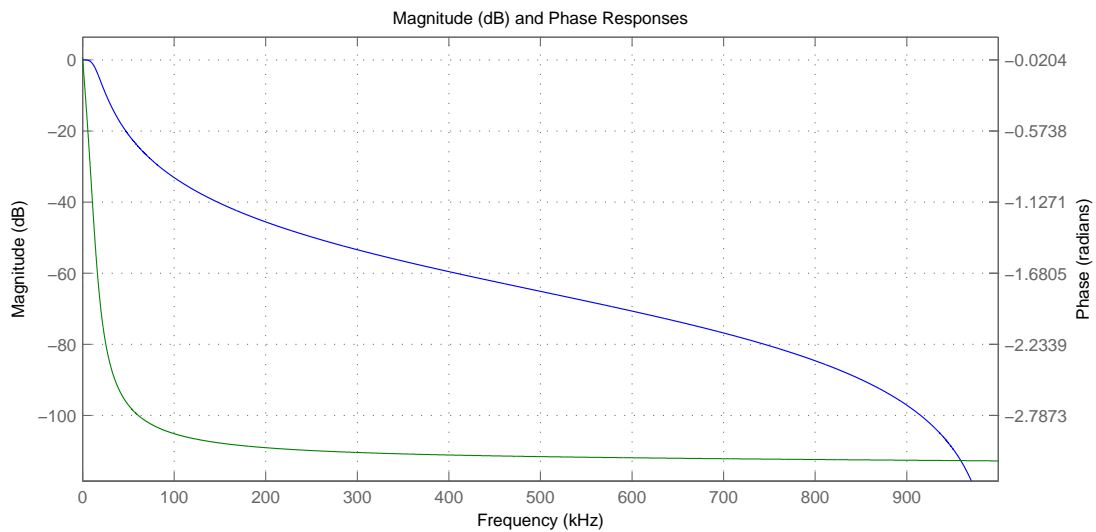
Aproksimacijom krivulje dobijamo pravac koji se sjeće y os u točki a. Iz te točke se povlači pravac paralelan sa x-osi. Točka b gdje se sjeće sa krivuljom srednjih vrijednosti nam određuje vrijednost filtera. Stoga su nam vrijednosti Butterworthovog filtera 2. reda sljedeće:

$$f_s = 2000000 \text{ Hz}$$

$$f_c = 15000 \text{ Hz}$$

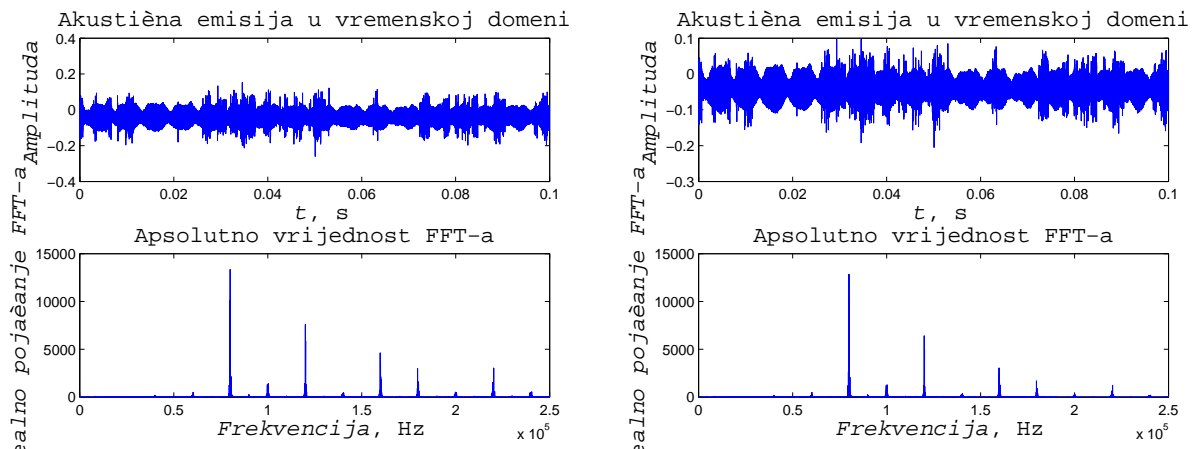
$$N = 2$$

Fazna karakteristika i karakteristika pojačanja filtera:



Slika 11: Prikaz faznog odziva i pojačanja Butterworth-ovog filtera

Na sljedećim slikama se prikazuje utjecaj odabranog filtera na snimljeni signal akustične emisije aluminijske i njegovu frekvencijsku karakteristiku. Na slikama se prikazuje srednja



(a) Prikaz relevantnih podataka prije prefiltriranja (b) Prikaz relevantnih podataka nakon prefiltriranja

vrijednost za režim bušenja  $v_c = 20 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  i  $f_v = 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . Primjećuje se uklanjanje visokog šuma na Realnom djelu apsolutne vrijednosti FFT-a izmjerenog signala.

### 2.5.2 Anti aliasing filter za vibracije

Signali od vibracija također moraju biti predfiltrirani niskopropusnim anti aliasing filterom. Opet uzimamo Butterworth-ov filter. No pošto kod vibracija imamo deklarirano mjerno područje korištenog senzora od 0,5 Hz - 5 kHz, možemo odmah odrediti prekidnu frekvenciju:

$$F_c = 5050 \text{ Hz}$$

Koristi se malo viša frekvencija od granične vrijednosti kako ne bi došlo do djelomičnog prigušenja signala na gornjoj frekvenciji mjernog područja senzora. Od tako filtriranog signala, prva je komponenta snage (na frekvenciji 0 Hz) izuzeta iz daljnje analize, tj analiza spektra je započela od 0.5Hz.

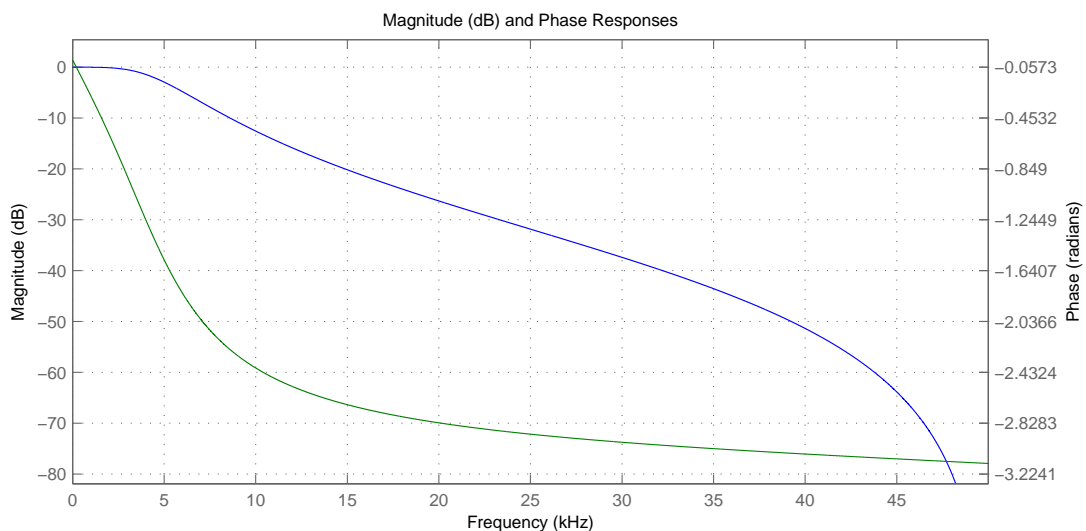
Vrijednosti antia aliasing filtera za vibracije:

$$f_s = 100000 \text{ Hz}$$

$$f_c = 5050 \text{ Hz}$$

$$N = 2$$

Fazna karakteristika i karakteristika pojačanja filtera:



Slika 13: Prikaz faznog odziva i pojačanja Butterworth-ovog filtera

## 3 Eksperimentalni dio diplomskog rada

### 3.1 Razvoj eksperimentalnog postava

U cilju strukturiranja modela trošenja i njegove verifikacije, realiziran je eksperimentalni ispitni postav zasnovan na postojećoj konstrukciji male tro-osne glodalice koja je modificirana i nadograđena nizom pogonskih, upravljačkih i mjernih sustava. Sustav je osmišljen i sastavljen u svrhu ispitivanja za disertaciju kolege s fakulteta u svrhu ispitivanja trošenja medicinskog svrdla. Sustav je naknadno prenamjenjen u svrhu ovog diplomskog rada.

[14] U sustav je ugrađeno i nekoliko vrsta mjernih uređaja za mjerenje temperature, sila, akustične emisije i vibracija. Montaža senzora akustične emisije i vibracije izvedena je u blizini prednjeg ležaja glavnog vretena, a senzori sile ispod stezne naprave za prihvata ispitnog uzorka. Uz navedene eksterne mjerne signale snimani su i interni pogonski signali motora glavnog vretena i posmičnih osi. Pomoću odgovarajuće hardverske i softverske podrške usklađeni su mjerni i upravljački sustav postava čime je omogućeno sinkronizirano i brže prikupljanje podataka, a ujedno je smanjena mogućnost pogreške pri označavanju, pohranjivanju i kasnijoj obradi signala. Uz navedeno, ugrađen je i sustav za regulaciju temperature okoline koji nije korišten u ovom radu.



Slika 14: Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja

### 3.2 Plan pokusa

U planiranju pokusa posvećena je pažnja na određivanje parametara obrade i stupnju istrošenosti oštrice alata. Parametri obrade (brzina rezanja i posmak) odabrani su s obzirom na karakteristike motora glavnog vretena. U svim eksperimentima korišteno je sljedeće svrdlo



Slika 15: Korišteno svrdlo

Signali procesa analizirani su u vremenskoj i frekvencijskoj domeni uz prethodno filtriranje šumova, a iz svakog je područja izdvojen niz karakterističnih značajki. Utjecaj svake značajke na dinamiku procesa analiziran je u cilju određivanja najboljeg skupa značajki na osnovi kojih je kasnije provedena procjena određivanja materijala.

### 3.3 Parametri bušenja

Esencijalan je ispravan odabir međusobno ovisnih parametara obrade, brzina rezanja i posmaka, zbog različite tvrdoće materijala. Korištena su dvije brzine vrtnje ( $v_c$ ) i dvije brzine posmaka ( $f_n$ )

#### 3.3.1 Brzina vrtnje

Korištene su brzine vrtnje od:

$$v_{c1} = 20 \frac{\text{m}}{\text{min}} \text{ i } v_{c2} = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Odabrani parametri su niži od preporučenih za aluminij koji se koristio u eksperimentu (AlMgSi05), zbog želje da se koriste isti režimi bušenja na oba materijala. Stoga se su se koristili režimi pogodni za što manje trošenje oštrice. No to je utjecalo na kvalitetu rezultata kao što će biti kasnije prikazano, zbog aluminijskih nakupina na oštrici.

#### 3.3.2 Brzina posmaka

Korištene brzine posmaka su:

$$f_{n1} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}} \text{ i } f_{n2} = 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$$

Ti parametri su bili podložni sustavu koji je korišten za testiranja. Sustav koji se koristio za bušenje ima najveće dopušteno opterećenje od  $700N$ . Sa odabranim parametrima vrijednosti nisu prelazile više od  $400N$ . [15]

### 3.4 Opis postupka bušenja

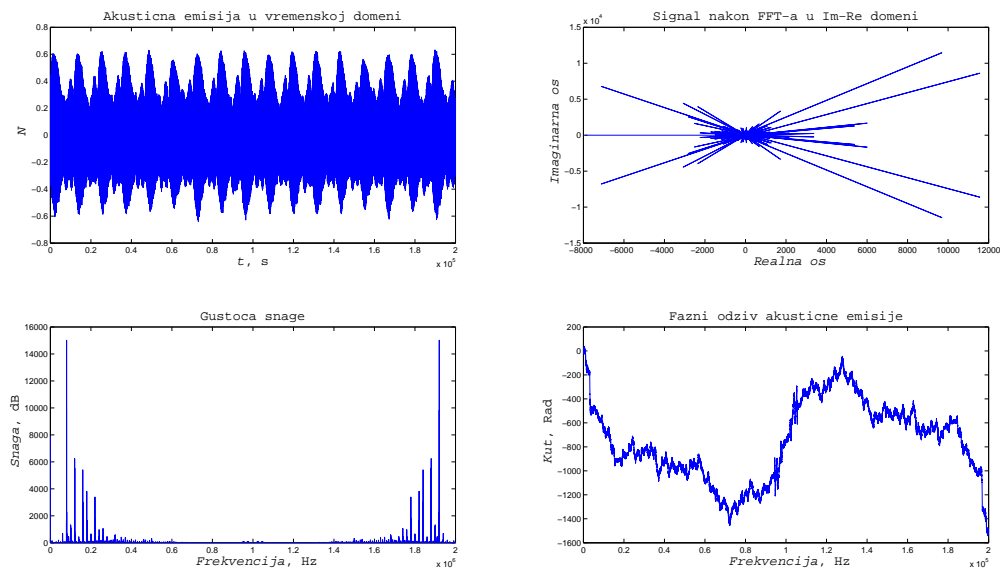
Testiranja su izvođena na pločama dimenzija  $200 \times 100 \times 5$  mm. Testeri su prije postupka bušenja centrirani s manjim svrdlom te su na samom testnom bušenju imali udubljene sve točke preodređene za bušenje. Prilikom bušenja bi se nedugo nakon zadirana u materijal mjerili vibracije i akustična emisija. Samo mjerenje je trajalo izrazito kratko. Akustična emisija bi se snimala 131 ms a mjerenje vibracija 2.13 s. Sam režim se stalno mijenjao za izbjegavanje ikakve korelacije pozicije bušenja i dobivenih rezultata. Nakon završetka bušenja polovice testera, svrdlo se uslikavalo visokorezolutnom kamerom za bilježenje stanja svrdla te bi se nakon toga mijenjao materijal koji se ispitivao. Frekvencija uzorkovanja akustične emisije iznosi 2Mhz dok je frekvencija uzorkovanja za vibracije jednaka 100kHz. Vibracija se mjerila u 3 osi (x, y, z) te su ti podaci zapisani zasebno.

## 4 Mjerenje i analiza signala

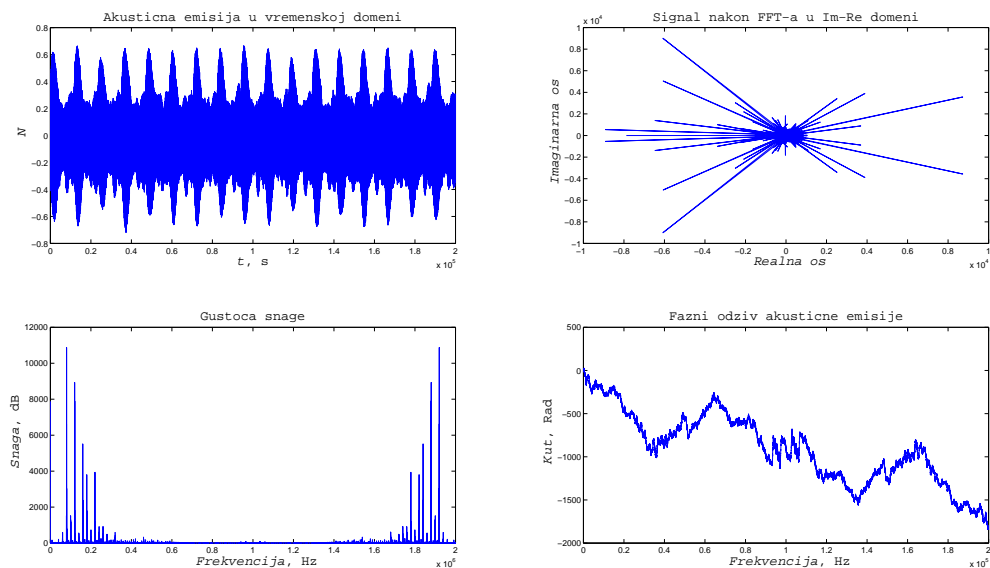
### 4.1 Mjerenja akustične emisije

#### 4.1.1 Signali nastali bušenjem aluminiya

U nastavku se prikazuju referentni podaci dobiveni snimanjem akustične emisije prilikom bušenja aluminiya. Potrebno je napomeniti da se prikazuju srednje vrijednosti svih mjerenja.

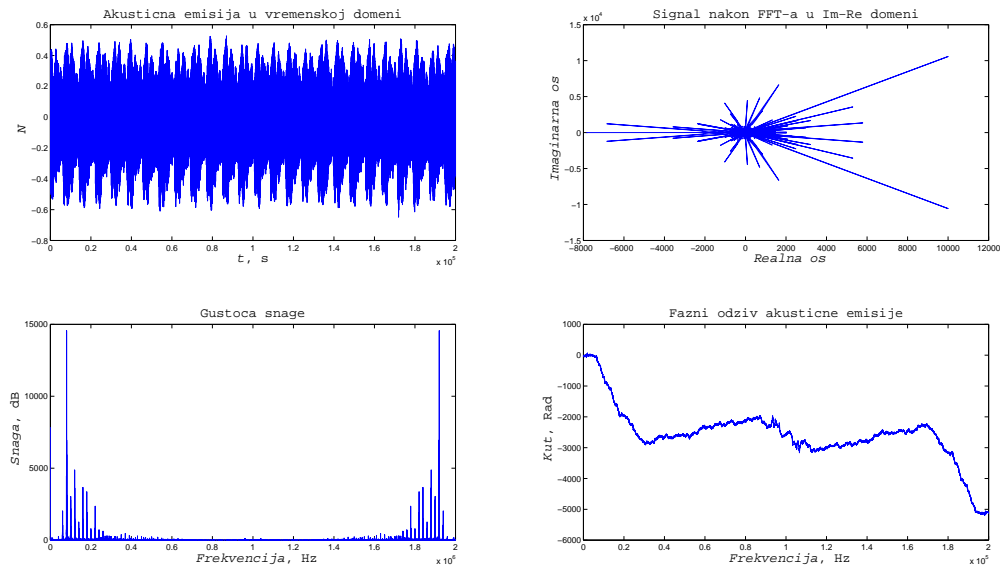
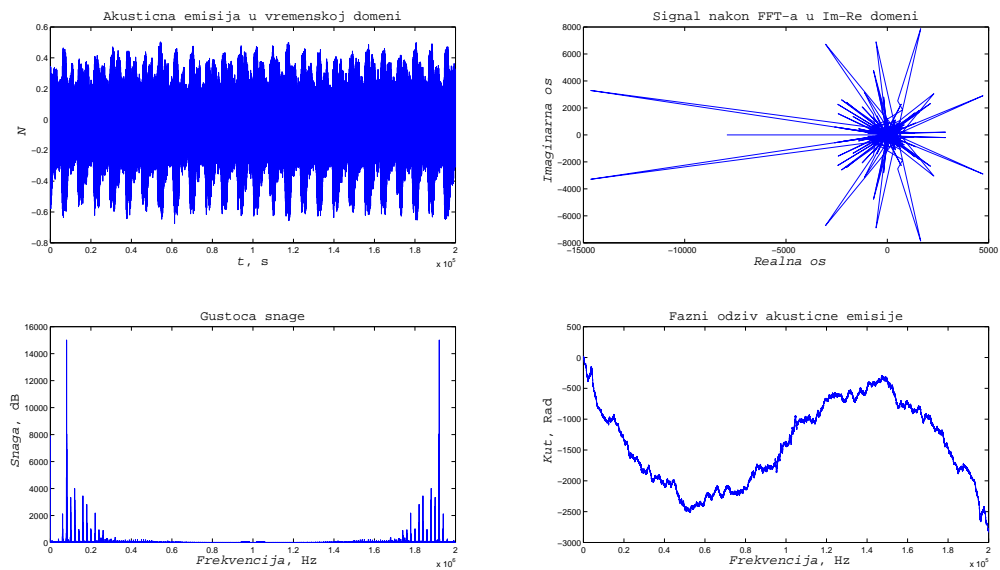


Slika 16: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

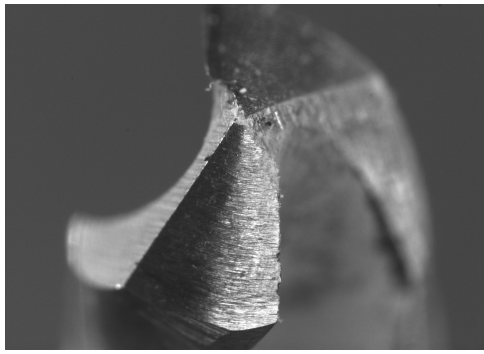


Slika 17: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

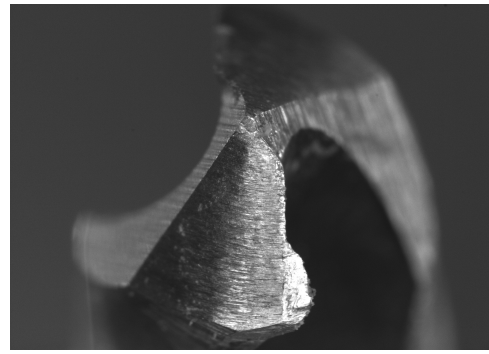


Slika 18: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 19: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ 

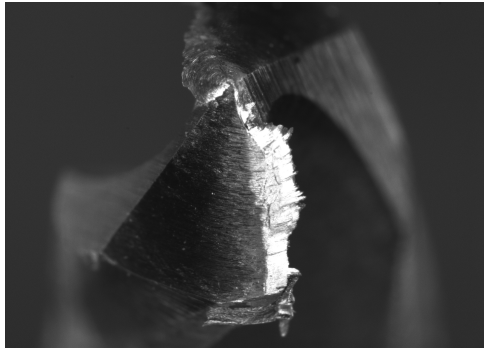
Potrebno je napomenuti da početna mjerenja nastala prilikom bušenja aluminiya variraju u velikom broju uzorka. Zbog izrazito niskih brzina vrtnje zadanih za aluminiy primjećena je naljepak aluminiya na oštrici svrdla.



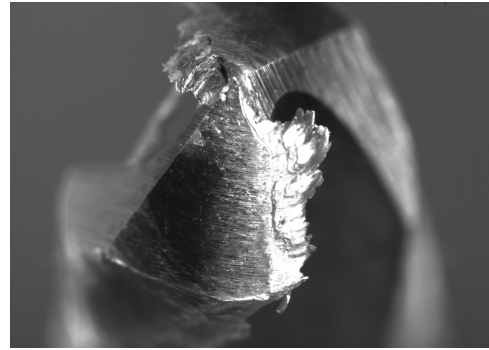
(a) Početno stanje oštrice



(b) Stanje oštrice nakon 54 bušenja



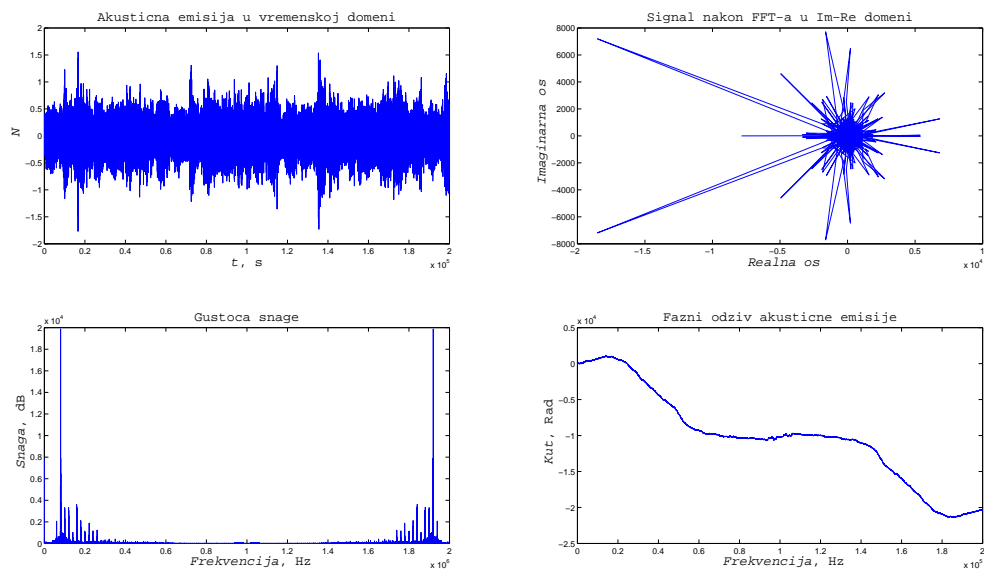
(c) Stanje oštrice nakon 216 bušenja



(d) Stanje oštrice nakon 378 bušenja

Slika 20: Prikaz oštrice svrdla

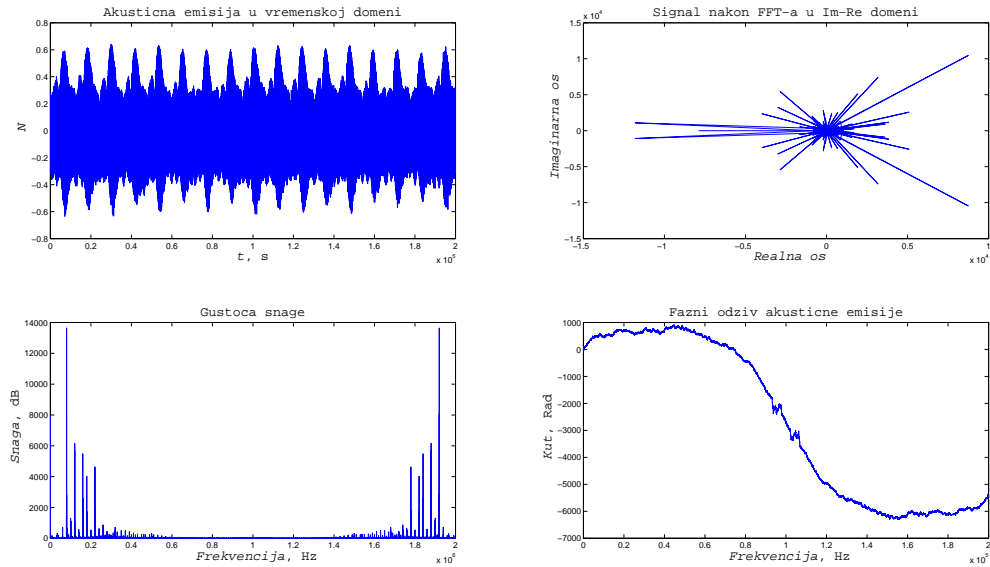
Primjećeno je nadalje da se mjerenja stabiliziraju nakon nekoliko mjerenja. Prilikom tih mjerenja vrijednosti postaju nekonstantne i gube ikakav smisao. Pretpostavka autora je da se tijekom tih mjerenja događaju plastične deformacije lijepljenja tokom bušenja.



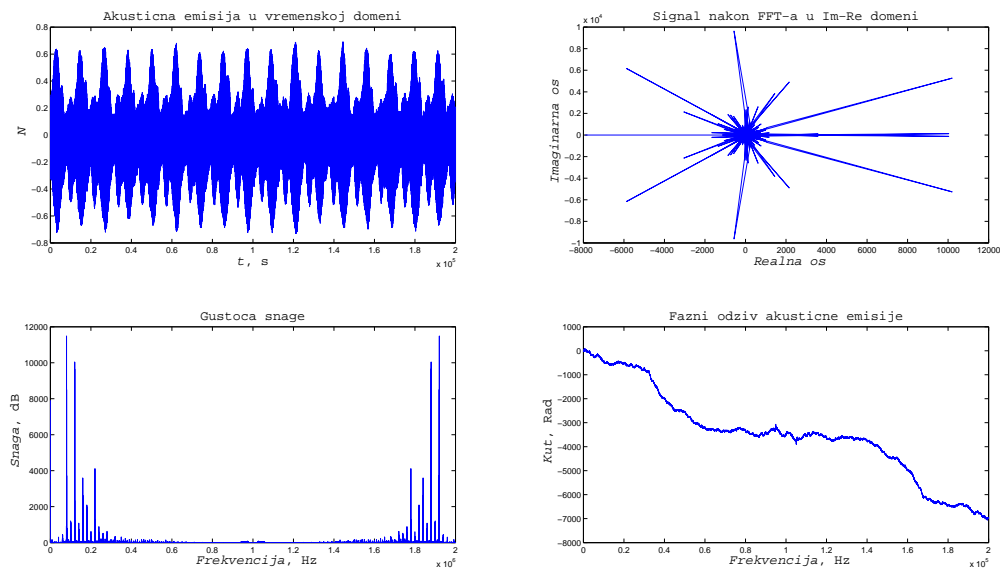
Slika 21: Prikaz plastičnih deformacija

## 4.1.2 Signali nastali bušenjem čelika

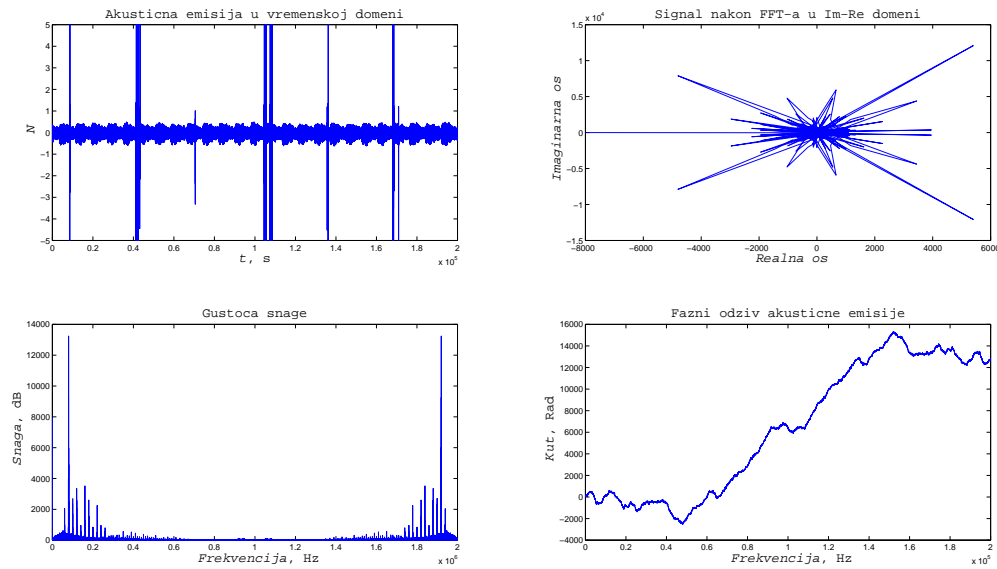
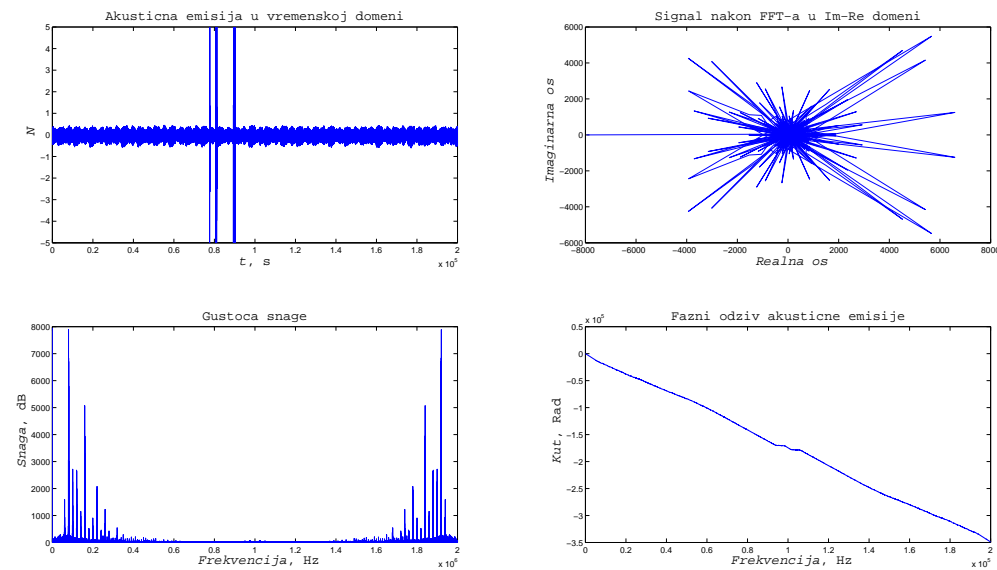
U nastavku se prikazuju referentni podaci dobiveni snimanjem akustične emisije prilikom bušenja čelika.



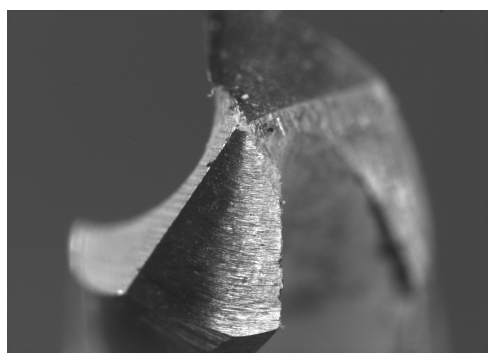
Slika 22: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$



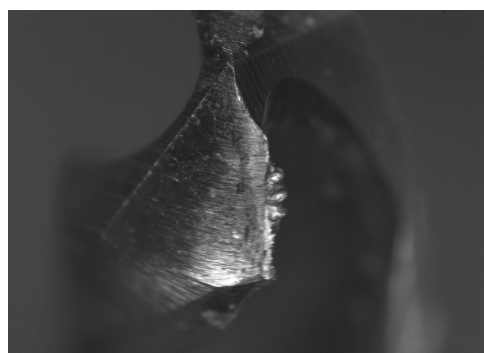
Slika 23: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

Slika 24: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 25: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ 

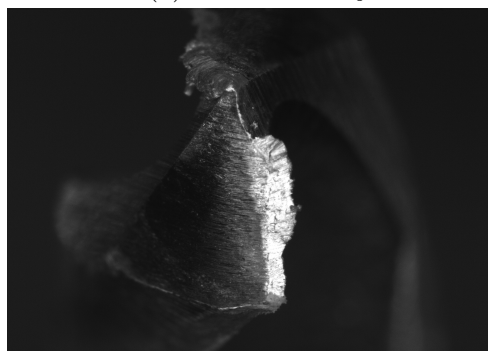
Kod čelika se u slučaju akustične emisije primjećuju dvije stvari. Snimanja su kvalitetnija za režime koji su u području preporučenome za bušenje čelika ( $20 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ ). Dok kod viših režima vrtnje je prisutna izrazit stupanj iskrivljenosti signala. Pretpostavka autora je da se pri višim brzinama, zbog većih sila koje se razvijaju na oštrici, troši i odlijepljuje naljepak od aluminijske. Slijedeće slike to zorno prikazuju:



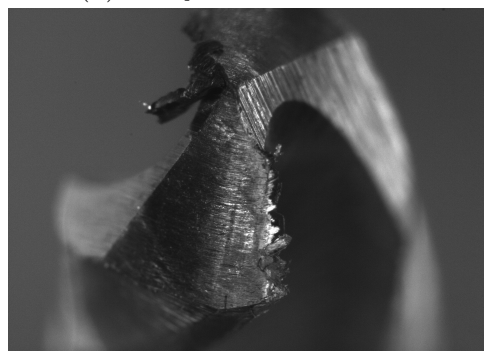
(a) Početno stanje oštrice



(b) Stanje oštrice nakon 108 bušenja



(c) Stanje oštrice nakon 270 bušenja

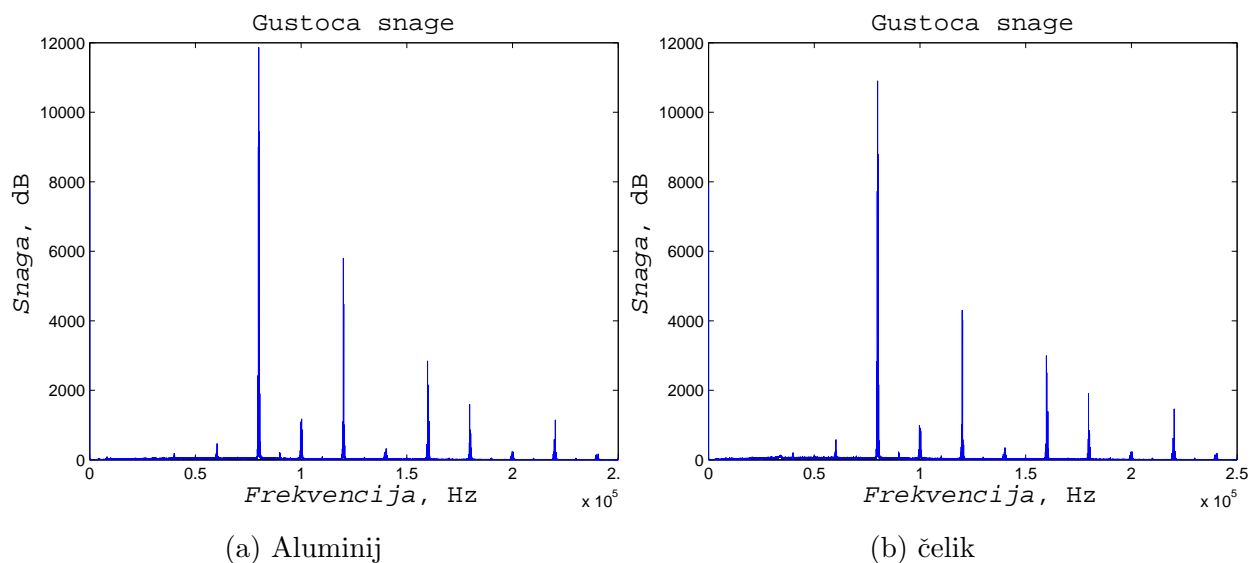


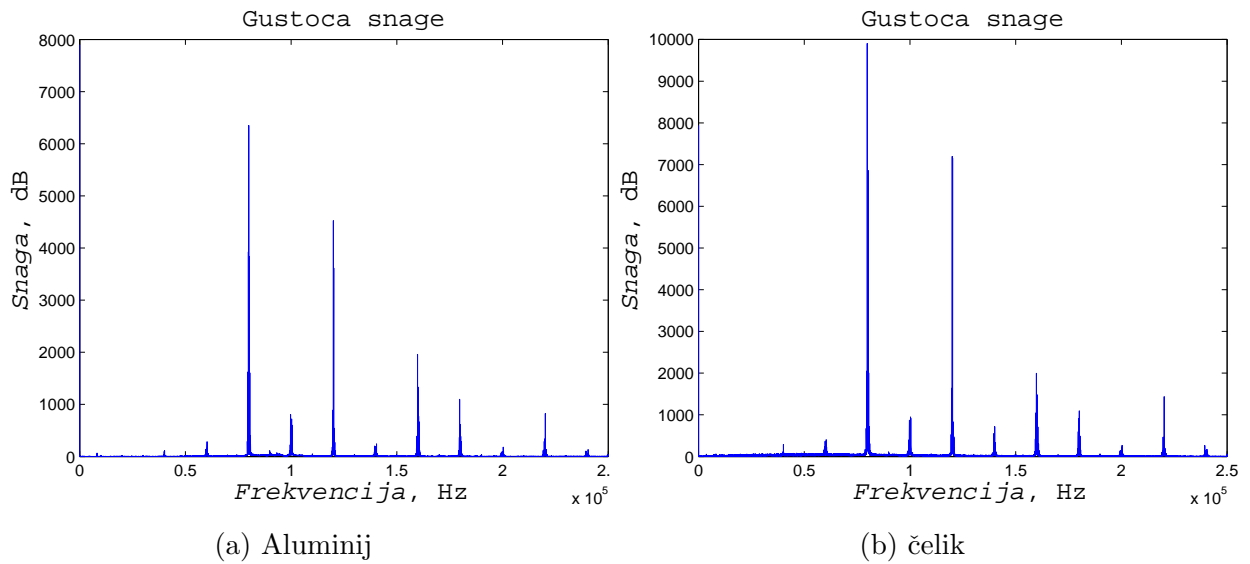
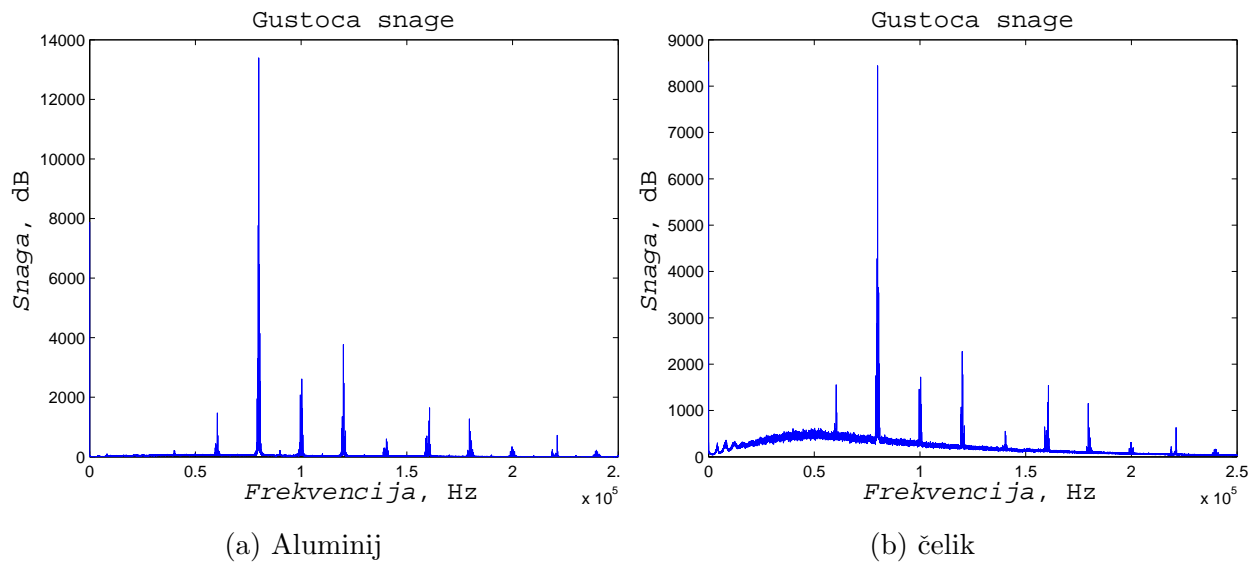
(d) Stanje oštrice nakon 432 bušenja

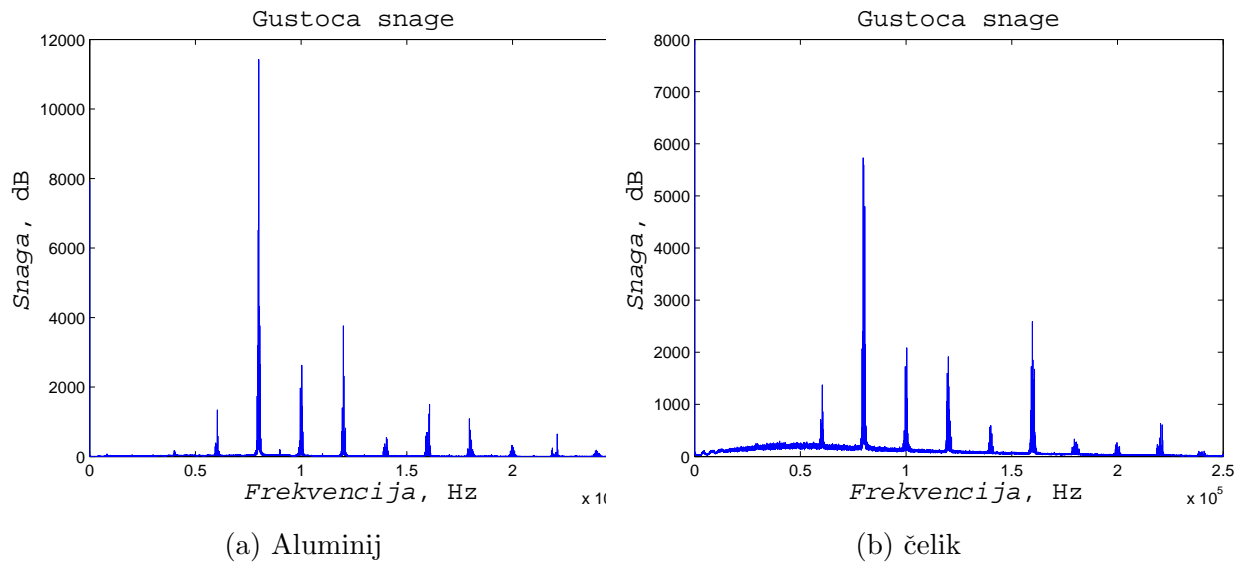
Slika 26: Prikaz oštrice svrdla

### 4.1.3 Usporedba obrađenih signala čelika i aluminija

Srednja vrijednost svih frekvencijskih karakteristika gustoće snage su filtrirane niskopropusnim Kaiser filterom s graničnom frekvencijom od 5,05 kHz za uklanjanje šuma. Filter je 12.-og reda s faktorom  $\beta = 3.4$ . Od tako filtriranog signala, prva komponenta snage (na frekvenciji 0 Hz) izuzeta iz daljnje analize, tj. analiza spektra je započela od 20 Hz.

Slika 27: Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminija  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

Slika 28: Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminija  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 29: Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminija  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

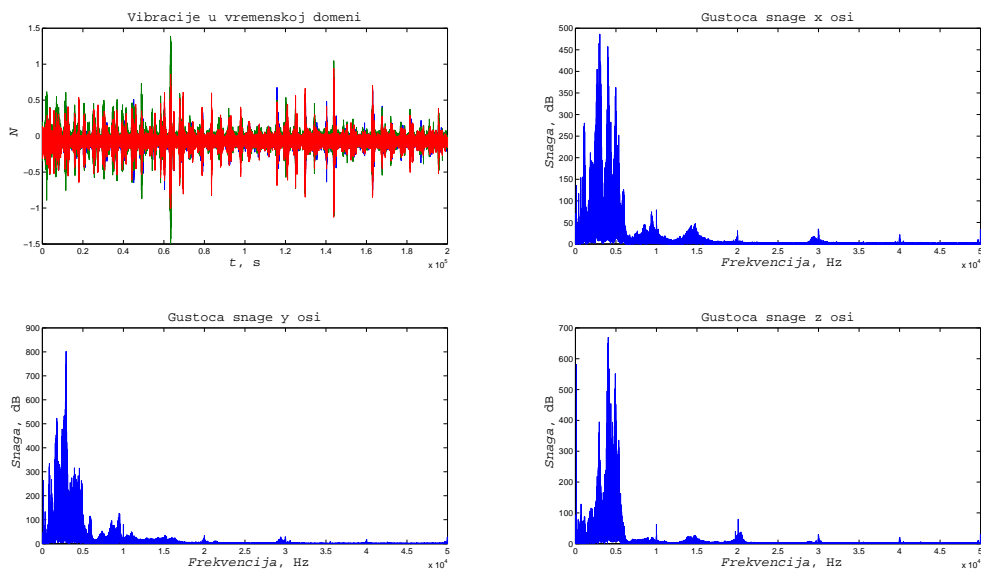


Slika 30: Prikaz različitosti akustične emisije čelika i aluminija  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

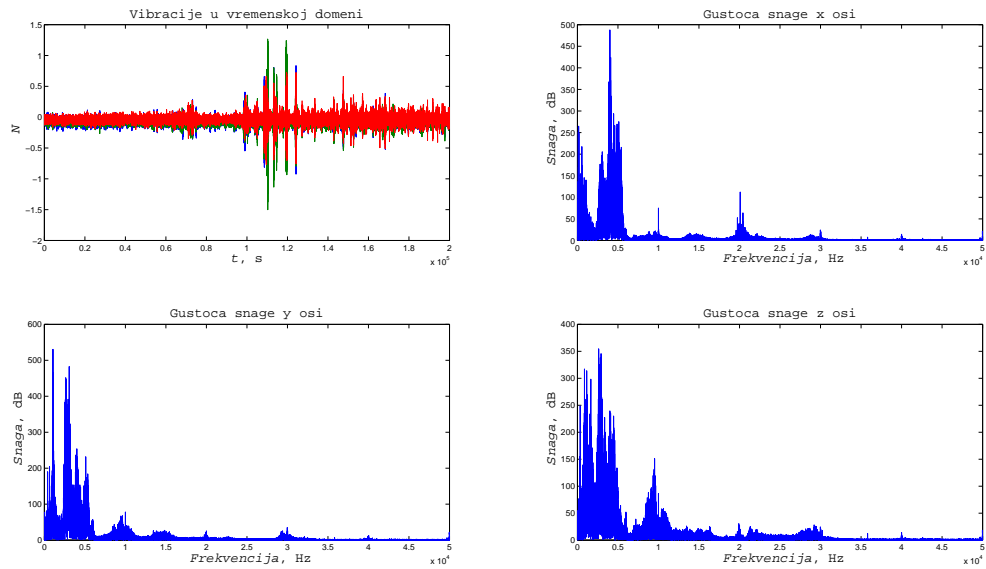
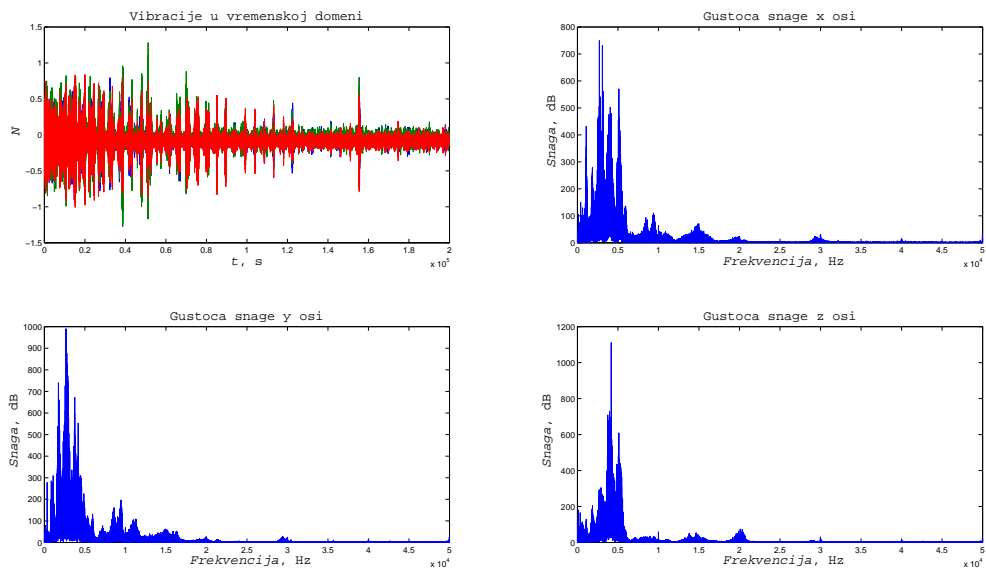
## 4.2 Mjerenja vibracija

### 4.2.1 Signali nastali bušenjem aluminija

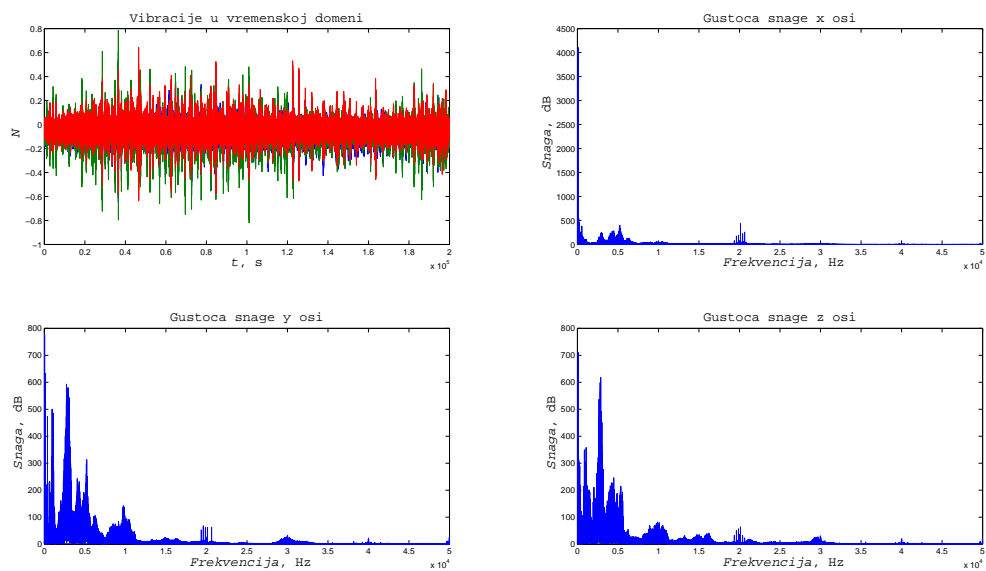
U nastavku se prikazuju referentni podaci dobiveni snimanjem vibracija prilikom bušenja aluminija.



Slika 31: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

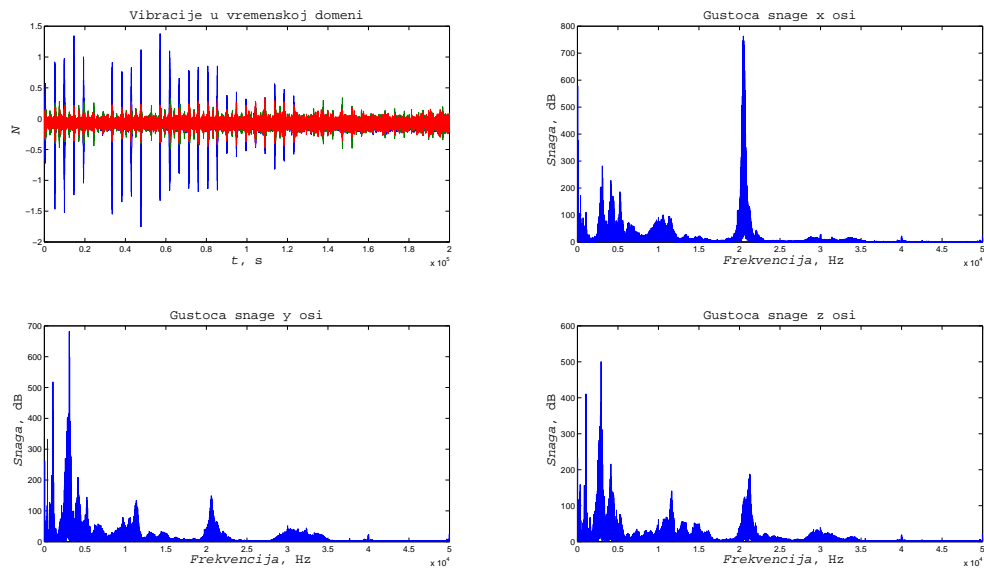
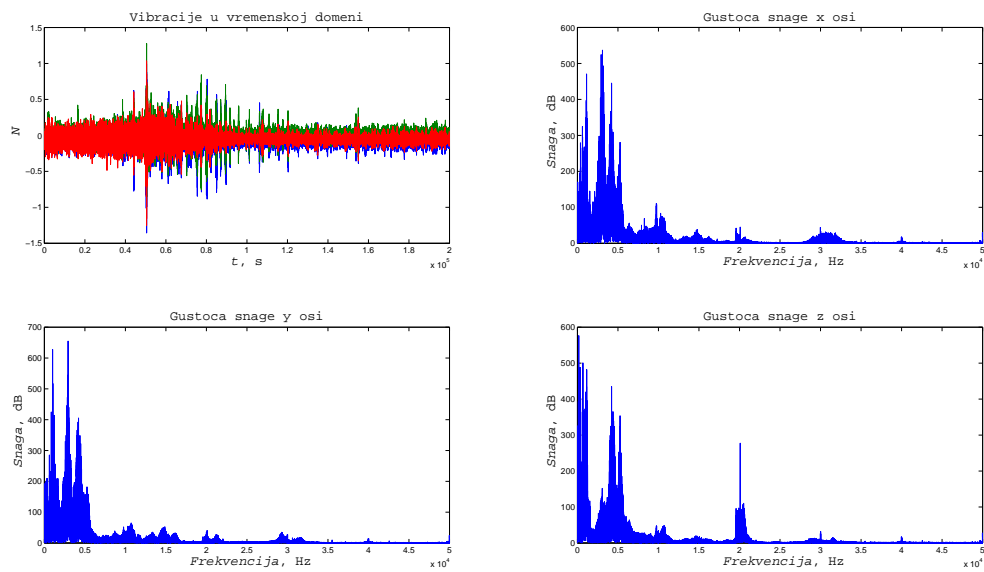
Slika 32: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 33: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

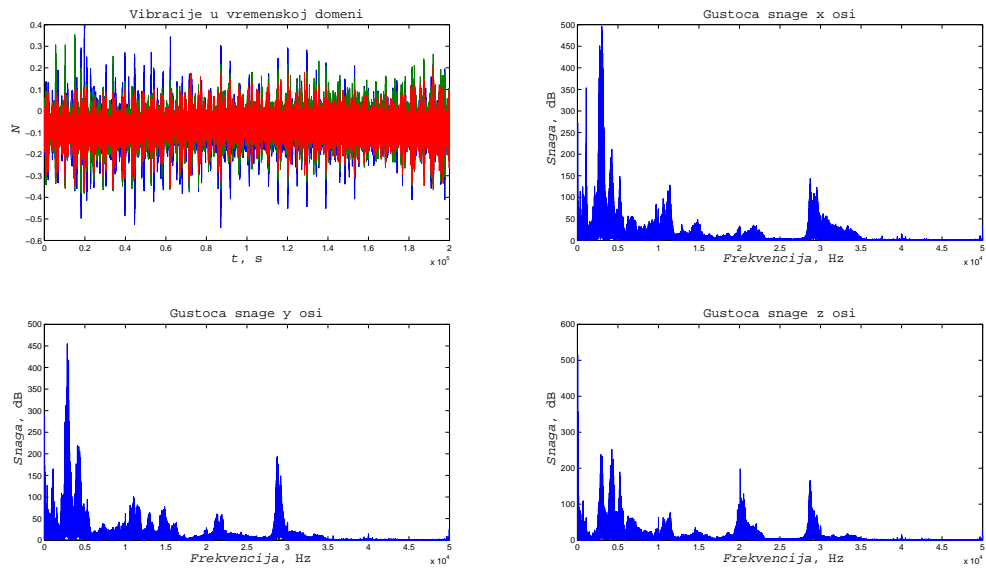
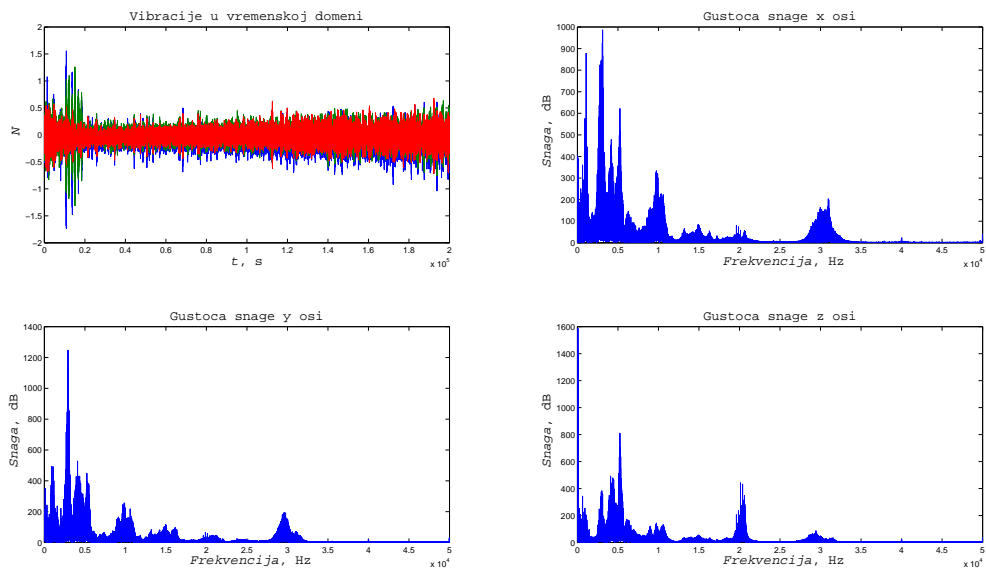




Slika 34: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

## 4.2.2 Signali nastali bušenjem čelika

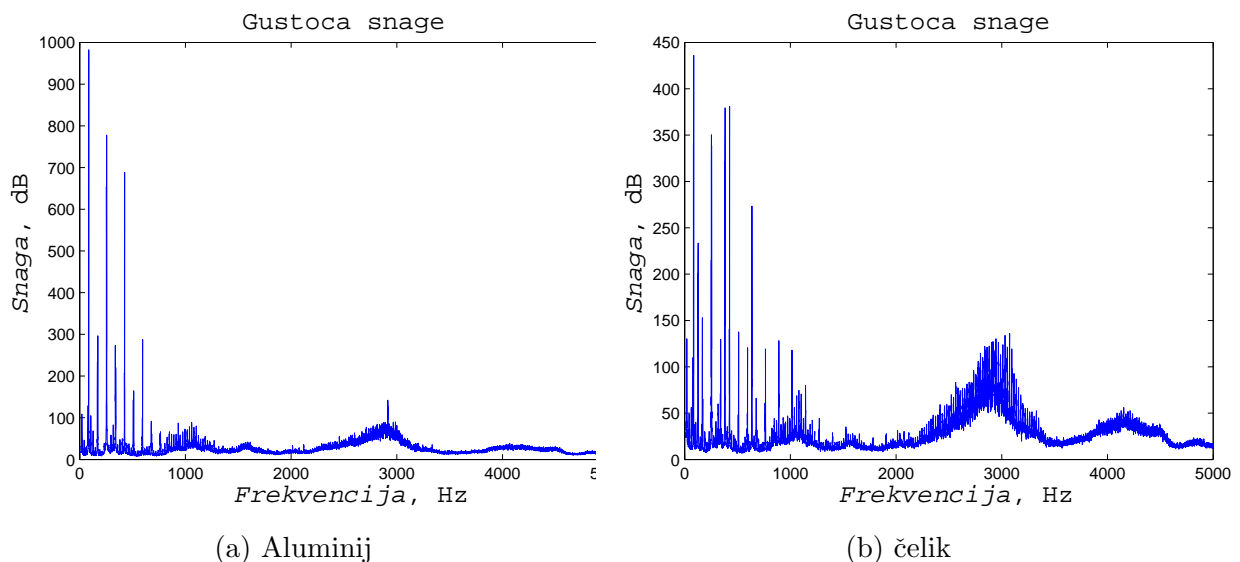
Slika 35: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 36: Karakterističan prikaz mjerenja  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

Slika 37: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 38: Karakterističan prikaz mjerenja  $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

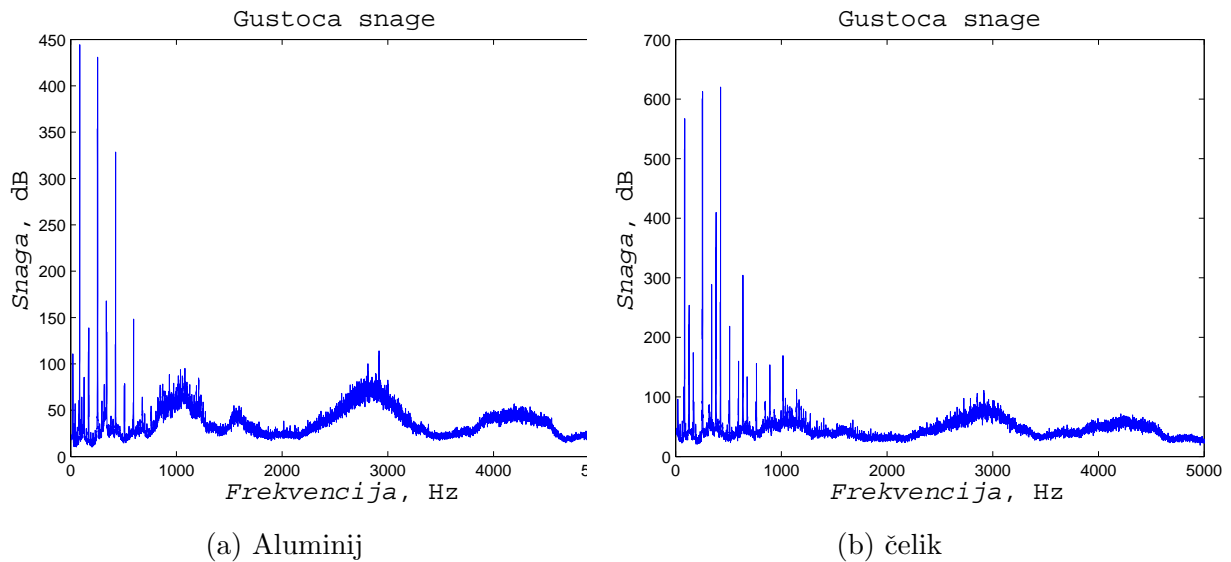
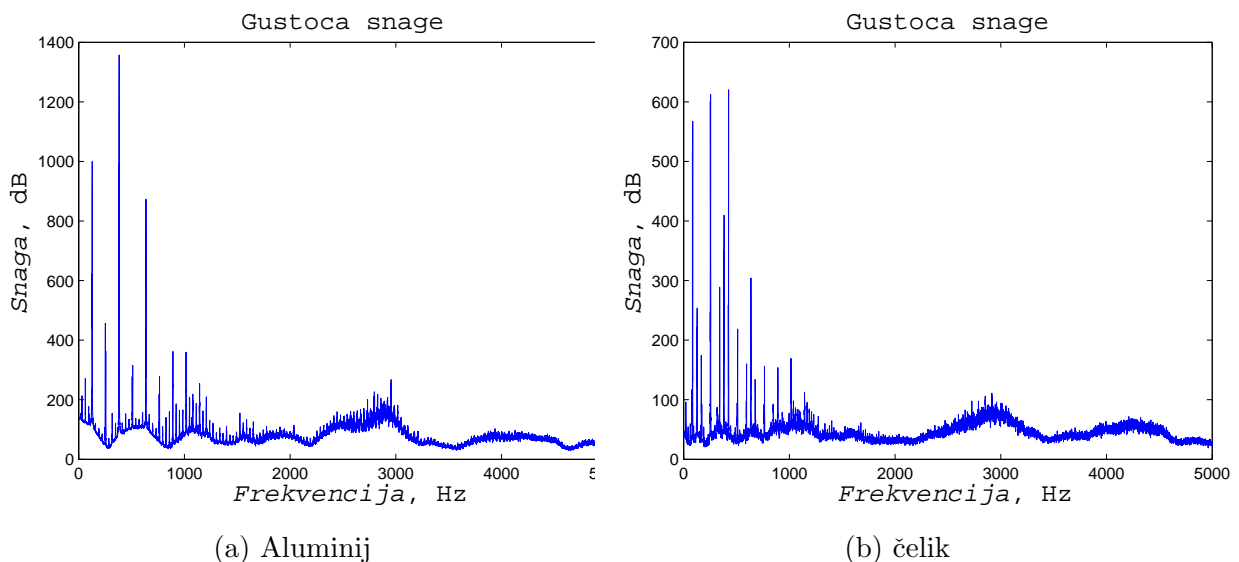
### 4.2.3 Usporedba signala čelika i aluminija

Srednja vrijednost svih frekvencijskih karakteristika gustoće snage su filtrirane niskopropusnim Kaiser filterom s graničnom frekvencijom od 5,05 kHz. Nešto viša vrijednost granične frekvencije uzeta je kako ne bi došlo di djelomičnog prigušenja signala na gornjoj frekvenciji mjernog područja senzora. Od tako filtriranog signala, prva komponenta snage (na frekvenciji 0 Hz) izuzeta iz daljnje analize, tj. analiza spektra je započela od  $20\text{Hz}$ .

U mjerenjima vibracija smo mjerili sve tri osi vibracija ali se ispostavilo da su ne postoji velika razlika u mjerenjima osiju. Zbog toga će se obraditi samo z komponenta vibracija. Srednja vrijednost svih frekvencijskih karakteristika gustoće snage su filtrirane i prikazane na sljedećim slikama:



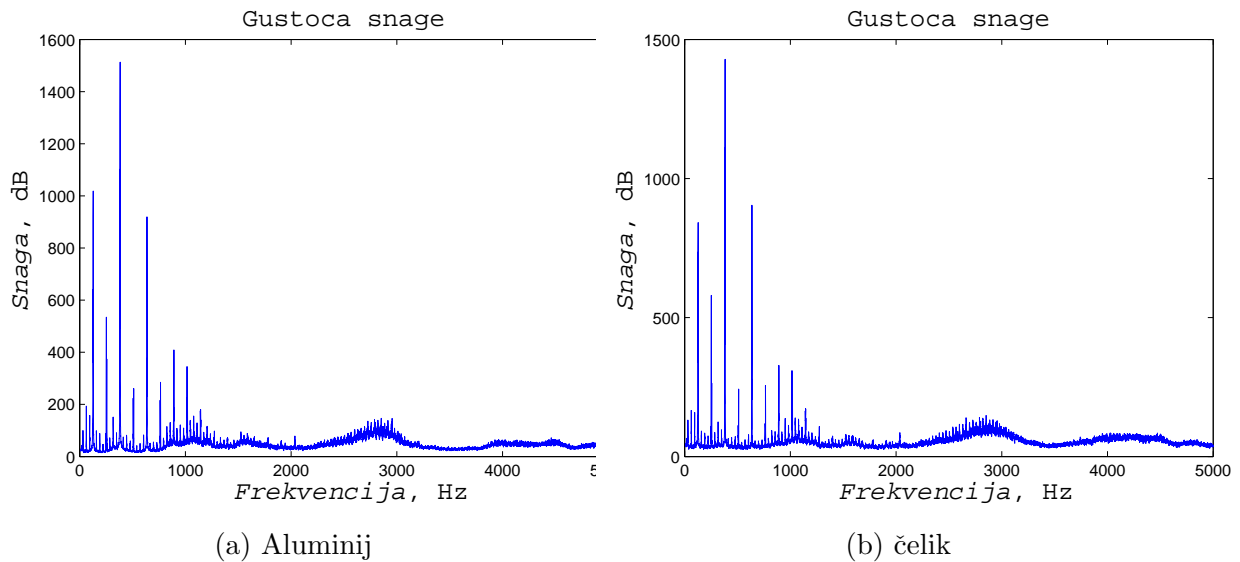
Slika 39: Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $20 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

Slika 40: Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $20 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  –  $9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ Slika 41: Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $30 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  –  $4 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ 

### 4.3 Analiza dobivenih rezultata

#### 4.3.1 Akustične emisija materijala

Pri analizi podataka dobijenih od akustične emisije jasno je vidljiva razlika u području snage amplitude. Vrijednosti amplitude su kod aluminija više nego kod čelika, u svim režimima osim u režimu  $20 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  i  $9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$ . No iz frekvencijskih karakteristika nije nažalost moguće dobiti ikakvu karakterističnu značajku koja bi se mogla vezati uz vrstu materijala. Ponajviše je problem izbor brzine vrtnje i posmaka. Pošto svaki materijal ima preporučene vrijednosti tih parametara događaju se neželjene posljedice neadekvatnog bušenja. Kod aluminija je najbolji primjer nalijepak koji je izrazito utjecao na rezultate mjerenja. Nadalje treba uzeti u obzir da nepravilno odvajanje čestica često dovodi do



Slika 42: Prikaz različitosti vibracija čelika i aluminija- $30 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 9 \frac{\text{mm}}{\text{okr}}$

povećanja temperature, zbog čega dolazi i do promjene u mikrostrukturi materijala i do iskrivljavanja akustične emisije. Vidljiva je razlika u frekvencijskoj karakteristici ali je ona očita pri naknadnom uspoređivanju. Po autoru je akustika previše "hirovita" te iz prikupljenih mjerenja nažalost nije evidentna karakteristika koja bi se mogla isključivo povezati s materijalom koji se buši.

#### 4.3.2 Vibracije materijala

Kod vibracija je primjećena isto slična fazna karakteristika s razlikom da čelik kao tvrdi materijal ima neravnomjerniju frekvencijsku karakteristiku. Ta karakteristika se može u općenitom smislu iskoristiti za određivanje materijala koji se buši.

Jednadžba za određivanje koeficijenta materijala:

$$k_m = \frac{P_m}{P} \quad (15)$$

Gdje  $P_m$  označava površinu ispod frekvencijske karakteristike izgladen medijan filterom. Koeficijentom tih površina mogla bi se uspostaviti varijabla koja može efikasno i brzo odrediti materijal koji se buši. Negativna strana ovog načina jest što koeficijenti variraju za različite režime bušenja.

## 5 Zaključak

Cilj ovog diplomskog je bio odrediti izvedivost sustava da se preko akustične emisije i vibracija efikasno odredi karakteristike materijala koji se buši. Za akustičnu emisiju se u sklopu ovog diplomskog nije uspjelo dokazati da je moguće na temelju same emisije odrediti tvrdoću materijala. Karakteristika koja bi jednoznačno ovisila o tvrdoći nije uočena ali je uočena mogućnost praćenja tvrdoće tijekom bušenja. Kad i se hipotetski bušio materijal nepoznatog unutrašnjeg sastava, mogla bi se pratiti gradacija tvrdoće te bi se s time mogla izbjeći oštećenja svrdla.

Vibracije imaju veću primjenjivost na ovu problematiku. Prednost vibracija u odnosu na akustičnu emisiju jest u neprekinutom toku informacija. Pri bušenju materijala u čvrstom kontaktu su podloga (materijal), svrdlo i preko njega mjerni instrument za vibracije. Jedino mjesto gdje može doći do smetnje u prikupljanju informacija jest na oštrici svrdla. Dok kod akustične emisije sam materijal može iskrivljavati početni signal, te je veća vjerojatnost da sama prašina mijenja emisiju koja dolazi na mjerni instrument.

I kod akustične emisije i kod vibracija je negativan aspekt povezanosti režima bušenja s mjerenim signalima. Za kvalitetnu realnu primjenu treba se ispitati mnogo uzoraka za kalibraciju režima koji se koristi s referentnim vrijenostima koje se dobijaju za kvalitetne rezultate.

Metoda istražene u diplomskom radu imaju potencijal za primjenu u rudarskoj industriji te bi se trebalo provesti ispitivanje na mnogo većem uzorku za razvoj primjenjivog rješenja.

## 6 Dodatak

U prilogu su kodovi matlab-a za obradu podataka i analiziranje istih.



```
lista=('D5d0S1-F0d04-Vc20d0-MJ0-K11-ae.txt');
defka='D5d0S1-F0d0%d-Vc%dd0-MJ%d-K11-ae.txt';
defka1='D5d0S2-F0d0%d-Vc%dd0-MJ%d-K12-ae.txt';
naziv='20_04_Al_S1_%d.jpg';
naziv2='20_04_Al_S2_%d.jpg';
x=1;
Fs=2000000;
Aa=strsplit(lista, '-');
A = regexp(Aa{1}, '\d*', 'Match');
a=A{3};
a = str2num(a);
B = regexp(Aa{2}, '\d*', 'Match');
b=B{2};
b = str2num(b);
C = regexp(Aa{3}, '\d*', 'Match');
c=C{1};
c = str2num(c);
D = regexp(Aa{4}, '\d*', 'Match');
d=D{1};
d = str2num(d);
for d=0:25
    (b==4) && (c==20)
        lista=sprintf(defka,b,c,d);
        Ae=dlmread(lista);
        X=length(Ae);
        AE=fft(Ae);
        F=((0:1/X:1-1/X)*Fs).';
        magnitudeAE=abs(AE);
        phaseAE=unwrap(angle(AE));
        subplot(2,2,1)
        plot(Ae, 'erasemode', 'background')
        title('Akusticna emisija u vremenskoj domeni')
        subplot(2,2,2)
        plot(AE, 'erasemode', 'background')
        title('Signal nakon FFT-a u Im-Re domeni'),
        subplot(2,2,3)
        plot(F,magnitudeAE, 'erasemode', 'background')
        title('Gustoca snage')
        xlabel('Frekvencija (Hz)')
        subplot(2,2,4)
        plot(phaseAE, 'erasemode', 'background')
        title('Fazni odziv akusticne emisije')
        ylabel('Radijani')
        xlabel('Frekvencija (Hz)')
```

```
drawnow
ispis=sprintf(naziv,d);
hgexport(gcf, ispis, hgexport('factorystyle'), 'Format', ↵
'jpeg');

end
for d=0:26
    (b==4) && (c==20)
    e=22;
    lista=sprintf(defka1,b,c,d);
    Ae=dlmread(lista);
    X=length(Ae);
    AE=fft(Ae);
    F=((0:1/X:1-1/X)*Fs).';
    magnitudeAE=abs(AE);
    phaseAE=unwrap(angle(AE));
    subplot(2,2,1)
    plot(Ae, 'erasemode', 'background')
    title('Akusticna emisija u vremenskoj domeni')
    subplot(2,2,2)
    plot(AE, 'erasemode', 'background')
    title('Signal nakon FFT-a u Im-Re domeni'),
    subplot(2,2,3)
    plot(F, magnitudeAE, 'erasemode', 'background')
    title('Gustoca snage')
    xlabel('Frekvencija (Hz)')
    subplot(2,2,4)
    plot(phaseAE, 'erasemode', 'background')
    title('Fazni odziv akusticne emisije')
    ylabel('Radijani')
    xlabel('Frekvencija (Hz)')
    drawnow
    ispis=sprintf(naziv2,d);
    hgexport(gcf, ispis, hgexport('factorystyle'), 'Format', ↵
'jpeg');

end
```

```
lista=('D5d0S1-F0d09-Vc30d0-MJ0-K21-vib.txt');
defka='D5d0S1-F0d0%d-Vc%dd0-MJ%d-K21-vib.txt';
defka1='D5d0S2-F0d0%d-Vc%dd0-MJ%d-K22-vib.txt';
naziv='30_09_Fe_S1_%d.jpg';
naziv2='30_09_Fe_S2_%d.jpg';
x=1;
Fs=100000;
Aa=strsplit(lista, '-');
A = regexp(Aa{1}, '\d*', 'Match');
a=A{3};
a = str2num(a);
B = regexp(Aa{2}, '\d*', 'Match');
b=B{2};
b = str2num(b);
C = regexp(Aa{3}, '\d*', 'Match');
c=C{1};
c = str2num(c);
D = regexp(Aa{4}, '\d*', 'Match');
d=D{1};
M=cell(1,15);
N=cell(1,26);
d = str2num(d);
    for d=0:15
        (b==9) && (c==30)
            lista=sprintf(defka,b,c,d);
            Ae=dlmread(lista);
            Ae=filter(Kaiser_diplomski_Vibracije,Ae);
            X=length(Ae);
            AE=fft(Ae);
            F=((0:1/X:1-1/X)*Fs).';
            magnitudeAE=abs(AE);
            phaseAE=unwrap(angle(AE));
            M=mean(magnitudeAE);
            apsolut=abs(Ae);
            if sum(apsolut(:,1))>sum(apsolut(:,2)) && sum(apsolut(:,1))>sum(apsolut(:,3)) && sum(apsolut(:,1))>sum(apsolut(:,4));
                magnitudeAE(:,1)=[];
                phaseAE(:,1)=[];
                AE(:,1)=[];
                Ae(:,1)=[];
            elseif sum(apsolut(:,2))>sum(apsolut(:,1)) && sum(apsolut(:,2))>sum(apsolut(:,3)) && sum(apsolut(:,2))>sum(apsolut(:,4));
                magnitudeAE(:,2)=[];
                phaseAE(:,2)=[];
```

```

        AE(:,2)=[];
        Ae(:,2)=[];
        elseif sum(absolut(:,3))>sum(absolut(:,2)) && sum(absolut
(:,3))>sum(absolut(:,1)) && sum(absolut(:,3))>sum(absolut(:,4));
            magnitudeAE(:,3)=[];
            phaseAE(:,3)=[];
            AE(:,3)=[];
            Ae(:,3)=[];
        elseif sum(absolut(:,4))>sum(absolut(:,2)) && sum(absolut
(:,4))>sum(absolut(:,3)) && sum(absolut(:,4))>sum(absolut(:,1));
            magnitudeAE(:,4)=[];
            phaseAE(:,4)=[];
            AE(:,4)=[];
            Ae(:,4)=[];
        end
        posa=magnitudeAE(:,3);
        M1{d+1}=posa;

end
for d=0:26
    (b==9) && (c==30)
    e=22;
    clear('magnitudeAE')
    lista=sprintf(defka1,b,c,d);
    Ae=dlmread(lista);
    Ae=filter(Kaiser_diplomski_Vibracijje,Ae);
    X=length(Ae);
    AE=fft(Ae);
    F=((0:1/X:1-1/X)*Fs).';
    magnitudeAE=abs(AE);
    phaseAE=unwrap(angle(AE));
    M=mean(magnitudeAE);
    absolut=abs(Ae);
    if sum(absolut(:,1))>sum(absolut(:,2)) && sum(absolut(:,
1))>sum(absolut(:,3)) && sum(absolut(:,1))>sum(absolut(:,4));
        magnitudeAE(:,1)=[];
        phaseAE(:,1)=[];
        AE(:,1)=[];
        Ae(:,1)=[];
    elseif sum(absolut(:,2))>sum(absolut(:,1)) && sum(absolut
(:,2))>sum(absolut(:,3)) && sum(absolut(:,2))>sum(absolut(:,4));
        magnitudeAE(:,2)=[];
        phaseAE(:,2)=[];

```

```
        AE(:,2)=[];
        Ae(:,2)=[];
        elseif sum(absolut(:,3))>sum(absolut(:,2)) && sum(absolut
(:,3))>sum(absolut(:,1)) && sum(absolut(:,3))>sum(absolut(:,4));
            magnitudeAE(:,3)=[];
            phaseAE(:,3)=[];
            AE(:,3)=[];
            Ae(:,3)=[];
            elseif sum(absolut(:,4))>sum(absolut(:,2)) && sum(absolut
(:,4))>sum(absolut(:,3)) && sum(absolut(:,4))>sum(absolut(:,1));
                magnitudeAE(:,4)=[];
                phaseAE(:,4)=[];
                AE(:,4)=[];
                Ae(:,4)=[];
            end
            magnitudeAE=magnitudeAE(:,3);
            N{d+1}=magnitudeAE;
        end
M=cell2mat(M1);
N=cell2mat(N);
Matrica={M,N};
prosjek=cell2mat(Matrica);
Prosjek=mean(prosjek,2);
idx =(20:10000);
plot(F(idx),Prosjek(idx),'erasemode','background')
title('Gustoca snage')
xlabel('Frekvencija (Hz)')
drawnow
hgexport(gcf,'Prosjek_celika_vibracije_4.jpg', hgexport
('factorystyle'),'Format','jpeg');
Prosjek=Prosjek(20:10000,:);
Odabir= medfilt1(Prosjek,20);
aaa=trapz(Prosjek);
bbb=trapz(Odabir);
Gama=bbb/aaa
```

## Literatura

- [1] A.L. Quadro, J.R.T. Branco, "Analysis of the acoustic emission during drilling test", Surface and Coating Technology, Vol. 94-95, no. 1-3, pp. 691 695, 1997.
- [2] <https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Uvod25.11.2015>.
- [3] <https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Uvod25.11.2015>.
- [4] <http://store.curiousinventor.com/guides/drillspeed,22.11.2015>.
- [5] <http://www.dspguide.com/ch3/3.htm>, 15.11.2015.
- [6] Tomislav Staroveški, Modeliranje trošenja medicinskog svrdla, Zagreb,2013.
- [7] <http://www.mistrasgroup.com/products/technologies/acousticemission.aspx,10.11.2015>.
- [8] <http://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf,24.11.2015>.
- [9] Oppenheim and Schafer-Discrete Time Signal Processing-Prentice Hall of India (2008),16.11.2015.
- [10] Oppenheim and Schafer-Discrete Time Signal Processing-Prentice Hall of India (2008),18.11.2015.
- [11] <http://www.mikroe.com/chapters/view/72/chapter-2-fir-filters/>,01.11.2015.
- [12] <http://www.mikroe.com/chapters/view/72/chapter-2-fir-filters/>,05.11.2015.
- [13] filtercutofffrequency, William Rose 20080515
- [14] Modeliranje trošenja medicinskog svrdla, Zagreb,2013.
- [15] Tomislav Staroveški, Modeliranje trošenja medicinskog svrdla, Zagreb,2013.