

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNIČKI FAKULTET  
„MIHAJLO PUPIN“  
ZRENJANIN**



**ISTRAŽIVANJE UTICAJA  
PROMENE VRSTE MATERIJALA  
NA FREKVENCIJSKI SPEKTAR  
MUZIČKIH INSTRUMENATA**

**Doktorska disertacija**

**Doktorant:  
Mr Sonja Krstić**

**Zrenjanin, juni 2009.**

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNIČKI FAKULTET  
„MIHAJLO PUPIN“  
ZRENJANIN**



**ISTRAŽIVANJE UTICAJA  
PROMENE VRSTE MATERIJALA  
NA FREKVENCIJSKI SPEKTAR  
MUZIČKIH INSTRUMENATA**

**Doktorska disertacija**

**Mentor:**  
**Dr Vjekoslav Sajfert**  
**Redovni profesor**

**Doktorant:**  
**Mr Sonja Krstić**

**Zrenjanin, juni 2009.**

**UNIVERZITET U NOVOM SADU**  
**Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin**

<b>KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA</b>
--

***Redni broj:***

RB

***Identifikacioni broj:***

IBR

***Tip dokumentacije:***

TD

***Tip zapisa:***

TP

Tekstualni štampani materijal

***Vrsta rada:***

VR

Doktorska disertacija

***Autor:***

AU

Mr Sonja Krstić

***Mentor:***

MK

Prof. Dr Vjekoslav Sajfert

***Naslov rada:***

NR

Istraživanje uticaja promene vrste materijala na frekvencijski spektar muzičkih instrumenata

***Jezik publikacije:***

JP

Srpski

***Jezik izvoda:***

JI

Srpski

<b>Zemlja publikacije:</b> ZP	Republika Srbija
<b>Uže geografsko područje:</b> UGP	Srbija
<b>Godina:</b> GO	2009.
<b>Izdavač:</b> IZ	Autorski reprint
<b>Mesto i adresa:</b> MS	Beograd, Maglajska 32
<b>Fizički opis rada:</b> FO	Broj strana – 630 Broj poglavlja – 11 Broj citata – 0 Broj slika – 845 Broj tabela – 139 Broj grafikona – 0 Broj priloga – 39
<b>Naučna oblast:</b> NO	Akustika
<b>Naučna disciplina:</b> DI	Muzička akustika
<b>Predmetna odrednica – ključne reči:</b> PO/UDK	frula, frekvencijski spektar, nivo zvuka, zvučni pritisak
<b>Čuva se:</b> ČU	U biblioteci tehničkog fakulteta „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
<b>Važna napomena:</b> VN	nema

***Izvod:***

IZ

Disertacija obuhvata opis osnovnih pojmova i metoda merenja iz oblasti muzičke akustike, detaljnije razrađeni teorijski model ponašanja zvučnog talasa u cevi frule i detaljnu analizu frekvencijskog spektra tonova odsviranih na jednodelnim i dvodelnim frulama, na glavi dvodelnih frula i tonova dobijenih upotrebom različitih vrsta prigušivača.

***Datum odbrane:***

DO

***Članovi komisije:***

KO

(Naučni stepen, ime i prezime, zvanje, fakultet)

***Predsednik:***

Dr Momčilo Bjelica, red. prof.  
Tehnički fakultet „M. Pupin“,  
Zrenjanin

***Član:***

Dr Ilija Ćosić, red. prof.  
FTN, Novi Sad

***Član:***

Dr Ljubomir Lukić, vanred. prof.  
Mašinski fakultet, Kraljevo

***Član:***

Dr Branko Škorić, vanred. prof.  
FTN, Novi Sad

***Mentor:***

Dr Vjekoslav Sajfert, red. prof.  
Tehnički fakultet „M. Pupin“,  
Zrenjanin

**UNIVERSITY OF NOVI SAD**  
**Technical Faculty „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin**

<b>KEY WORDS DOCUMENTATION</b>
--------------------------------

*Accession number:*

ANO

*Identification number:*

INO

*Document type:*

DT

*Type of record:*

TR

Textual printed material

*Contents code:*

CC

Ph.D. dissertation

*Author:*

AU

M.A. Sonja Krstić

*Menthor:*

MN

Ph.D. Vjekoslav Sajfert, full professor

*Title:*

T

Research of material changing influence on frequency spectrum of musical instruments

*Language of text:*

LT

Serbian

*Language of abstract:*

LS

Serbian

<b>Country of publication:</b> CP	Republic of Serbia
<b>Locality of publication:</b> LP	Serbia
<b>Year of publication:</b> GO	2009.
<b>Publisher:</b> PB	The author's reprint
<b>Place of publications:</b> PL	Belgrade, 32 Maglajska st.
<b>Physical description:</b> FD	Number of pages – 630 Number of chapters – 11 Number of quations – 0 Number of pictures – 845 Number of charts – 139 Number of graphs – 0 Number of appendixes – 39
<b>Scientific field:</b> SF	Technical acoustics
<b>Scientific discipline:</b> SD	Musical acoustics
<b>Subject/Key words:</b> CX/UC	flute, frequency spectrum, sound level, sound pressure
<b>Holding data:</b> HD	The library of the Technical Faculty „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
<b>Note:</b> N	none

***Abstract:***

The dissertation presents a description of the Musical acoustics basic facts and measuring methods , a profoundly developed theoretical model of behaviour of sound waves in sheperd's flute, and very detailed frequency spectrum analysis of musical tones played on simple Serbian flute, two-piece Serbian flute, tones played only on the had of the flute and musical tones played on the two-piece Serbian flute using different types of mutes.

***Accepted by the Scientific Board on:***  
ASB

***Defended on:***  
DE

***Dissertation defend panel:***  
DB

(Degree, name, surname, title, faculty)

***Chairman:***

Ph.D. Momčilo Bjelica, full professor of the Technical Faculty „M. Pupin“, Zrenjanin

***Member:***

Ph.D. Ilija Ćosić, full professor of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

***Member:***

Ph.D. Ljubomir Lukić, associate professor of the Mechanical Engineering Faculty, Kraljevo

***Member:***

Ph.D. Branko Škorić, associate professor of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad



***Menthor:***

Ph.D. Vjekoslav Sajfert, full  
professor of the Technical Faculty  
„M. Pupin“, Zrenjanin

## SADRŽAJ:

Uvod .....	
1. Fizika zvuka. Opšti pojmovi fizičke, fiziološke i muzičke akustike .....	1
2. Fizika muzike. Osnovni pojmovi o muzičkim skalama i frekvencijskim odnosima tonova .....	55
3. Podela muzičkih instrumenata prema načinu dobijanja zvuka	
3.1 Žičani muzički instrumenti (KORDOFONI) .....	70
3.2 Duvački muzički instrumenti (AEROFONI) .....	114
3.3 Udarački muzički instrumenti (IDIOFONI, LAMELOFONI, MEMBRANOFONI, muzički instrumenti sa nedefinisanom visinom tona) .....	159
4. Muzički instrument FRULA.....	206
5. Teorijski model drvenih duvačkih instrumenata .....	224
6. Merenja, obrada rezultata merenja i analiza .....	258
7. Diskusija (uporedna analiza merenja urađenih na fruli sa merenjima urađenim na drugim duvačkim instrumentima, opisanim u literaturi).	347
Zaključak .....	350
Literatura .....	354
Prilozi .....	369

## UVOD

Akustika je oblast fizike koja se bavi zvukom u najširem smislu. Postoji još od antičkih vremena. Muzička akustika je oblast akustike koja se bavi zvukom muzičkih instrumenata. Proučava način nastajanja zvuka na svim najrazličitijim mogućim muzičkim instrumentima, emisiju tog zvuka u okolinu. Muzička akustika izučava same tonove različitih lestvica koje su formirane tokom istorije civilizacije, sa aspekta frekvencije tonova pojedinačno, međusobnog odnosa frekvencija tonova koji grade intervale, akorde, lestvice. Sa aspekta dinamike tonova pojedinačno ili međusobno, ako instrumenti sviraju zajedno.

Muzička akustika proučava frekvencijske spektre muzičkih instrumenata, analizira osnovne i više harmonike, njihovu međusobnu frekvencijsku i amplitudnu zavisnost. Izučava talasne oblike tonova muzičkih instrumenata i njihove karakteristične specifičnosti.

Za neke od ovih oblasti istraživanja postoje usavršene metode, a za mnoge ne. Jedna od najpoznatijih metoda je Kladni metoda kojom se mogu vizuelno odrediti stepeni vibracija zategnutih membrana. Za neka druga istraživanja primenjuje se metoda hologramskog interferograma za određivanje vibracija instrumenta ( za zvona, na primer).

U literaturi su najviše proučavani muzički instrumenti iz sastava simfonijskog orkestra. Oni su najpoznatiji široj populaciji stanovništva, konstrukciono su dovedeni do savršenstva i važno je da budu potpuno analizirani. Folklorni muzički instrumenti i muzički instrumenti ranih epoha su nekako zapostavljeni. Kada se pogleda pregled knjiga iz ove oblasti, u njima se piše o instrumentima simfonijskog orkestra, klaviru, gitari, udaračkim instrumentima koji se povremeno koriste na koncertima, i crkvenim zvonima. O folklornim instrumentima i instrumentima ranih epoha, sa aspekta muzičke akustike, nema mnogo literature. Postoje pojedinačni članci objavljeni u časopisima o orguljama. U poslednjih nekoliko godina su Australijanci objavili nekoliko članaka o svom instrumentu diđeriduu. Iz nekog razloga o tome se ili ne piše mnogo, ili se ne proučava mnogo.

Frula je narodni instrument srpskog naroda. Rasprostranjena je u svim krajevima Srbije i okoline. Datira od davnina. Etnomuzikolozi su je proučavali, zapazili su specifičnosti karakteristične za lokalitet. Sa aspekta muzičke akustike frula nije mnogo proučavana. U ovom radu je urađena detaljna analiza frekvencijskih spektara različitih vrsta frule, u zavisnosti od konstrukcije samog instrumenta, vrste materijala od kojeg je izrađena, veličine unutrašnjeg prečnika cevi, načina pobude muzičkog instrumenta. Dalja istraživanja su u toku. Proučavaće se direkcione karakteristike frule, mogućnost da se frula standardizuje kao instrument, barem kao regionalna karakteristika. Mogućnost da preraste u orkestarski muzički instrument (za sada se na fruli najčešće svira solistički).

Želja je da se za frulu čuje i izvan granica Srbije, da se zainteresuju ljudi nekih drugih naroda da taj instrument slušaju ili čak nauče da sviraju. To ne zvuči tako neobično. Ima mnogo muzičkih instrumenata drugih naroda koji su nama ovde izuzetno zanimljivi. Svi volimo da slušamo različite bubnjeve iz Afrike, Azije, Južne Amerike. To znači da se granice mogu pomeriti. Potrebno je da prvo mi sami promenimo svoj stav prema tom malom i lepom muzičkom instrumentu i da se mi sami upoznamo s njim.

U ovom radu, pored uvoda i zaključka, postoji sedam poglavlja: poglavlje u kome su date opšte činjenice o fizici zvuka, poglavlje u kome su date opšte činjenice o fizici muzike, poglavlje u kome su date opšte karakteristike muzičkih instrumenata sa aspekta muzičke akustike, poglavlje u kome su navedene osnovne karakteristike frule, poglavlje u kome je objašnjen teorijski model duvačkih muzičkih instrumenata, poglavlje u kojem je izložen eksperimentalni deo ovog rada i poglavlje u kome je urađena uporedna analiza rezultata merenja izloženih u ovom radu i srodnih primera iz literature. Izvedeni stavovi u vezi sa svim činjenicama koje su u ovom radu razmotrene dati su u zaključku.

U prvom poglavlju izložene su osnovne definicije pojmova fizičke i fiziološke akustike. Objašnjen je: talas, zvuk, čulo sluha, longitudinalni itransverzalni talasi, frekvencija i amplituda zvučnog talasa, brzina prostiranja zvučnog talasa. Objašnjene su osnovne karakteristike zvuka ( visina, boja, intenzitet), jedinica dB, nivo zvuka, frekvencijski odziv čujnog opsega, izofonske krive. Pokazano je kako se sve talas ponaša tokom prostiranja kroz sredinu, interferencija talasa. Pokazana je veza između rezonancije, stojećih talasa i muzičkih instrumenata. Objašnjen je frekvencijski spektar, način stvaranja zvuka na pojedinim muzičkim instrumentima, tonovi, udari, kritični opseg, konsonancija i disonancija, maskiranje zvuka.

U drugom poglavlju su izložene osnovne činjenice o različitim muzičkim skalama, nastalim još u antičko vreme, i načinu na koje su one osmišljene, intervalima i akordima. Napravljena je komparacija između najvažnijih muzičkih lestvica i navedeno je na koji način se one danas upotrebljavaju.

U trećem poglavlju su navedene opšte karakteristike muzičkih instrumenata. Urađena je podela muzičkih instrumenata prema načinu dobijanja zvuka i detaljnije su objašnjeni žičani, duvački i udarački muzički instrumenti (kordofoni, aerofoni, idiofoni), sa svim preklapanjima i izuzecima koji među njima, u okviru te podele, postoje.

U četvrtom poglavlju su izložene, do sada poznate, i neke nove činjenice o muzičkom instrumentu frula koji je bio tema ovog rada. Navedene su karakteristike izgleda, konstrukcija, vrste materijala od koga se prave, način izrade, način obrade. Izložene su osnovne karakteristike zvuka frule, načini na koje se može uticati na boju tona.

U petom poglavlju je izložen teorijski model drvenih duvačkih muzičkih instrumenata sa vazдушnim jezičkom (u koje spada frula).

U šestom poglavlju je izložen eksperimentalni deo ovog rada. Obrazložena su sva urađena merenja i dobijeni rezultati.

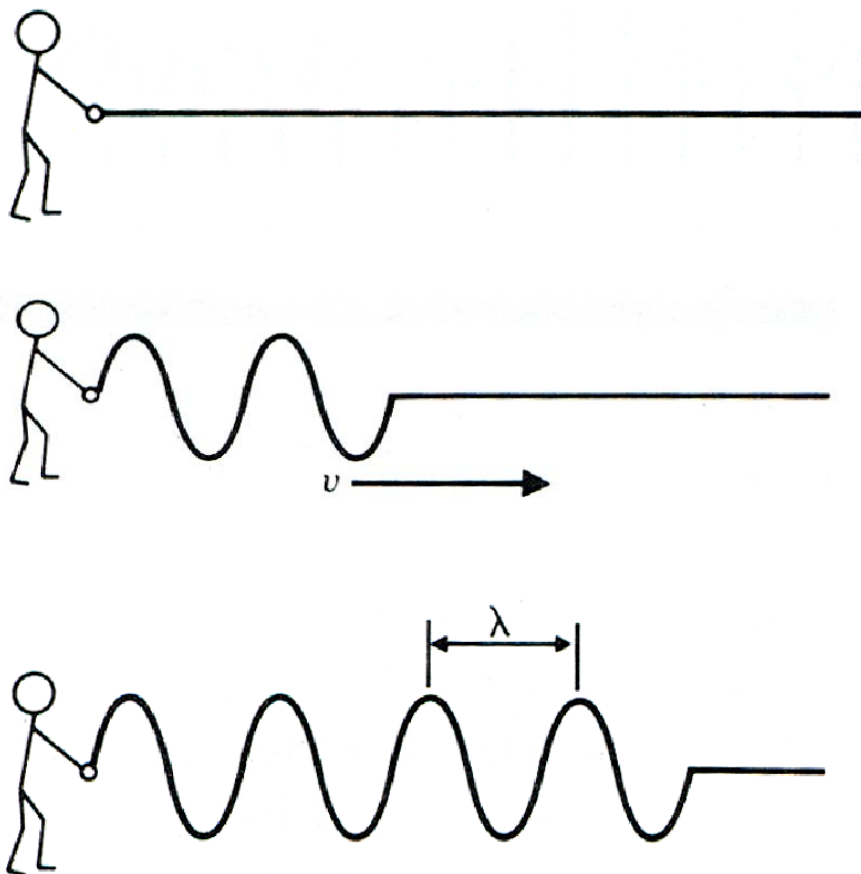
U sedmom poglavlju su upoređeni dobijeni rezultati merenja koja su urađena sa frulom sa merenjima sa drugim duvačkim instrumentima koja su opisana u literaturi.

U zaključku je svedeno sve što je urađeno u ovom radu, sa osvrtom na mogućnost da se veliki i mali naponi malih i velikih ljudi u Srbiji nekako udruže u jedinstveni pokušaj da sve ono što je lepo i značajno od kulturne baštine i tradicije srpskog naroda sistematizuju, objedine, detaljno prouče, standardizuju i učine svaki mogući napor da svo to blago, koje nije malo, ostane da traje.

# 1. FIZIKA ZVUKA

## 1.1 TALASI I ZVUK

Energija se može prenositi na različite načine. Talas je jedan od načina prenosa energije. Dva čoveka mogu proizvesti talas ako uhvate kanap svaki za po jedan kraj i onda jedan od njih zamahne kanapom gore – dole.



*Slika 1.1.1: Kako se može napraviti talas kanapom*

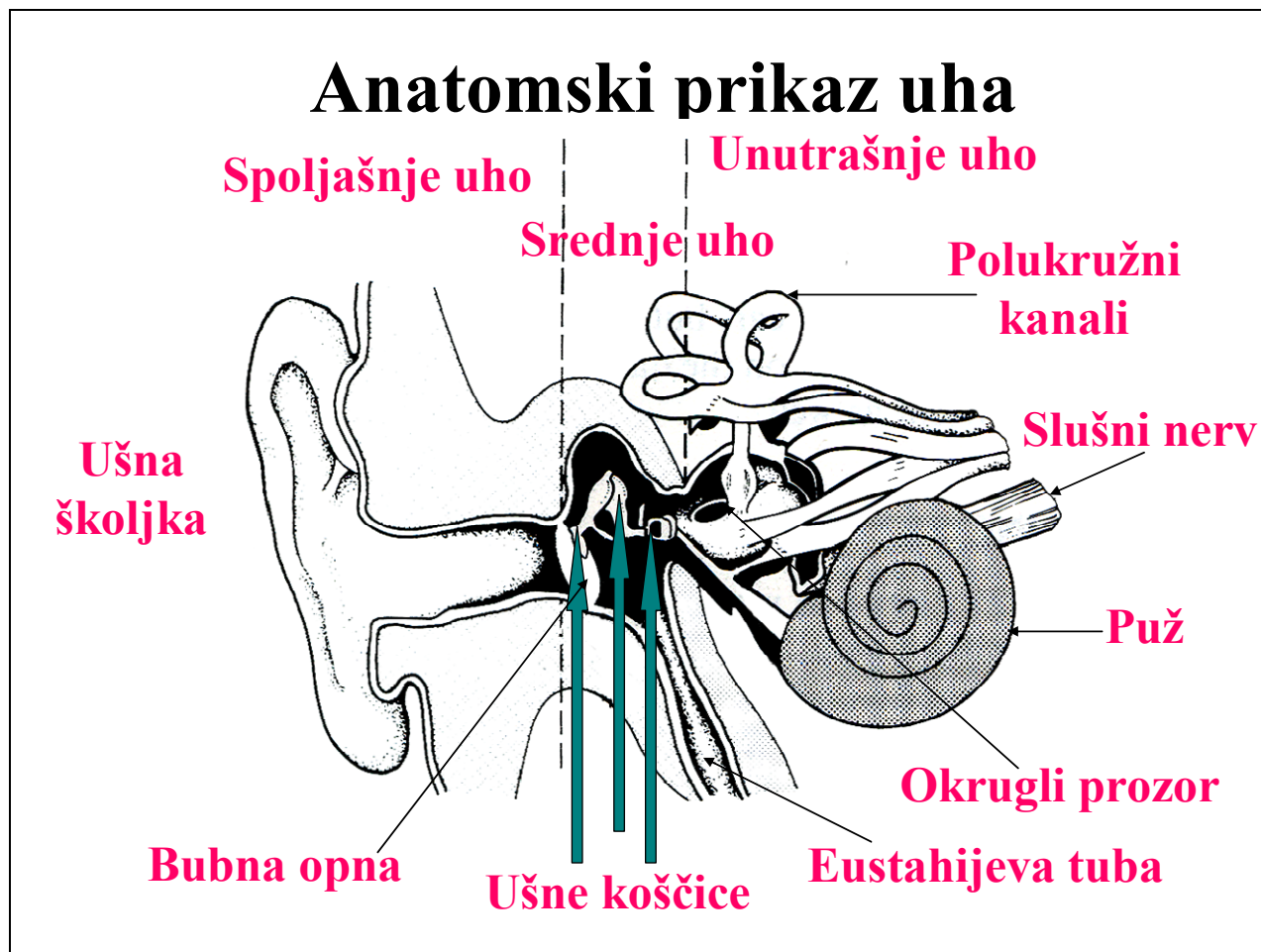
Iako se kanap pokreće, na ovaj način se zapravo energija prenosi sa jednog na drugi kraj kanapa.

Energija talasa proporcionalna je kvadratu amplitude samog talasa.

### 1.1.1 TALASI, ZVUK I ČULO SLUHA

Posebna vrsta talasa je zvučni talas. Zvučni talas ima malu energiju u odnosu na neke druge vrste talasa (vodene talase, cunami talase, ...) i mi možemo da ga detektujemo samo zahvaljujući veoma složenom sistemu čula sluha. Čulo sluha čoveka je veoma osetljivo na zvučne talase. **Prag čujnosti** iznosi  $\sim 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . To je izuzetno mala energija. Pri tom zvuku bubna opna čovečijeg uha osciluje manjom amplitudom od prečnika atoma vodonika [48].

Ono što je zanimljivo kod čula sluha je da čovek čuje logaritamski. To znači da možemo čuti zvučni talas koji ima energiju hiljadu, milion, čak milijardu puta veću od praga čujnosti [46] .

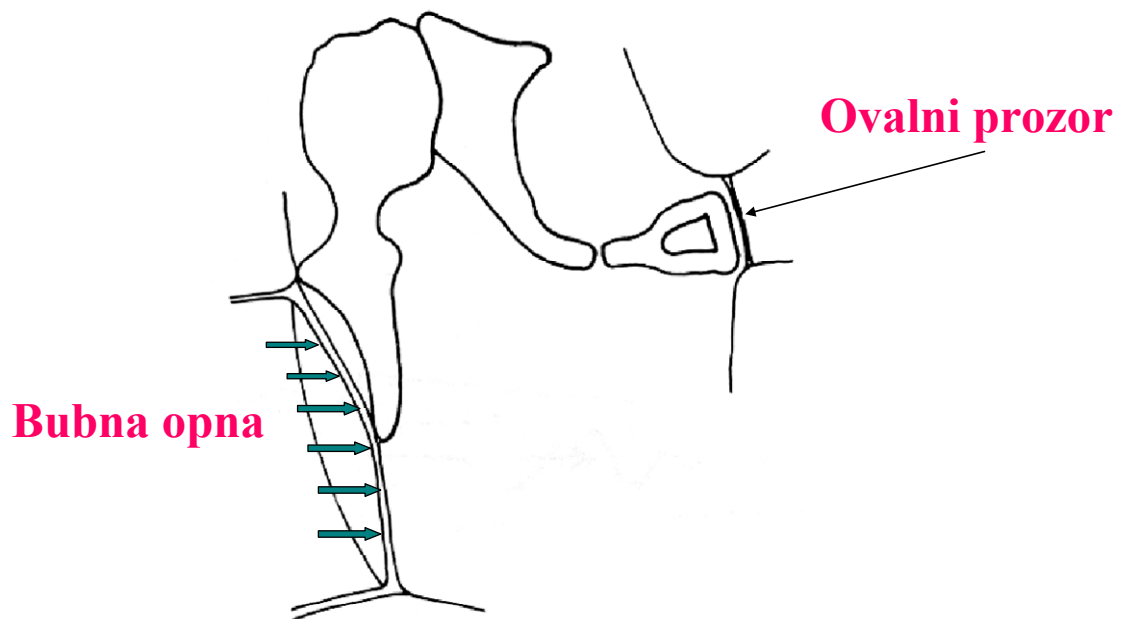


*Slika 1.1.1.1: Anatomski prikaz uha*

Neobična karakteristika čula sluha je da čovek ima sposobnost da razlikuje pojedine zvuke iz mnoštva zvukova koji se istovremeno proizvode u istom prostoru. Na primer: na koncertu simfonijskog orkestra u sali Kolarca slušalac može da izdvoji zvuk klarineta, oboe, violine iako sviraju istovremeno. Može čak izuzetno dobro da izdvoji zvuk kašljanja drugog posetioca u neposrednoj blizini ( jer mu to smeta). Kada slušate neki CD, veoma lako se koncentrišete da izdvojite glas pevača iako muzički instrumenti sviraju zajedno sa njim [48] .

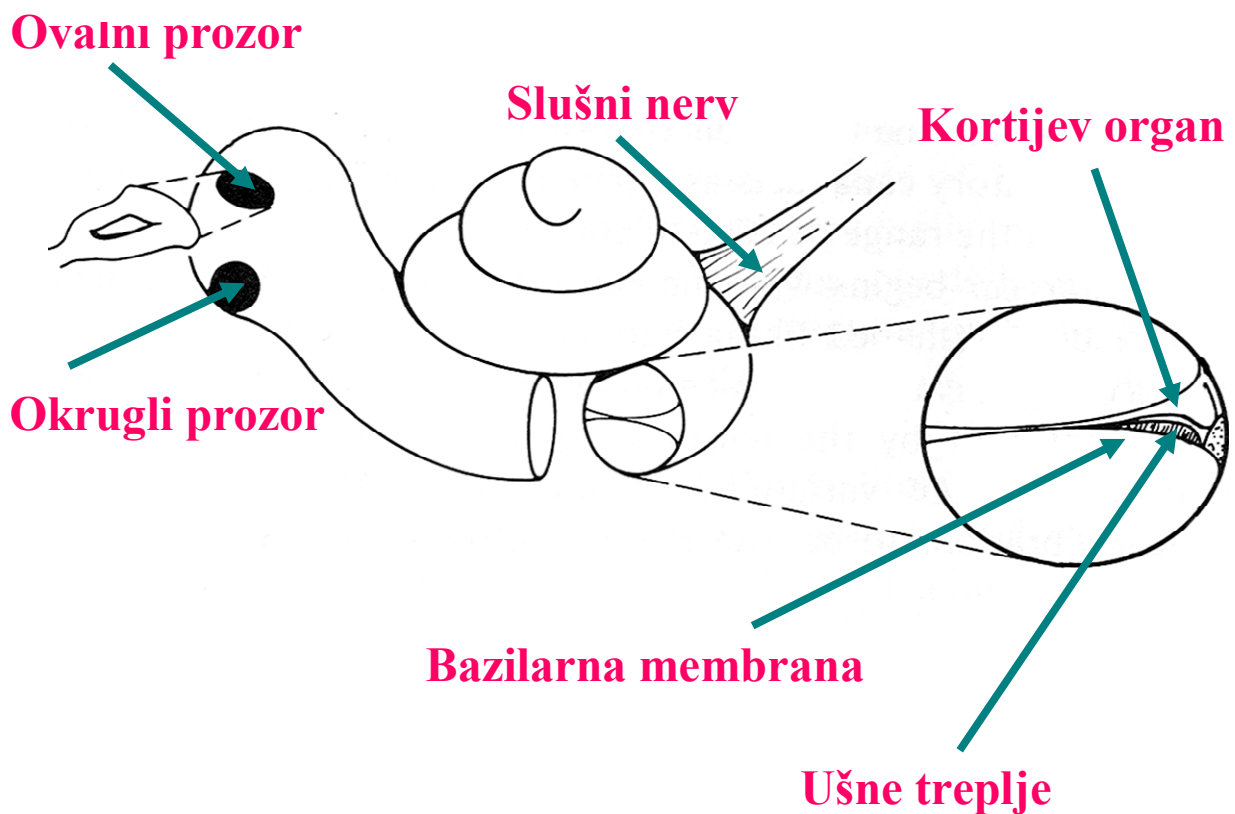
Na slikama je dat prikaz spoljašnjeg, srednjeg i unutrašnjeg uha čoveka.

## Pojačanje zvuka ušnim koščicama



Slika 1.1.1.2: Pojačanje zvuka ušnim koščicama

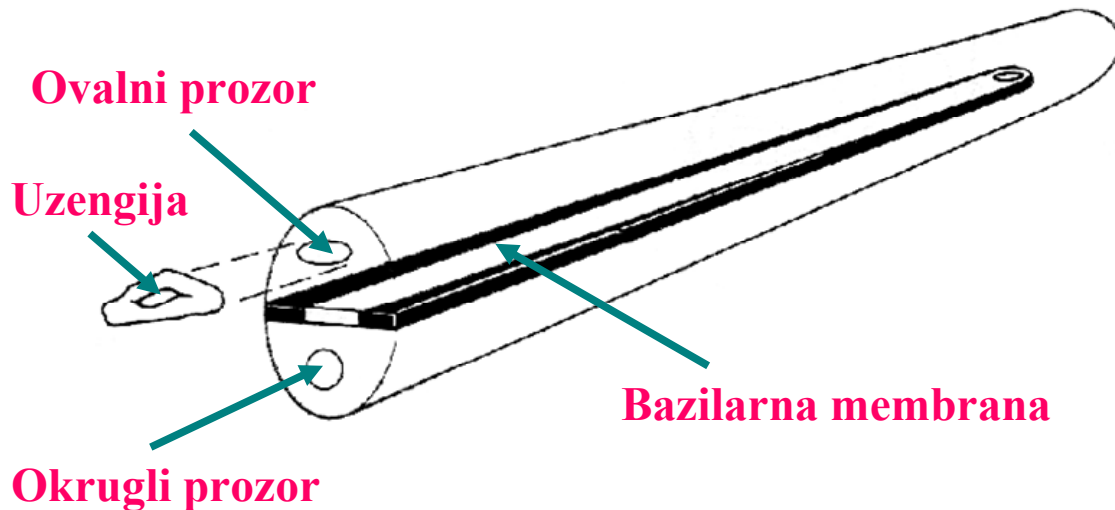
## Unutrašnje uho



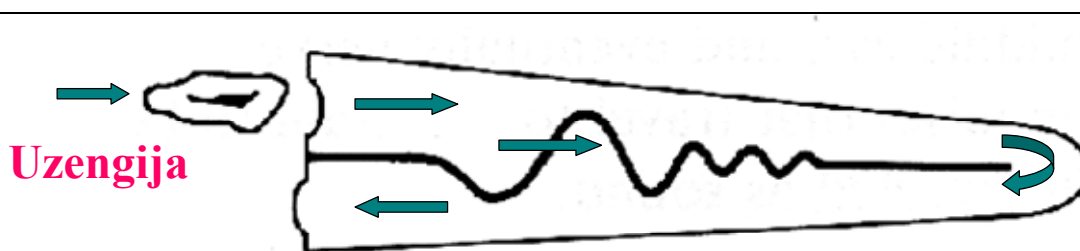
Slika 1.1.1.3: Unutrašnje uho



# Puž



Slika 1.1.1.4: Šematski prikaz odmotanog puža



**Kada uzensija pritisne ovalni prozor, impuls se prostire kroz puževu tečnost do okruglog prozora i prouzrokuje talasanje u bazilarnoj membrani.**

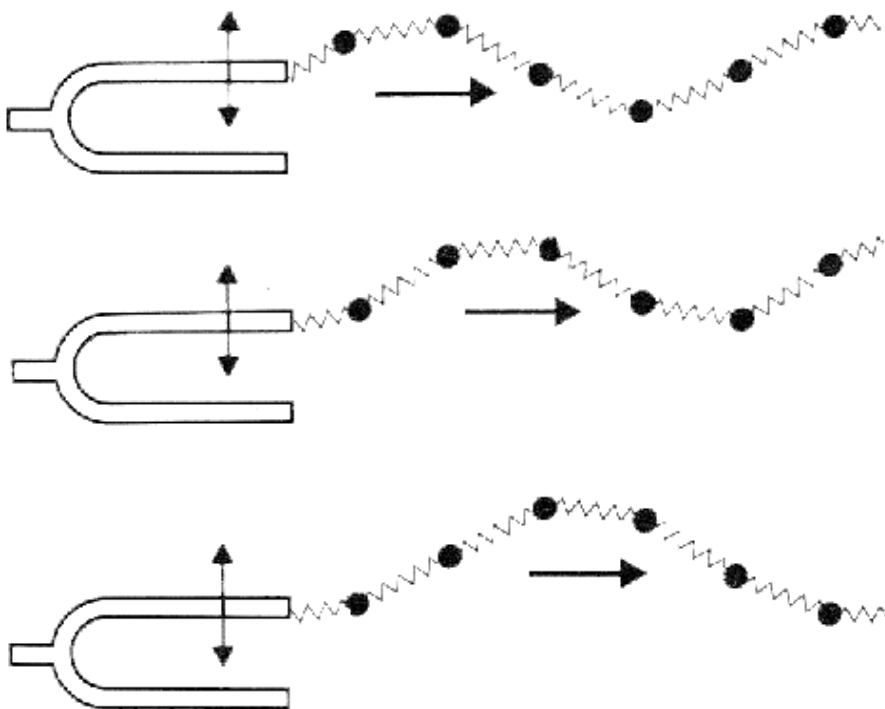
Slika 1.1.1.5: Prostiranje impulsa kroz puževu tečnost

## 1.1.2 DVA TIPA TALASA

Postoje dva osnovna tipa talasa:

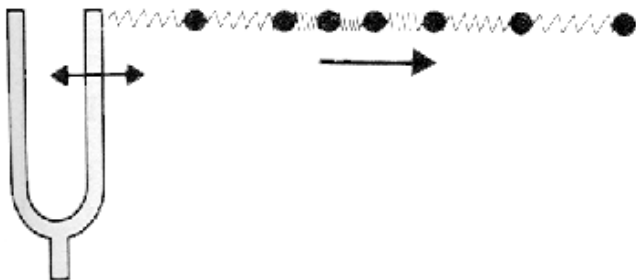
- transverzalni
- longitudinalni

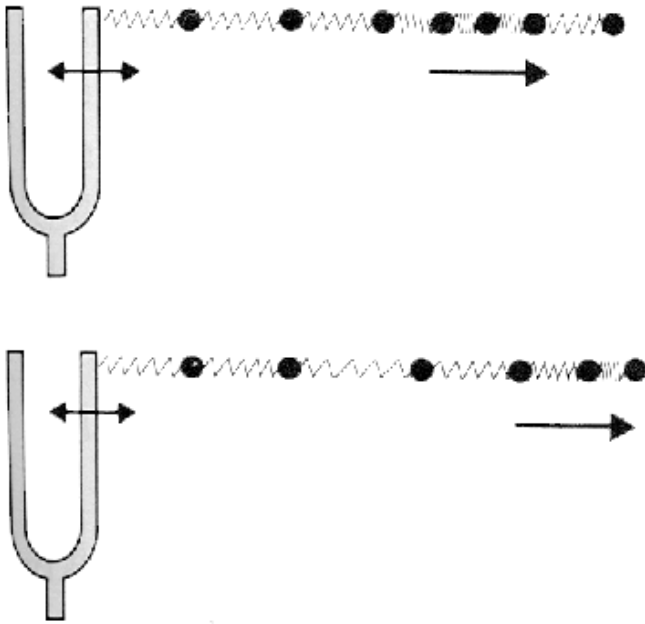
**Transverzalni talas** nastaje ako medijum osciluje pod pravim uglom u odnosu na pravac prostiranja talasa.



*Slika 1.1.2.1: Transverzalni talas*

**Longitudinalni talas** nastaje ako medijum osciluje u pravcu prostiranja talasa.





Slika 1.1.2.2: Longitudinalni talas

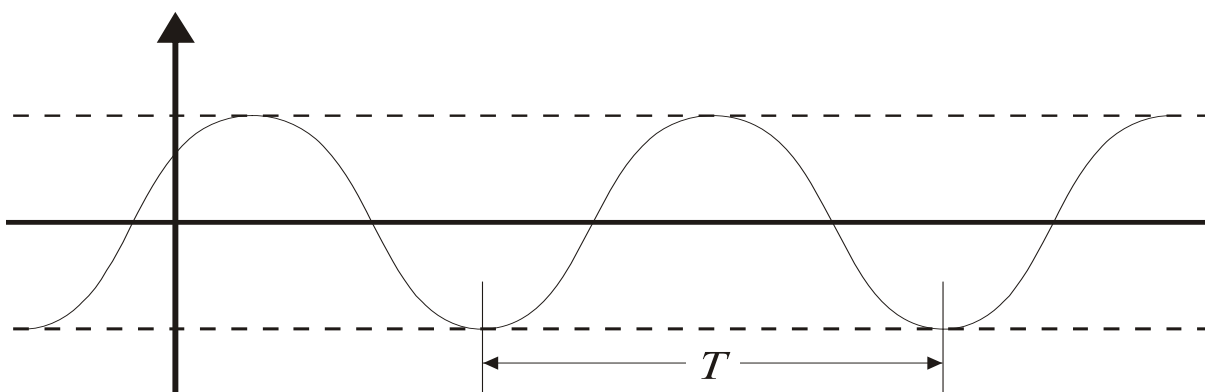
Da bi se mogao analizirati neki talasni oblik, potrebno je definisati osnovne pojmove o talasima [66].

**Talasna dužina  $\lambda$**  je rastojanje između dva maksimuma. Izražava se u metrima [m].

**Amplituda** je maksimalna vrednost talasnog signala.

**Frekvencija  $f$**  je broj ponovljenih oscilacija u jedinici vremena. Izražava se u hercima [Hz].

**Period  $T$**  je vremenski interval u kome se odigra jedna oscilacija. Period je recipročna veličina frekvenciji (  $T = 1/f$  ). Izražava se u sekundama [s].



Slika 1.1.2.3: Period

**Brzina talasa  $v$**  je rastojanje koje talas pređe u jedinici vremena (  $v = \lambda/T = \lambda f$  ). Izražava se u [m/s].

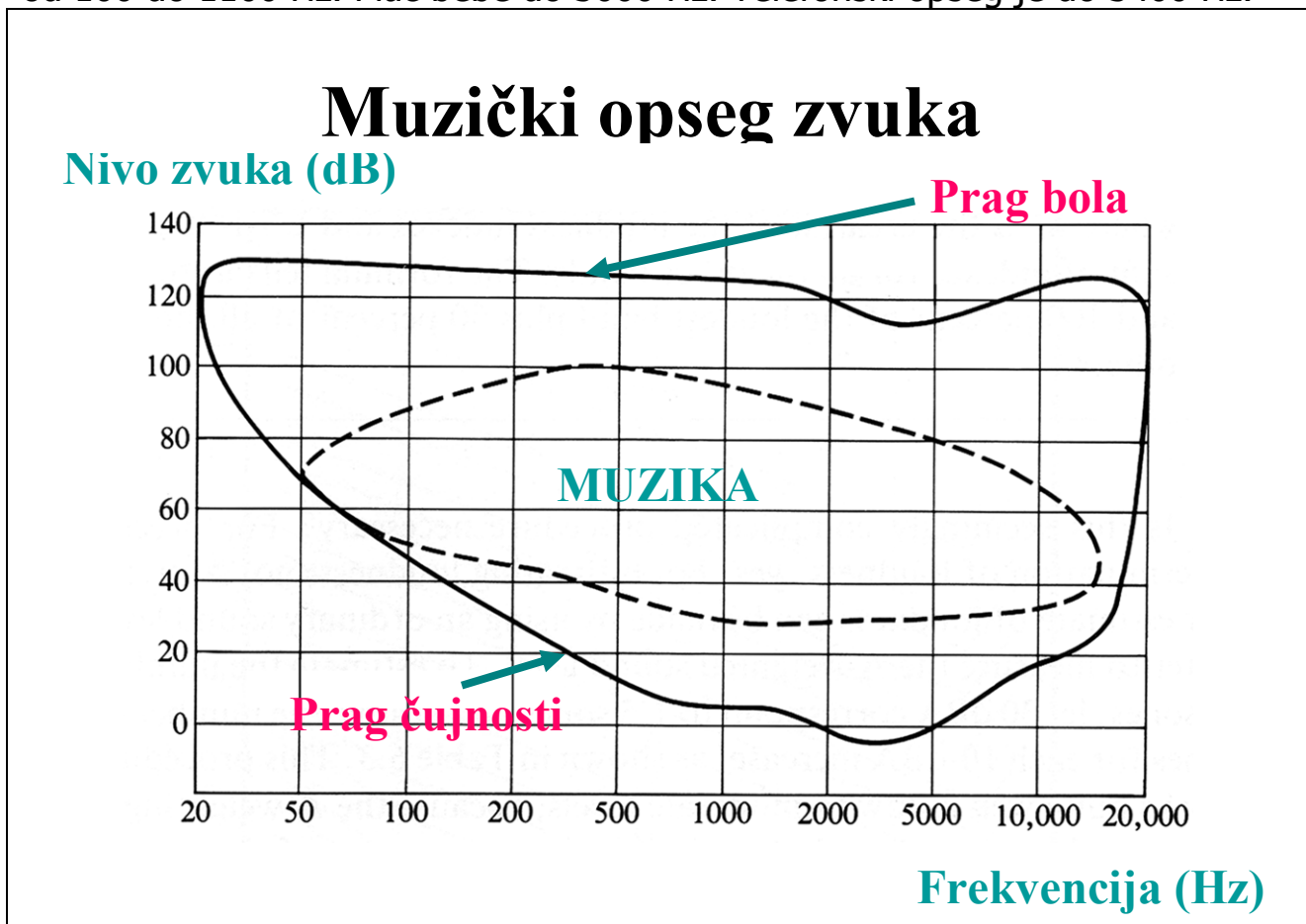
### 1.1.3 ZVUČNI TALASI. KARAKTERIZACIJA ZVUKA

Zvučni talas je longitudinalni talas prouzrokovan vibracijom čvrstog tela. Na primer: ako pažljivo posmatramo konus zvučnika dok slušamo muziku, primetićemo da on osciluje. To su vibracije koje se prenose kroz vazduh do našeg uha i tu se generiše zvuk [46].

Osnovne karakteristike zvučnih talasa su: brzina, visina, jačina i boja.

**Brzina zvuka** je najveća u čvrstim telima (  $\sim 6000$  m/s u čeliku). Manja je u tečnostima (  $1500$  m/s u vodi). Najmanja je u gasovima. U vazduhu je brzina prostiranja zvuka  $331$  m/s na  $0^{\circ}\text{C}$ , a sa porastom temperature za  $1^{\circ}\text{C}$ , brzina raste za  $0.6$  m/s. Na sobnoj temperaturi od  $20^{\circ}\text{C}$  brzina zvuka u vazduhu je  $343$  m/s.

**Visina zvuka** je isto što i frekvencija zvučnog talasa. Čovečije čulo sluha bez oštećenja čuje zvuk od  $20$  do  $20000$  Hz. Sve ispod  $20$  Hz je infrazvuk, a sve iznad  $20000$  Hz je ultrazvuk. Sa godinama se snižava gornja granica frekvencija koje čovek čuje. Običan govor se kreće u frekvencijskom opsegu od  $100$  do  $1100$  Hz. Plač bebe do  $3000$  Hz. Telefonski opseg je do  $3400$  Hz.



Slika 1.1.3.1: Muzički opseg zvuka

Što se tiče samog govora, različitu energiju nose samoglasnici i suglasnici. Samoglasnici su raspoređeni između  $300$  i  $750$  Hz. Oni su glasni. Nose  $95\%$  akustičke energije govora [104] .

Neki suglasnici ( j, z, v ) imaju nisku frekvenciju ( ~ 250 Hz). Neki drugi ( k, t, f, s) imaju visoku frekvenciju (od 3000 do 8000 Hz). Suglasnici nose samo 5 % akustičke energije govora. Oni su odgovorni za razumljivost [124'].

Važan pojam u objašnjavanju visine tona je interval oktava. Oktava predstavlja udvostručenu frekvenciju (ton koji je za oktavu viši od tona od 20 Hz ima 40 Hz). Ljudsko čulo sluha registruje preko 10 oktava (od 20 do 20000 Hz). U tom frekvencijskom opsegu mnogo toga uho čuje drugačije. Na primer: minimalna promena frekvencije koju ljudsko uho registruje (JND) na frekvencijama ispod 1000 Hz je 1 Hz. Na 2000 Hz to je 2 Hz, a na 4000 Hz iznosi 10 Hz. To znači da čulo sluha razlikuje da su tonovi od 500 Hz i 501 Hz dva različita tona, ali za 4000 Hz i 4003 Hz misli da su to ista dva tona. Tek za 4010 Hz čuje da je to drugi ton. Sa druge strane, treba naglasiti da je čulo sluha kod čoveka daleko savršenije od čula vida. Kada oko treba da razlikuje boje, u stanju je da napravi razliku samo za frekvencije veće od oktave (veći frekvencijski odnos od 2:1) [46] .

**Jačina zvuka** je direktno povezana sa amplitudom zvučnog talasa. Zbog toga što ljudsko uho čuje logaritamski, uvedena je odgovarajuća jedinica [dB]. Skala u dB je logaritamska. To znači da, ako kažemo da je jačina zvuka porasla za 10 dB, intenzitet zvuka se povećao 10 puta. Ili još upečatljivije: ako zvuk pojačamo sa 50 dB na 60 dB, intenzitet zvuka je porastao 10 puta. Ako zvuk pojačamo sa 50 dB na 70 dB, intenzitet zvuka je porastao 100 puta. A ako zvuk pojačamo sa 50 dB na 80 dB (što nije tako mnogo, za 30 dB), intenzitet zvuka je porastao čak 1000 puta. Moguće je pojačati zvuk i 1000000 puta, a da smo još uvek ispod granice bola.

Sa druge strane, kada se intenzitet zvuka poveća toliko puta, ljudsko uho to uopšte ne čuje tako.

**Boja zvuka** je najistančanija od svih karakteristika zvuka. Svako od nas može da čuje razliku ako zatvorenih očiju slušamo istu melodiju odsviranu na klaviru i na saksofonu, istom jačinom. Tu razliku čini boja zvuka tih muzičkih instrumenata. Boja zvuka zavisi od rasporeda i nivoa viših harmonika u frekvencijskom spektru nekog zvuka. To ne utiče na visinu samog zvuka, ali je presudno za boju.

#### 1.1.4 DETALJNIJE O [dB]

Ljudsko uho ne čuje linearno. Zato nije tako jednostavno objasniti sve pojave u vezi sa čulom sluha i zvukom. Postoji nekoliko fizičkih veličina koje su definisane da bi nam sve to približile i pojasnile. Treba ih pažljivo proučiti i ne brkati međusobno.

**Intenzitet zvuka  $J$**  je ona količina akustičke energije koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu normalnu na pravac prostiranja zvučnih talasa. Izražava se u  $[W/m^2]$ . Na primer: prag čujnosti  $J_0$  je  $10^{-12} W/m^2$ .

**Nivo zvuka  $L$**  je fizička veličina uvedena zato što ljudsko uho ne čuje linearno. Kada je intenzitet nekog zvuka dvostruko veći, čovek to ne čuje kao dvostruko jači zvuk. Nivo zvuka se izražava u [dB]. Jačina zvuka se izražava takođe u [dB] (prema nivou zvuka, ne prema intenzitetu zvuka). Na primer: da smo kao osnovu za jačinu zvuka uzeli intenzitet zvuka i kao minimalnu jačinu zvuka uzeli 1, onda bi skala jačine zvuka išla do  $10^{14} = 100\,000\,000\,000\,000$ . Skala u dB je mnogo pogodnija. S jedne strane je kompaktnija (kreće se od 0 do 140 dB). Sa druge strane je prirodnija jer je mnogo bliža načinu na koje ljudsko uho čuje.

Intenzitet zvuka se može smatrati fizičkom veličinom, a nivo zvuka psihološkom veličinom (tako postoji i posebna grana akustike – psihološka akustika).

Postoji relacija koja povezuje nivo zvuka i intenzitet zvuka:

$$L = 10 \log J / J_0 \quad (1.1.4.1)$$

gde je:

- $L$  - nivo zvuka, izražen u [dB]
- $J$  - intenzitet zvuka koji želimo da izrazimo preko nivoa, izražen u [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $J_0$  - intenzitet zvuka na pragu čujnosti na 1000 Hz, izražen u [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

Prag čujnosti  $J_0$  je najmanji intenzitet zvuka koje zdravo ljudsko uho može da čuje [66].

Na osnovu ove jednačine se može izraziti razlika dva nivoa zvuka:

$$\Delta L = 10 \log J_2 / J_1 \quad (1.1.4.2)$$

gde je:

- $\Delta L$  - razlika nivoa zvuka, izražena u [dB]
- $J_2$  - veći intenzitet zvuka koji se upoređuje, izražen u [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $J_1$  - manji intenzitet zvuka koji se upoređuje, izražen u [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

Ako je intenzitet  $J_2 = 2 \cdot J_1$ , razlika nivoa  $\Delta L = 10 \log 2 \approx 3 \text{ dB}$ .

Na primer: ako u orkestru svira 100 violina istim intenzitetom zvuka, razlika nivoa zvuka će biti  $\Delta L = 10 \log 100 = 20 \text{ dB}$  u odnosu na nivo kada svira samo 1 violina.

Često se nivo pojedinih zvukova izražava u dB. To znači da smo intenzitet tog zvuka uporedili sa intenzitetom praga čujnosti i izrazili u dB.

U tabeli su date neke osnovne vrednosti za nivo zvuka.

## Nivo zvuka

Poletanje aviona	120	dB	
Gradilište	110	dB	Neizdrživo
Vika	100	dB	
Veliki kamion	90	dB	Veoma bučno
Bučna ulica	80	dB	
Unutrašnjost automobila	70	dB	Bučno
Razgovor	60	dB	
Učionica	50	dB	Umereno
Dnevna soba	40	dB	
Spavaća soba noću	30	dB	Tiho
Radijski studio	20	dB	
Šuštanje lišća	10	db	Jedva čujno
Prag čujnosti	0	db	

Slika 1.1.4.1: Nivo zvuka

### 1.1.5 FREKVENCIJSKI ODZIV ČUJNOG OPSEGA

Čovek čuje niske frekvencije kao niske tonove, a visoke frekvencije kao visoke tonove. Međutim, osetljivost na promenu frekvencije se menja duž čujnog opsega. Zvuk niske frekvencije mora biti mnogo jači od zvuka srednjih frekvencija, da bismo ih čuli kao da su iste jačine. Čulo sluha je najosetljivije na frekvencije oko 4000 Hz. Izofonske krive prikazuju tu nepravilnost [72].

Kojom jačinom čujemo neki zvuk zavisi i od naše udaljenosti od zvučnog izvora. Nije isto da li smo udaljeni 1m ili 10 m. Intenzitet zvuka opada sa kvadratom rastojanja od zvučnog izvora:

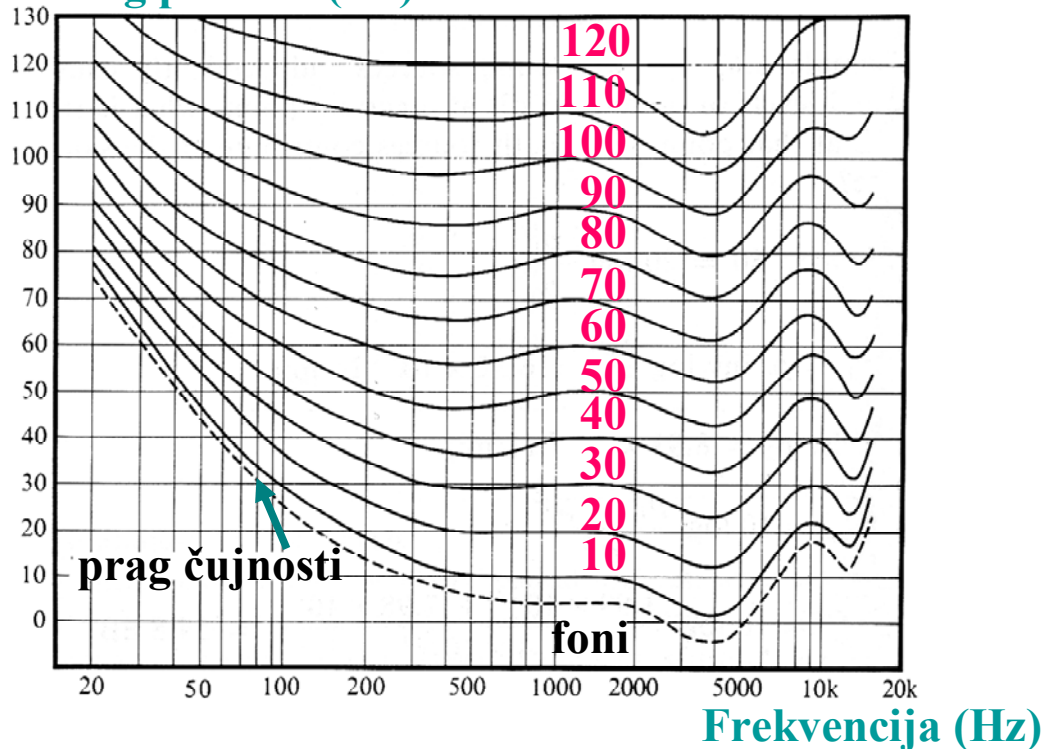
$$J = \frac{P_a}{4 \pi r^2} \quad (1.1.5.1)$$

gde je:

- $r$  - rastojanje od zvučnog izvora, izraženo u [m]
- $P_a$  - snaga zvučnog izvora, izražena u [W].

# Izofonske krive

Nivo zvučnog pritiska (dB)



Slika 1.1.5.1: Izofonske krive

Pošto se snaga zvučnog izvora ne menja u zavisnosti od pozicije posmatrača, može se koristiti i sledeća relacija:

$$P_a = J_1 4\pi r_1^2 = J_2 4\pi r_2^2 \quad (1.1.5.2)$$

gde je:

- $r_1$  - rastojanje od prvog zvučnog izvora, izraženo u [m]
- $r_2$  - rastojanje od drugog zvučnog izvora, izraženo u [m]
- $P_a$  - snaga zvučnog izvora, izražena u [W].
- $J_1$  - intenzitet zvuka prvog zvučnog izvora, izražen u [ $W/m^2$ ]
- $J_2$  - intenzitet zvuka drugog zvučnog izvora, izražen u [ $W/m^2$ ]

Muzički instrument	Nivo zvuka (dB)
violina - najtiše	34.8
klarinet	76.0
truba	83.9
činela	98.8
bas bubanj - najjače	103

Slika 1.1.5.2: Nivo zvuka pojedinih muzičkih instrumenata

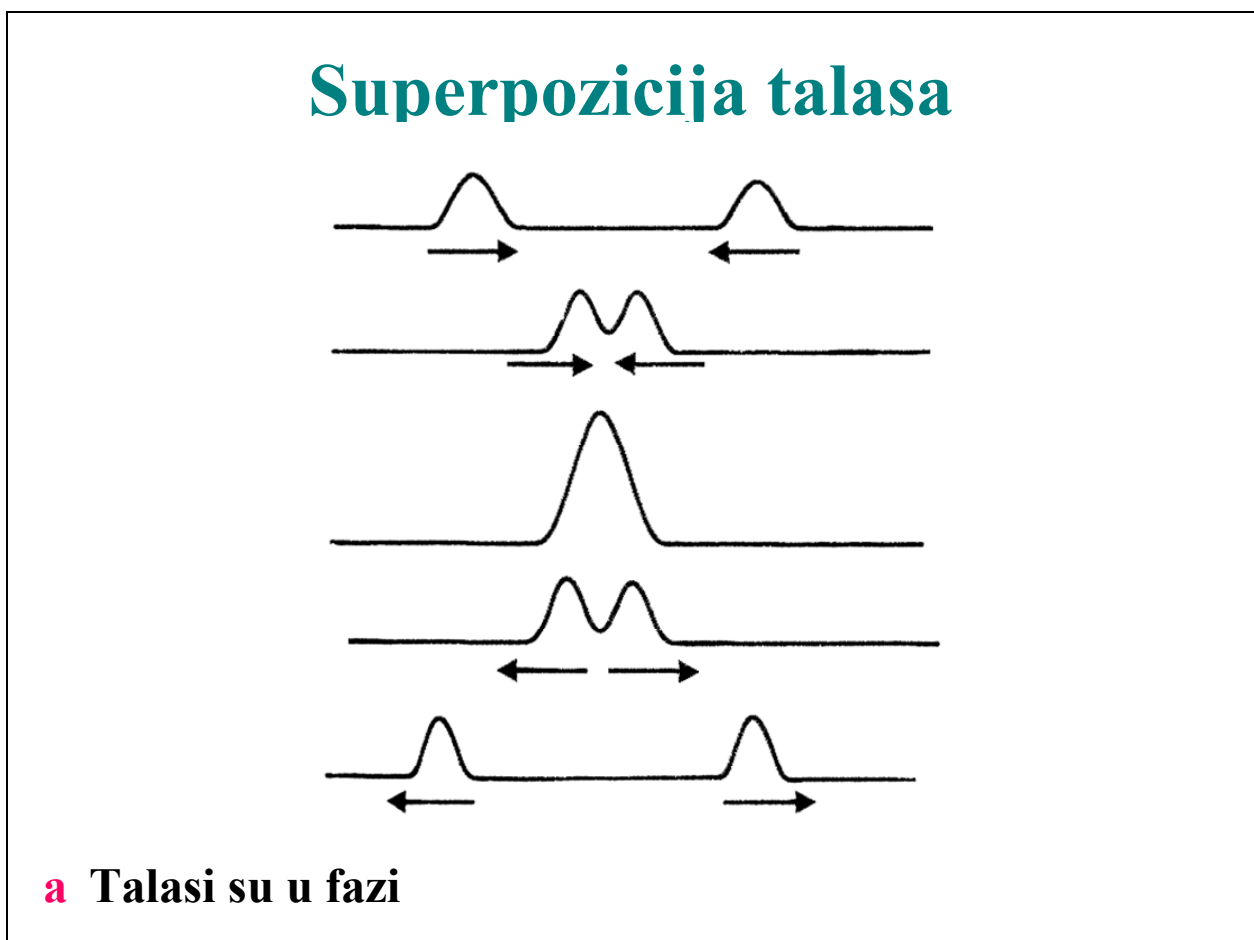


### 1.1.6 INTERFERENCIJA TALASA

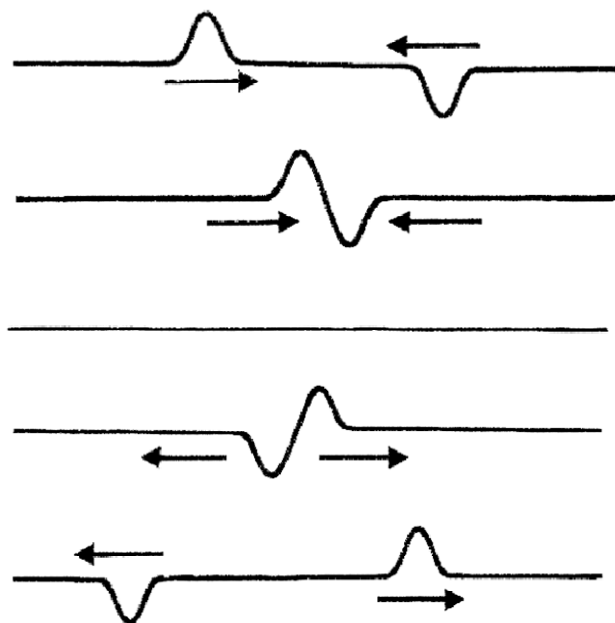
Jedna od najneobičnijih osobina čula sluha je da čovek može da izdvoji i prati jedan zvuk iz buke od mnoštva različitih zvukova. To je moguće zahvaljujući superpoziciji talasa [72].

Do **superpozicije talasa** dolazi kada se dva ili više talasa kreću kroz isti prostor i prenose istim medijumom (na primer: kreću se kroz vazduh u istoj učionici). Tokom superponiranja talasa bitne su dve stvari. Jedna je da svaki talas ostaje nepromenjen i ne pretrpi uticaj drugih talasa (zato mi i možemo da iz gomile zvukova izdvojimo jedan i pratimo ga sa razumevanjem). Drugo je da je amplituda superponiranog talasa jednaka sumi amplituda za dati trenutak svih talasa koji se superponiraju.

Kad je muzika u pitanju, interferencija talasa je naročito važna. Muzički zvukovi su obično konstantne frekvencije tokom nekog vremenskog perioda. Zvučni talasi se superponiraju kao svi ostali talasi, ali u slučaju muzike, ti superponirajući talasi mogu zvučati prijatno (konsonance) i neprijatno (disonance). O tome treba voditi računa.

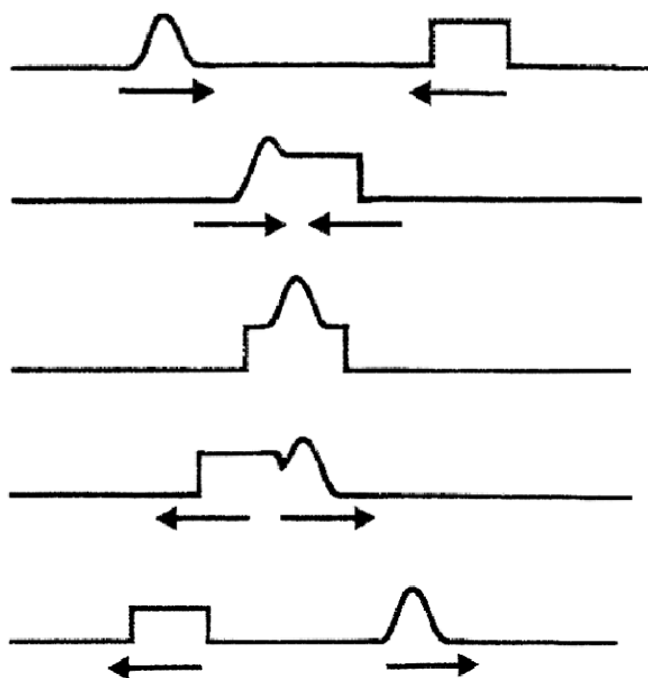


Slika 1.1.6.1: Superpozicija talasa: talasi su u fazi



**b** Talasi su u protivfazi

*Slika 1.1.6.2: Superpozicija talasa: talasi su u protivfazi*



**c** Talasi su različitog oblika

*Slika 1.1.6.3: Superpozicija talasa: talasi su različitog oblika*

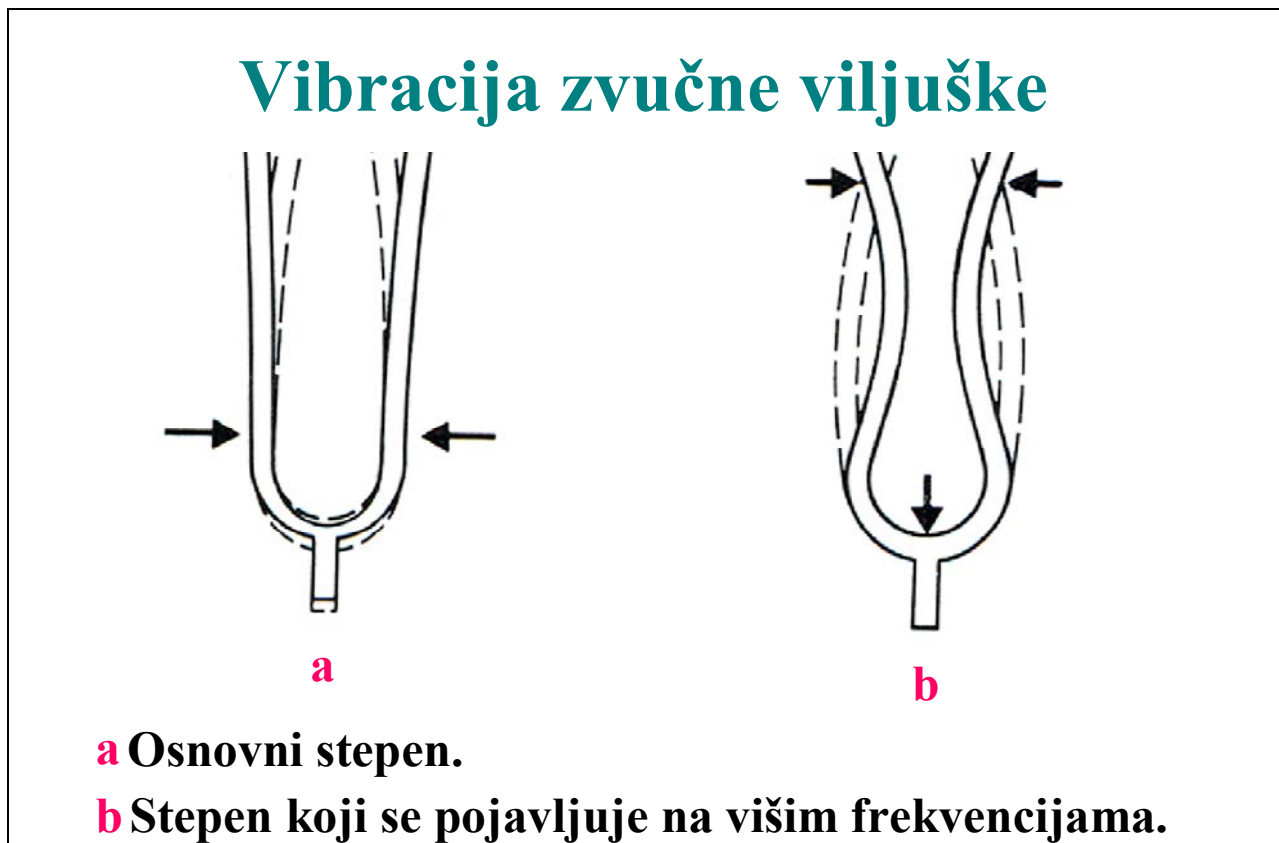
## 1.2 REZONANCIJA, STOJEĆI TALASI I MUZIČKI INSTRUMENTI

Fenomen rezonancije i stojećih talasa se pojavljuje u strukturi svakog muzičkog instrumenta. Preko tih fizičkih veličina svi muzički instrumenti proizvode zvuk.

Ako se zvučna viljuška pobudi na oscilovanje i ako se postigne rezonantna frekvencija, oba kraka viljuške će oscilovati napred - nazad tom frekvencijom. Ukoliko se energija za održavanje tog stanja ne dodaje, oscilacije će se vremenom prigušiti. Ako se energija dodaje, oscilacije se mogu održati konstantnim, ili čak pojačati [72].

**Rezonancija** nastaje kad god se neki fizički sistem pobudi njegovom rezonantnom frekvencijom. Većina fizičkih sistema ima nekoliko rezonantnih frekvencija. Postoji osnovni stepen i viši stepeni rezonancije.

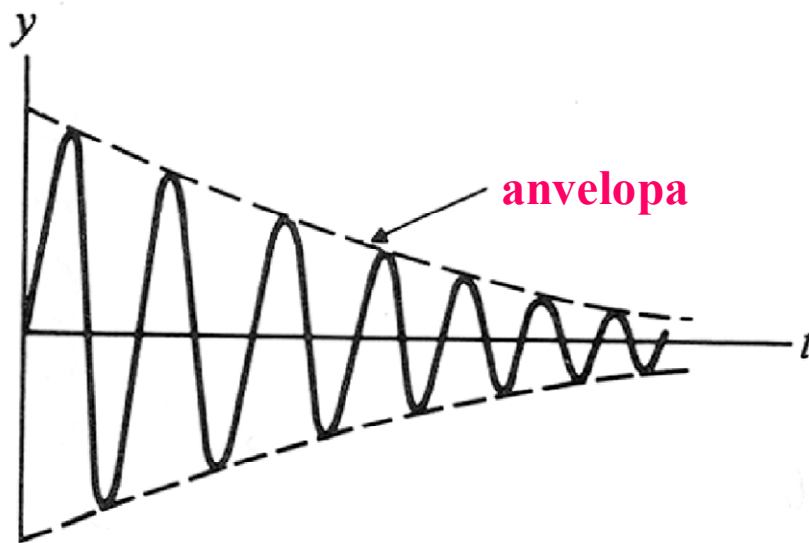
Kod muzičkih instrumenata se rezonancija može lakše objasniti poznavanjem stojećih talasa [4].



Slika 1.2.1: Vibracije zvučne viljuške

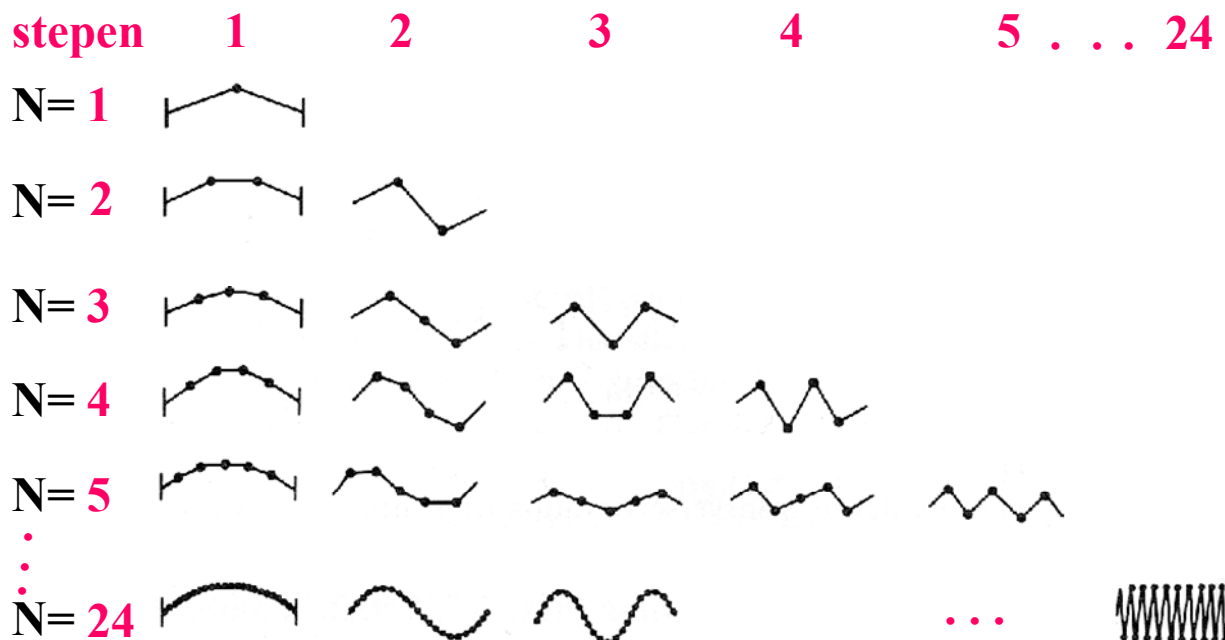
**Stojeći talasi** nastaju kada se dva talasa iste frekvencije i iste talasne dužine prostiru kroz istu sredinu tako, da se međusobno podražavaju. Pri tome dužina prostora mora biti jednaka celobrojnom umnošku polovine talasne dužine talasa. Kod stojećih talasa je obično jedan talas refleksija onog drugog. Naziv „stojeći“ potiče otuda što, kad se posmatra takav talas, deluje

## Prigušena oscilacija



Slika 1.2.2: Prigušena oscilacija

## Stepeni transverzalnih vibracija sistema sa različitim brojem masa



Slika 1.2.3: Stepeni transverzalnih oscilacija


da energija talasa stoji u pojedinim delovima sredine kojima se talas prostire. **Čvorovi stojećeg talasa** su pozicije u kojima talas miruje [6].

**Trbusi stojećeg talasa** su pozicije u kojima talas menja svoju vrednost od amplitude u jednom smeru do amplitude u drugom smeru oscilovanja.

Stojeći talas može nastati u bilo kojoj sredini. Na primer: ako napunimo tanku čašu vodom i prstom kružimo po ivici čaše, u jednom trenutku će se čuti zvuk. Ako nam to ne polazi od ruke iz prve, možemo pokvasiti prst vodom da poboljšamo prijanjanje. U svakom slučaju, zvuk nastaje zato što se u čaši formira stojeći talas kome amplituda postepeno raste sve dok ne postane čujna za ljudsko uho.

Telo svakog muzičkog instrumenta postiže rezonantnu frekvenciju kada se na instrumentu svira. Zato se obično i zove *rezonatorska* kutija. Na primer: ako se na flauti zatvore sve rupice i svirač uduva vazduh u cev, formiraće se stojeći talas određene frekvencije i to se čuje kao odsvirani ton. Ako flautista ne dodaje vazduh, ton će prestati (stojeći talas će se prigušiti). Ako flautista dodatno uduva vazduh u cev flaute, ton traje (stojeći talas se održava). To je najniži ton koji može da se odsvira na flauti [37].

## Rezonancija oscilujuće žice

**a**   $\lambda = 2L; f_1 = \frac{v}{2L}$

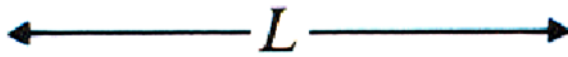
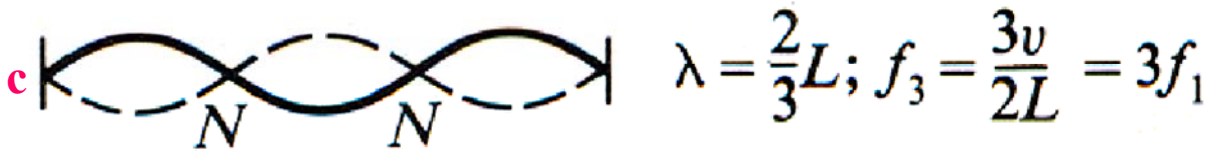
$L$

**b**   $\lambda = L; f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$

**Stepeni vibracija oscilujuće žice u rezonanciji.**

**Žica osciluje kao stojeći talas.**

Slika 1.2.4 a: Rezonancija oscilujuće žice – prva dva stepena



**Uočiti da su frekvencije viših harmonika umnošci frekvencije osnovnog tona.**

*Slika 1.2.4 b: Rezonancija oscilujuće žice – n –ti stepen*

## Dovođenje žice u rezonanciju



**a**

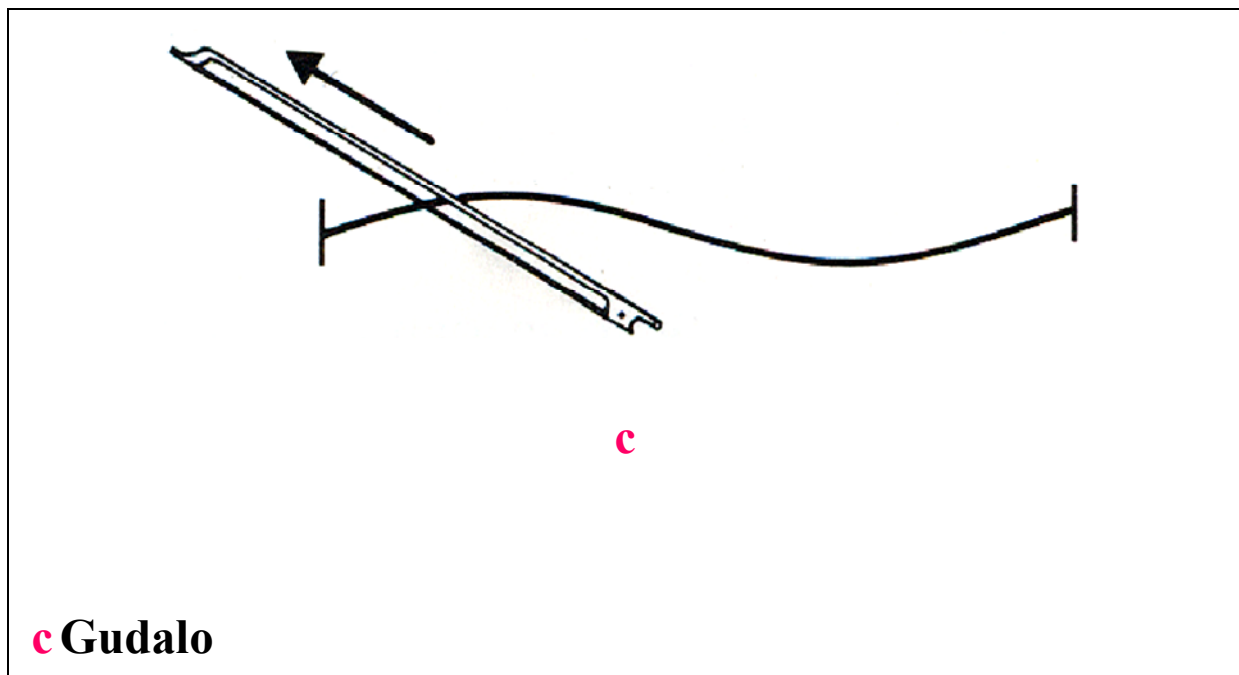


**b**

**a** Zvučna viljuška

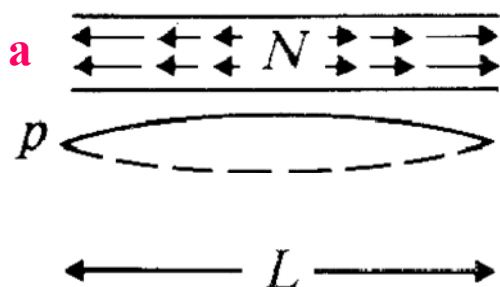
**b** Elektromagnet

*Slika 1.2.5 a: Načini dovođenja žice u rezonanciju – zvučnom viljuškom i elektromagnetom*

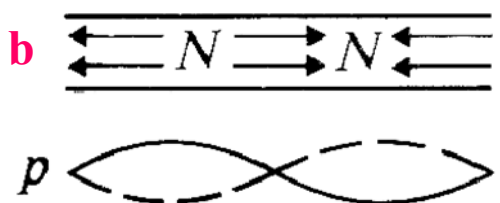


Slika 1.2.5 b: Načini dovođenja žice u rezonanciju - gudalom

## Rezonancija otvorene cevi



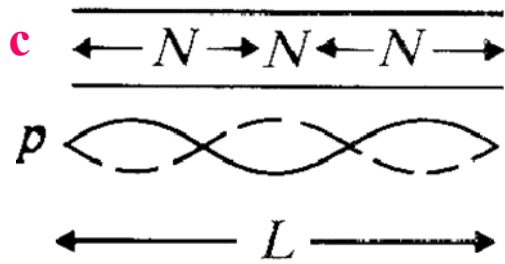
$$\lambda = 2L; f_1 = \frac{v}{2L}$$



$$\lambda = L; f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$$

**Na otvorenim krajevima pritisak je jednak atmosferskom.**

Slika 1.2.6 a: Rezonancija u otvorenoj cevi - prva dva stepena



$$\lambda = \frac{2}{3}L; f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

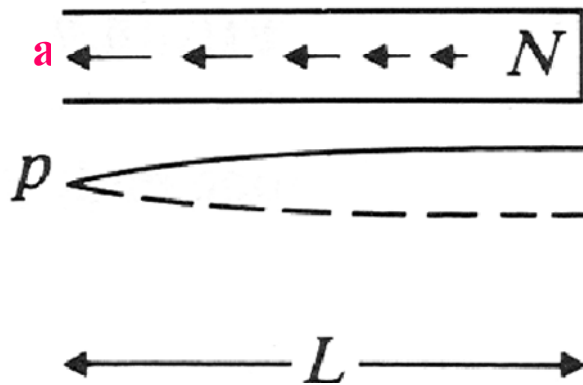
$$f_n = nf_1$$

( $n = 1, 2, 3 \dots$ )

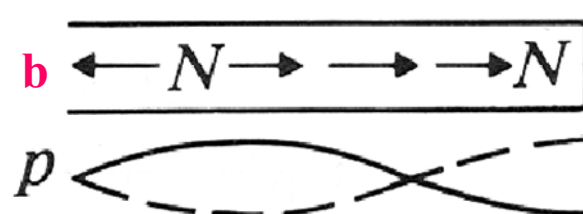
**Uključeni su i neparni i parni harmonici.**

*Slika 1.2.6 b: Rezonancija u otvorenoj cevi – n – ti stepen*

## Rezonancija zatvorene cevi



$$\lambda = 4L; f_1 = \frac{v}{4L}$$

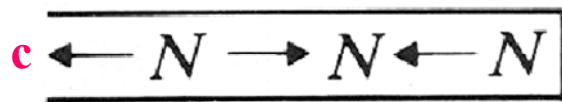


$$\lambda = \frac{4}{3}L; f_3 = \frac{3v}{4L} = 3f_1$$

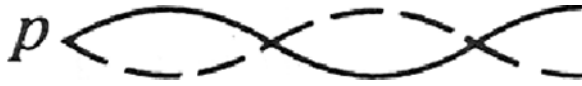
**Na zatvorenom kraju kretanje vazduha je minimalno, a pritisak je maksimalan.**

*Slika 1.2.7 a: Rezonancija zatvorene cevi - prva dva stepena*





$$\lambda = \frac{4}{5}L; f_5 = \frac{5v}{4L} = 5f_1$$



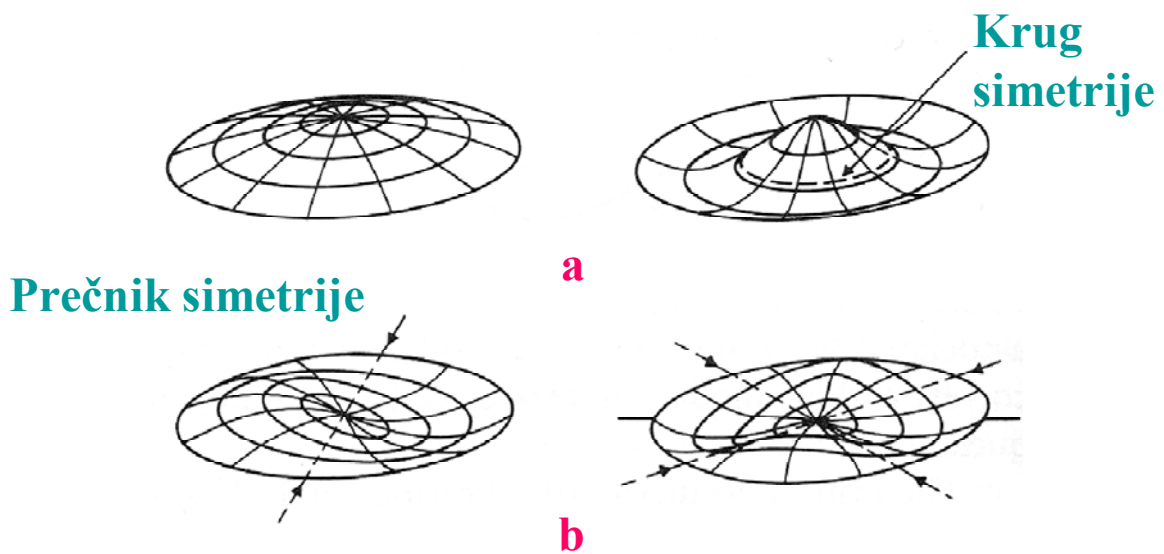
$$f_n = nf_1$$

$(n = 1, 3, 5 \dots)$

**Uključeni su samo neparni harmonici.**

*Slika 1.2.7 b: Rezonancija zatvorene cevi – n – ti stepen*

## Stepeni vibracija kružne membrane

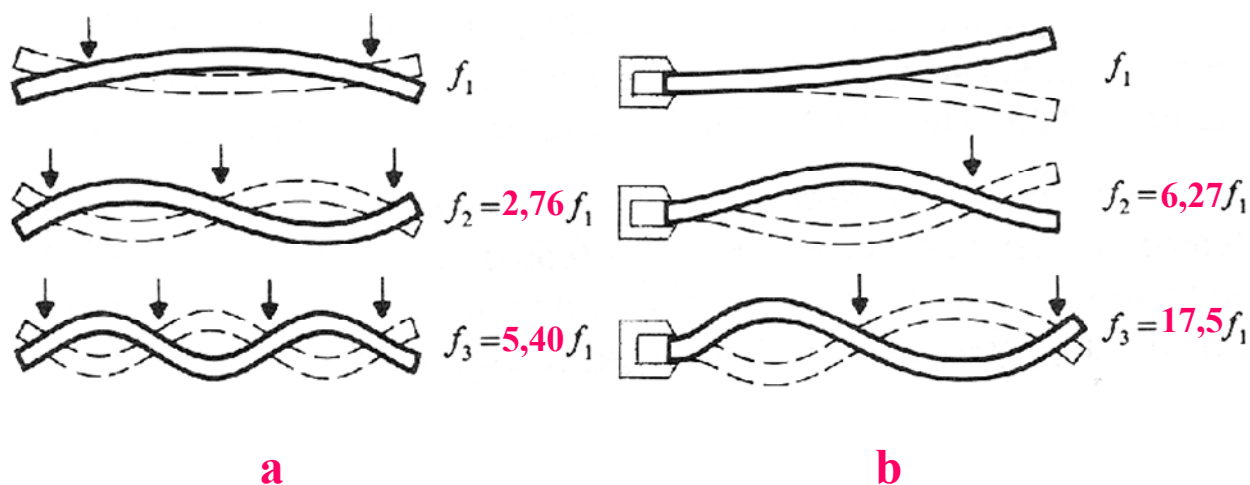


**a** Kružna simetrija.

**b** Nema kružne simetrije.

*Slika 1.2.8: Stepni vibracija kružne membrane*

## Stepeni vibracija pločice

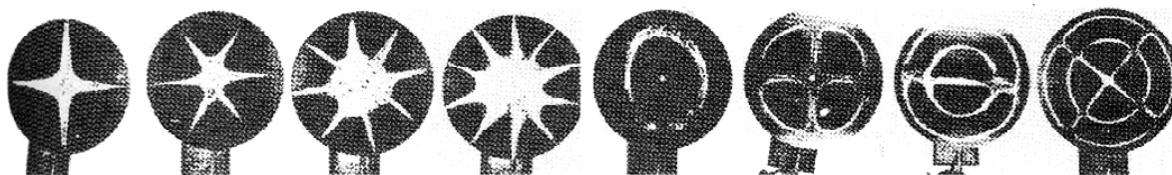


**a** Oba kraja pločice su slobodna.

**b** Jedan kraj pločice je učvršćen.

Slika 1.2.9: Stepeni vibracija pločica

## Vibracije kružnog tanjira



Prva četiri slučaja imaju linije simetrije.

Druga četiri slučaja imaju krugove simetrije.

Slika 1.2.10: Stepeni vibracija kružnog tanjira

### 1.3 UPOZNAVANJE SA MUZIČKIM INSTRUMENTIMA

Da bi se razumela fizika muzike i muzičkih instrumenata nije neophodno biti muzičar. Svi izvođači muzike proizvode muziku stvarajući stojeće talase na svojim muzičkim instrumentima. Gitarista pravi stojeće talase na žicama gitare, bubnjar na membrani bubnja, svirači duvačkih instrumenata prave stojeće talase u cevima svojih instrumenata. Da bi se razumela fizika muzičkih instrumenata, mora se razumeti stojeći talas.

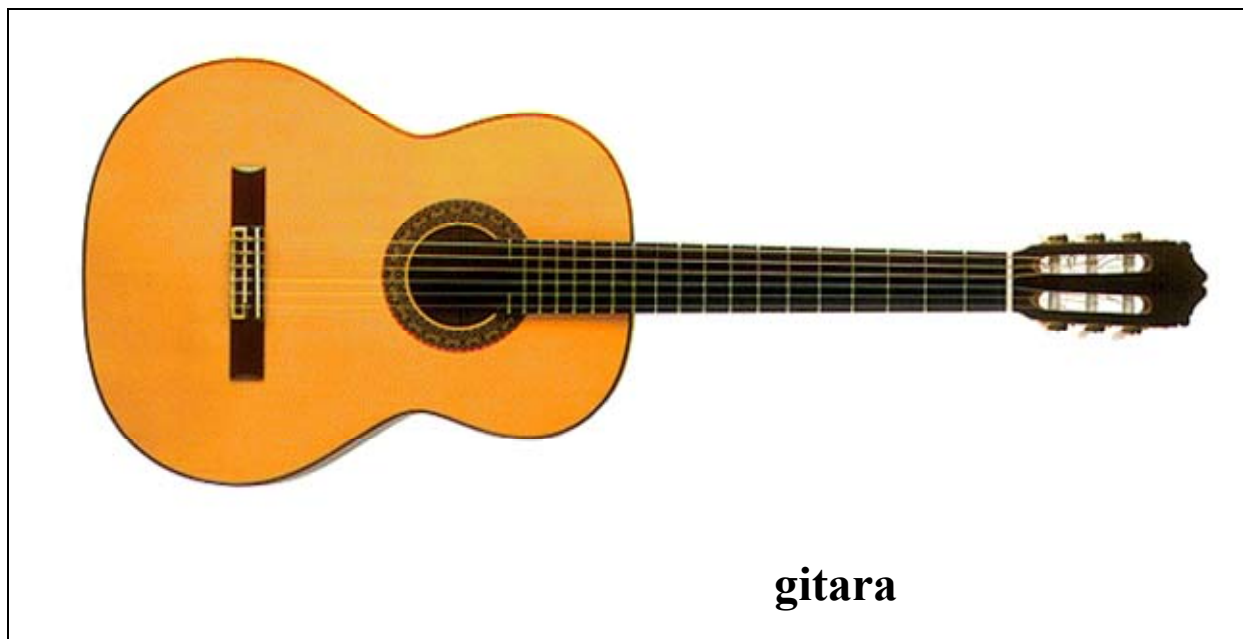
Muzički instrumenti mogu da se podele u 3 grupe:

- kordofoni (žičani)
- aerofoni (otvorene i zatvorene cevi - duvački)
- idiofoni, lamelofoni, membranofoni (vibracija čvrstih pločica i cevi, vibracija membrana - udarački)

**Kordofoni** su muzički instrumenti kod kojih se stojeći talas formira na žici instrumenta. Žica može da se okida prstima ili trzalicom, da se prevlači gudalom preko nje, ili da se udara po njoj nekim mekim čekićima. U kordofone spadaju: trzani žičani instrumenti (gitara, harfa, lauta, kantele, citra, koto, harpsikord, spinet, ...), gudački instrumenti (violina, viola, violončelo, kontrabas, viola da gamba, viola di bardone, žiga, rebek, rebab, si hu, ...) i udarni instrumenti (cimbal, klavikord, klavir, ...) [30].



*Slika 1.3.1: Violina*



*Slika 1.3.2: Gitara*



*Slika 1.3.3: Harfa*



**lauta**

*Slika 1.3.4: Lauta*

**Aerofoni** su muzički instrumenti kod kojih se stojeći talas formira u vazdušnom stubu u cevi instrumenta. U tu grupu spadaju muzički instrumenti sa: jezičkom od trske (klarinet, saksofon, oboa, fagot, engleski rog, pungi, suona, zurna, zuckra,...), usnenim jezičkom (truba, trombon, francuska horna, tuba, kornet, diđeridu, konč – školjka,...), sa vazdušnim jezičkom (frula, dvojnica, panova frula, nosna flauta, blok flauta, flažolet, flauta, pikolo,...) i sa metalnim jezičkom (harmonika, usna harmonika, orgulje,...) [48].



**Panova frula**

*Slika 1.3.5: Panova frula*



**flauta**

*Slika 1.3.6: Flauta*



**saksofon**

*Slika 1.3.7: Tenor saksofon*



**trombon**

*Slika 1.3.8: Trombon*



**harmonika**

*Slika 1.3.9: Harmonika*



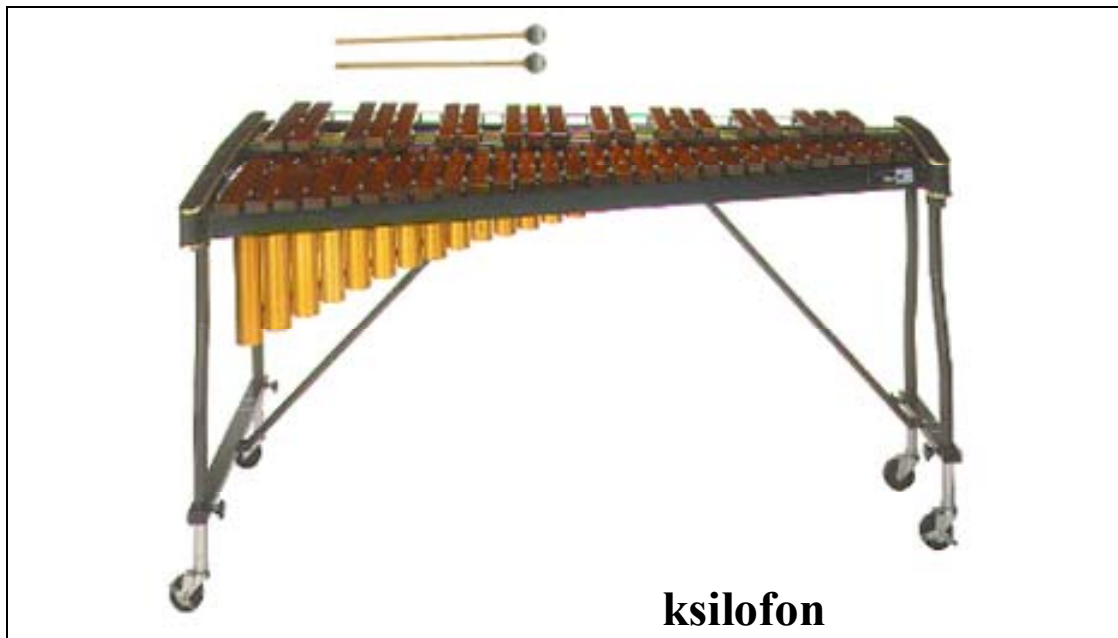
**šen**

*Slika 1.3.10: Šen – usne orgulje*

**Idiofoni** su muzički instrumenti kod kojih se stojeći talas stvara u samoj fizičkoj strukturi instrumenta. U tu grupu spadaju: ksilofon, marimba,

vibrafon, metalofon (udarački instrumenti sa pločicama) i cevasta zvona. U širem smislu to su i razne činele, gong i tam-tam (udarački muzički instrumenti sa metalnim tanjirom).

**Lamelofoni** su udarački instrumenti kod kojih rezoniraju tanki listovi (najčešće metala), učvršćeni sa jedne strane.



*Slika 1.3.11: Ksilofon*



*Slika 1.3.12: Cevasta zvona*





*Slika 1.3.13: Činele*

**Membranofoni** su muzički instrumenti kod kojih se stojeći talas stvara u samoj strukturi instrumenta, usled vibracije jedne ili dve membrane. U ovu grupu spadaju sve vrste bubnjeva [72].



*Slika 1.3.14: Tabla i bayan*

## 1.4 MUZIČKI INSTRUMENTI I AKUSTIČKA IMPEDANSA

Da bi se potpuno razumela fizika muzičkih instrumenata, neophodno je poznavati akustičku impedansu.

**Akustička impedansa** pokazuje kolikom silom treba da deluje talas u sredini u kojoj se prostire, da bi napravio određeni protok (pomerio određenu zapreminu te sredine). Najvažniji aspekt promene impedanse stojećih talasa u telima muzičkih instrumenata je da one uvek izazivaju refleksije. Kada god talas pretrpi promenu impedanse, deo talasa će se reflektovati. Na primer: kada sviramo na gitari, talas se prostire duž žice prema glavi ili prema kobilici. Kada dođe do glave (kobilice), reflektovaće se nazad jer je akustička impedansa glave (kobilice) drugačija od akustičke impedanse same žice. Tako nastaje stojeći talas na žici. Mnogo je teže uočiti kako nastaje stojeći talas unutar cevi. Ispostavlja se da se talas reflektuje na kraju cevi bez obzira da li se akustička impedansa smanjuje ili povećava [46]. Procenat refleksije zavisi od veličine promene impedanse: što je veća promena, veći procenat talasa će se reflektovati. Kada talas koji se prostire u cevi dođe do kraja, promena impedanse je mala (ista je sredina) [48], ali je i toliko dovoljno da izazove refleksiju talasa i da tako održava stojeći talas u cevi. Deo talasa koji se nije reflektovao učestvuje u obrazovanju zvuka koji proizvodi muzički instrument.



Slika 1.4.1: Prostiranje pritiska i brzine u cevi

## Stepeni rezonancije u cevi

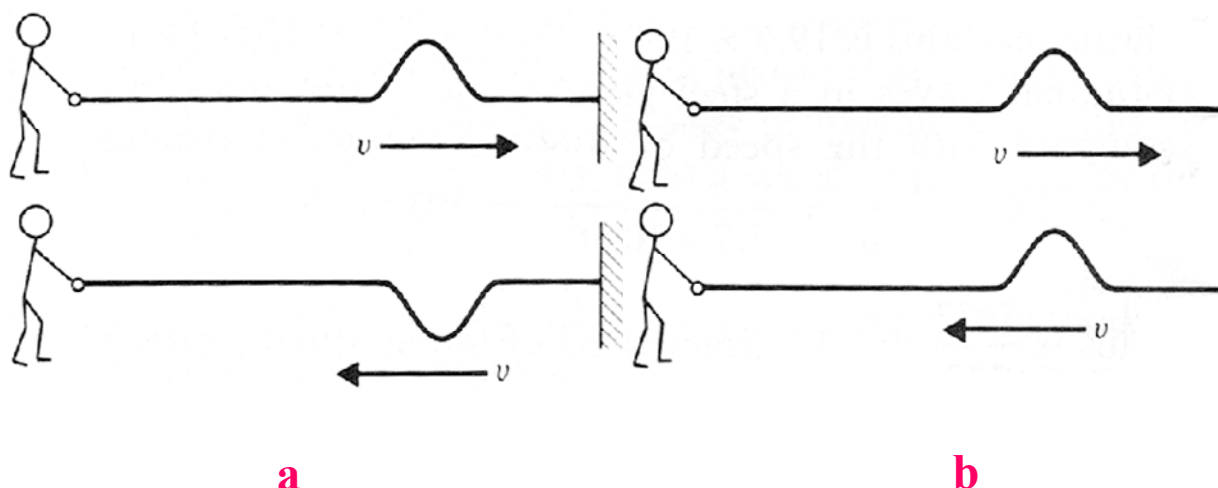
stepen	cilindrična	konusna	proširena
1	136.4 Hz	255.6 Hz	281 Hz
2	409.2	512.0	520
3	682.0	771.0	767
4	954.9	1032.0	1021

**Cilindrična cev** – odnos frekvencija je: **1 : 3 : 5 : 7.**

**Konusna cev** – odnos frekvencija je: **1 : 2 : 3 : 4.**

Slika 1.4.2: Stepeni rezonancije u cevi

## Refleksija talasa



**a** Sa učvršćenim krajem ( sa manje na veću impedansu )

**b** Sa slobodnim krajem ( sa veće na manju impedansu )

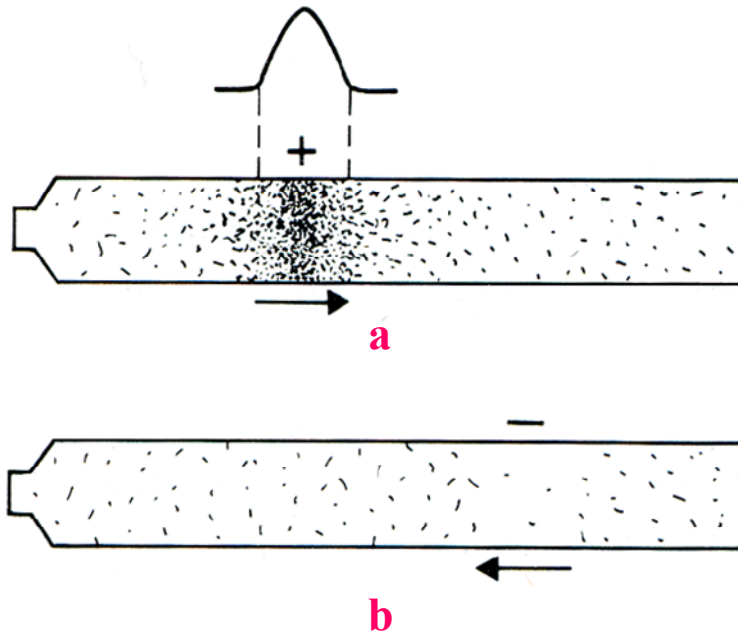
Slika 1.4.3: Refleksija talasa

Prilikom promene akustičke impedanse sredine talas se ponaša na sledeći način:

- kada talas prelazi u sredinu mnogo veće impedanse, refleksija je velika i reflektovani talas je u fazi
- kada talas prelazi u sredinu nešto veće impedanse, refleksija je mala i reflektovani talas je u fazi
- kada talas prelazi u sredinu mnogo manje impedanse, refleksija je velika i reflektovani talas je u protivfazi

- kada talas prelazi u sredinu nešto manje impedanse, refleksija je mala i reflektovani talas je u protivfazi [46].

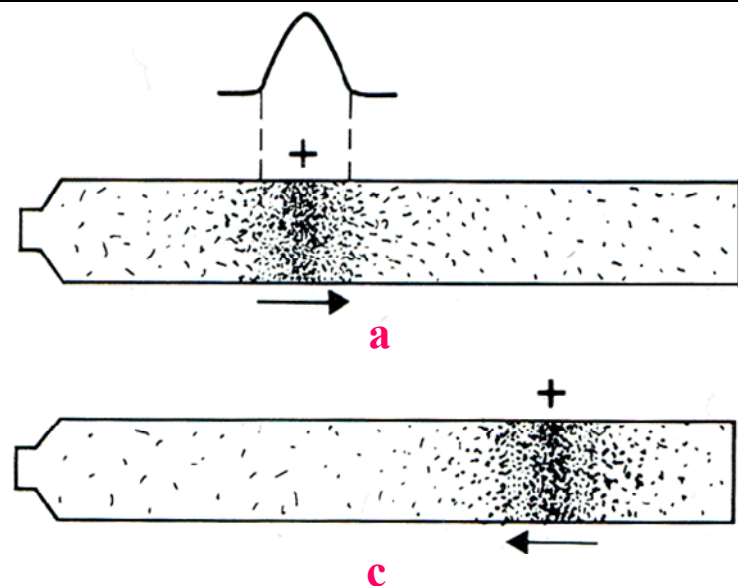
## Refleksija zvučnog talasa u cevi



**a** Impulsni talas

**b** Refleksija na otvorenom kraju ( sa manje na veću imp.)

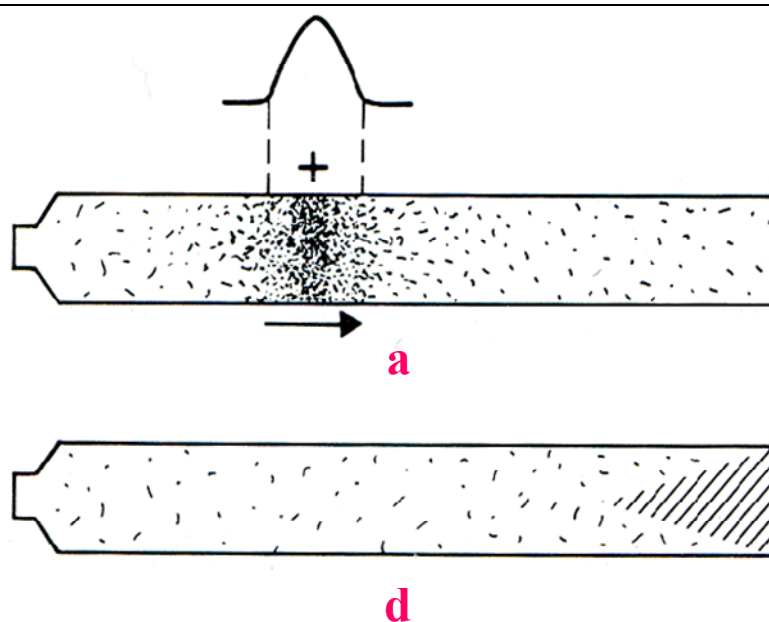
*Slika 1.4.4 a: Refleksija zvučnog talasa u cevi – na otvorenom kraju*



**a** Impulsni talas

**c** Refleksija na zatvorenom kraju ( sa veće na manju imp.)

*Slika 1.4.4 b: Refleksija zvučnog talasa u cevi – na zatvorenom kraju*

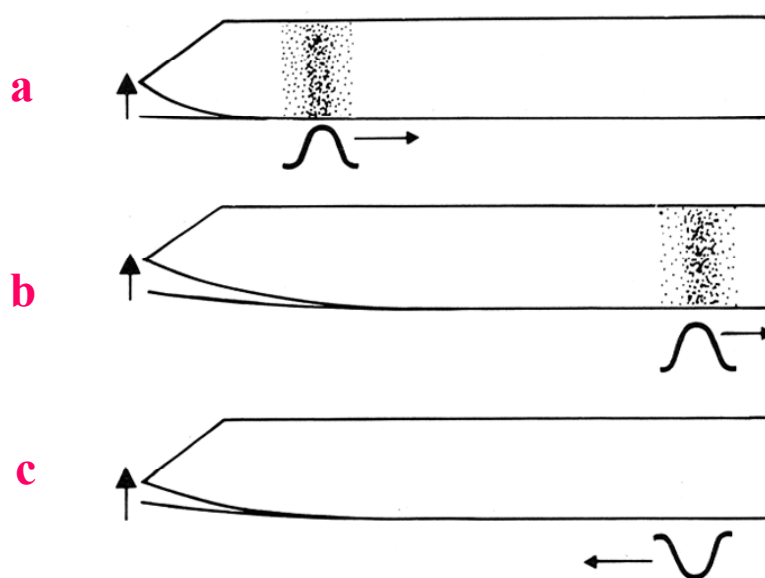


**a** Impulsni talas

**d** Nema refleksije od apsorbera

*Slika 1.4.4 c: Refleksija zvučnog talasa u cevi – apsorber*

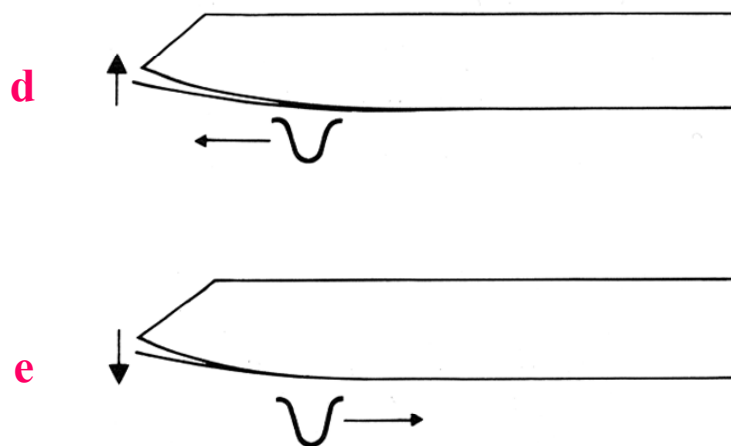
## Vibracija vazduha u cevi klarineta



**a** Uduvani impuls vazduha putuje kroz cev do otvorenog kraja. Tu pritisak pada na 0.

**b i c** To prouzrokuje impuls negativnog pritiska koji se vraća kroz cev prema trsci.

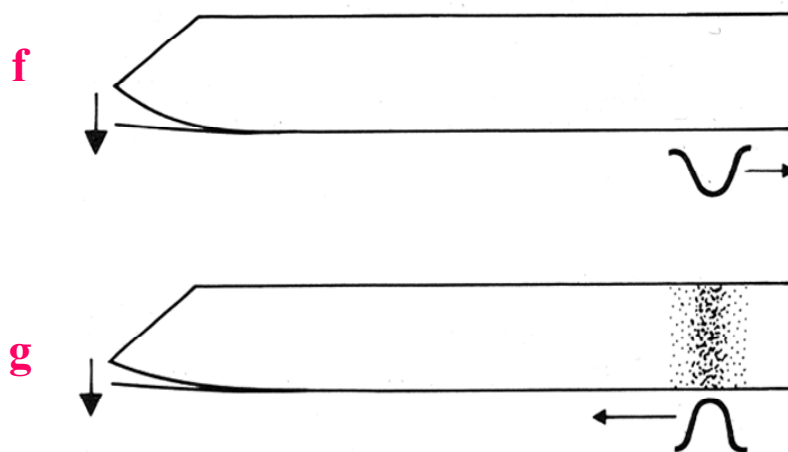
*Slika 1.4.5 a: Vibracija vazduha u cevi klarineta – impuls negativnog pritiska*



**d** Kad impuls stigne, trska se upravo zatvara. Impuls svojim potpritiskom dodatno zatvori trsku.

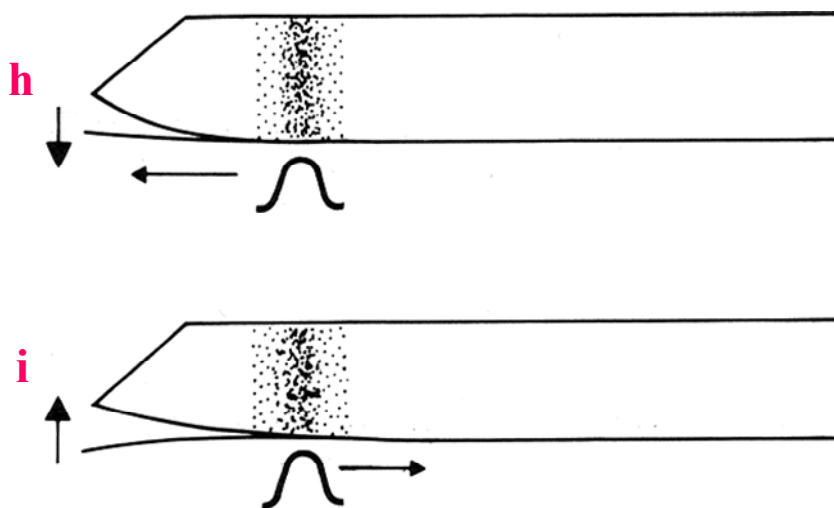
**e** Pošto je trska skoro potpuno zatvorila ulazni otvor i vrlo malo vazduha ulazi u cev, impuls negativnog pritiska se vraća kroz cev ka otvorenom kraju.

Slika 1.4.5 b: Vibracija vazduha u cevi klarineta – impuls se reflektuje na usniku



**f i g** Kad stigne do kraja, impuls potpritiska se popne na 0 (zapravo na normalni atmosferski pritisak) i impuls pozitivnog pritiska počinje da putuje nazad ka trsci.

Slika 1.4.5 c: Vibracija vazduha u cevi klarineta – impuls se reflektuje na daljem kraju

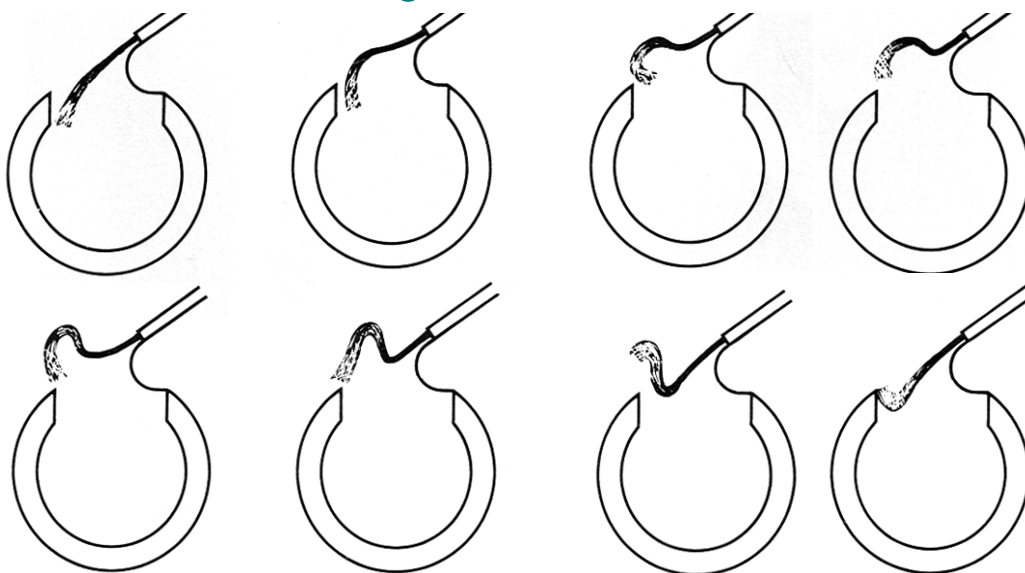


**h** Kad impuls stigne, trska je otvorena i pritisak vazdušnog impulsa je dalje otvara.

**i** Sada je trska potpuno otvorena i klarinetista može ponovo da uduva vazduh u cev.

*Slika 1.4.5 d: Vibracija vazduha u cevi klarineta – zatvoren ciklus*

## Oscilovanje vazdušnog stuba na rupi za uduvavanje vazduha kod flaute



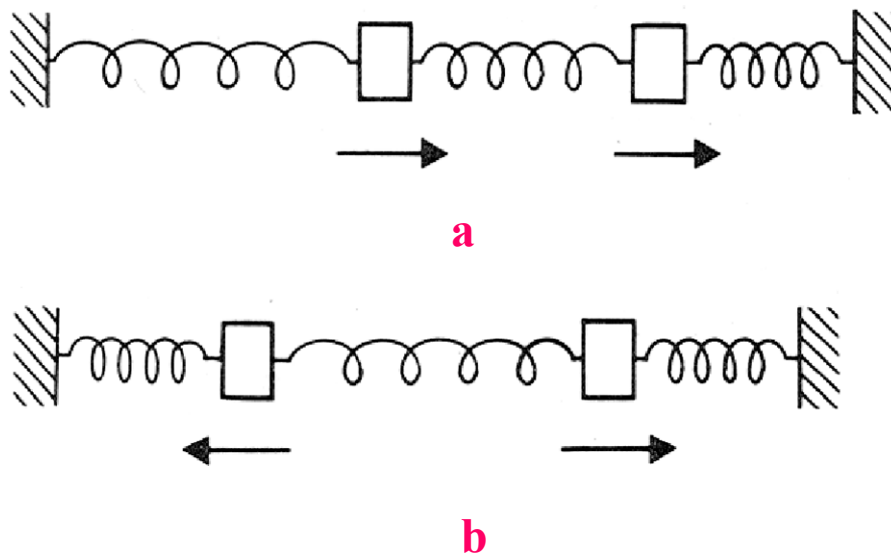
**Kad je pritisak minimalan, vazduh ulazi najviše (suprotno od ostalih duvačkih instrumenata).**

*Slika 1.4.6: Oscilovanje vazdušnog stuba na usniku flaute*

## 1.5 STEPENI VIBRACIJE I HARMONICI

Kada odsviramo željeni ton na nekom muzičkom instrumentu, frekvencija tog tona se zove **osnovni harmonik**. To je prvi stepen vibracije. Uz prvi stepen vibracije istovremeno se pojavljuju i neki viši stepeni vibracije. To zovemo višim harmonicima odsviranog tona [48].

### Stepeni longitudinalnih vibracija sistema sa dve mase



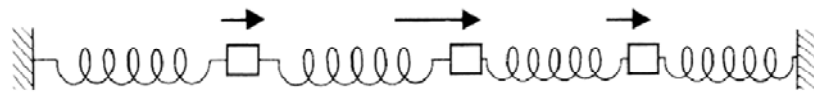
**a** Mase se kreću u istom smeru.

**b** Mase se kreću u suprotnim smerovima.

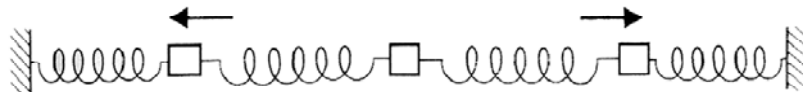
*Slika 1.5.1: Stepeni longitudinalnih oscilacija sistema sa dve mase*



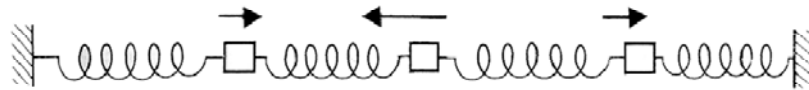
## Stepeni longitudinalnih vibracija sistema sa tri mase



**a**



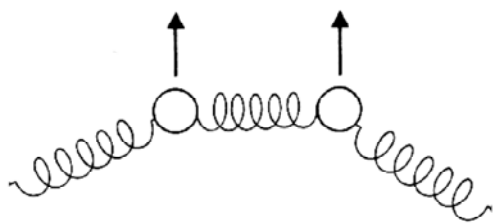
**b**



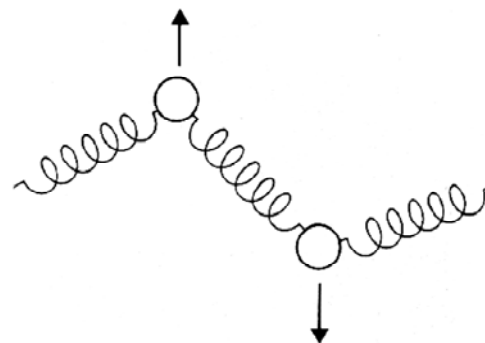
**c**

*Slika 1.5.2: Stepeni longitudinalnih oscilacija sistema sa tri mase*

## Stepeni transverzalnih vibracija sistema sa dve mase



**a**



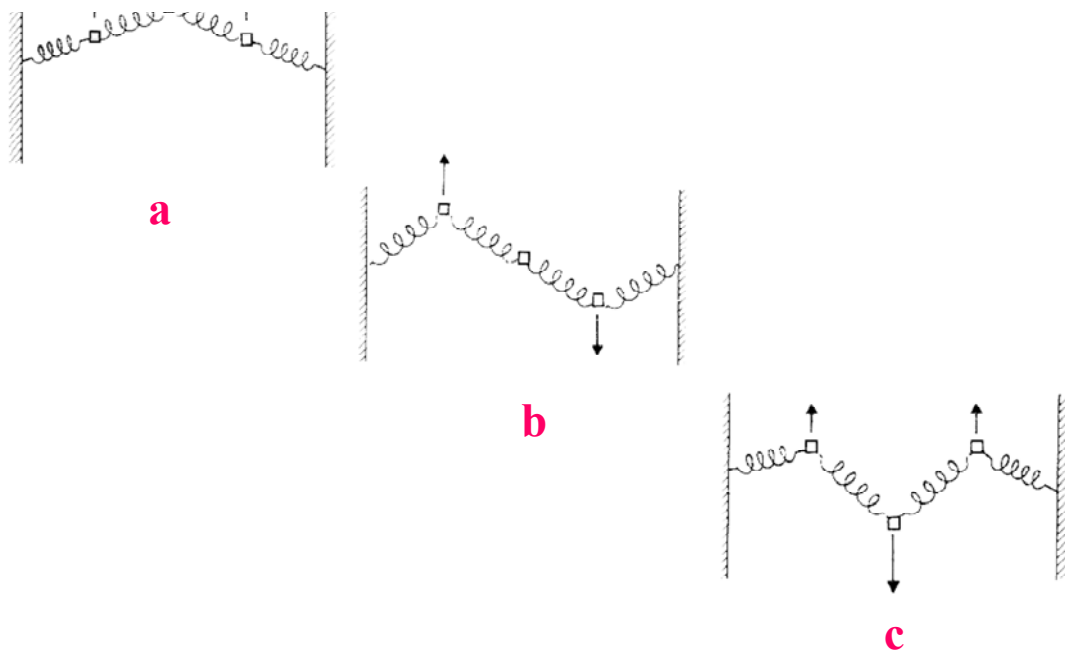
**b**

**a** Slučaj pri nižim frekvencijama.

**b** Slučaj pri višim frekvencijama.

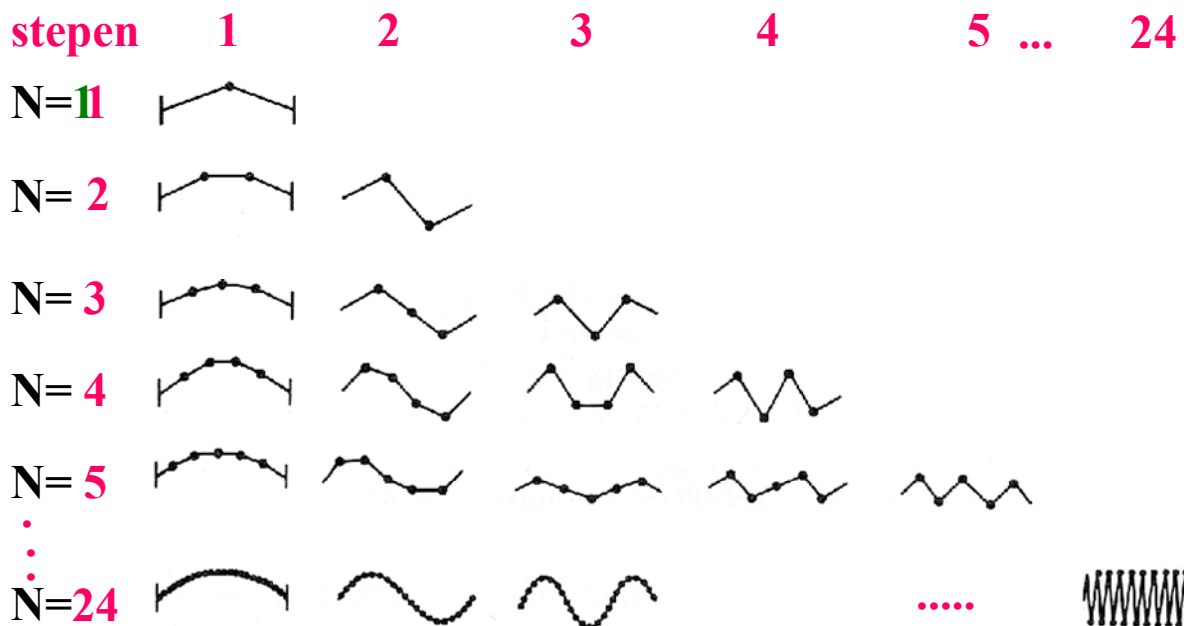
*Slika 1.5.3: Stepeni transverzalnih oscilacija sistema sa dve mase*

## Stepeni transverzalnih vibracija sistema sa tri mase



Slika 1.5.4: Stepeni transverzalnih oscilacija sistema sa tri mase

## Stepeni transverzalnih vibracija sistema sa različitim brojem masa

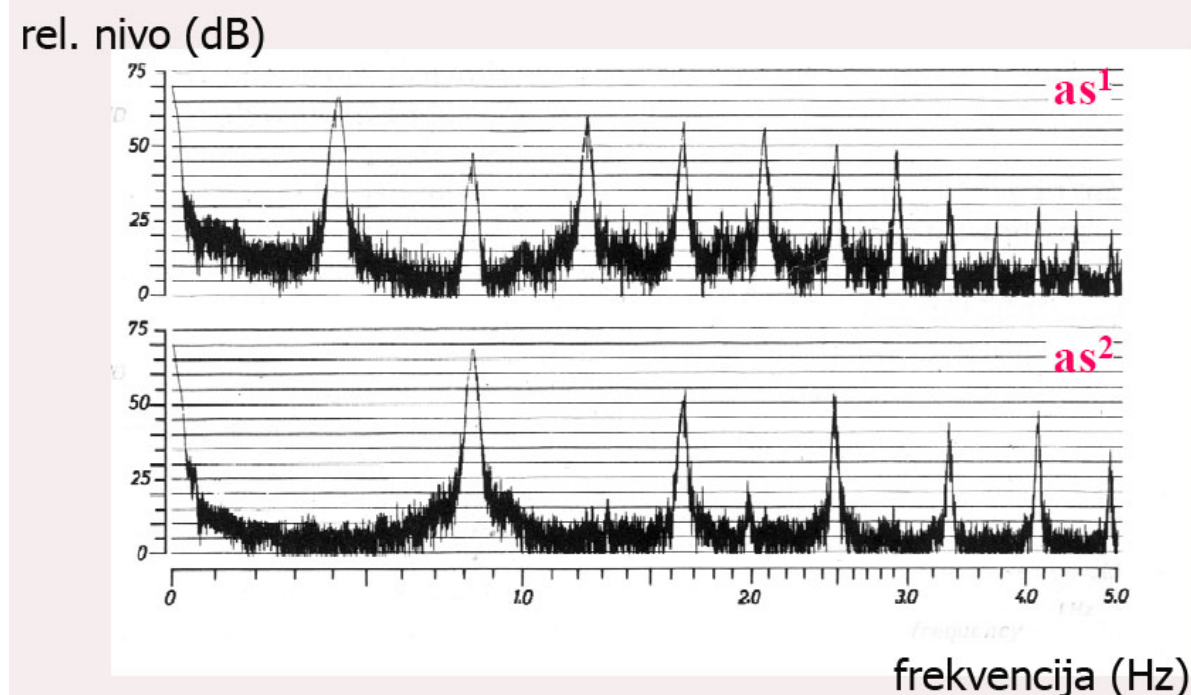


Slika 1.5.5: Stepeni transverzalnih oscilacija sistema sa različitim brojem masa

Kod većine muzičkih instrumenata (žičani, duvački) viši harmonici su u harmonijskom odnosu prema osnovnom harmoniku (jednaki su celobrojnom umnošku frekvencije osnovnog harmonika). Kod nekih muzičkih instrumenata (ksilofon, marimba) taj odnos nije tako jednostavan [41].

**Frekvencijski spektar** tona nekog muzičkog instrumenta je istovremeno pojavljivanje osnovnog harmonika (frekvencije osnovnog tona) i viših harmonika (frekvencija koje su jednake celobrojnom umnošku frekvencije osnovnog tona). Viši harmonici imaju različit intenzitet. Primer: na slici je prikazan frekvencijski spektar klarineta za ton  $as^1$  i  $as^2$ . Za  $as^1$  frekvencija u muzičkoj skali je 415.30 Hz. To je frekvencija prvog vertikalnog pika na slici. Drugi pik je zapravo drugi harmonik (drugi stepen vibracije) i njegova frekvencija je dvostruko veća od frekvencije osnovnog tona ( 830.60 Hz). Svi naredni pikovi su viši harmonici i njihove frekvencije su celobrojni umnošci frekvencije osnovnog tona (  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ ,...) [72] . Na slici se može uočiti da su nivoi harmonika različiti.

## Spektar klarineta



Slika 1.5.6: Frekvencijski spektar klarineta

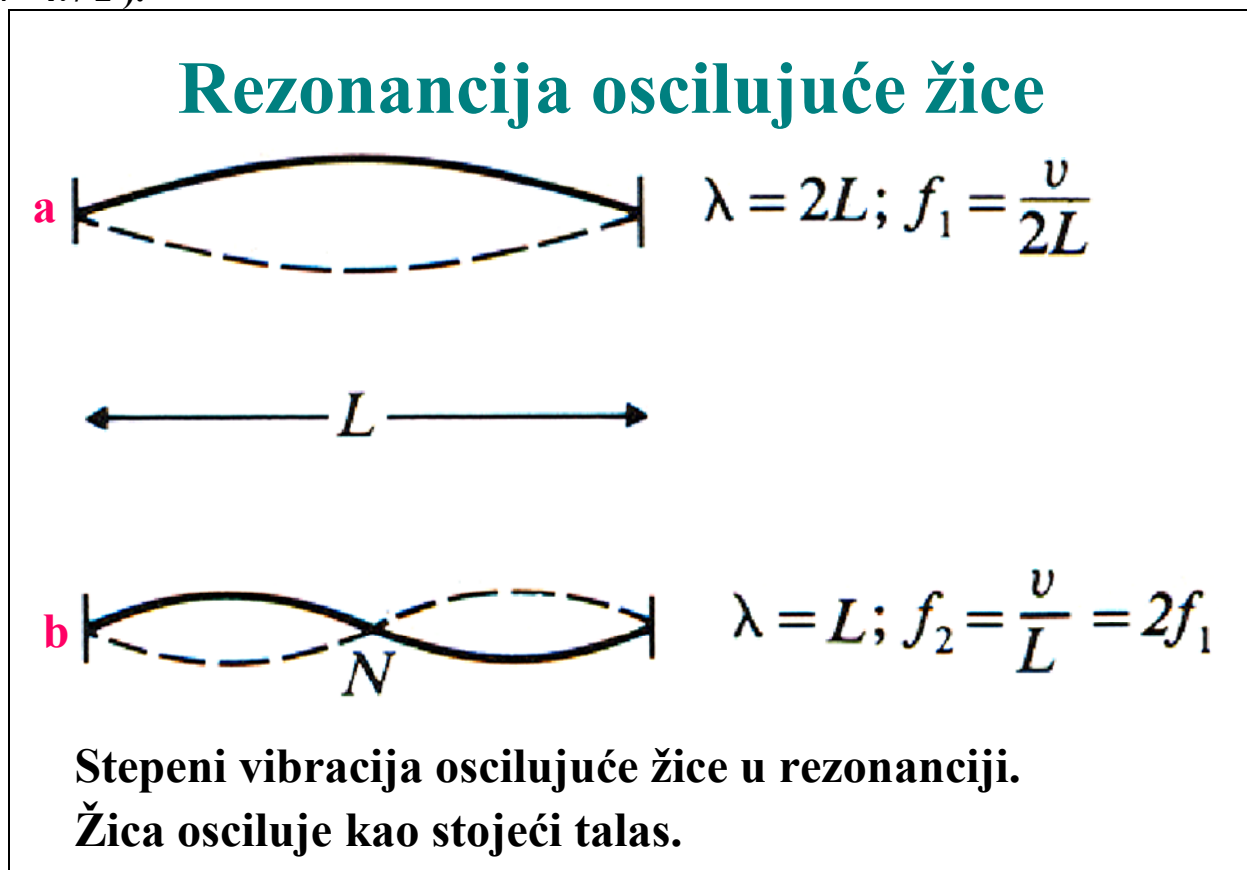
Na slici frekvencijskog spektra je zanimljivo još nešto: ako se uporedi frekvencijski spektar tona  $as^1$  i tona  $as^2$ , deluje kao da drugi spektar ima svaki drugi harmonik. Ali to nije zapravo tako. Osnovni ton  $as^2$  ima dvostruko veću frekvenciju od tona  $as^1$  ( 830.60 Hz), pa su samim tim i frekvencije njegovih viših harmonika dvostruko veće nego za  $as^1$  (to su frekvencije parnih harmonika tona  $as^1$ ).

### 1.5.1 BOJA TONA

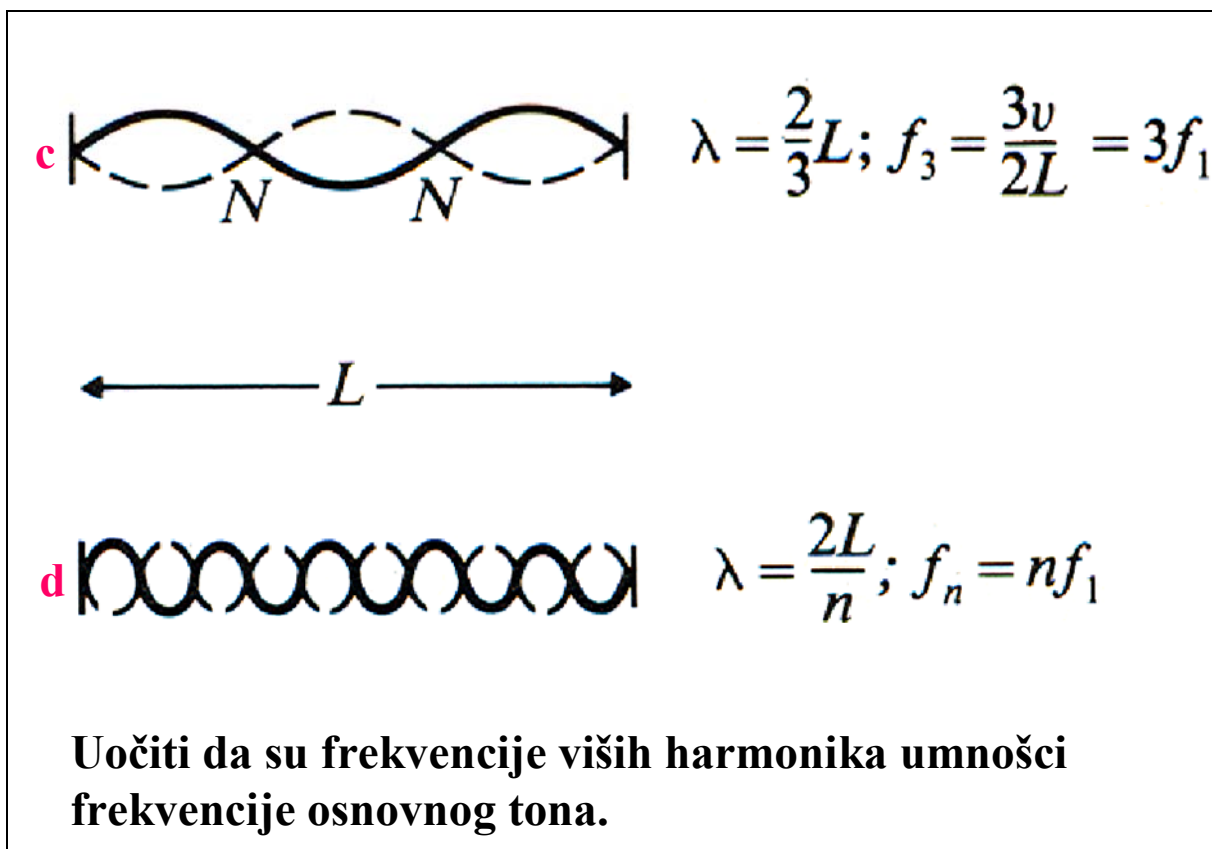
Boja je jedna od osnovnih karakteristika svakog zvuka. Čak i oni koji nisu muzički obrazovani u stanju su da čuju razliku između tona iste frekvencije odsviranog na dva različita muzička instrumenta. Svaki muzički instrument ima svoju boju. Zapis leži u frekvencijskom spektru. Različiti nivoi pojedinih viših harmonika definišu boju tona nekog muzičkog instrumenta. Kod nekih instrumenata viši harmonici više doprinose spektru i boja tona se znatno menja zbog njihovog prisustva (fagot), a kod drugih instrumenata je doprinos viših harmonika boji tona manji (flauta, violina) [5].

### 1.5.2 NASTAJANJE VIŠIH HARMONIKA

Nastajanje viših harmonika je najlakše uočiti i objasniti na primeru nekog žičanog instrumenta (formiranje stojećeg talasa se lakše vidi na žici nego u cevi). Neka to bude gitara, kao svima poznat muzički instrument. Žica na gitari je pričvršćena na oba kraja vrata gitare. S jedne strane je učvršćenje na glavi vrata. Sa druge strane je učvršćenje na kobilici. Kada okinemo žicu i ona zavibrira, ti učvršćeni krajevi predstavljaju čvorove stojećeg talasa. Žica može oscilovati bilo kojim stepenom vibracije za koji važi da je dužina same žice jednaka celobrojnom umnošku polovine talasne dužine stojećeg talasa ( $L = n \cdot \lambda / 2$ ).



Slika 1.5.2.1 a: Rezonancija oscilujuće žice – prva dva stepena



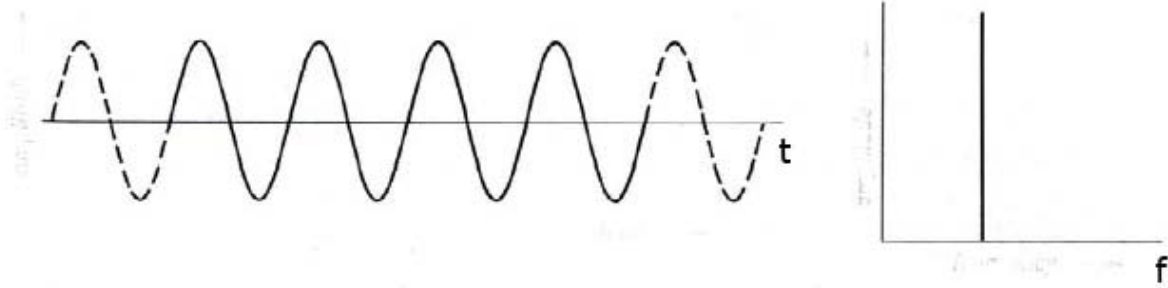
*Slika 1.5.2.1 b: Rezonancija oscilujuće žice – n – ti stepen*

Ako žicu okinemo na polovini, javiće se na tom mestu trbuh stojećeg talasa (čvorovi će biti na učvršćenim krajevima). Pošto svi neparni stepeni vibracije imaju trbuh u toj tački, svi neparni stepeni vibracije će postojati u tom stojećem talasu. Sa druge strane, svi parni stepeni vibracije imaju čvor u toj tački. Zbog toga će parni stepeni vibracije biti prigušeni, ili ih uopšte neće biti u sastavu stojećeg talasa [72].

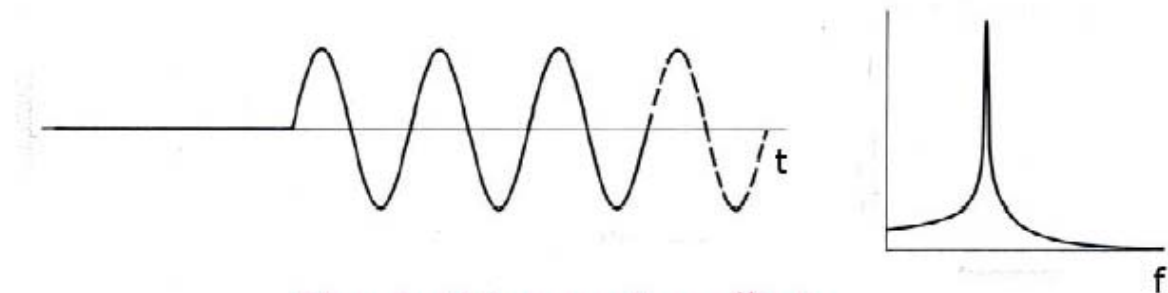
Najjednostavniji ton ima talasni oblik sinusoide. Talasni oblik je predstavljanje zavisnosti promene amplitude talasa tokom vremena.

Tonovi dobijeni na različitim muzičkim instrumentima ne predstavljaju uvek prosto oscilatorno kretanje i ne mogu se uvek prikazati sinusoidalnim talasnim oblikom. Često su složeniji i predstavljaju kombinaciju talasnih oblika osnovnog tona i celobrojnih umnožaka frekvencije osnovnog tona. Raspodela energije po harmonicima je različita za različite muzičke instrumente. Kod violine je nivo harmonika u pravilnom opadajućem nizu. Kod duvačkih instrumenata postoje odstupanja u smislu da je treći harmonik većeg intenziteta nego drugi (flauta) [22'], da su neparni harmonici većeg intenziteta nego parni (klarinet) [5'], da su viši harmonici većeg intenziteta nego osnovni harmonik (fagot, gajde, truba). Karakteristike spektra muzičkih instrumenata su često potpuno drugačije u različitim delovima tonskog opsega instrumenta (raspodela energije po harmonicima je različita u različitim oktavama) [55]. Sve ovo karakteriše boju tona jednog muzičkog instrumenta.

## Talasni oblik spektra



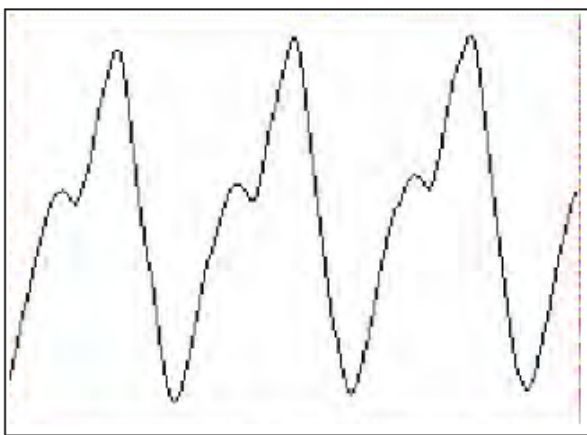
**Konstantan ton**



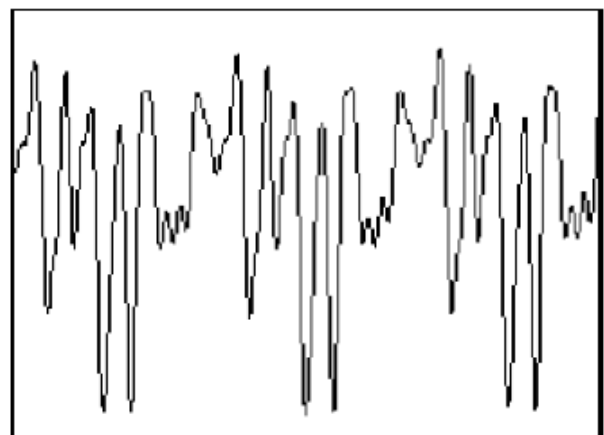
**Ton koji iznenada počinje**

*Slika 1.5.2.2 : Talasni oblik i spektar*

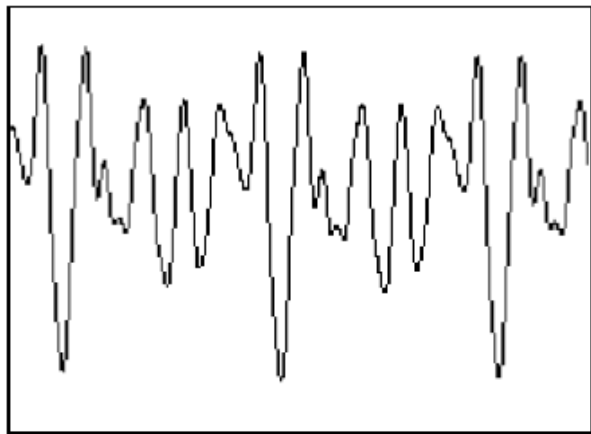
## Talasni oblici tonova nekih muzičkih instrumenata



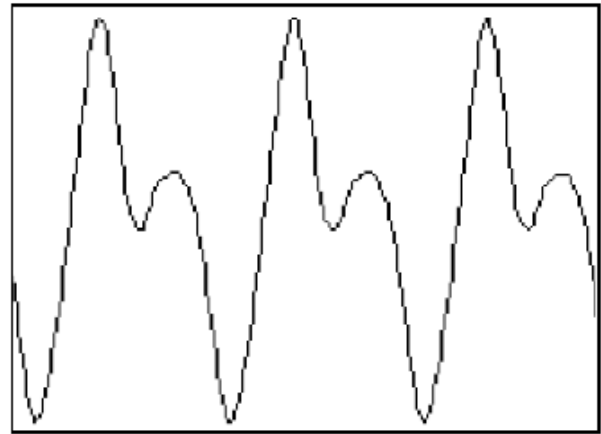
**violina  $e^2$**



**klarinet  $f$**



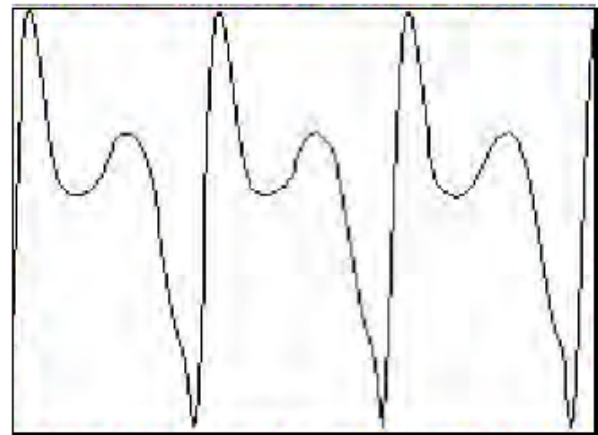
**fagot F**



**fagot h<sup>1</sup>**



**truba b**



**truba d<sup>2</sup>**

*Slika 1.5.2.3 : Talasni oblici tonova nekih muzičkih instrumenata*

### 1.5.3 MUZIČKI TONOVI

Kod nekih naroda najzastupljeniji muzički instrumenti pripadaju grupi udaračkih muzičkih instrumenata. Kod tih instrumenata je ritam daleko važniji od frekvencijskog spektra (boje) zvuka. Kod većine naroda, međutim, mnogo su zastupljeniji duvački i žičani muzički instrumenti koji se često sviraju istovremeno. Da bi to bilo moguće, neophodno je bilo usvojiti neke dogovore po pitanju frekvencija tonova. Tako je nastala muzička skala [37].

Kada se čuje čisti ton, to je talas jedne frekvencije. Talasni oblik takvog tona je sinusoida. Ako imamo dva čista tona, superpozicija se odvija kao i superpozicija dva prostoharmonijska kretanja. Ako tonovi imaju istu frekvenciju, rezultatna amplituda će biti od  $A + B$  do  $A - B$ , u zavisnosti od njihove fazne razlike. To znači da dva tona odsvirana na dve žice na gitari

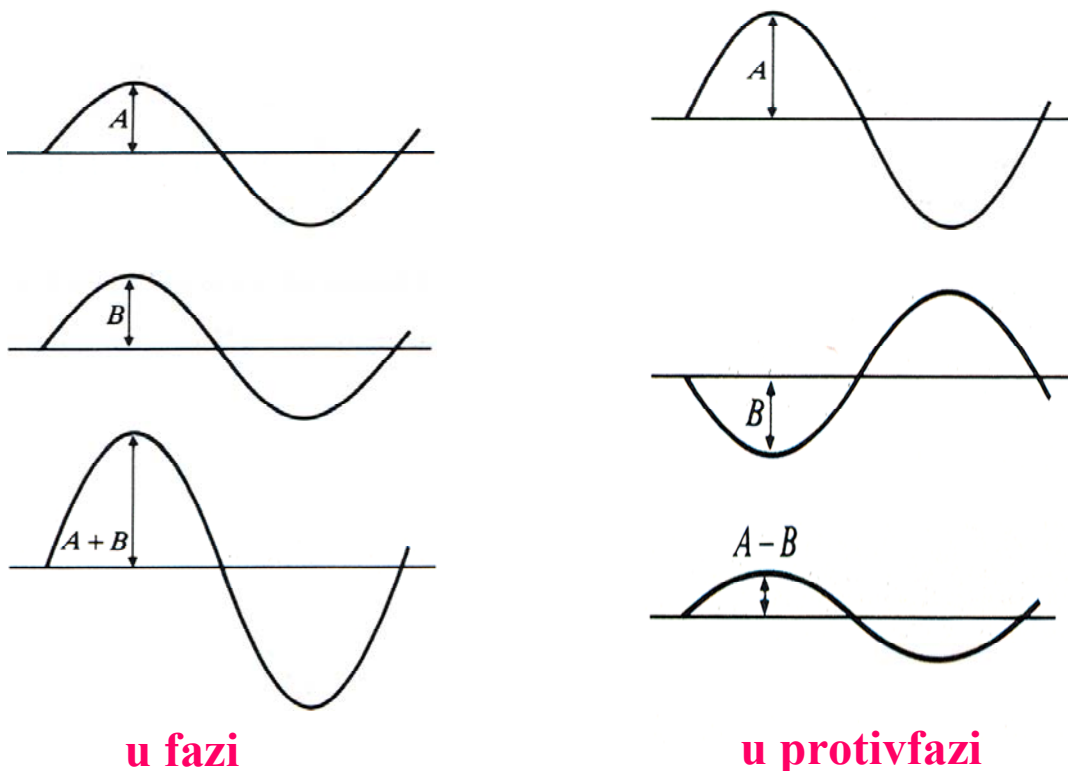
moгу biti superponirana tako da se čuje jači ton od pojedinačnog jednog ili drugog, ali i tako da se ne čuje ništa.

Ako dva čista tona imaju malu frekvencijsku razliku ( $f_1$  i  $f_1 + \Delta f$ ), fazna razlika se menja kroz vreme pa se i razlika amplituda menja tokom vremena: od  $A + B$  do  $A - B$  za frekvenciju  $\Delta f$ . Ova variranja u amplitudi zovu se **udari**. Ako su amplitude iste, rezultanta varira od  $0 - 2A$ , ali nije nužno da se čuju udarne pojave. Ako je frekvencija malo različita, javljaju se zvučni udari na toj  $\Delta f$ . Udari se čuju kao pojačano zvučno pulsiranje na frekvenciji  $f = \frac{1}{2} (f_1 + f_2)$  [72].

Sve dok je  $\Delta f$  manje od 10 Hz, udari se čuju lako. Kada je  $\Delta f > 15$  Hz, udari nestaju. Pojavljuje se oštrina u zvuku. To je **disonancija**. Disonancija je najjača kada je razlika frekvencija jednaka  $\frac{1}{4}$  širine kritičnog opsega [72].

**Konsonancija** nastaje kada razlika frekvencija postane veća od širine kritičnog opsega. Konsonancija znači da taj interval zvuči prijatno za uho.

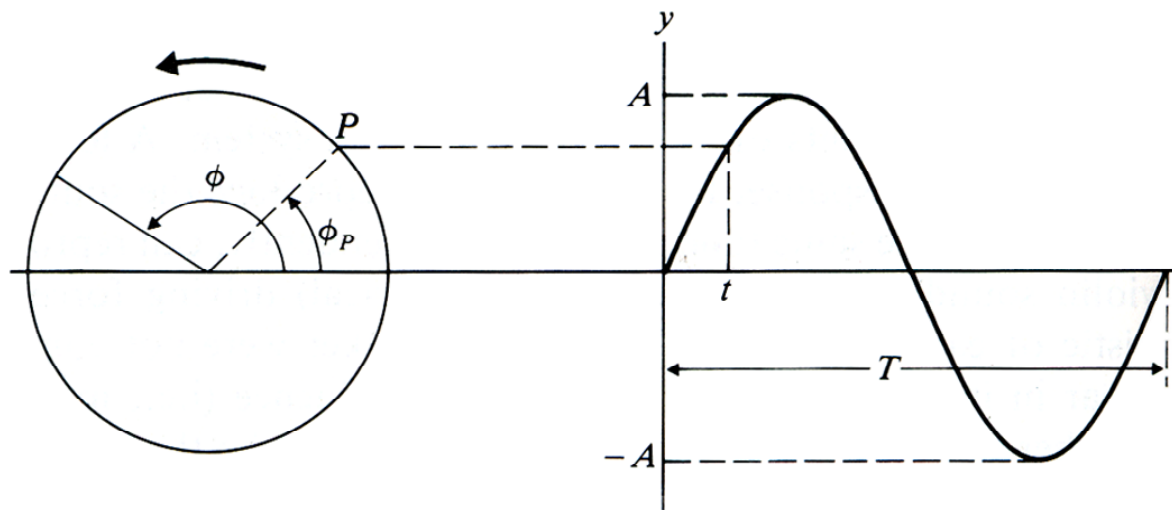
## Superpozicija dva fazno pomerenog signala



Slika 1.5.3.1 : Superpozicija dva prostoperiodična signala

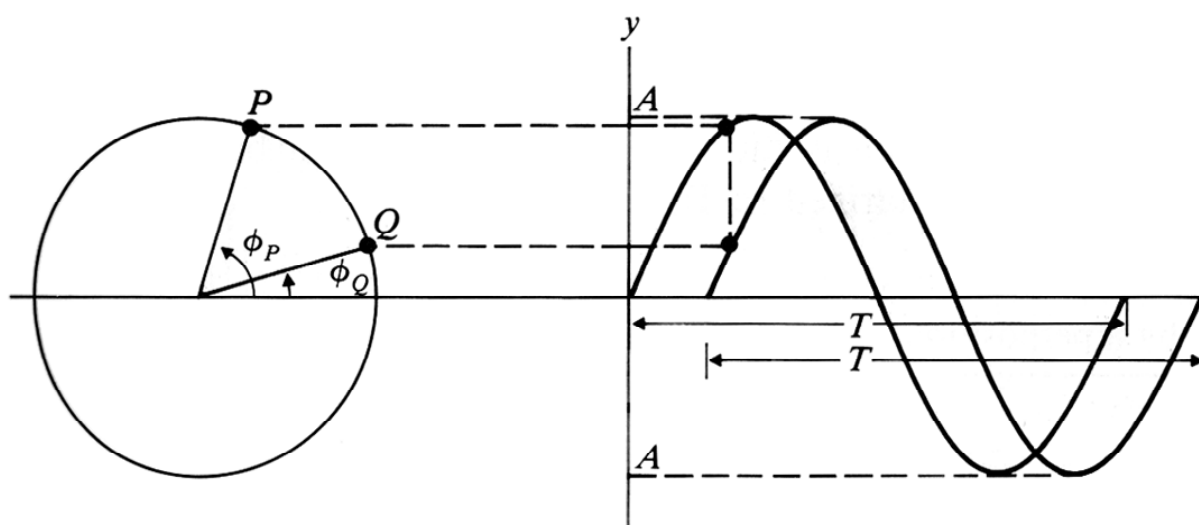


## Predstavljanje rotacionog kretanja sinusoidom



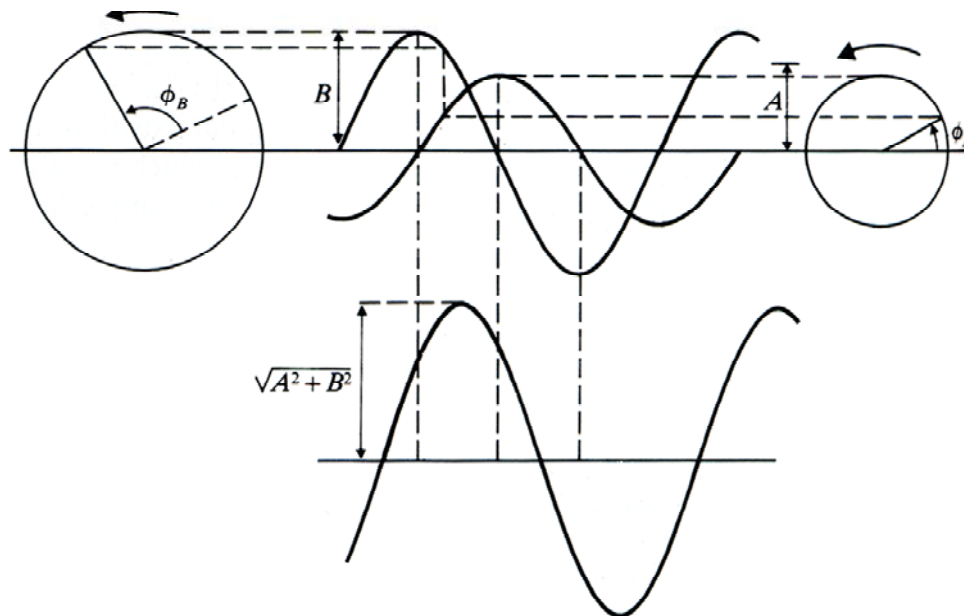
Slika 1.5.3.2 : Predstavljanje rotacionog kretanja sinusoidom

## Dva fazno pomerena signala



Slika 1.5.3.3 : Dva fazno pomerena signala

## Superpozicija dva fazno pomerenena signala



Signali su fazno pomereni za  $\pi/2$ .

Slika 1.5.3.4 : Superpozicija dva fazno pomerenena signala

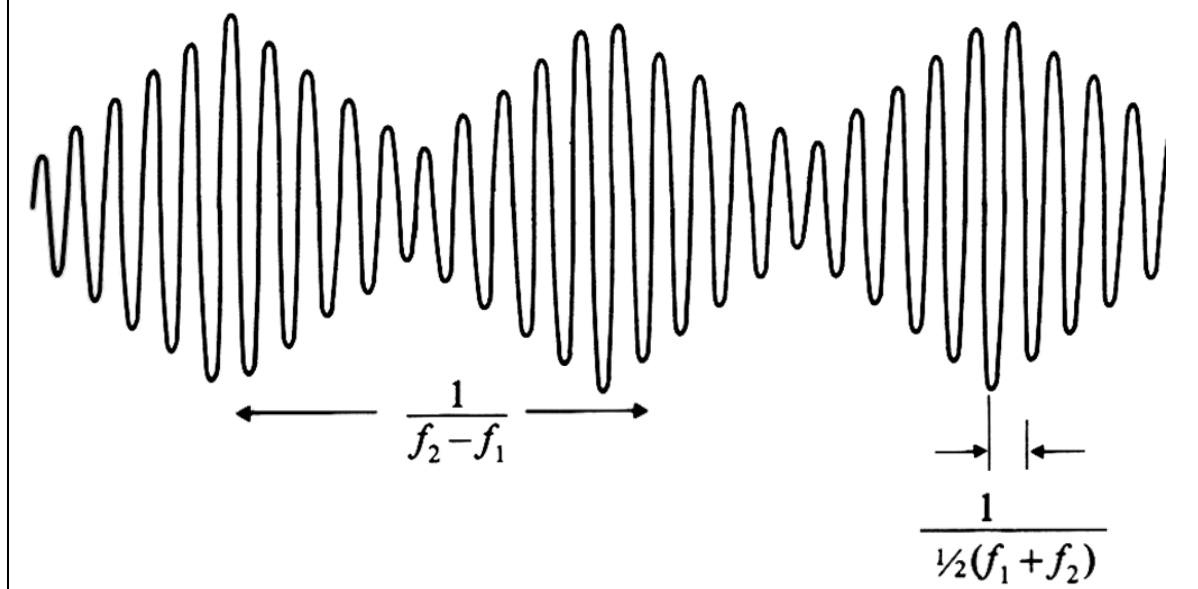
## Amplituda superponiranog signala

0	45°	90°
$A + B$	$\sqrt{A^2 + B^2 + 1.4AB}$	$\sqrt{A^2 + B^2}$
135°	180°	270°
$\sqrt{A^2 + B^2 - 1.4AB}$	$A - B$	$\sqrt{A^2 + B^2}$

Signali su fazno pomereni, a iste frekvencije.

Slika 1.5.3.5 : Amplituda superponiranog signala

## Talasni oblik sa udarima



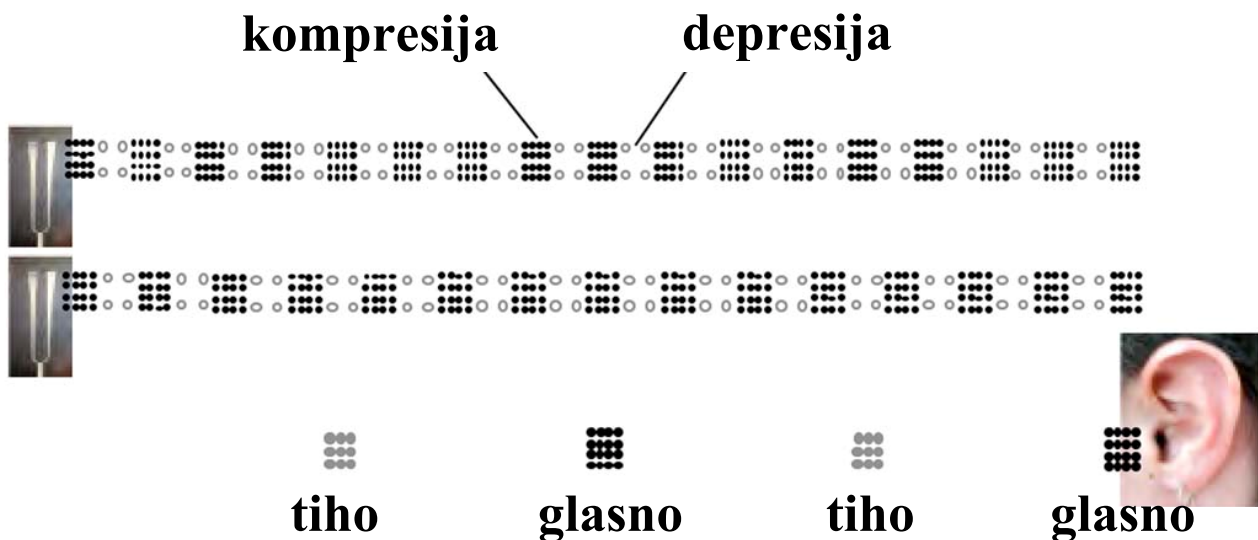
Slika 1.5.3.6 : Talasni oblik sa udarima

Pomoću udara može da se naštimuje žičani muzički instrument. Gitara se po sluhu štимуje tako. Postoje i udari drugog reda. Oni se javljaju ako su frekvencije signala  $f_2 = 2 \cdot f_1 + \delta$  (ili u nekom drugom malo frekvencijski pomerenom konsonantnom odnosu) i to na frekvenciji  $\delta$ . Udari drugog reda se koriste za štımovanje gudačkih instrumenata i klavira. Pomoću njih se mogu naštimovati savršeno konsonantni intervali.

Na slici je prikazana rezonancija dve zvučne viljuške čiji su tonovi frekvencijski pomereni za  $\Delta f$ , a zvuče istovremeno. Zbog razlike u frekvenciji tonova nastaju kompresije i depresije signala. Kompresije imaju pritisak veći nego što je prosečni atmosferski pritisak, a depresije imaju pritisak manji nego što je prosečni atmosferski pritisak. Za vreme za koje gornja zvučna viljuška proizvede 17 kompresija, donja zvučna viljuška (na slici) proizvede 15. Ako slušamo ove zvučne viljuške ponaosob, tokom vremena od 0.5 sekundi, gornja se čuje frekvencijom od 34 Hz, a donja frekvencijom od 30 Hz. Ako slušamo obe zvučne viljuške istovremeno, čućemo interferenciju. Postoje mesta u prostoru gde se progresije zvučnih talasa obe zvučne viljuške kombinuju i dostižu maksimum. Tu je zvuk najglasniji. Postoje mesta gde se progresija zvučnog talasa jedne zvučne viljuške kombinuje sa regresijom zvučnog talasa druge zvučne viljuške. Tu se postiže normalan atmosferski pritisak i nema zvuka uopšte [48]. U međuvremenu se zvuk pojačava ili utišava. Na dnu slike je prikazan ritam pojavljivanja najglasnijeg i potpuno

nečujnog tona. To su udari. Za 0.5 s, koliko traje prikazani zvuk na slici, ostvarena su dva perioda, što znači da je frekvencija udara 4 Hz. Uho će da perceptuje prosečnu frekvenciju ove dve zvučne viljuške od 32 Hz koja se pojačava i utišava 4 puta u sekundi. Treba uočiti da je 4 Hz takođe razlika frekvencija talasa ove dve zvučne viljuške.

## Udari



Slika 1.5.3.7 : Udari

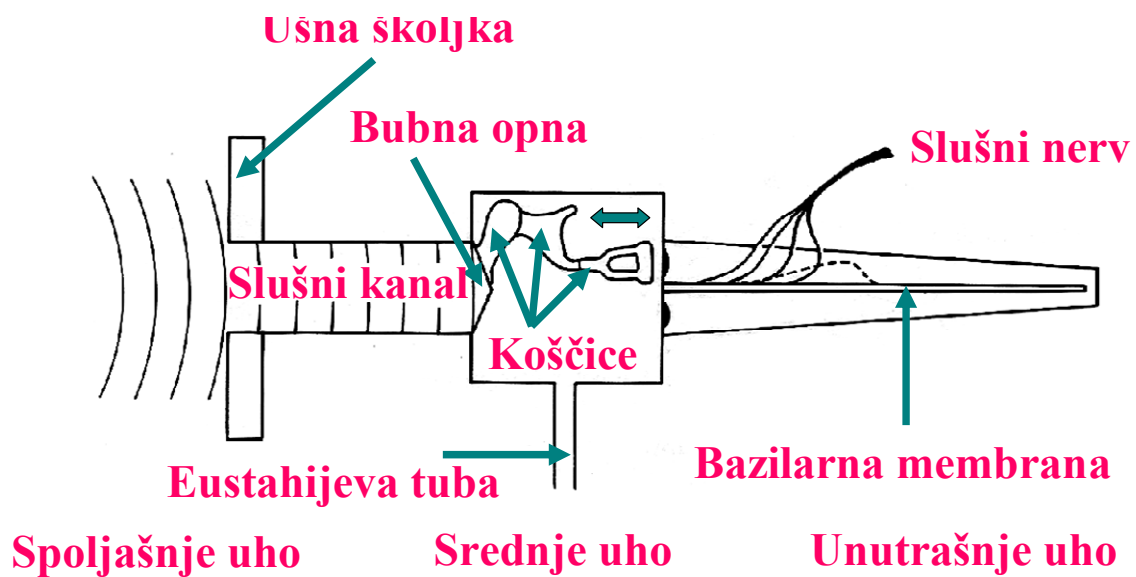
Frekvencija udara opada kad se razlika frekvencija talasa smanjuje i postaje jednaka 0 kada se frekvencije talasa izjednače. Tako se štimuju žice na gitari: okinemo 2 žice istovremeno i štimujemo jednu prema drugoj, sve dok udari ne iščeznu potpuno.

### 1.5.4 KRITIČNI OPSEZI. KONSONANCIJA I DISONANCIJA

Kada se zvučni talas prostire u ljudskom uhu, on izaziva vibracije bazilarne membrane u unutrašnjem uhu. Različite frekvencije stimulišu različite treplje na bazilarnoj membrani i šalju različite električne impulse mozgu. Na taj način ljudsko uho razlikuje različite frekvencije.

Ako su dva tona bliskih frekvencija, može doći do preklapanja kritičnih opsega na bazilarnoj membrani. To prouzrokuje maskiranje zvuka. Tonovi visokih frekvencija stvaraju nadražaje na samom početku bazilarne membrane, blizu ovalnog prozora. Tonovi niskih frekvencija stvaraju nadražaje na najudaljenijem kraju bazilarne membrane od ovalnog prozora. Ako je razlika frekvencija dva tona veća, do preklapanja ne dolazi, ili je malo. Ako je razlika frekvencija dva tona mala, preklapanje je veće.

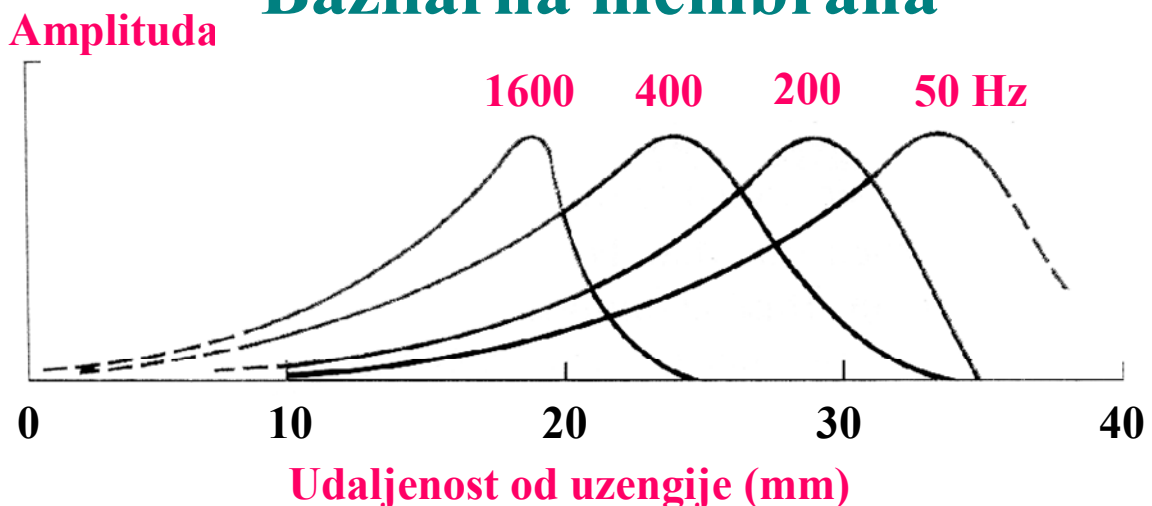
## Mehanička šema uha



Zvučni talas u spoljašnjem uhu prouzrokuje mehaničke vibracije u srednjem uhu i, konačno, nervni impuls koji putuje ka mozgu.

Slika 1.5.4.1 : Mehanička šema uha

## Bazilarna membrana

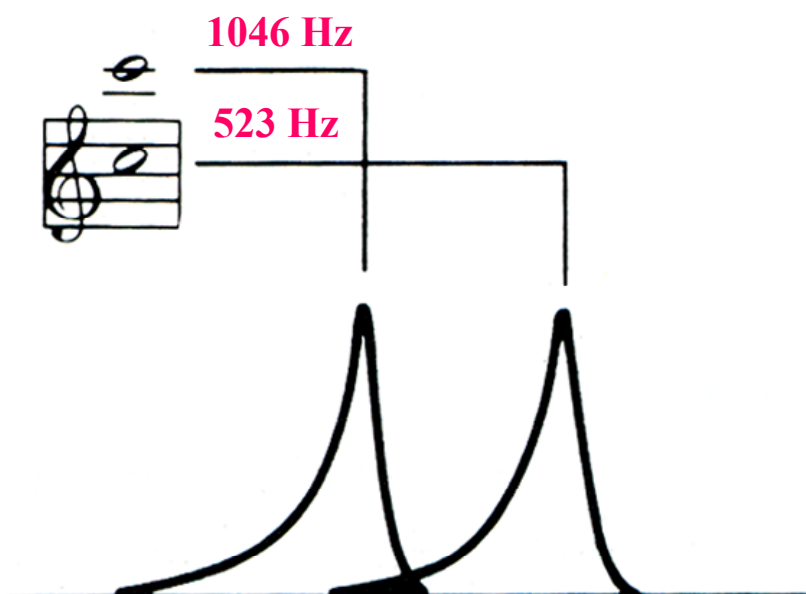


Tonovi visokih frekvencija stvaraju talasanje najveće amplitude bliže ovalnom prozoru, gde je bazilarna membrana ravna i čvrsta.

Tonovi niskih frekvencija stvaraju talasanje najveće amplitude na samom kraju.

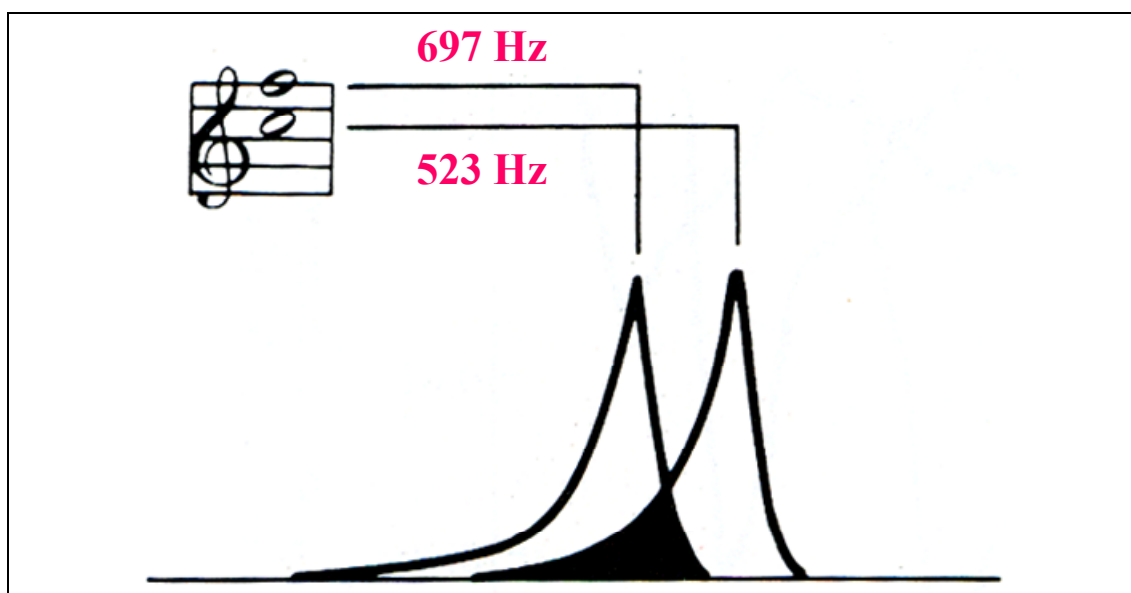
Slika 1.5.4.2 : Bazilarna membrana

## Frekvencijski odziv bazilarne membrane

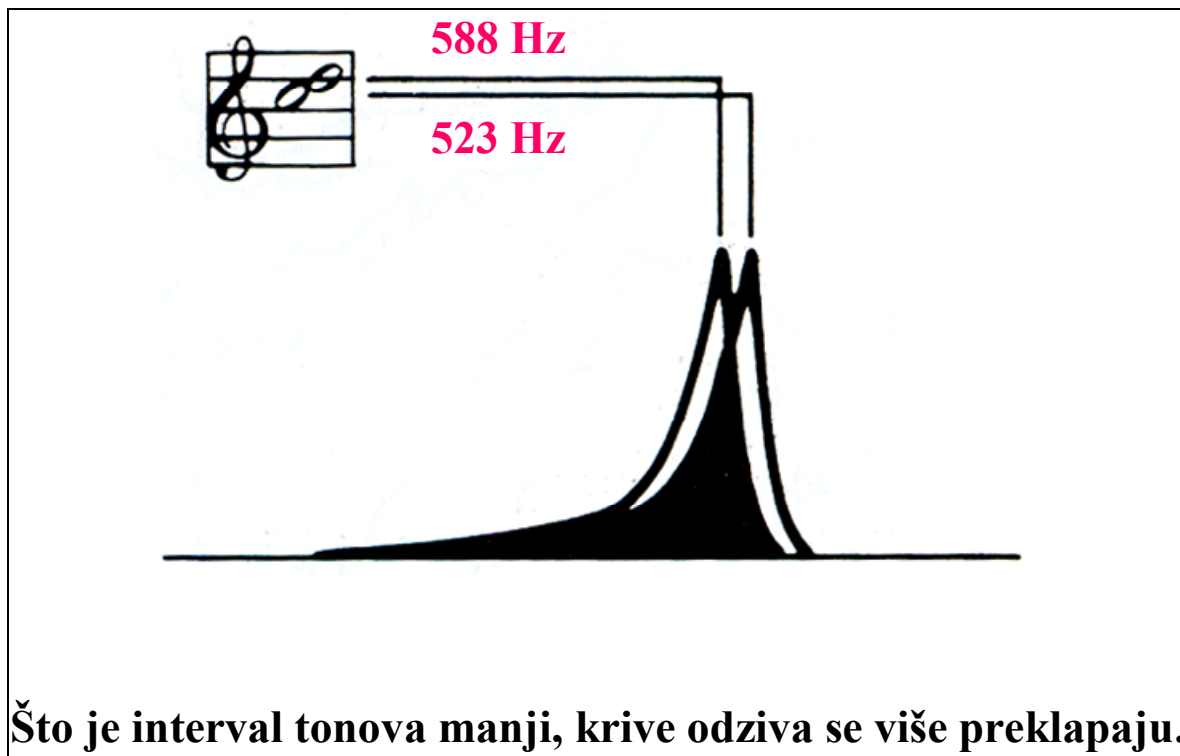


**Za veliki interval tonova, preklapanje je malo.**

*Slika 1.5.4.3 a : Frekvencijski odziv bazilarne membrane za veliki interval*



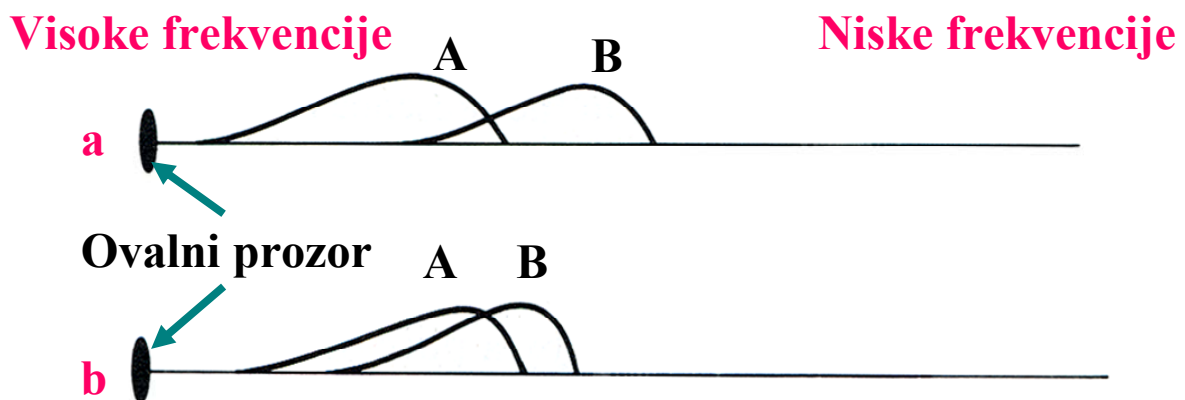
*Slika 1.5.4.3 b : Frekvencijski odziv bazilarne membrane za srednji interval*



Slika 1.5.4.3 c : Frekvencijski odziv bazilarne membrane za mali interval

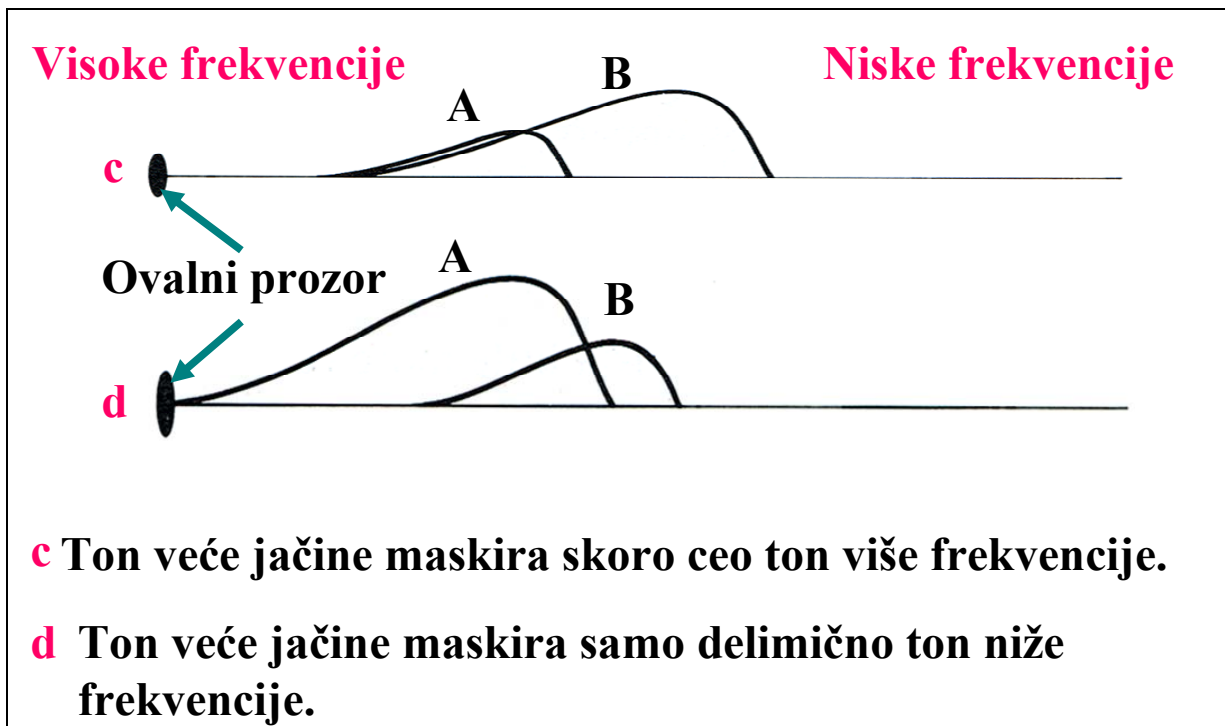
Ton koji ima veću jačinu, a manju frekvenciju može kompletno da maskira ton manje jačine, a više frekvencije. Za razliku od toga, ton koji ima veću jačinu i višu frekvenciju ne može potpuno da maskira ton manje jačine.

## Maskiranje zvuka



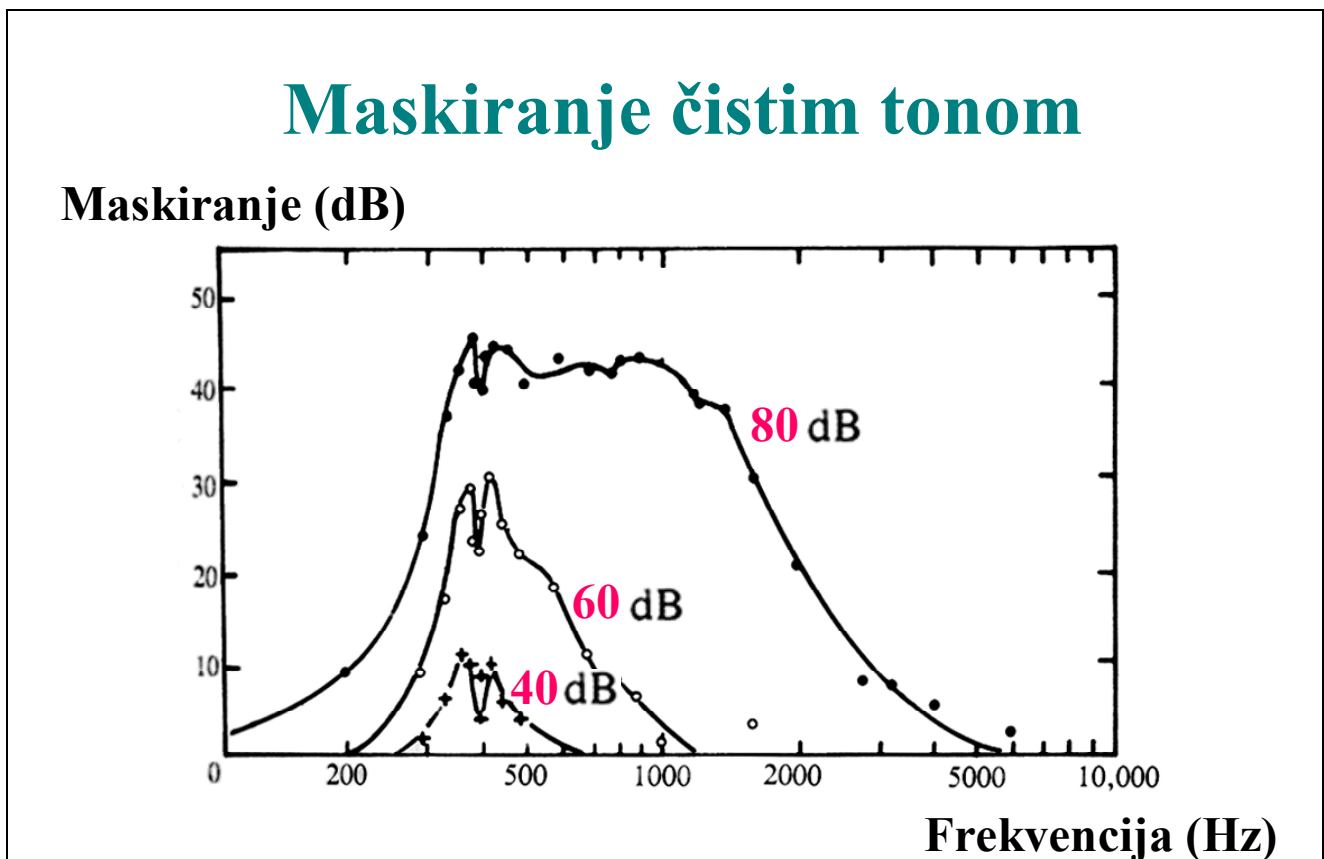
- a** Ako su dva tona različitih frekvencija, maskiranja nema (ili je malo).
- b** Ako su tonovi bliskih frekvencija, više se međusobno maskiraju.

Slika 1.5.4.4 a :Maskiranje zvuka za tonove različitih i bliskih frekvencija



*Slika 1.5.4.4 b :Maskiranje zvuka za tonove različitih jačina*

Ako su frekvencije tonova bliske, nemoguće je razlikovati ta dva tona. Čujemo ih kao 1 sa prosečnom frekvencijom. Ako su frekvencije 440 Hz i 450 Hz, čućemo ton od 445 Hz sa udarima 10 puta u sekundi.

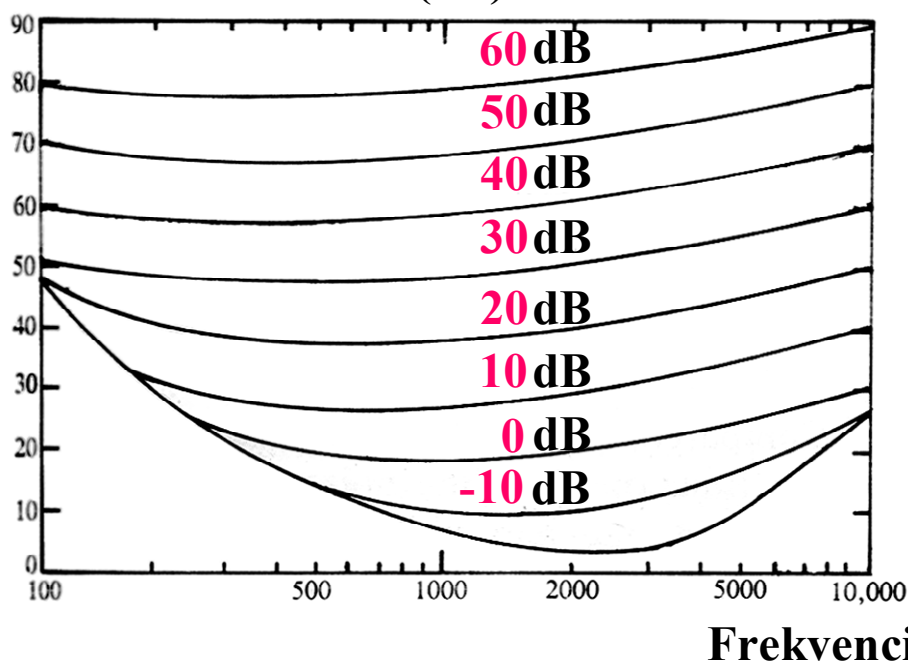


*Slika 1.5.4.5 :Maskiranje čistim tonom*



# Maskiranje belim šumom

Nivo jačine zvuka test tona (dB)



**Beli šum maskira sve frekvencije linearno: porast nivoa buke za 10 dB povećava prag čujnosti za 10 dB.**

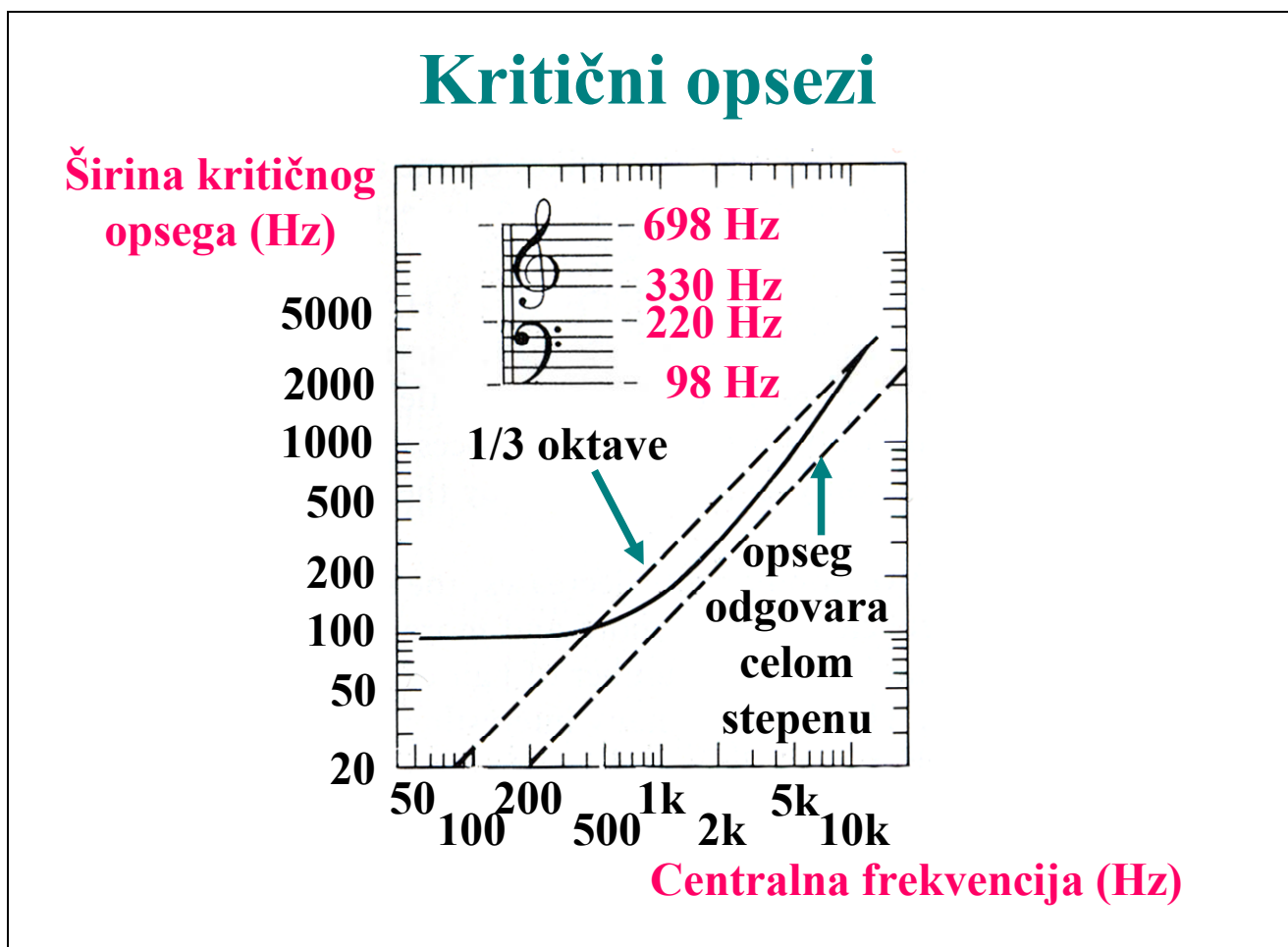
Slika 1.5.4.6 :Maskiranje belim šumom

Postoji maskiranje spreda, s kraja i centralno maskiranje. Maskiranje spreda je maskiranje zvukom koji se završi 20 – 30 ms pre drugog tona. Maskiranje s kraja je maskiranje tonom koji počne do 10 ms kasnije. Centralno maskiranje je kada je ton u jednom uhu poklopljen tonom u drugom uhu.

Na bazilarnoj membrani su, po dužini, raspoređeni **kritični opsezi**. Svaki kritični opseg može da se posmatra kao baza podataka bazilarne membrane u unutrašnjem uhu. U okviru slušnog opsega postoje 24 kritična opsega. Svaki zauzima 1.3 mm dužine bazilarne membrane i obuhvata oko 1300 neurona. Svaki kritični opseg ima svoju centralnu frekvenciju oko koje je raspoređen, svoju širinu koja pokazuje koliko je specifično slušno područje tog kritičnog opsega. Kada su frekvencije tonova toliko bliske da izazivaju udare ili nelagodnost, to znači da pripadaju istom kritičnom opsegu.

Ako frekvenciju jednog tona držimo na 440 Hz, a frekvenciju drugog tona postepeno povećavamo, prvo će nestati udari kao pojava. Ako nastavimo da povećavamo frekvenciju drugog tona postepeno će početi da se oseća neprijatnost i nelagodnost. Ta pojava se naziva **disonancija**. U muzici se tonovi koji se sviraju zajedno nazivaju **intervali**. Postoje disonantni intervali, koji se tako zovu upravo jer nisu prijatni za slušanje. To su: sekunda, septima. Sve dok su frekvencije ta dva tona u okviru istog kritičnog opsega,

postoji disonancija. Kada povećavanjem frekvencije drugog tona postignemo vrednost koja je veća od širine kritičnog opsega, nastupiće pojava koja se zove **konsonancija**. U muzici postoje konsonantni intervali, koji se tako zovu jer su prijatni za slušanje. To su: terca, seksta, kvarta, kvinta, oktava [91].



Slika 1.5.4.7 :Kritični opsezi

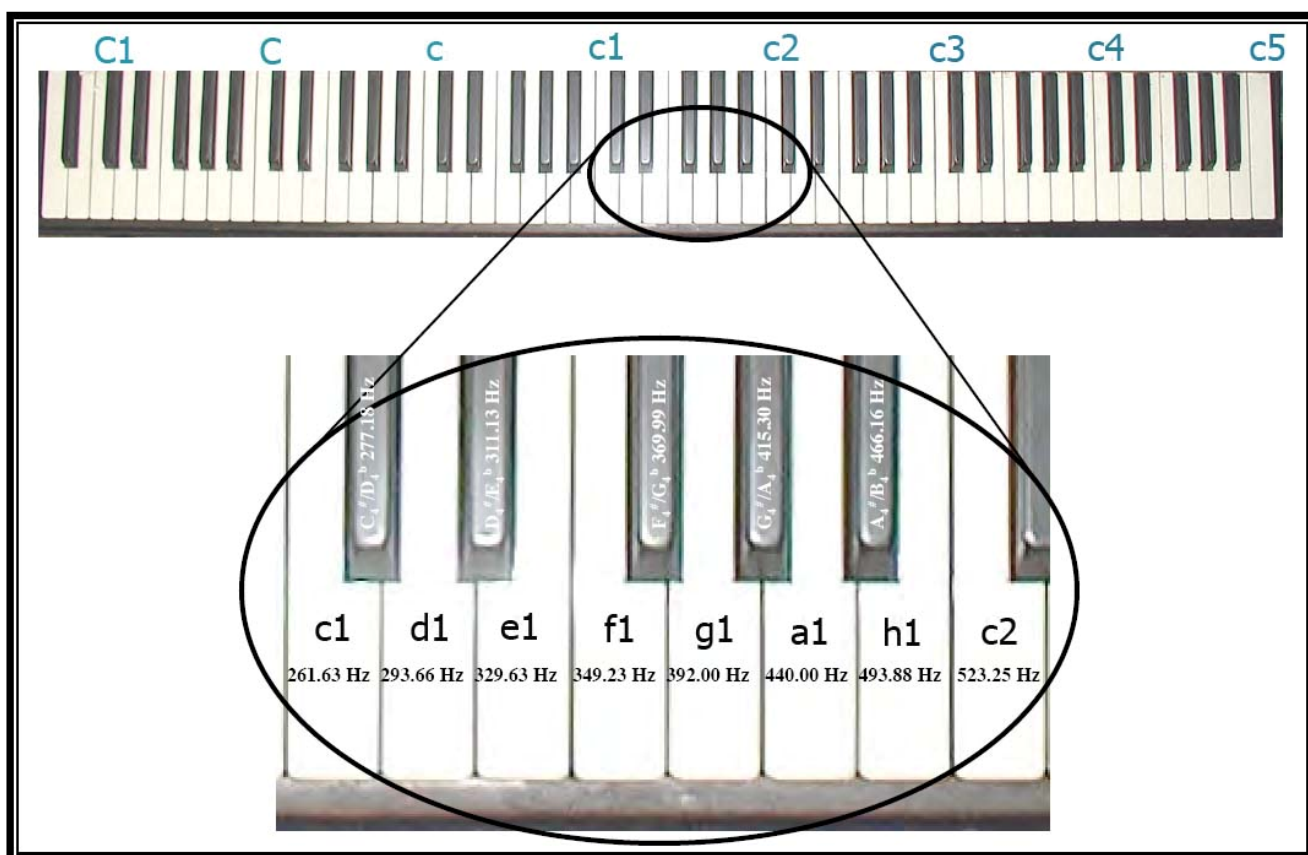
Centralna frekvencija (Hz)	Širina kritičnog opsega (Hz)
100	90
200	90
500	110
1000	150
2000	280
5000	700
10000	1200

Slika 1.5.4.8 :Širine kritičnih opsega za različite centralne frekvencije

Važno je naglasiti da, ako se istovremeno proizvode dva tona različite frekvencije, međusobno bliske, čuće se jedan ton uprosečene frekvencije sa udarima čija je frekvencija jednaka razlici frekvencija ta dva tona.

## 2. FIZIKA MUZIKE

### 2.1 MUZIČKE SKALE



Slika 2.1.1: Skala

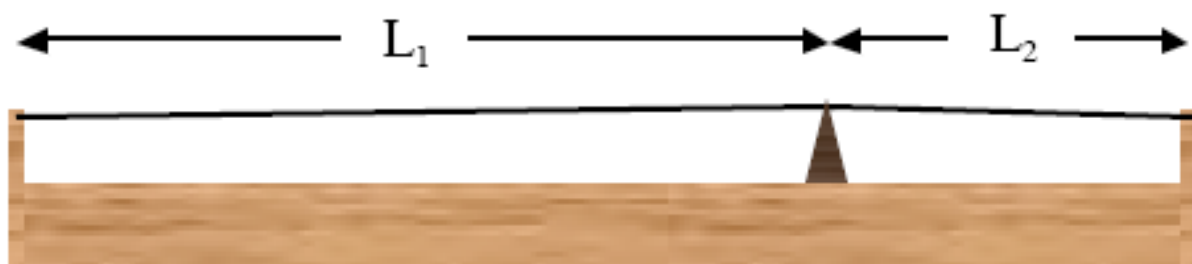
Čujni opseg ljudskog uha je, u idealnom slučaju, od 20 – 20000 Hz. Tonovi tih frekvencija su prikazani na maloj klavijaturi. Postoji 7 oktava u okviru čujnog opsega (postoji teorijski nepunih 10, ali toliko čuje samo mlad čovek koji nikada nije bio izložen nekoj buci), pa ima sedam oktava i na klavijaturi. Posmatrano od najniže do najviše frekvencije to su: subkontra, kontra, velika, mala, prva, druga, treća, četvrta, peta. Subkontra ima samo 3 tona, a peta samo 1 ton.

Na uvećanom delu slike vidi se jedna oktava (prva). Tonovi koje ona ima su c, d, e, f, g, a, h i c na belim dirkama i cis (des), dis (es), fis (ges), gis (as), ais (b) na crnim dirkama. Tonovi na crnim dirkama čine hromatsku skalu. To su povišeni ili sniženi tonovi sa belih dirki. Ova skala se ponavlja 7 puta sa istim tonovima (samo u odgovarajućoj oktavi). Zato se tonovi obeležavaju brojevima u indeksu. Po tome se razlikuje kojoj oktavi pripadaju. Zanimljivo je da je frekvencija istog tona za oktavu više uvek udvostručena.

### 2.1.1 KONSONANTE I CELOBROJNI UMNOŠCI FREKVENCIJSKIH ODNOSA

U prethodnom tekstu je napomenuto da je konsonantan interval prijatan za slušanje. To proizlazi iz frekvencijskog odnosa dva tona koji čine taj interval. Idealna konsonanta je čista oktava. Frekvencije tonova koji čine oktavu su u odnosu 2:1. Primer: ton  $c^1$  i ton  $c^2$  čine konsonantnu oktavu.  $c^1$  ima  $f_1 = 261.63$  Hz, a ton  $c^2$  ima frekvenciju  $f_2 = 523.25$  Hz, znači dvostruko veću. To znači da imamo idealno poklapanje talasnih oblika ta dva signala: sve amplitude talasa niže frekvencije se uklapaju u amplitude talasa više frekvencije. To važi i za ton frekvencije  $f_3 = 1046.5$  Hz i sve ostale čija je frekvencija udvostručena u okviru čujnog opsega [48].

Ovaj zvučni fenomen je proučavao još Pitagora u staroj Grčkoj, na monokordu. Pitagora nije znao ništa o frekvencijama tonova koje je svirao, ali je uočio zavisnost međusobnih odnosa delova žice na monokordu.



Slika 2.1.1.1: Monokord

Monokord je muzički instrument koji ima 1 žicu pričvršćenu na dva kraja i kobilicu (mostić) koji može da se pomera od jednog do drugog kraja žice. Tim pomeranjem kobilice žica se deli na dva dela koja su stalno u nekom međusobnom odnosu. Pitagora je uočio da ukoliko je žica u odnosu dužine 2:1, onda tonovi zvuče idealno prijatno zajedno i čine konsonantni interval. Isto je dobio konsonantne intervale i za odnose dužina 3:2, 4:3.

Mi danas znamo da postoji veza između dužine žice i frekvencije tona koji se dobije kada se žica okine. Ukoliko je dužina žice dvostruko veća, frekvencija tona je dvostruko manja. Ukoliko je dužina žice tri puta veća, frekvencija tona je tri puta manja...To znači da ton frekvencije od  $f = 1000$  Hz zvuči dobro ako se odsvira zajedno sa tonom od 2000 Hz (frekvencijski odnos 2:1), 1500 Hz (frekvencijski odnos 3:2), 1333 Hz (frekvencijski odnos 4:3).

Jedno od objašnjenja zašto ovi intervali dobro zvuče je da oni imaju preveliku frekvencijsku razliku da izazovu udare, a premalu da bi se našli u istom kritičnom opsegu.

frekvencija 1 (Hz)	frekvencija 2 (Hz)
$f_1 = 100$	$f_2 = 200$
$2f_1 = 200$	$2f_2 = 400$
$3f_1 = 300$	$3f_2 = 600$
$4f_1 = 400$	
$5f_1 = 500$	
$6f_1 = 600$	

Slika 2.1.1.2: Frekvencije konsonantnih intervala - oktava

Druga teorija govori o harmonicima dva konsonantna tona: većina harmonika se frekvencijski poklapa, a oni koji se ne poklapaju imaju frekvenciju premalu da bi izazivala udare i preveliku da bi bila u istom kritičnom opsegu.

frekvencija 1 (Hz)	frekvencija 2 (Hz)
$f_1 = 100$	$f_2 = 150$
$2f_1 = 200$	$2f_2 = 300$
$3f_1 = 300$	$3f_2 = 450$
$4f_1 = 400$	$4f_2 = 600$
$5f_1 = 500$	
$6f_1 = 600$	

Slika 2.1.1.3: Frekvencije konsonantnih intervala - kvinta

## 2.1.2 MUZIČKA SKALA KROZ ISTORIJU

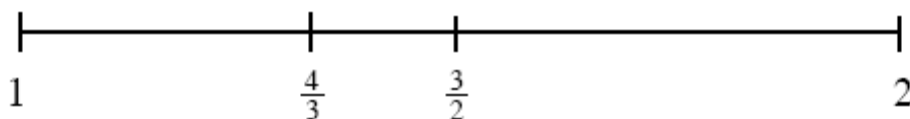
Treba naglasiti da nije jednostavno objasniti nastajanje muzičke skale. Usko je povezana sa fizikom zvučnih talasa. Tokom vremena su se formirale različite muzičke skale u različitim kulturama. Neke su jednostavnije, a neke izrazito složene.

## 2.1.3 PITAGOREJSKA SKALA

Pitagora se bavio proučavanjem dobijanja novih tonova promenom dužine žice. Uočio je da ako žicu produžimo 2 puta, ton koji dobijemo će biti 2 puta manje frekvencije. Napravio je skalu u okviru jedne oktave, pomoću dve žice. Povećavao je i smanjivao veličinu tih žica za određen konsonantni odnos na

sledeći način. Uzeo je dve žice u odnosu dužina 2:1. Kraću žicu je produžio za  $\frac{3}{2}$ , a dužu je skratio za  $\frac{3}{2}$ . Tako je dobio nove dve dužine:

$$1 \cdot \frac{3}{2} = \frac{3}{2} \quad \text{i} \quad 2 : \frac{3}{2} = 2 \cdot \frac{2}{3} = \frac{4}{3}$$



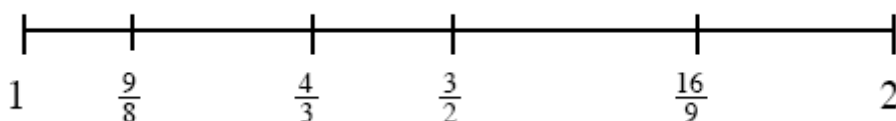
Ako za osnovni ton uzmemo 100 Hz, onda će ova skala imati tonove od: 100 Hz, 133 Hz, 150 Hz i 200 Hz. Smatra se da je ova jednostavna četvorotonska skala služila za štimovanje stare lire.

Pitagora se nije zaustavio na ovoj skali već je nastavio da traži nove tonove na isti način, zadržavajući odnos tonova 2:3. Tako je dobio nove dve dužine žice:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{9}{4} \quad \text{i} \quad \frac{4}{3} : \frac{3}{2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{2}{3} = \frac{8}{9}$$

Pošto ni jedan od ovih tonova ne pripada intervalu između 1 i 2, moramo ih prilagoditi tako što ćemo ih pomnožiti ili podeliti sa 2. Tako dobijemo ton virtuelno iste visine (za oktavu niži ili za oktavu viši).

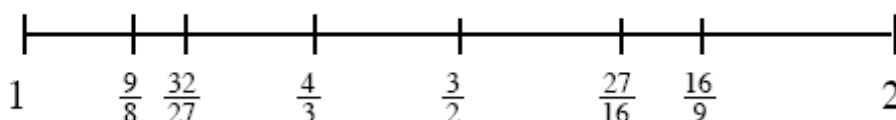
$$\frac{9}{4} : 2 = \frac{9}{8} \quad \text{i} \quad \frac{8}{9} \cdot 2 = \frac{16}{9}$$



Ova skala se zove Pentatonska skala i koriste je narodi dalekog istoka. Međutim, narodni zapadne kulture koriste skalu sa 7 tonova, pa ćemo još jednom primeniti postupak odnosa 3:2:

$$\frac{9}{8} \cdot \frac{3}{2} = \frac{27}{16} \quad \text{i} \quad \frac{16}{9} : \frac{3}{2} = \frac{16}{9} \cdot \frac{2}{3} = \frac{32}{27}$$

Konačan izgled skale od 7 tonova sa rasporedom intervala u nizu, po veličini je:



Ako posmatramo intervale redom, idući od manjeg ka većem, može se uočiti:

$$9/8 \bullet 1 = 1.125 = 9/8$$

$$9/8 \bullet 9/8 = 1.125 \bullet 1.125 = 1.265625 \quad 32/27 = 1.185$$

$$9/8 \bullet 32/27 = 1.125 \bullet 1.185 = 1.3333 = 4/3$$

$$9/8 \bullet 4/3 = 1.125 \bullet 1.333 = 1.5 = 3/2$$

$$9/8 \bullet 3/2 = 1.125 \bullet 1.5 = 1.6875 = 27/16$$

$$9/8 \bullet 27/16 = 1.125 \bullet 1.6875 = 1.8984375 \quad 16/9 = 1.777777$$

$$9/8 \bullet 16/9 = 1.125 \bullet 1.7777 = 2$$

Ako posmatramo intervale redom, koji se nisu uklopili, može se uočiti:

$$256/243 \bullet 9/8 = 1.053 \bullet 1.125 = 1.184625 \approx 1.185 = 32/27$$

$$256/243 \bullet 27/16 = 1.053 \bullet 1.6875 = 1.777 = 16/9$$

Ako pogledamo ta dva odnosa:

$$9/8 = 1.125 \quad \text{i} \quad 256/243 = 1.053$$

Vidi se da prvi odnos predstavlja povećanje prethodnog tona za 12.5 %, a drugi povećanje prethodnog tona za 5.3 % (skoro duplo manje). Veći od ovih intervala se zove **ceo stepen**, a manji se zove **polustepen**. Pitagorejska skala ima ceo stepen između 1. i 2. tona, 3. i 4. tona, 4. i 5. tona, 5. i 6. tona 7. i 8. tona, a polustepen između 2. i 3. tona i 6. i 7. tona. To je kao C dur skala koja počinje od D. Zove se i **dorski modus**. Postoje modusi od svakog tona C dur lestvice: jonski (od C), dorski (od D), frigijski (od E), lidijski (od F), miksolidijski (od G), eolski (od A).

Pitagorejska lestvica ima 7 tonova. Štimovani na prethodno prikazan način, tonovi te lestvice su zapravo štimovani prema kvartama i kvintama. To znači da je prednost u intervalima data oktavi, kvarti i kvinti i da ti intervali imaju proste frekvencijske odnose. Zato se ti intervali i zovu '**čisti**': čista oktava (2:1), čista kvinta (3:2) i čista kvarta (4:3). Ostale intervale je Pitagora uklopio u ovaj kostur i zato oni nisu tako savršeni.



# Modusi



Slika 2.1.3.1: Modusi

**Durska skala** ima nešto drugačiji raspored celih stepena i polustepena: između 1. i 2. tona je ceo stepen, između 2. i 3. tona je ceo stepen, između 4. i 5. tona je ceo stepen, između 5. i 6. tona je ceo stepen, između 6. i 7. tona je ceo stepen. Polustepen je između 3. i 4. tona i između 7. i 8. tona.

**Molske skale** postoje tri: prirodni, harmonski i melodijski mol. Prirodni mol ima polustepene između 2. i 3. tona i 5. i 6. tona, a između svih ostalih tonova je ceo stepen.

Po Pitagorejskom štimu, C dur lestvica bi imala sledeći raspored intervala:

C	D	E	F	G	A	H	C
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{243}{128}$	2

Slika 2.1.3.2: Stupnjevi Pitagorejske lestvice

$$9/8 \bullet 9/8 = 1.125 \bullet 1.125 = 81/64 = 1.265625$$

$$81/64 \bullet 256/243 = 1.265625 \bullet 1.053 = 1.3327 = 4/3$$

$$4/3 \bullet 9/8 = 1.333 \bullet 1.125 = 1.4999 = 3/2 \dots\dots\dots$$

Kada se pogleda, po Pitagori, postoje 2 moguća intervala između tonova u lestvici:  $9/8$  ( ceo stepen) i  $256/243$  ( polustepen).

ton	frekvencijski odnos
C → D	9/8
D → E	9/8
E → F	256/243
F → G	9/8
G → A	9/8
A → H	9/8
H → C	256/243

Slika 2.1.3.3: Pitagorejska skala

## Varijante dura i mola

<b>C-dur</b>		<b>prirodni d-mol</b>	
<b>harmonski dur (moldur)</b>		<b>harmonski d-mol</b>	
		<b>melodijski d-mol</b>	

Slika 2.1.3.4: Durska i molska lestvica

Postoje mnoge druge lestvice, lestvice drugih naroda i kultura.

## Ostale lestvice

<b>ciganški mol</b>	<b>frigijski moldur</b>
<b>balkanski mol</b>	<b>orijentalni dur</b>
<b>pentatonika</b>	<b>celostepena</b>

Slika 2.1.3.5: Lestvice drugih naroda

Osim između dva susedna tona u lestvici, intervali se računaju i između bilo koja dva tona u lestvici. Postoje: prima, sekunda, terca, kvarta, kvinta, seksta, septiima i oktava. Neki od tih intervala su čisti, neki mali, veliki, umanjeni, prekomerni.

## Intervali

The diagram illustrates six musical intervals on a staff. Each interval is represented by a staff with a treble clef and a key signature of one flat (B-flat). The intervals are labeled in red text above the staff, and their corresponding scale degrees are shown in blue text below the staff.

- čista**: 1 4 5 8
- mala**: 2 3 6 7
- prekomerna**: 4 5 8
- velika**: 2 3 6 7
- prekomerna**: 2 3 6 7
- umanjena**: 4 5 8

Slika 2.1.3.6: Intervali

### 2.1.4 PRIRODNA SKALA

Prirodna skala potiče takođe iz stare Grčke. Osmislio ju je Ptolomej, koji, za razliku od Pitagore, nije bio matematičar nego astronom. Kao i Pitagora i Ptolomej je čuo konsonantne intervale u frekvencijskom odnosu 2:1, 3:2, 4:3, ali je čuo i interval u frekvencijskom odnosu 5:4. Ptolomej je otkrio akorde trozvuke jer mu se dopalo kako zvuče tri tona odsvirana zajedno, u međusobnom frekvencijskom odnosu 4:5:6. Tako je formirao skalu da svi tonovi trozvuka budu u međusobnom odnosu 4:5:6. Današnja C dur lestvica bi prema Ptolomeju bila pravljenja prema idealnim trozvucima.

Ako uzmemo za početni ton C kao frekvencijsku osnovu 1, onda se kao oktavni ton dobija ton 2:1 = 2. Osnovni ton C ćemo prikazati kao frekvencijski odnos 4:4, ton E je u odnosu 5:4, a ton G je u odnosu 6:4 = 3:2. Tako dobijemo prva tri frekvencijska odnosa [48].

Sledeći trozvuk ćemo dobiti kada pomnožimo ton G = 3:2 frekvencijskim odnosima 4:4, 5:4 i 6:4. Dobija se:

$$G = 3/2 \cdot 4/4 = 12/8 = 3/2$$

## Skala prirodnih trozvuka

<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>C</b>	<b>E</b>	<b>G</b>
<b>G</b>	<b>H</b>	<b>D</b>
<b>F</b>	<b>A</b>	<b>C</b>

*Slika 2.1.4.1: Skala prirodnih trozvuka*

$$H = 3/2 \bullet 5/4 = 15/8$$

$$D = 3/2 \bullet 6/4 = 18/8 = 9/4$$

Pošto je ovaj odnos veći od 2 i izlazi iz ove oktave, podelićemo ga sa 2 i dobiti ton D u okviru ove oktave.

$$D = 3/2 \bullet 6/4 = 18/8 = 9/4 : 2 = 9/8$$

Tako smo dobili još dva frekvencijska odnosa: 15/8 i 9/8.

Treći trozvuk ćemo dobiti malo drugačije. Pošto je jedini frekvencijski odnos koji poznajemo za oktavu  $C = 2$ , a to je treći ton u trozvuku, onda ćemo sada da delimo frekvencijske odnose da bismo dobili ton A i ton F.

$$F = \mathbf{x} \bullet 4/4 = \mathbf{x}$$

$$A = \mathbf{x} \bullet 5/4 =$$

$$C = \mathbf{x} \bullet 6/4 = 2$$

$$\mathbf{x} = 2 : 6/4 = 2 \bullet 4/6 = 8/6 = 4/3 = F$$

$$A = 4/3 \bullet 5/4 = 20/12 = 5/3$$

Ili se A može dobiti iz oktavnog C:

$$A = 2 : 6/5 = 2 \bullet 5/6 = 10/6 = 5/3$$

Sada imamo celu skalu po prirodnom (Ptolomejevom) štimu i sve frekvencijske odnose tonova u odnosu na osnovni ton:

<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>C</b>
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Slika 2.1.4.2: Stupnjevi Skale prirodnih trozvuka

Zanimljivo je pogledati i frekvencijske odnose između pojedinih intervala.

<b>ton</b>	<b>frekvencijski odnos</b>
C → D	9/8
D → E	10/9
E → F	16/15
F → G	9/8
G → A	10/9
A → H	9/8
H → C	16/15

Slika 2.1.4.3: Ptolomejeva prirodna skala

Ova skala se potpuno razlikuje od Pitagorine. Jedina sličnost je interval od 9/8 koji se kod Pitagore zove *ceo stepen*. U prirodnom štimu to je *veliki ceo stepen*. U prirodnom štimu postoje dva cela stepena: 9/8 = 12.5 % povećanje (veliki ceo stepen) i 10/9 = 11.1 % povećanje (mali ceo stepen). Najmanji interval u lestvici je 16/15 = 6.7 % povećanje i zove se polustepen. Razlikuje se u odnosu na polustepen u Pitagorejskoj lestvici ( 256/243 = 5.3 % povećanje).

FO		intervali
2/1	C → C	<b>oktava</b>
3/2	C → G	<b>čista kvinta</b>
4/3	C → F	<b>čista kvarta</b>
5/3	C → A	<b>velika seksta</b>
5/4	C → E	<b>velika terca</b>
8/5	E → C	<b>mala seksta</b>
6/5	A → C	<b>mala terca</b>

*Slika 2.1.4.4: Intervali Ptolomejeve prirodne skale*

Obe navedene skale imaju velikih problema kada se ukaže potreba za transponovanjem kompozicije u neki drugi tonalitet. Primer: ako je pevaču nisko da peva iz C, onda je moguće istu kompoziciju transponovati ('pomeriti po tonovima') za željeni interval koji nam odgovara po visini. Ako pokušamo to da uradimo sa Pitagorejskom skalom ili Prirodnom skalom javljaju se različiti problemi pošto međusobni frekvencijski odnosi intervala nisu isti u okviru ni jedne od tih dveju lestvica. Taj problem se može delimično rešiti uvođenjem povišenih i sniženih tonova između svih celih stepena, ali ne dovoljno precizno jer polustepeni u ove dve lestvice nemaju istu vrednost frekvencija. Pored toga ostaje problem dva različita cela stepena u Prirodnoj skali. Jedinstveno rešenje je da se svi međusobni frekvencijski odnosi intervala izjednače. Tako bi se ostvario jednostavan prelazak iz jednog tonaliteta u drugi.

### 2.1.5 DOBROTEMPEROVANA SKALA

Dobrotemperovanu skalu je napravio Johan Sebastijan Bah tako što je osnovnih 7 tonova postojećih lestvica proširio za još 5 tonova raspoređenih između (povišenih), tako da frekvencijski odnos između svih 12 polustepena bude isti. To ne znači da frekvencijski odnos oktave 2:1 možemo jednostavno podeliti sa 12 i da je svaki naredni polustepen uvećan za  $\Delta f$ . Na taj način se ne bi dobili ravnomerni frekvencijski odnosi intervala. Dobrotemperovani štim znači da treba pronaći frekvencijski umnožak kojim kada pomnožimo bilo koji ton, dobijemo ton viši za ravnomerni (frekvencijski ujednačeni) polustepen [72].

Kada se dobro razmisli, ispada da treba svaki ton pomnožiti  $\sqrt[12]{2}$  puta :

$$\sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot \sqrt[12]{2} \cdot$$

$$\sqrt[12]{2} = 2$$

što je frekvencijski odnos jedne oktave. Drugim rečima, bilo koji ton ako pomnožimo  $\sqrt[12]{2} = 1.05946$  puta, dobićemo ton za ravnomeran polustepen viši.

Dobrotemperovana skala je najrasprostranjenija u tzv. zapadnoj civilizaciji i to kao dur i mol. Durska i molska skala imaju po 7 tonova (stupnjeva) između kojih je različit raspored stepena i polustepena. U durskoj lestvici polustepeni se nalaze između 3. i 4. i 7. i 8. stupnja. U molskoj lestvici polustepeni se nalaze između 2. i 3. i 5. i 6. stupnja. Durska lestvica postoji samo jedna, a molska postoji: prirodna, harmonska i melodijska. Sve one imaju različit raspored polustepena u lestvici. (Naveden je raspored za prirodni mol.)

---

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>C</b>	<b>C<sup>*</sup></b>	<b>D</b>	<b>D<sup>*</sup></b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>F<sup>*</sup></b>	<b>G</b>	<b>G<sup>*</sup></b>	<b>A</b>	<b>A<sup>*</sup></b>	<b>H</b>

*Slika 2.1.5.1: Stupnjevi Dobrotemperovane lestvice*

Preciznijim proučavanjem se ispostavlja da uvođenjem dobrotemperovanog štima nije mnogo pokvaren idealan frekvencijski odnos konsonantnih intervala. Primer: čista kvinta je u apsolutnom (prirodnom) štиму i u Pitagorejskom štиму imala idealan frekvencijski odnos 3:2. U dobrotemperovanom štиму je  $(\sqrt[12]{2})^7 = 1.498$  što je dovoljno približno da kvinta zvuči konsonantno. Odstupanje je samo 0.1 %. Čista kvarta je imala idealan odnos 4:3 = 1.3333, a u dobrotemperovanom štиму je  $(\sqrt[12]{2})^5 = 1.335$ . Odstupanje je manje od 0.4 %.

## 2.1.6 UPOREĐIVANJE PITAGOREJSKE, PRIRODNE I DOBROTEMPEROVANE SKALE

Kada se dobro prouče Pitagorejska, prirodna i dobrotemperovana skala vidi se da postoje značajna odstupanja među njima. Sa druge strane, Dobrotemperovana skala je i uvedena da bi se nekako ujednačilo sviranje u različitim tonalitetima na različitim muzičkim instrumentima. Suštinsko i veoma ozbiljno pitanje za praksu je da li to ujednačavanje mnogo remeti prirodan frekvencijski odnos tonova, da li se to čuje i da li smeta ljudskom

uhu i sluhu. Da bi se sve to precizno proučilo i iskazalo, uvedena je nova jedinica za upoređivanje frekvencijskih odnosa **cent**.

U muzičkom smislu, 1 cent je 1/100 deo polustepena u Dobrotemperovanoj lestvici. Pošto u jednoj oktavi ima 12 polustepena, to znači da u jednoj oktavi ima 1200 centi. Treba voditi računa da to ne znači da je 1 cent 2:1200 jer je cent frekvencijski odnos. 1 cent je konstantan frekvencijski odnos između bilo koje dve frekvencije. To praktično znači da ako frekvencijski odnos od 1 cent pomnožimo samim sobom 1200 puta, dobiće se frekvencijski odnos oktave 2. Primer: Ako frekvencijski odnos kao veličinu označimo sa FO, onda je:

$$FO_{1cent} \cdot FO_{1cent} \cdot FO_{1cent} \cdot FO_{1cent} \cdot FO_{1cent} \cdot \dots \cdot FO_{1cent} = 2$$

$$(FO_{1cent})^{1200} = 2$$

Frekvencijski odnos za 1 cent može da se izračuna iz prethodnog izraza:

$$FO_{1cent} = \sqrt[1200]{2} = 2^{1/1200} = 1.000578$$

Frekvencijski odnos za 2 centa je onda:

$$FO_{2cent} = (2^{1/1200}) \cdot (2^{1/1200}) = 2^{2/1200}$$

Na ovaj način može da se odredi i frekvencijski odnos za proizvoljan broj centi:

$$FO_{Ncent} = 2^{N/1200}$$

$$\log FO_{Ncent} = \log 2^{N/1200} = (N/1200) \cdot \log 2$$

$$N = 1200 \cdot \log FO_{Ncent} / \log 2$$

Pomoću ovog obrasca može da se odredi frekvencijski odnos u centima za bilo koji interval bilo koje skale. Takođe možemo preko centa definisati koliko može da bude odstupanje u frekvencijskom odnosu nekog intervala da bismo taj interval čuli kao 'ispravan'. Uvežbani muzičar može da čuje frekvencijsko odstupanje od 5 centi za čist interval, a 10 – 15 centi je granica do koje sme da odstupa frekvencijski odnos čistih intervala da bi i dalje zvučali konsonantno.



## Aproksimacija intervala u centima

interval	FO	FO (cent)	dobrotemperovana skala (cent)
oktava	2 : 1	<b>1200</b>	1200
kvinta	3 : 2	<b>702</b>	700
kvarta	4 : 3	<b>498</b>	500
v. seksta	5 : 3	<b>884</b>	<b>900</b>
v. terca	5 : 4	<b>386</b>	<b>400</b>
m. seksta	8 : 5	<b>814</b>	<b>800</b>
m. terca	6 : 5	<b>316</b>	<b>300</b>

Slika 2.1.6.1: Dobrotemperovana skala

Ako se pažljivo pogledaju podaci u tabeli, vidi se da je u Dobrotemperovanoj lestvici samo oktava idealan frekvencijski odnos. Kvinta i kvarta odstupaju za po 2 centa. To se još uvek može smatrati 'čistim' intervalima jer ljudsko uho ne čuje tu frekvencijsku razliku. Mnogo veći problem u Dobrotemperovanoj skali predstavljaju terce i sekste jer su one praktično nedovoljno dobro naštimovane. To svako izoštreno ljudsko uho može da čuje [4].

Pomoću frekvencijskog odnosa u centima može da se analizira i Pitagorejska skala i da se proveri koliko su terce i sekste u preciznom frekvencijskom odnosu u toj lestvici.

ton	FO (cent)
C	0
D	204
E	408
F	498
G	702
A	906
H	1110
C	1200

Slika 2.1.6.2: Frekvencijski odnos, izražen u centima

Iz prethodne tabele može da se izračuna koliko centi ima bilo koji interval u Pitagorejskoj skali. Na taj način može da se precizno odredi da li je interval konsonantan ili disonantan i u kojoj meri.

<b>interval</b>	<b>ime intervala</b>	<b>FO (cent)</b>
$C \rightarrow C_1$	<b>oktava</b>	1200
$C \rightarrow G$	<b>kvinta</b>	702
$D \rightarrow A$	<b>kvinta</b>	702
$E \rightarrow H$	<b>kvinta</b>	702
$F \rightarrow C_1$	<b>kvinta</b>	702
$C \rightarrow F$	<b>kvarta</b>	498
$D \rightarrow G$	<b>kvarta</b>	498
$E \rightarrow A$	<b>kvarta</b>	498
$G \rightarrow C_1$	<b>kvarta</b>	498
$C \rightarrow E$	<b>v. terca</b>	408
$F \rightarrow A$	<b>v. terca</b>	408
$G \rightarrow H$	<b>v. terca</b>	408

*Slika 2.1.6.3: Intervali Dobrotemperovane skale, izraženi u centima*

U Pitagorejskoj skali su kvinte i kvarte zaista idealno naštimovane: sve kvinte imaju frekvencijski odnos po 702 centa (što je idealno za frekvencijski odnos kvinte 3:2), a sve kvarte imaju frekvencijski odnos po 498 centa (što je idealno za frekvencijski odnos kvarte od 4:3). Za razliku od toga, frekvencijski odnos za terce je loš. Sve velike terce imaju frekvencijski odnos po 408 centi (a trebalo bi po 386 za frekvencijski odnos 5:4), a male terce imaju frekvencijski odnos 294 centa (a trebalo bi 316 za frekvencijski odnos 6:5). Razlika je po 22 centa i za velike i za male terce, samo što su velike terce 'prevelike', a male terce 'premale'. Ta razlika od 22 centa je zapravo 21.5 centi i to je greška koja nastaje usled zaokruživanja. Pomoću delova tog frekvencijskog odnosa ( $1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4$ ) se vrše različite korekcije u štиму ove lestvice.

### 3. MUZIČKI INSTRUMENTI

#### 3.1 ŽIČANI MUZIČKI INSTRUMENTI (KORDOFONI)

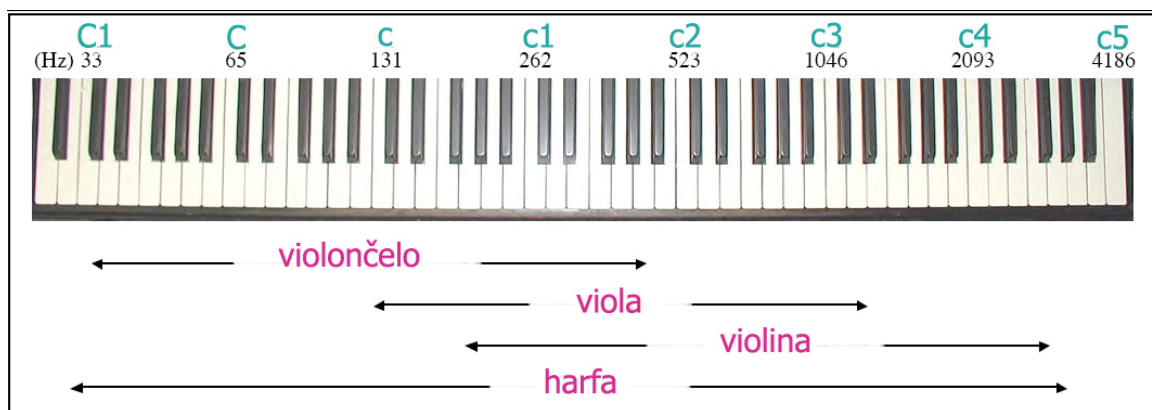
Žičani instrumenti se razlikuju po načinu pravljenja tona na žici: ***gudački***, ***trzajući*** i ***udarni***.

Kod gudačkih instrumenata žice u osnovnom načinu sviranja trepere pod dejstvom gudala. U simfonijskom orkestru to su: violina, viola, violončelo, kontrabas. U folkloru to su razne gusle i violine (kemange – iranska violina, sarangi – indijska violina, berimbau – brazilske gusle). Postoje i mnogi rani instrumenti na kojima se nekada sviralo, a danas su ponovo u upotrebi: viol (preteča violončela), viola da gamba, viola di bardone, žiga (francuska preteča violine).

Kod trzajućih instrumenata žice se okidaju nekad prstima, nekad trzalicom. U simfonijskom orkestru to je harfa. Postoje rani instrumenti: lauta, teorba, spinet, harpsikord, čembalo. U folkloru to su: gitara, laute, harfe i citre raznih zemalja (mandolina – italijanska lauta, balalajka – ruska lauta, buzuki – grčka lauta, harango – južnoamerička lauta, sitar – indijska lauta, pipa – kineska lauta, šamisen – japanska lauta, kora – harfa iz Senegala, kantele – finska citra, koto – japanska citra, vina – indijska citra).

Kod udarnih žičanih instrumenata se žice udaraju mekim čekićem ili palicama. U simfonijskom orkestru to je klavir. U folkloru to je cimbal. Od ranih instrumenata to je klavikord.

Opseg nekoliko žičanih instrumenata je prikazan na klavijaturi:



Slika 3.1.1: Opseg nekih žičanih muzičkih instrumenata

##### 3.1.1 PRVI STEPEN VIBRACIJA

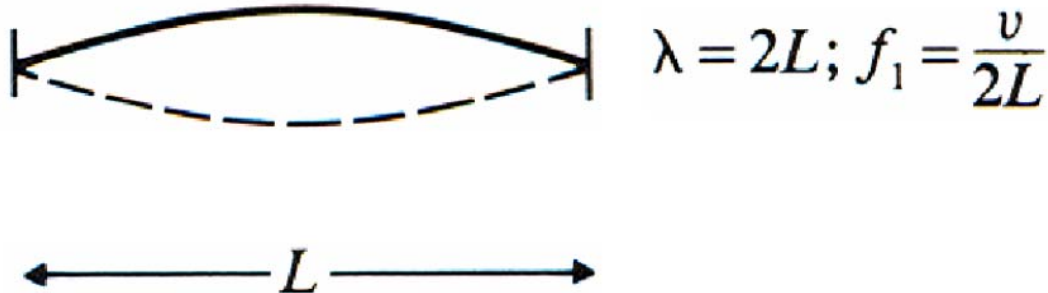
Prvi stepen vibracija žice je najjednostavniji oblik oscilovanja žice u stojećem talasu. Ima dva čvora i jedan trbuh na sredini između ta dva čvora. Ovaj stepen vibracije definiše osnovnu frekvenciju tona [6].

Dužina žice u ovom stepenu jednaka je  $\frac{1}{2}$  talasne dužine  $\lambda$  :

$$L = \lambda / 2 \quad \rightarrow \quad \lambda = 2L$$

Frekvenciju ovog stepena vibracije možemo naći preko opšteg izraza:

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_1 = v / \lambda = v / 2L$$



Slika 3.1.1.1: Prvi stepen oscilovanja žice, zategnute na dva kraja

### 3.1.2 BRZINA TALASA NA ŽICI

Brzina talasa na žici zavisi od zategnutosti same žice. Žica može biti manje ili više zategnuta i to će zahtevati različiti pritisak delovanja na žicu. Ako je žica više zategnuta potrebna je jača sila da se žica okine i izvede iz ravnotežnog položaja. Nakon okidanja, brže će se vratiti u stanje mirovanja ako je više zategnuta. To znači da je kod veće zategnutosti žice veća brzina prostiranja talasa na žici.

Na brzinu talasa na žici utiče i težina same žice (precizno: podužna gustina žice). Što je žica deblja, ima veću masu, manje je pokretna i brzina talasa je manja [41].

Važno je uočiti da brzina talasa na žici zavisi proporcionalno zategnutosti žice (tenzija  $T$ ), a obrnuto proporcionalno podužnoj masi (težini) same žice  $\mu$ .

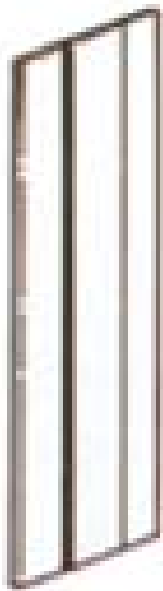
$$v = \frac{T}{\mu} \quad (3.1.2.1)$$

Ako ovo uzmemo u obzir, možemo pokazati čemu je jednaka frekvencija prvog stepena vibracije:

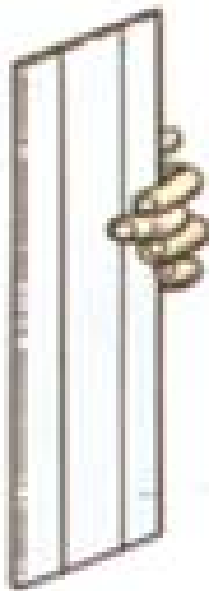
$$f_1 = \frac{\sqrt{T}}{2L} \cdot \mu \quad (3.1.2.2)$$

Iz prethodnog izraza sledi da frekvencija tona raste sa povećanjem zategnutosti žice. Dakle, visina tona raste sa povećanjem zategnutosti žice. Frekvencija tona se smanjuje sa povećanjem dužine žice i sa povećanjem težine žice.

Ton je viši ako je žica: kraća, lakša, tanja, zategnutija. Ton je niži ako je žica: duža, teža, deblja i manje zategnuta.



**Teža žica**  
daje niži ton.



**Duža žica**  
daje niži ton.



**Labavija žica**  
daje niži ton.

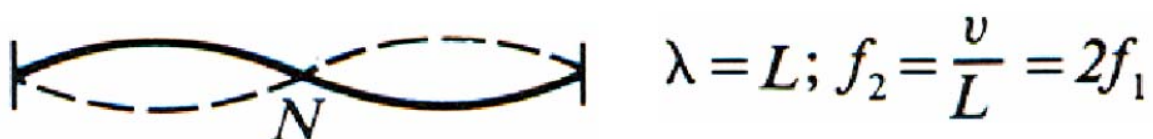
Slika 3.1.2.1: Zavisnost visine tona od različitih faktora

### 3.1.3 DRUGI STEPEN VIBRACIJA

Drugi stepen vibracija je sledeći najjednostavniji oblik oscilovanja žice zategnute na dva kraja. On daje prvi viši harmonik (drugi harmonik u frekvencijskom spektru). Talasna dužina je jednaka dužini žice.

Frekvenciju ovog stepena vibracije možemo naći preko opšteg izraza:

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_2 = v / \lambda = v / L$$



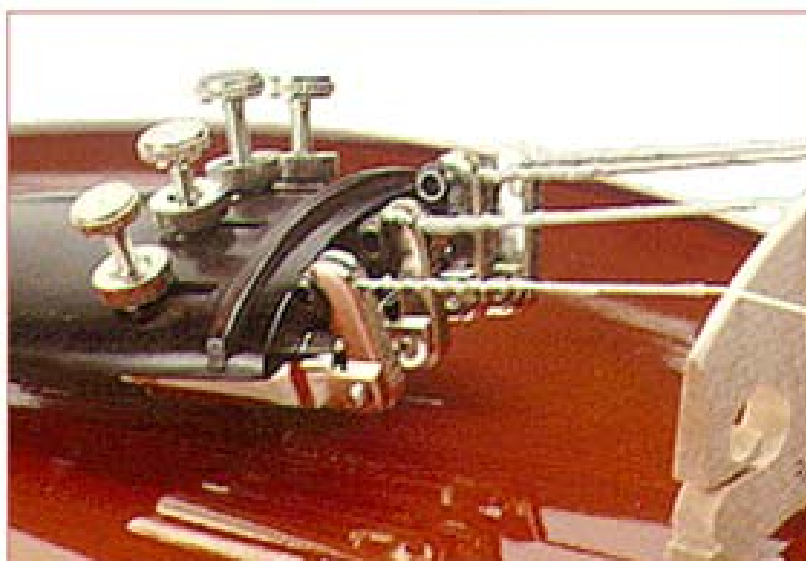
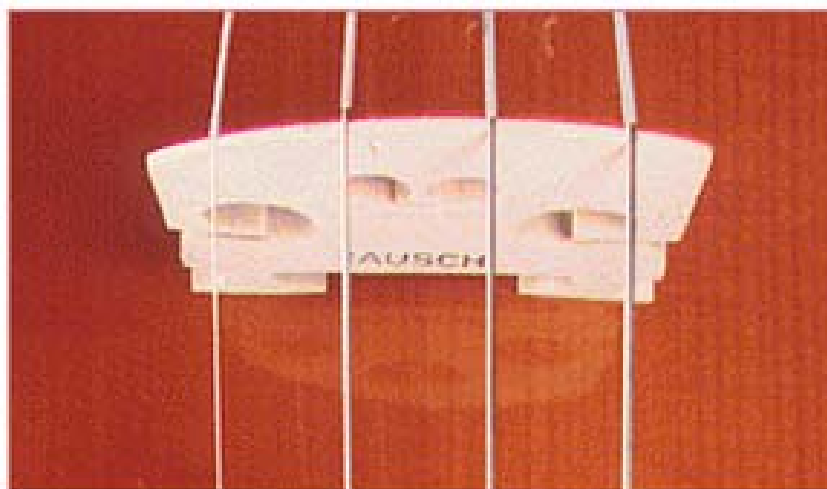
Slika 3.1.3.1: Drugi stepen oscilovanja žice, zategnute na dva kraja

### 3.1.4 KAKO SE PROIZVODI ZVUK KOD ŽIČANIH MUZIČKIH INSTRUMENTATA

Da bi se zvuk proizveden na žičanom instrumentu dobro čuo, žica mora biti učvršćena za materijal koji ima sličnu impedansu, koji će oscilovati istom frekvencijom i mora pokretati veliku količinu vazduha. Zato su žice gitare, violine ili bilo kog akustičkog žičanog instrumenta učvršćene za rezonatorsku ploču i razapete između kobilice (mostića) i glave vrata instrumenta. Dok žica osciluje, prenose se vibracije na gornju ploču instrumenta (rezonatorska ploča) i ona osciluje. Pri tome se sila koja deluje na gornju ploču menja sa promenom frekvencije oscilovanja žice, Impedansa žice i impedanse kobilice i glave vrata su slične pa se veliki deo akustičke energije žice prenosi na gornju ploču gitare i izaziva oscilovanje veće površine. Zbog toga se oscilovanje žice na akustičkom žičanom instrumentu mnogo bolje čuje nego oscilovanje same žice [30] .

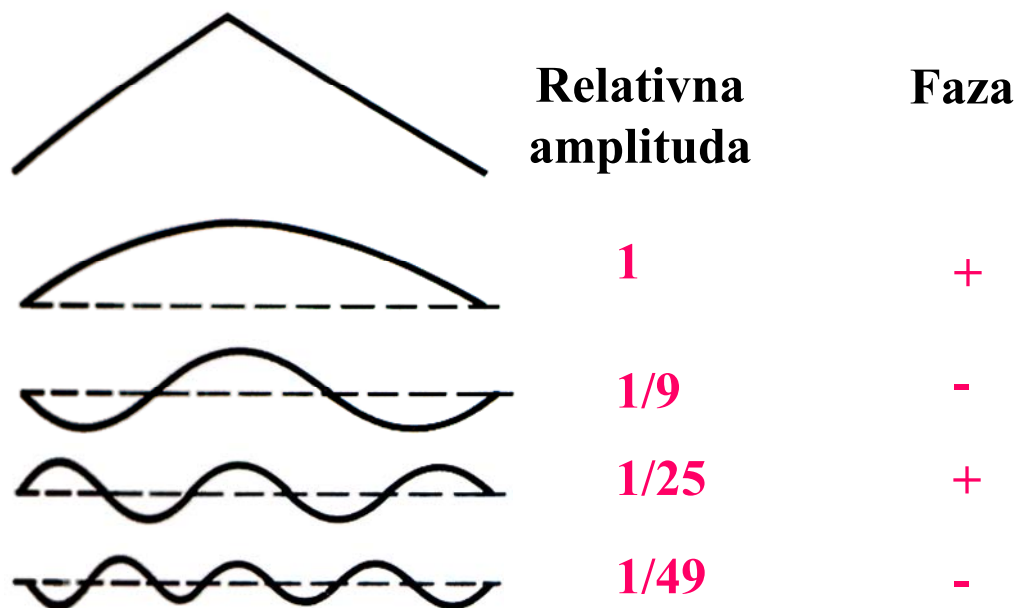


*Slika 3.1.4.1: Violina*



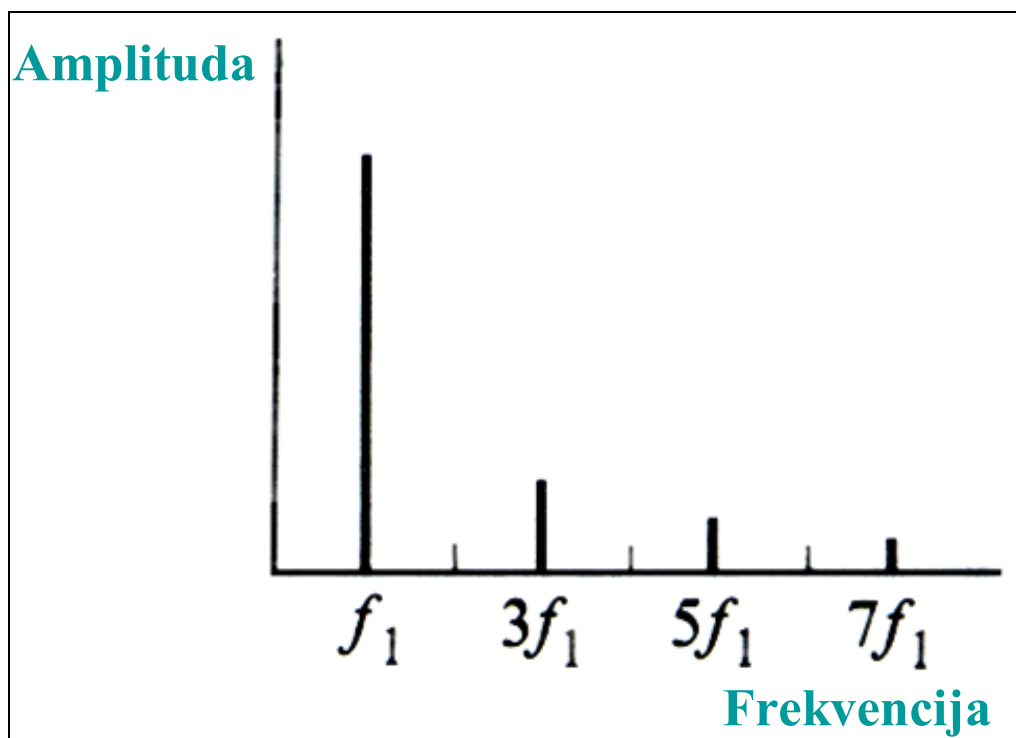
*Slika 3.1.4.2: Delovi violine*

## Okinuta žica violine



- Žica je okinuta u sredini.
- Postoje samo neparni harmonici.

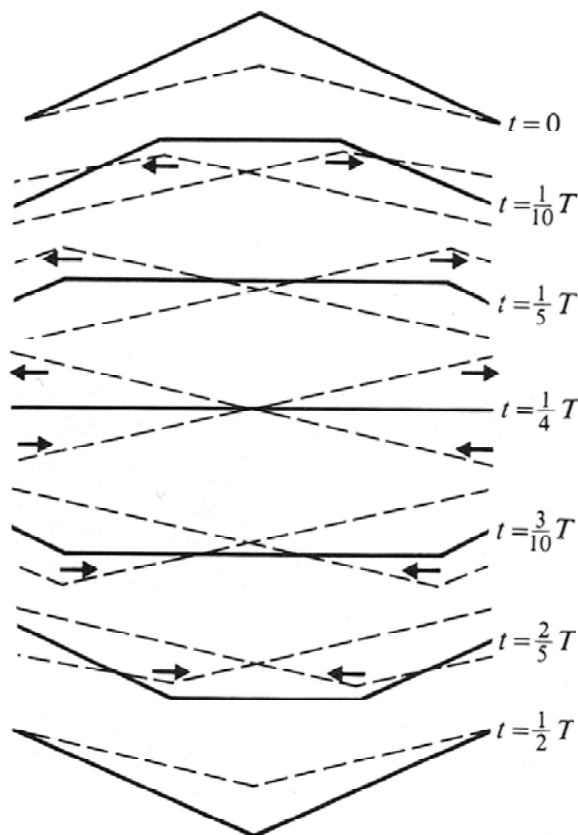
*Slika 3.1.4.3: Okinuta žica violine na polovini*



*Slika 3.1.4.4: Neparni harmonici*

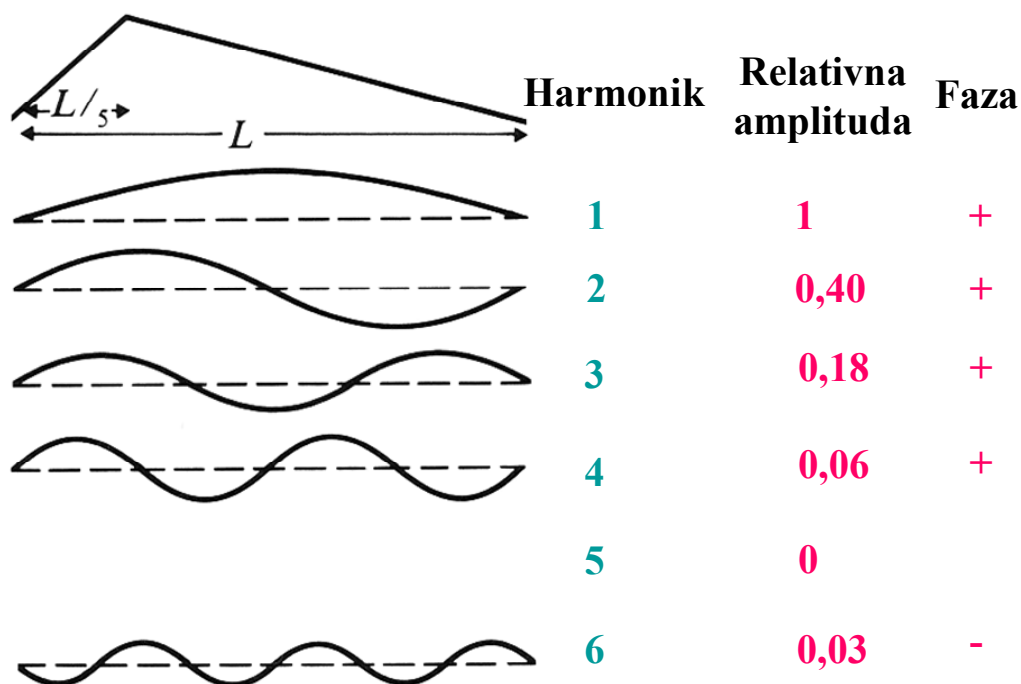


## Kretanje žice tokom poluperiode

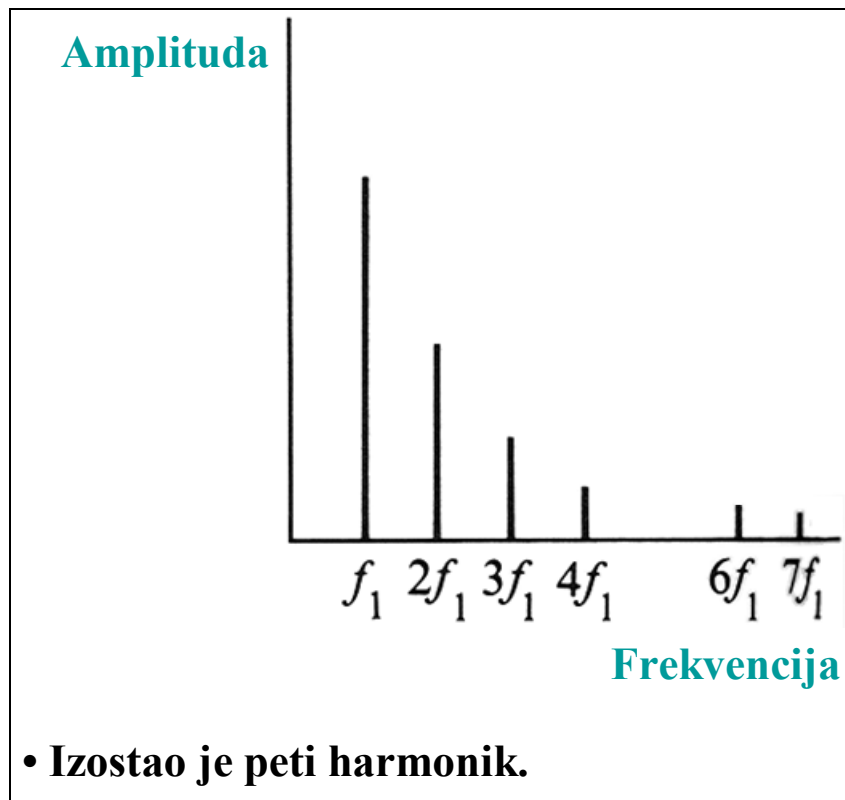


Slika 3.1.4.5: Kretanje okinute žice violine tokom poluperiode

## Oscilovanje žice okinute na 1/5 dužine



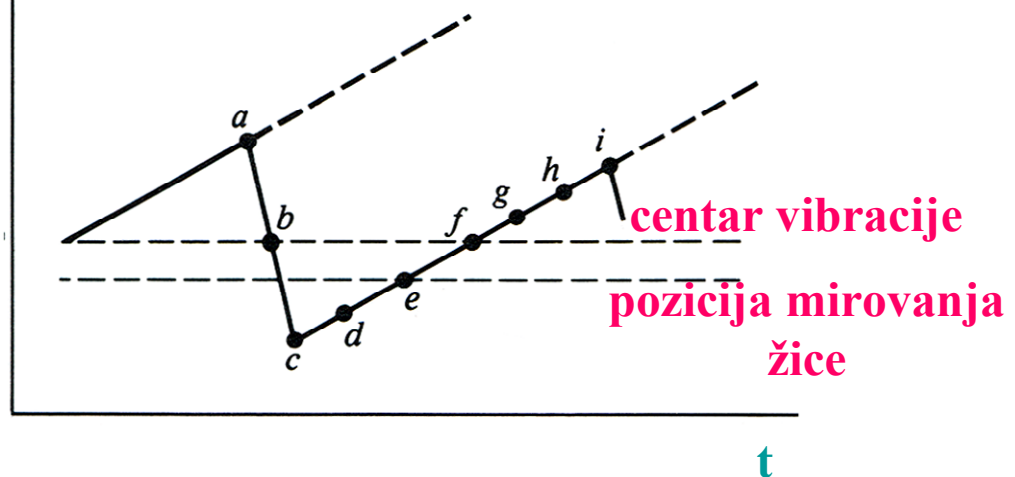
Slika 3.1.4.6: Oscilovanje žice okinute na 1/5 dužine



Slika 3.1.4.7: Spektar žice okinute na 1/5 dužine

## Žica prevučena gudalom

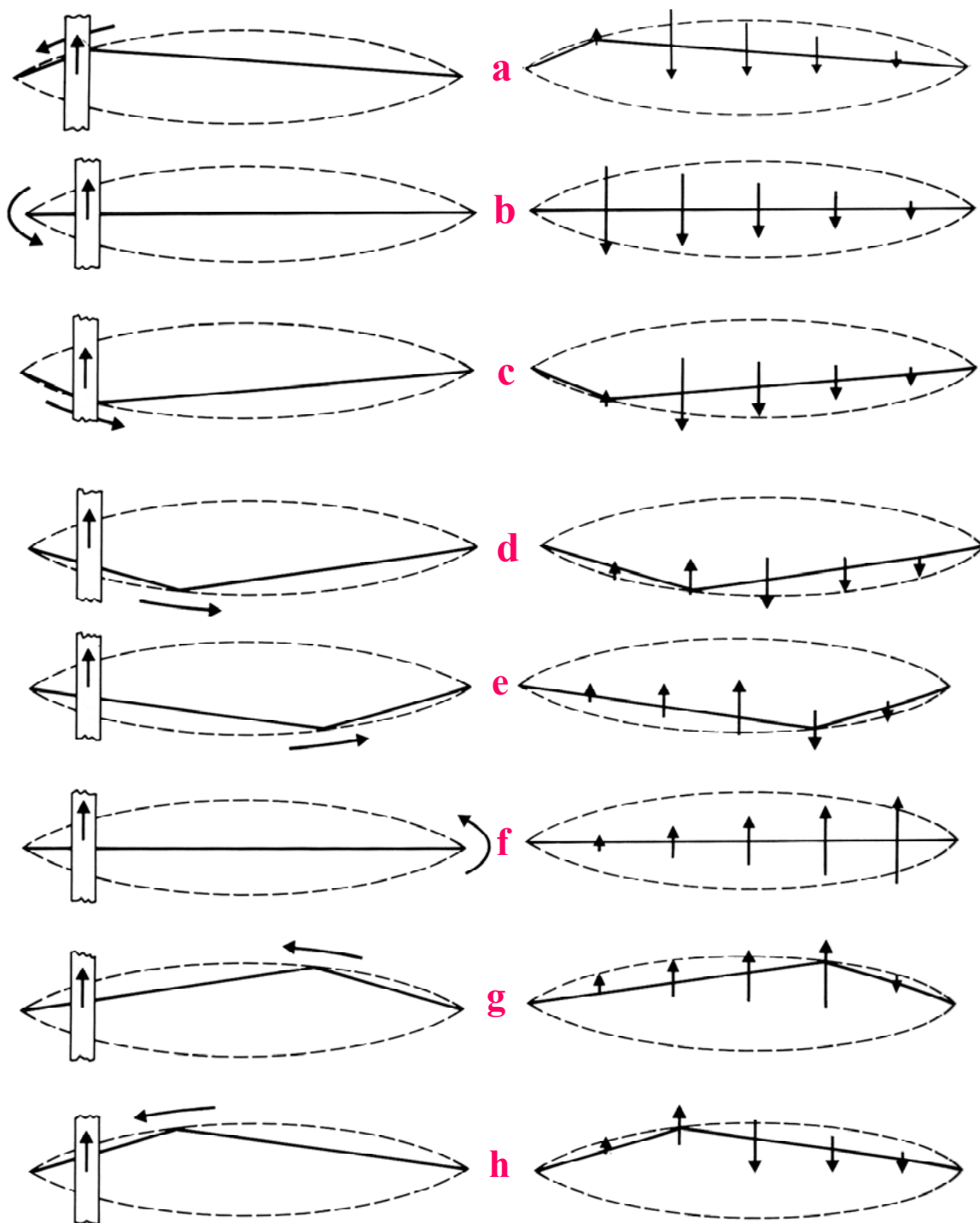
**Pomeraj**



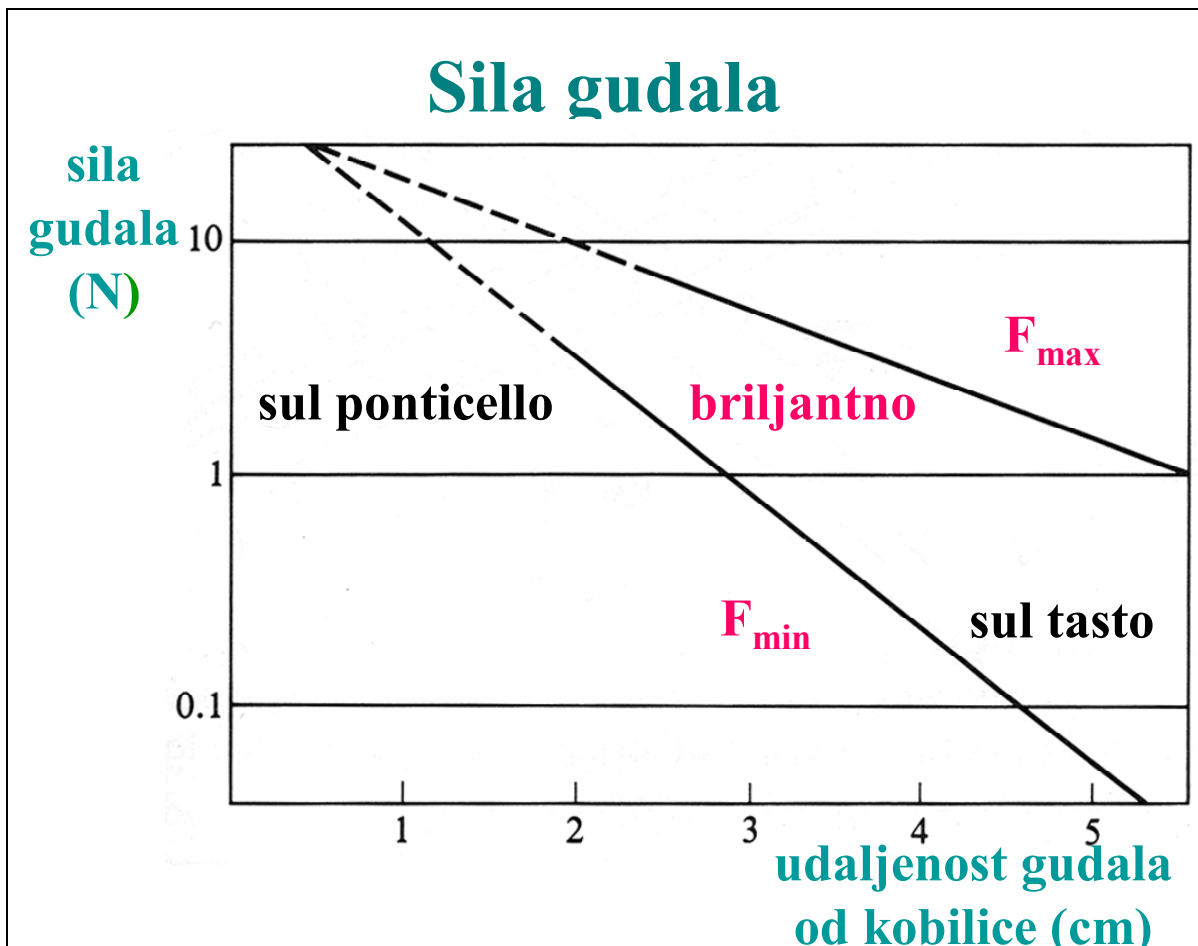
- Uočiti da je centar vibracije pomeren u odnosu na poziciju mirovanja žice.

Slika 3.1.4.8: Žica prevučena gudalom

## Žica prevučena gudačkom tokom periode

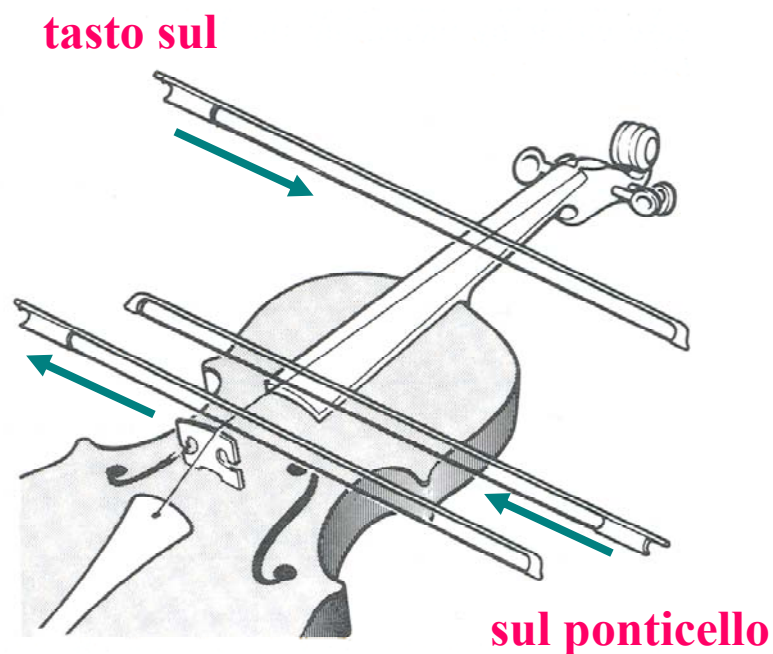


Slika 3.1.4.9: Žica prevučena gudačkom tokom periode

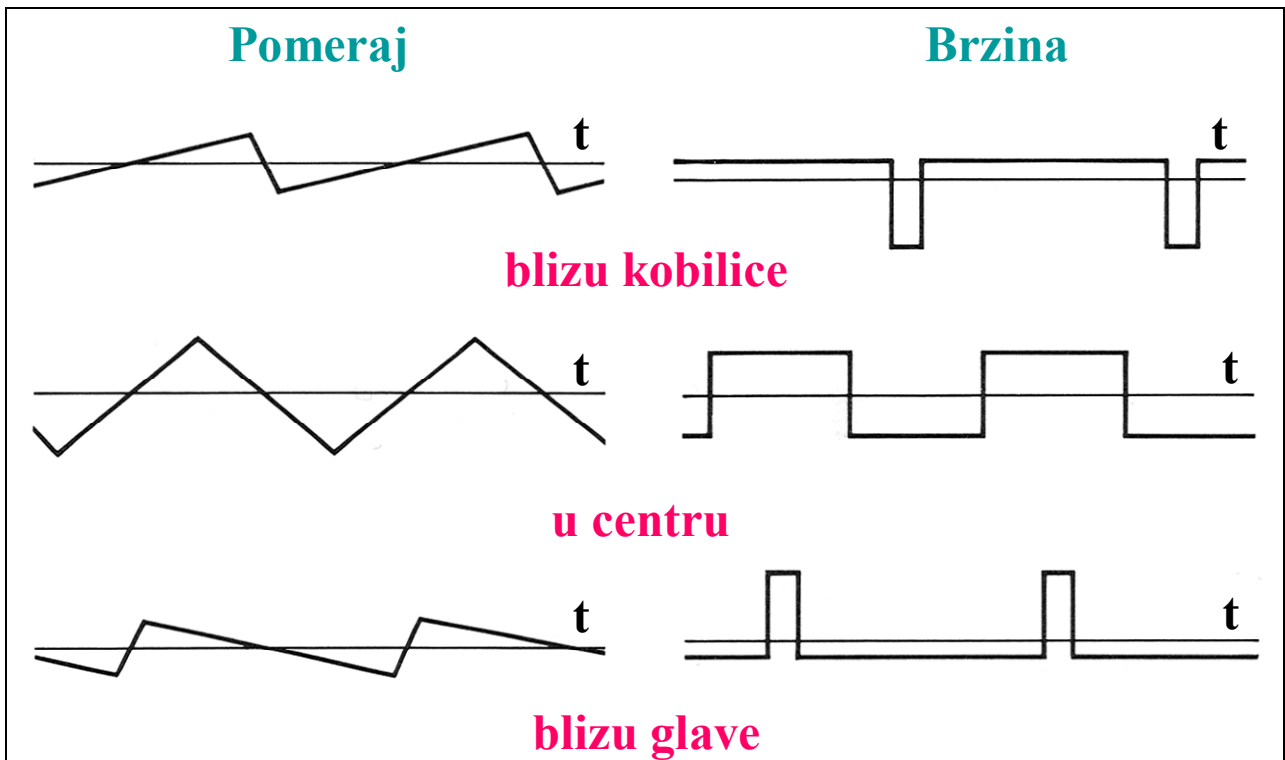


Slika 3.1.4.10: Sila gudala

## Različita mesta za sviranje gudaalom

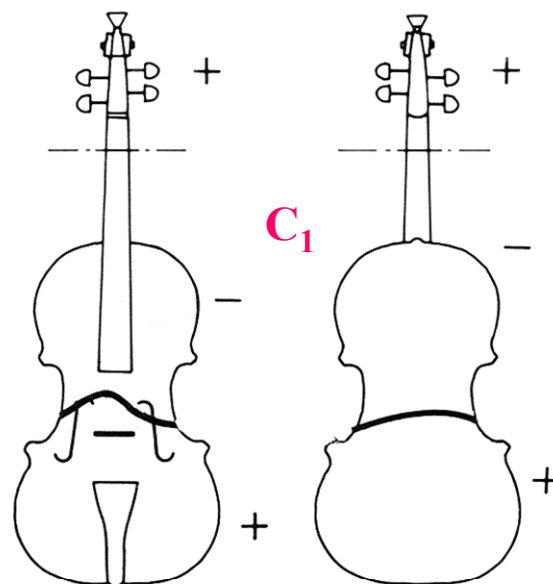


Slika 3.1.4.11: Različita mesta na žici na kojima se svira gudaalom



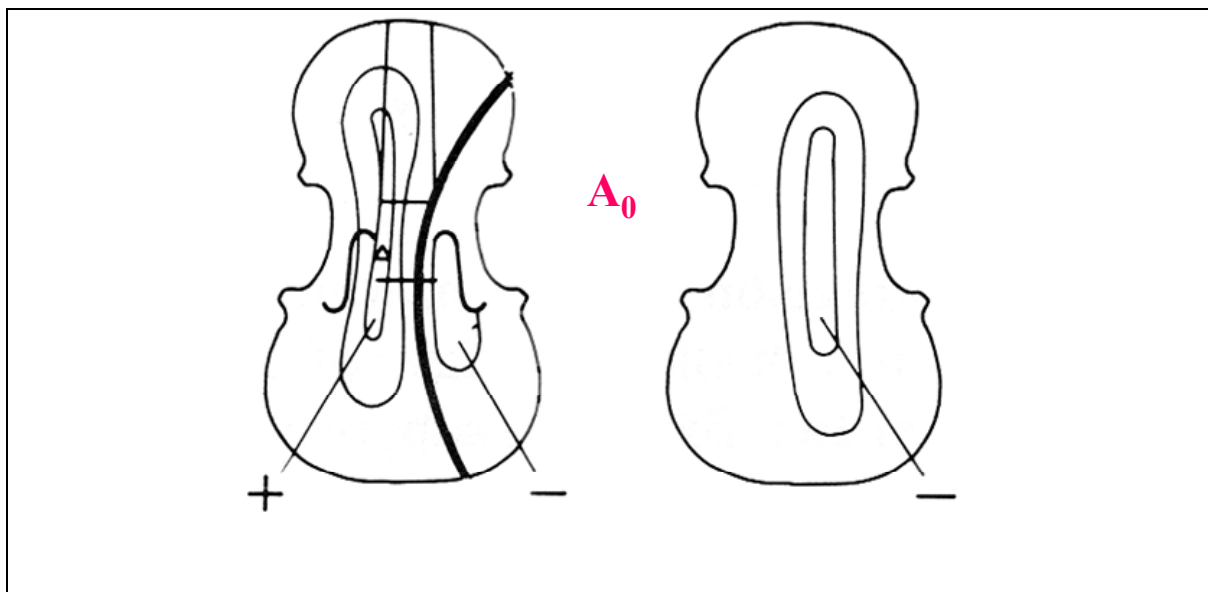
Slika 3.1.4.12: Pomeraj i brzina žice na kojoj se svira gudačkom

## Rezonancija tela violine



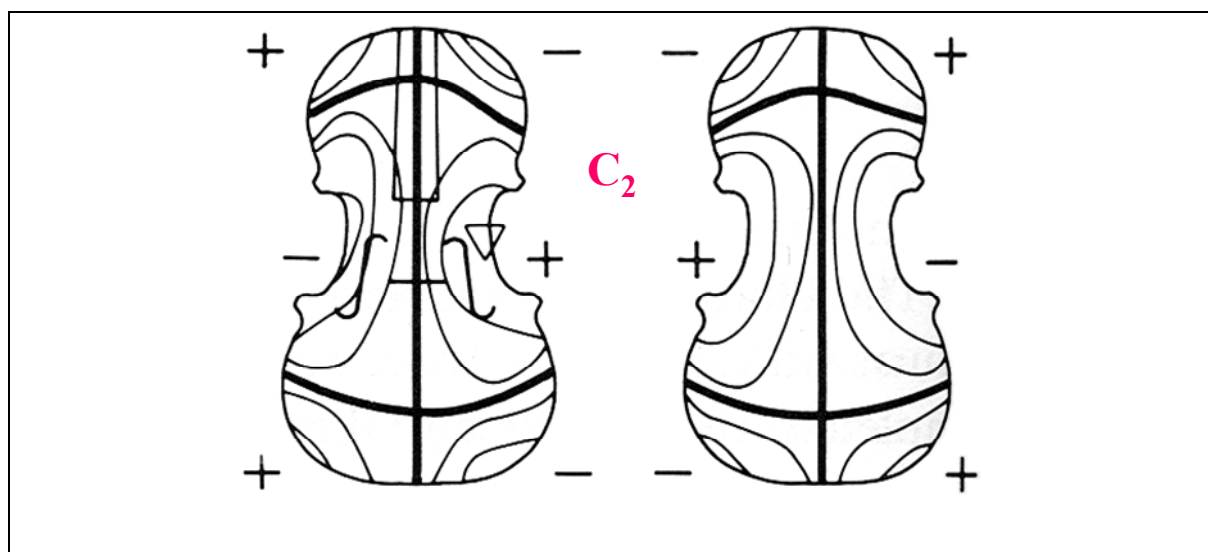
**C<sub>1</sub> (185Hz):** jednodimenzionalni prikaz  
Emituje se malo zvuka.

Slika 3.1.4.13: Rezonancija tela violine na 185 Hz



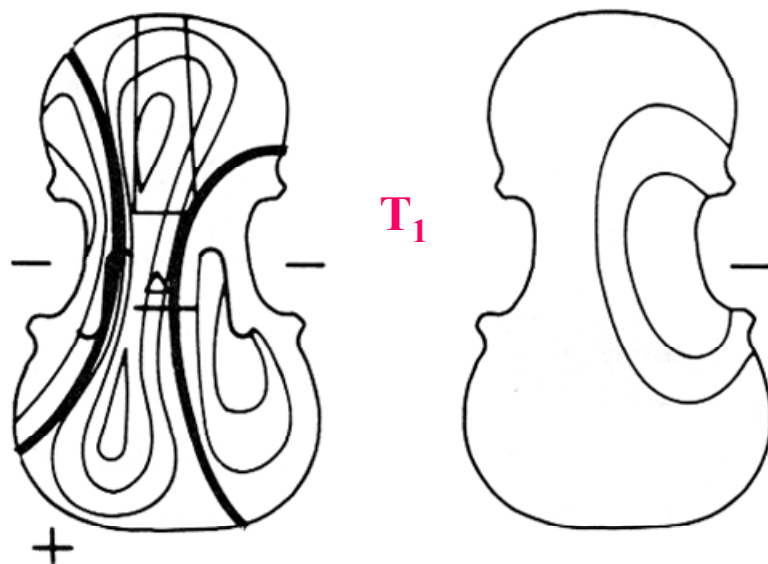
**A<sub>0</sub> (275Hz):** vazduh ulazi i izlazi iz f-rupa.  
**Emituje se značajna količina zvuka.**

*Slika 3.1.4.14: Rezonancija iz f – rupa na 275 Hz*



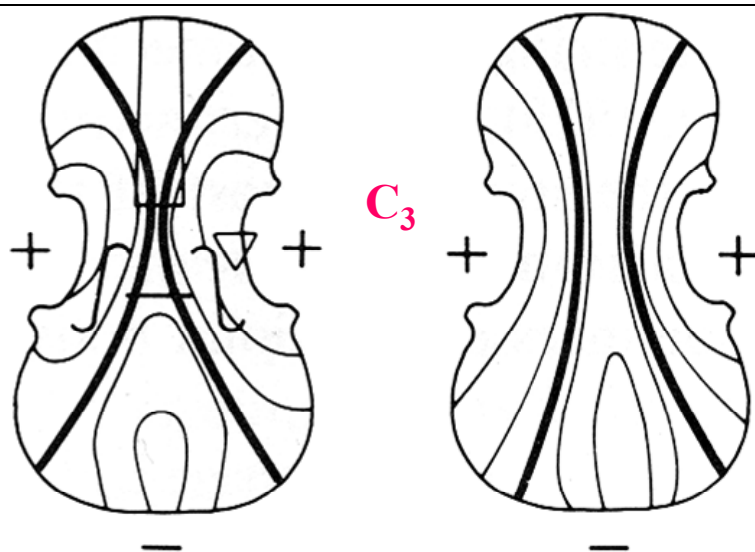
**C<sub>2</sub> (405Hz):** dvodimenzionalni prikaz  
**Emituje se malo zvuka.**

*Slika 3.1.4.15: Rezonancija tela violine na 405 Hz*



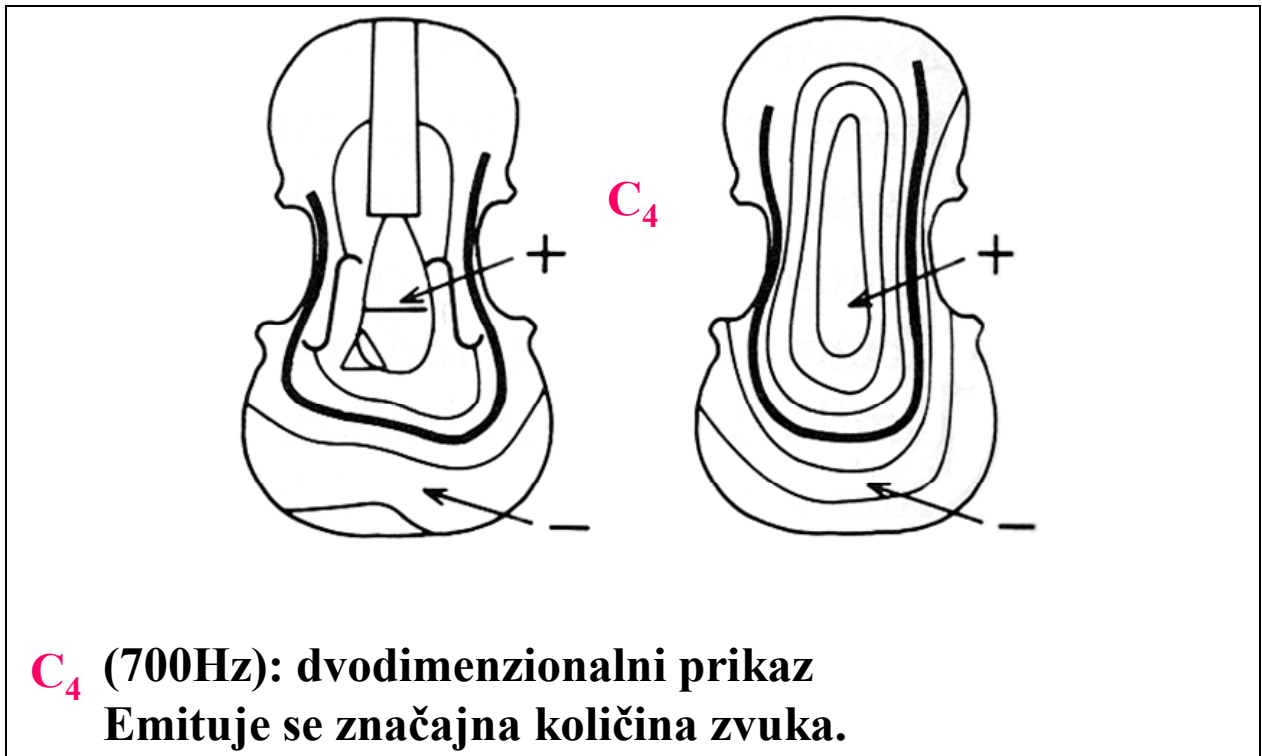
**T<sub>1</sub> (460Hz): glavni pokreti gornje ploče.  
Emituje se značajna količina zvuka.**

*Slika 3.1.4.16: Rezonancija tela violine na 460 Hz*



**C<sub>3</sub> (530Hz): dvodimenzionalni prikaz  
Emituje se značajna količina zvuka.**

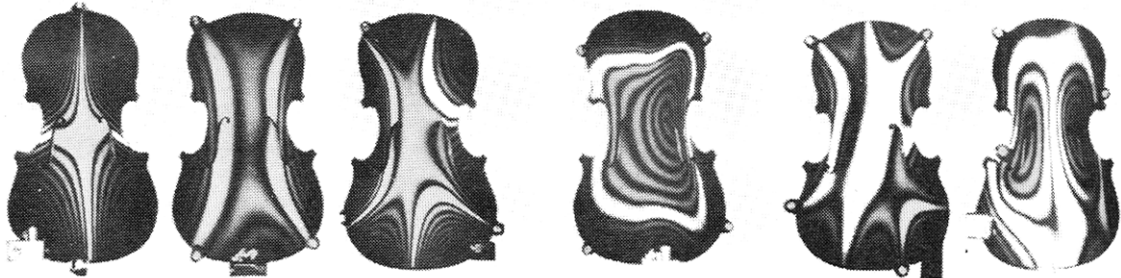
*Slika 3.1.4.17: Rezonancija tela violine na 530 Hz*



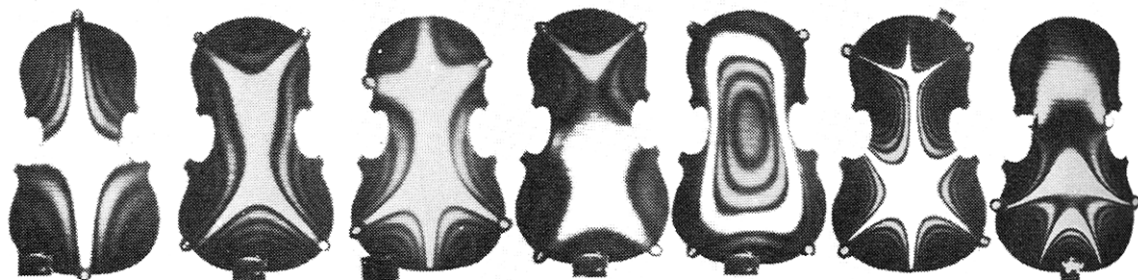
*Slika 3.1.4.18: Rezonancija tela violine na 700 Hz*

## Stepeni vibracija gornje i donje ploče violine

**gornja**



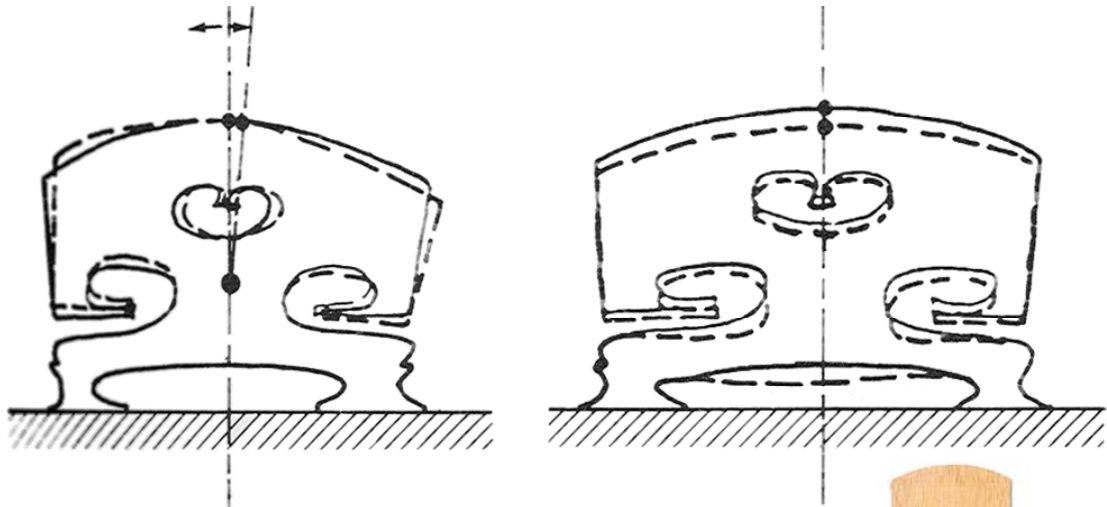
**donja**



*Slika 3.1.4.19: Stepeni oscilovanja gornje i donje ploče violine*



## Rezonancija kobilice



- Kobilica ima jaku rezonanciju na:
  - 3000Hz (levo-desno)
  - 6000Hz (gore-dole)
- Ako se svira blizu kobilice zatamni se zvuk violine.

Slika 3.1.4.20: Rezonancija kobilice

### 3.1.5 NEKI FOLKLORNI GUDAČKI INSTRUMENTI



Slika 3.1.5.1: Hardanger i kemange

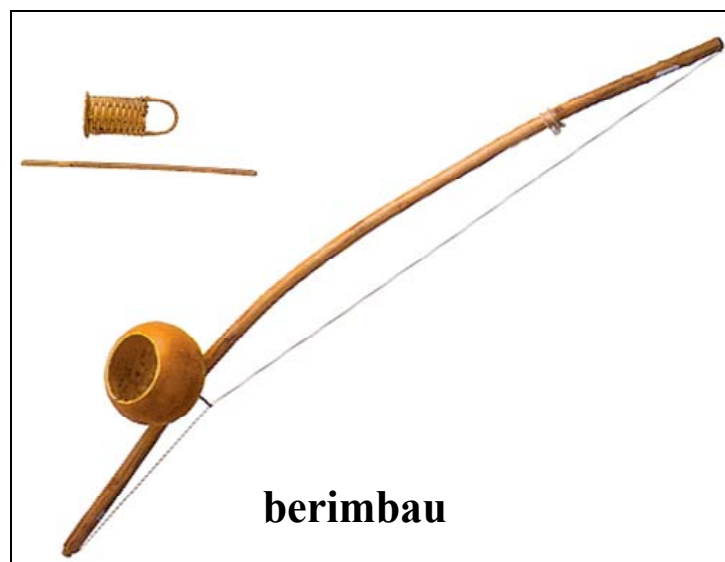


**sarangi**

*Slika 3.1.5.2: Sarangi*



**Si Hu**



**berimbau**

*Slika 3.1.5.3: Si Hu i berimbau*

Postoje folklorni gudački instrumenti mnogih naroda sveta. To su najčešće razne violine i gusle.

**Hardanger** je narodna violina iz Norveške. Ima 4 žice na kojima se svira i 4 nevidljive žice naštimentovane da osciluju zvukom glavnih žica. Potiče iz 17. veka.

**Kemange** je iranska violina sa 3 žice iz 18. veka. Ima nožicu koja kreće od čivija, prolazi kroz vrat i probija okruglo telo. Instrument je napravljen od drveta. Čivije od slonovače. Gornji deo zvučne kutije je od najfinijeg pergamenta.

**Sarangi** je indijska violina. Ima debeljuškasto telo. Drži se uspravno. Nevidljive žice prolaze kroz rupe na hvatniku.

**Berimbau** su brazilske gusle. Gudalo je primitivno, samo trska.

**Si Hu** je kineski muzički instrument iz familije Hu Kin. Ti muzički instrumenti odgovaraju violini i violi. Si Hu ima 4 žice, a većina ovih instrumenata ima samo 2.

Nemoguće je napraviti jasnu klasifikaciju između folklornih instrumenata i ranih muzičkih instrumenata jer su, zapravo, svi folklorni instrumenti tradicionalno poreklom od davnina.

### 3.1.6 NEKI RANI GUDAČKI INSTRUMENTI



Slika 3.1.6.1: Rebek



*Slika 3.1.6.2: Rebab*

Postoje mnogi rani instrumenti. Neki su ostali tradicionalni folklorni instrumenti, a od nekih su se razvili muzički instrumenti koji se koriste u klasičnoj muzici i koji su zastupljeni u simfonijskom orkestru.

**Rebek** je violina sa Srednjeg istoka.

**Andaluzijski rebab** je preteča gudačkih instrumenata.

**Žiga** je francuska preteča violine.

**Viola da gamba** je preteča violončela.

**Viola di bardone** je preteča današnjeg kontrabasa.

**Kit** je mali gudački instrument omiljen u 18. i 19. veku. Nastao je od srednjovekovne rubebe. Postoji nemački i engleski kit.



*Slika 3.1.6.3: Nemački kit i viola d'amore*



*Slika 3.1.6.4: Renesansna violina ii viola da gamba*





*Slika 3.1.6.6: Viola d'amore*

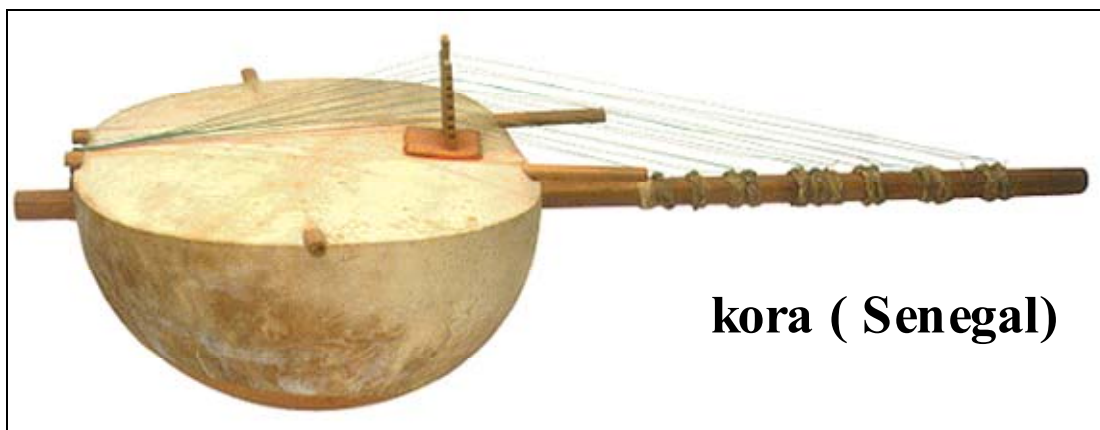
### 3.1.7 NEKI GUDAČKI INSTRUMENTI U SIMFONIJSKOM ORKESTRU

#### violončelo



*Slika 3.1.7.1: Violončelo*

### 3.1.8 NEKI FOLKLORNI TRZAJUĆI ŽIČANI INSTRUMENTI



*Slika 3.1.8.1: Kora*



*Slika 3.1.8.2: Rahao i balalajka*

Postoje trzajući žičani muzički instrumenti mnogih naroda sveta. Svi se oni sviraju okidanjem žica prstima ili trzalicom.

**Kora** je lauta iz Senegala.

**Rahao** je portugalska lauta. Nema duboko telo klasične laute. Ima 5 pojedinačnih žica.

**Balalajka** je ruska lauta. Ima 3 žice, trouglasto telo i ravno dno.

**Buzuki** je grčka lauta. Ima 8 žica.

**Mandolina** je italijanska lauta. Ima 10 žica.

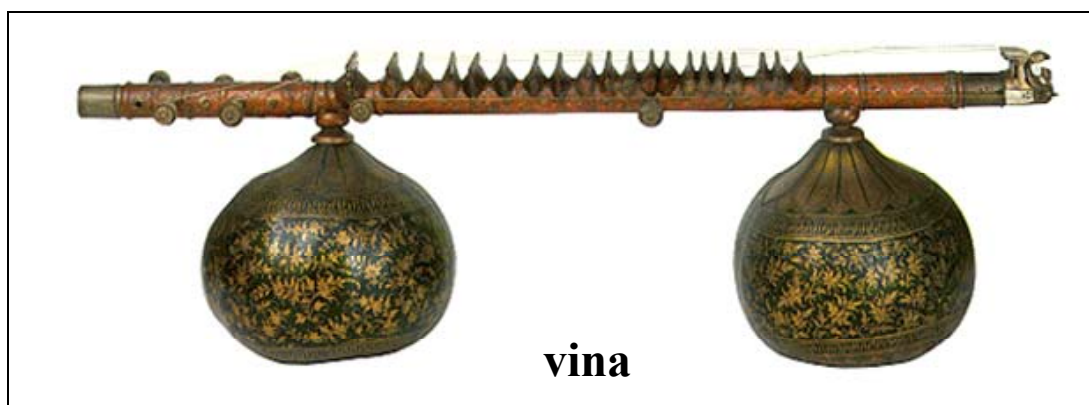




**šamisen**



**sitar**



**vina**

*Slika 3.1.8.3: Šamisen, sitar i vina*

**Šamisen** je japanska lauta dugačkog vrata. Koristi se u Kabuki teatru. Ima 3 žice različito naštimovane. Za sviranje se koristi koštana trzalica **bači**. Telo šamisenena je napravljeno od mačije kože, a glasnjača je ojačana pergamentom.

**Vina** je vrsta indijske laute. Ima 7 žica. 4 žice se pritiskaju prstima preko pragova. 3 žice su postavljene sa strane i njihovim okidanjem se naglašava melodija. To su tzv. zujeće žice. Vina može da se nosi uspravno ili preko ramena.



**mandolina**



*Slika 3.1.8.4: Mandolina*



**buzuki**

*Slika 3.1.8.5: Buzuki*



**harango**

*Slika 3.1.8.6: Harango*

**Sitar** je dugačka indijska lauta. Ima 7 glavnih žica koje prelaze preko lučnih metalnih pragova. Čivije se pružaju celom dužinom vrata. Zvučna kutija je napravljena od tikve.

**Harango** je mala južnoamerička lauta. Dno je napravljeno od kože armadilja. Instrument postoji u mnogim zemljama Južne Amerike. Harango iz Bolivije ima 5 pari žica.

**Bendžo** je američka lauta. Ima 5 žica.

**Pipa** je kineska lauta u obliku kruške. Ima 4 žice.

**Ruan** je vrlo stara kineska lauta u obliku punog meseca. Ima 4 žice.

**Ye Kin** je mala kineska lauta u obliku punog meseca. Ima 4 žice koje se okidaju trzalicom.

**Nigerijska citra** ima rezonator od šuplje tikve. Umesto žica koriste se tanke trake od bambusove trske.

**Koto** je japanska citra. Ima 13 žica i svira se obema rukama. Postoje sopran, alt i tenor koto.

**Begana** je lira iz Etiopije. Vodi poreklo iz antičke Grčke. Ima 6 žica koje se okidaju trzalicom. Zvučna kutija je obložena kožom.

**Lire** su postojale još u sumerskoj civilizaciji 2500 g. p.n.e.

**Krar** je lira iz Etiopije.

**Lučna harfa** je jedan od najstarijih muzičkih instrumenata. Dokaz o tome je egipatska freska u Dolini kraljeva iz 1400. godine p.n.e.

**Saung Gauk** je lep primer lučne harfe. To je savremeni narodni instrument u Burmi. Pravi se od drveta i ukrašava staklom i pozlatom. Rezonantno telo ima 4 otvora na svom gornjem delu. Saung ima 13 žica. Drži se na krilu.

**Irska harfa** je harfa sa zakrivljenim stubom. Nastala je pre 1000 godina i bila je omiljeni instrument u srednjem veku. U svom stubu harfa ima 7 kukica kojima se rukom podiže visina tona. Irska harfa nema pedale.



*Slika 3.1.8.7: Ye Qin*



*Slika 3.1.8.8: Pipa*



*Slika 3.1.8.9: Bendžo*



**koto**

*Slika 3.1.8.10: Koto*



**citra**

*Slika 3.1.8.11: Citra*

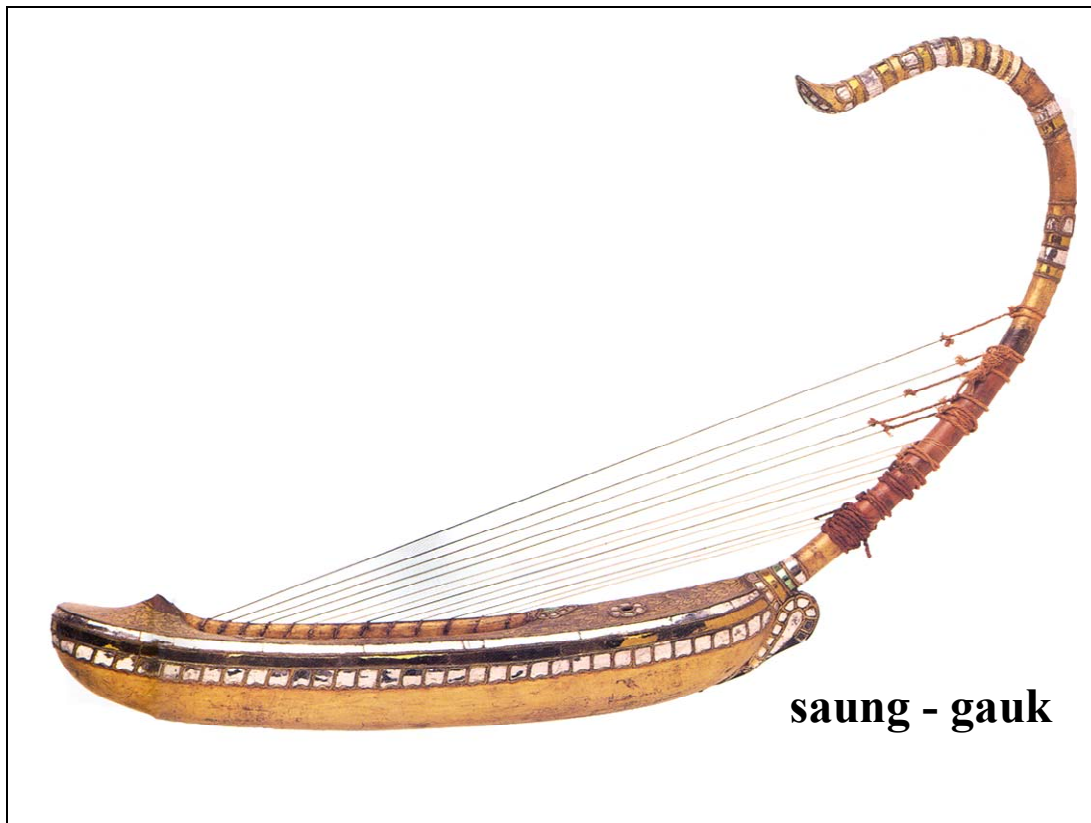


**begana**



**krar  
( Etiopija)**

*Slika 3.1.8.12: Begana i krar*



**saung - gawk**

*Slika 3.1.8.13: Saung - gawk*



*Slika 3.1.8.14: Irska harfa*

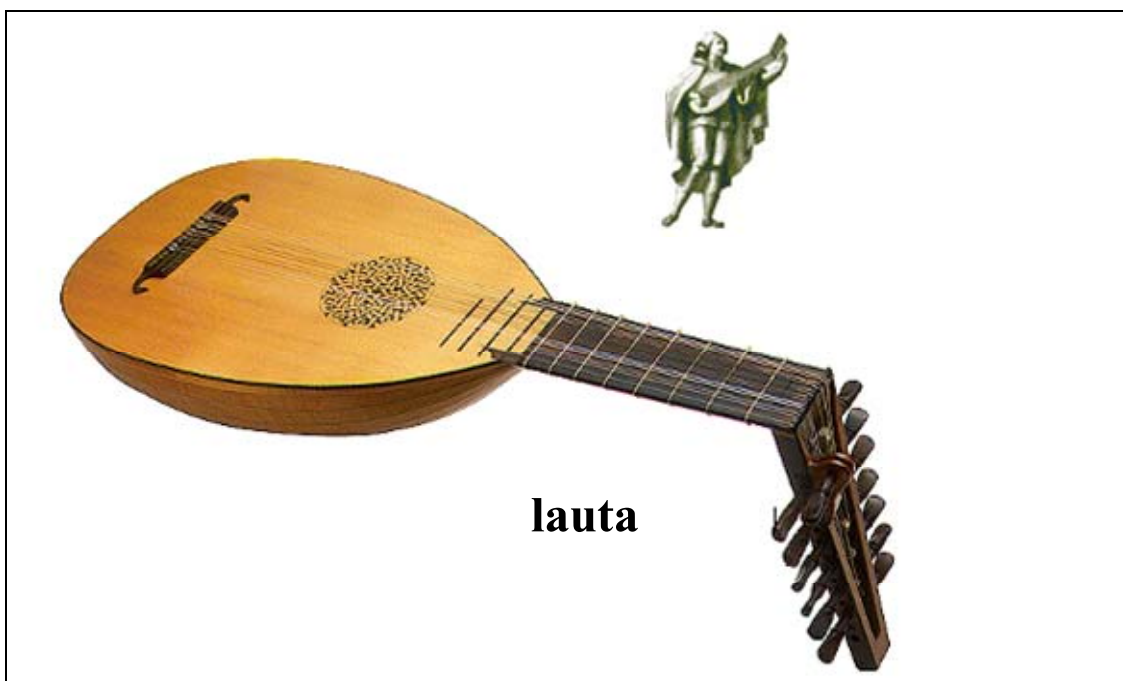
### 3.1.9 NEKI RANI TRZAJUĆI ŽIČANI INSTRUMENTI

Postoje rani trzajući žičani muzički instrumenti na kojima se žice okidaju prstima ili trzalicom koja se drži prstima i rezonator im je kruškastog oblika.

**Klasična lauta** vodi poreklo od arapskog instrumenta al' ut. Al ut' ima glavu sa čivijama u obliku slova S, dublje telo i uži vrat od klasične laute u Evropi u 15. i 16. veku. Kod klasične laute glava sa čivijama se savija nazad pod blažim ili oštrijim uglom. Koriste se pojedinačne žice ili parovi jednako naštimovanih žica.

Postoje **italijanska lauta (arči lauta)**, **nemačka barokna lauta (teorba)** i mnoge druge.





*Slika 3.1.9.1: Klasična lauta*

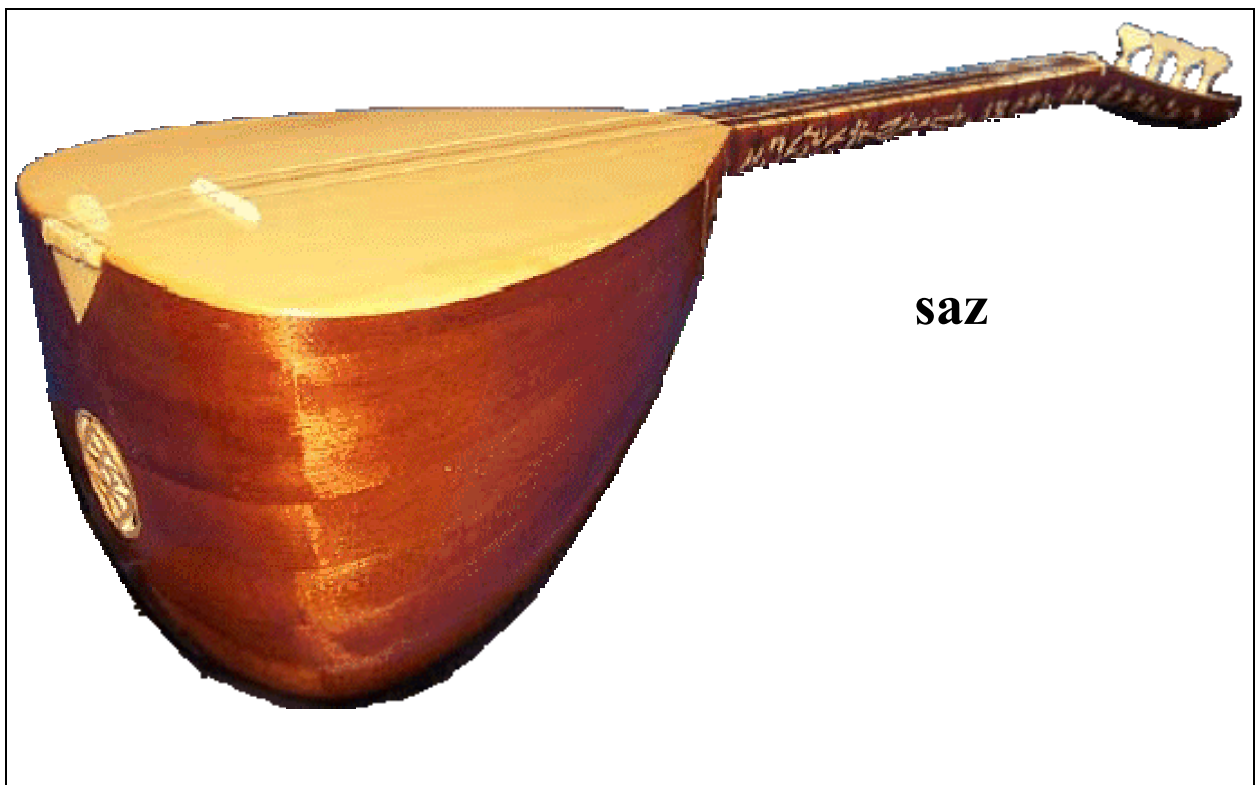


*Slika 3.1.9.2: Teorba*



**kitarone**

*Slika 3.1.9.3: Kitarone*

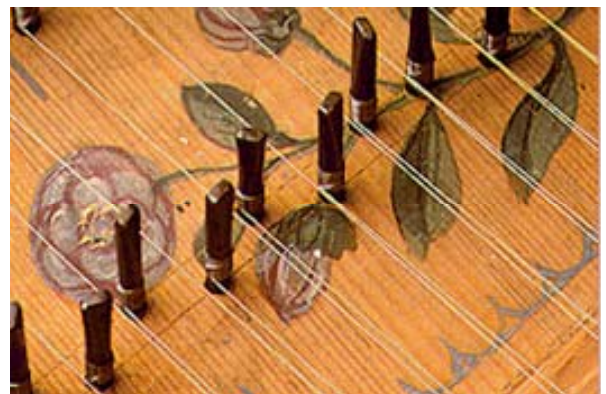


**saz**

*Slika 3.1.9.4: Saz*

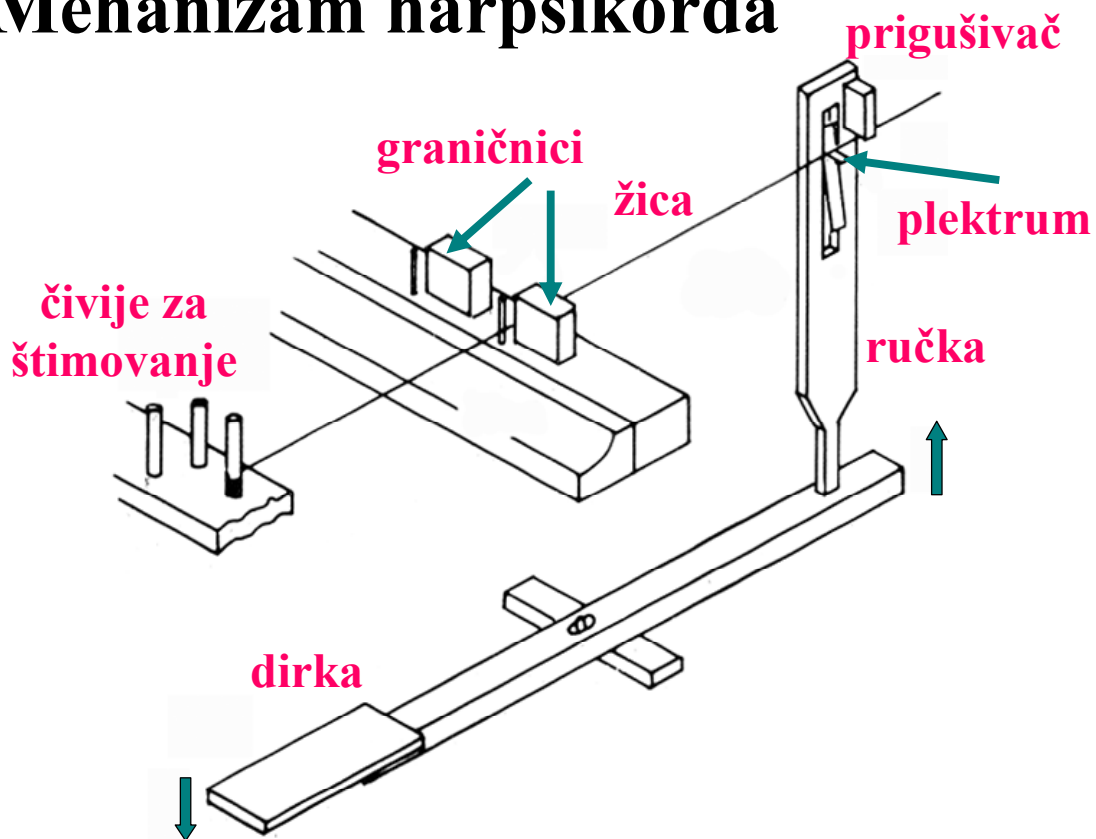
Postoje rani trzajući muzički instrumenti koji imaju klavijaturu, a žice im se okidaju trzalicom pomoću celog mehanizma.

# harsikord



*Slika 3.1.9.5: Harpsikord*

# Mehanizam harpsikorda



Slika 3.1.9.6: Mehanizam harpsikorda

**Harpsikord** je bio jako popularan u baroku. Konstrukcija je kao kod klavira, samo je sve manje i lakše. U originalu plektrum (trzalica) je ptičje pero.



spinet

Slika 3.1.9.7: Spinet

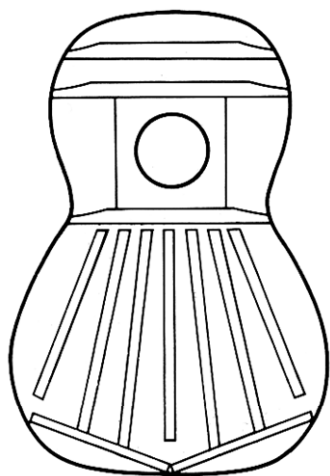
### 3.1.10 NEKI KLASIČNI TRZAJUĆI ŽIČANI INSTRUMENTI

**Gitara** vodi poreklo iz Egipta, pre više od 3000 godina. Najveću popularnost je dostigla u Španiji. Gitara ima 6 žica na kojima se svira prstima i trzalicom. Postoji nekoliko vrsta gitare: klasična gitara, flamenko gitara, gitara sa 12 žica, gitara sa metalnim žicama (mora imati posebno ojačanje).



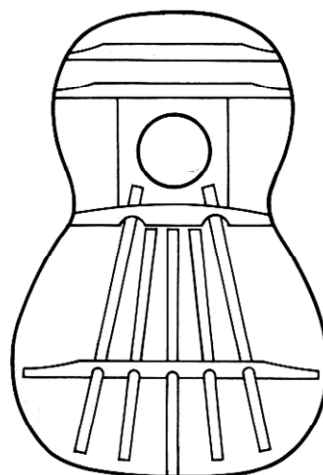
Slika 3.1.10.1: Gitara

## Ojačanja gornje ploče gitare



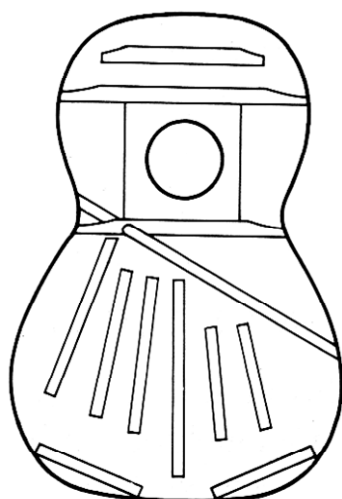
**a**

**a** Tradicionalno ojačanje



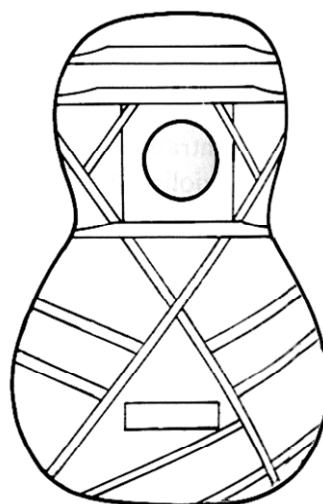
**b**

**b** Bouchet (francusko) ojačanje



**c**

**c** Ramirez (špansko) ojačanje

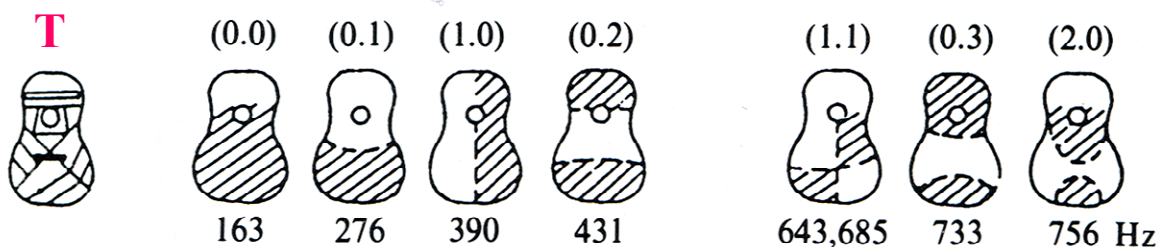


**d**

**d** Ukršteno ojačanje

*Slika 3.1.10.2: Ojačanja gornje ploče gitare*

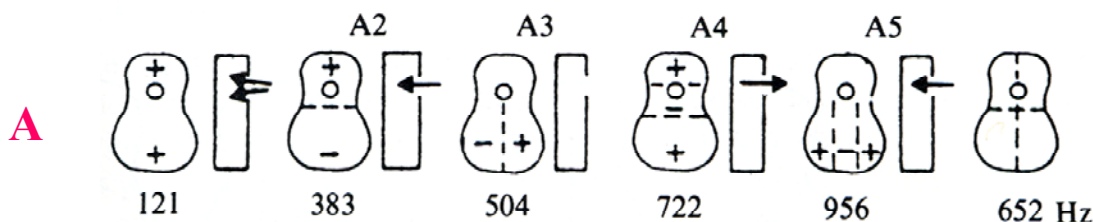
## Rezonancija gitare



**Stepeni vibracije Martin gitare: leđa i strane su u pesku.**



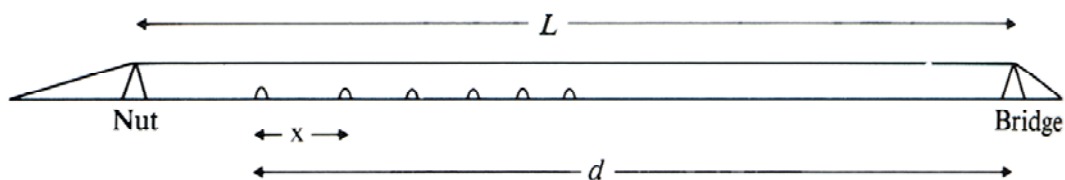
**Stepeni vibracije donje ploče: gornja ploča i strane su u pesku.**



**Stepeni vibracije zvučne rupe: telo gitare je u pesku.**

*Slika 3.1.10.3: Rezonancija gitare*

## Pravilo 18



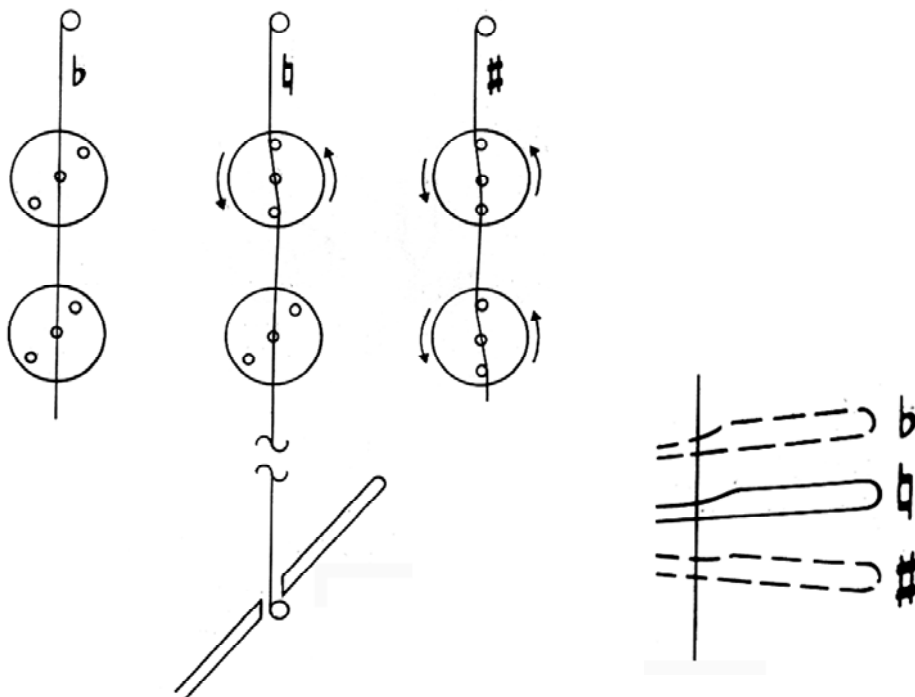
**Polustepen u temperovanoj skali ima odnos frekvencija 1,059. To je približno 18:17. Zbog toga se pragovi gitare postavljaju na 1/18 preostalog rastojanja hvatnika.**

*Slika 3.1.10.4: Pravilo postavljanja pragova na gitari*



Slika 3.1.10.5: Harfa

## Mehanizam pedala harfe



Slika 3.1.10.6: Pedalni mehanizam



**Harfa** je muzički instrument koji se često nalazi u simfonijskom orkestru. Ima 47 žica štimovanih po dijatonskoj lestvici. C žice i F žice su obojene drugom bojom da bi se svirač lakše snalazio. Harfa ima 7 pedala koje povišavaju ili snižavaju ton za polustepen. Tako je omogućeno hromatsko sviranje. Osnovni tonalitet harfe je C dur (odnosno Ces dur).

### 3.1.11 NEKI FOLKLORNI UDARNI ŽIČANI INSTRUMENTI



*Slika 3.1.11.1: Cimbalom*

**Cimbalom** je mađarski folklorni instrument na kome se razapete žice udaraju sa dva para batića. Svirač u svakoj ruci drži po 2 batića i svira njima istovremeno (slično kao što se svira na marimbi). Zato se ovaj instrument klasifikuje i u grupu udaračkih muzičkih instrumenata. Cimbalom ima veoma prijatan zvuk i sviranje na njemu deluje izrazito virtuozno i efektno.

### 3.1.12 NEKI RANI UDARNI ŽIČANI INSTRUMENTI



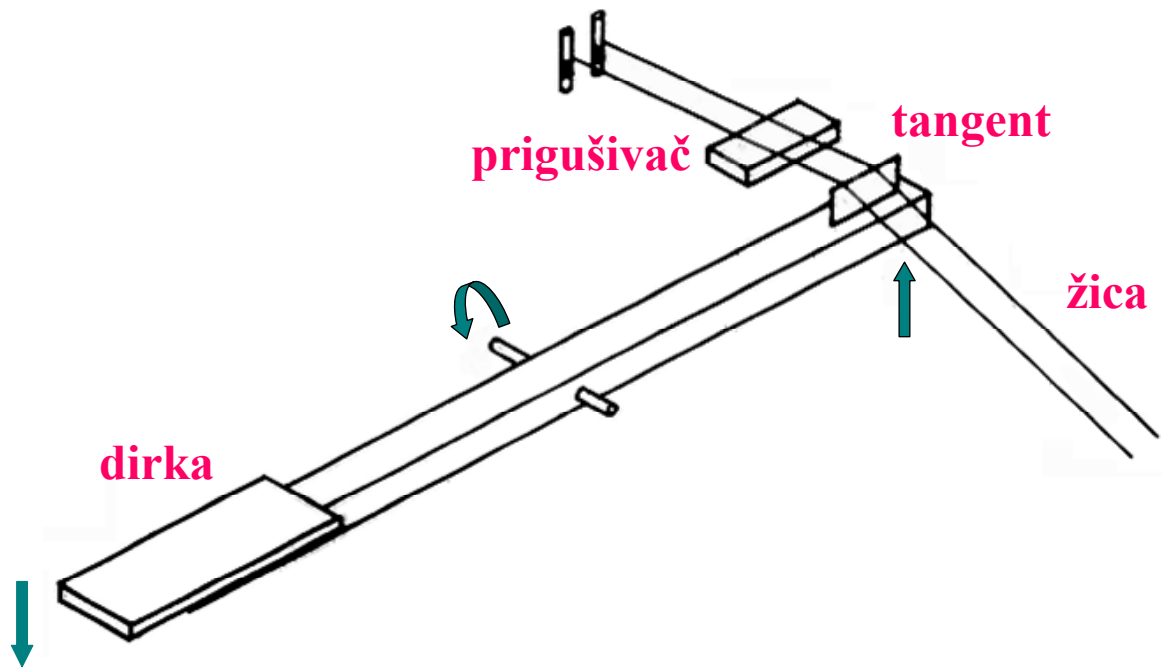
**klavikord**



*Slika 3.1.12.1: Klavikord*

**Klavikord** je mali instrument sa mekim zvukom. Priliči kućnoj upotrebi, a ne koncertnim salama. Ton je za 10 dB tiši nego kod klavira. Ima još više visokih harmonika nego klavir. Ton može da varira u jačini. Može i vibrato da se doda. Zvuk se proizvodi udarom u žicu. Tonski opseg je 4 oktave.

# Mehanizam klavikorda



*Slika 3.1.11.2: Mehanizam klavikorda*



*Slika 3.1.11.3: Forteplano*

### 3.1.13 NEKI UDARNI ŽIČANI INSTRUMENTI U SIMFONIJSKOM ORKESTRU



*Slika 3.1.13.1: Klavir*

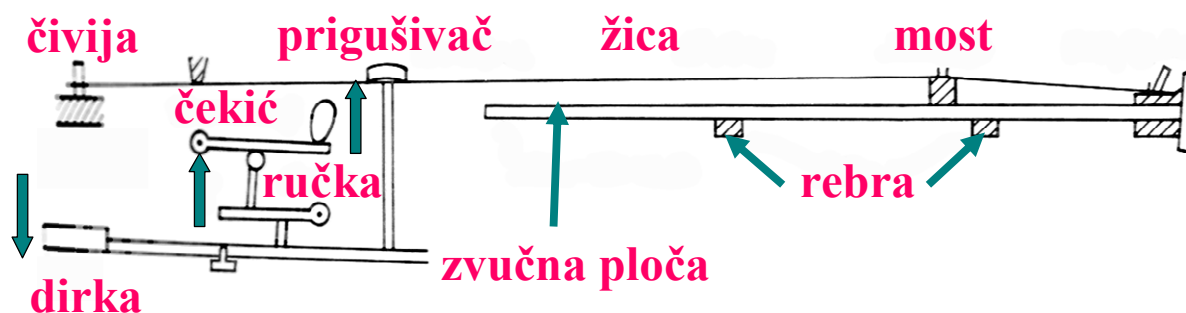
Prvi **klavir** je napravio 1709. godine u Firenci italijanski graditelj Bartolomeo Kristifori. Ubrzo je postao najpopularniji instrument. Tonski opseg klavira je preko 7 oktava. Veličina varira od kućnog pianina do velikog koncertnog klavira.

Klavir ima 88 dirki: 52 bele i 36 crnih. Veliki koncertni klavir ima 243 žice razapete od rama do čivija. Žice su različite dužine: od 5 cm do 2 m, u zavisnosti da li su za visoke ili niske tonove. Manji klaviri mogu imati manji broj žica, ali imaju isti broj dirki. Zategnutost žica je  $1000 \text{ N/mm}^2$  i zbog toga se ram pravi od čelika [72].

Klavir se štимуje 'rastegnuto' po intervalima. Na taj način se dobija određena doza neharmoničnosti, a tonovi sa neharmoničnim harmonicima se smatraju topliji, kod klavira. Takav način štimovanja je komplikovaniji jer su žice zategnutije.

Unisone žice se štimuju za 1 – 2 centa različito da bi emisija zvuka bila manje rapidna i vreme prestanka tona duže. Ne sme se preterati da se ne bi javili udari u zvuku. Malo frekvencijski pomereni tonovi bolje zvuče jer su onda i fazno pomereni.

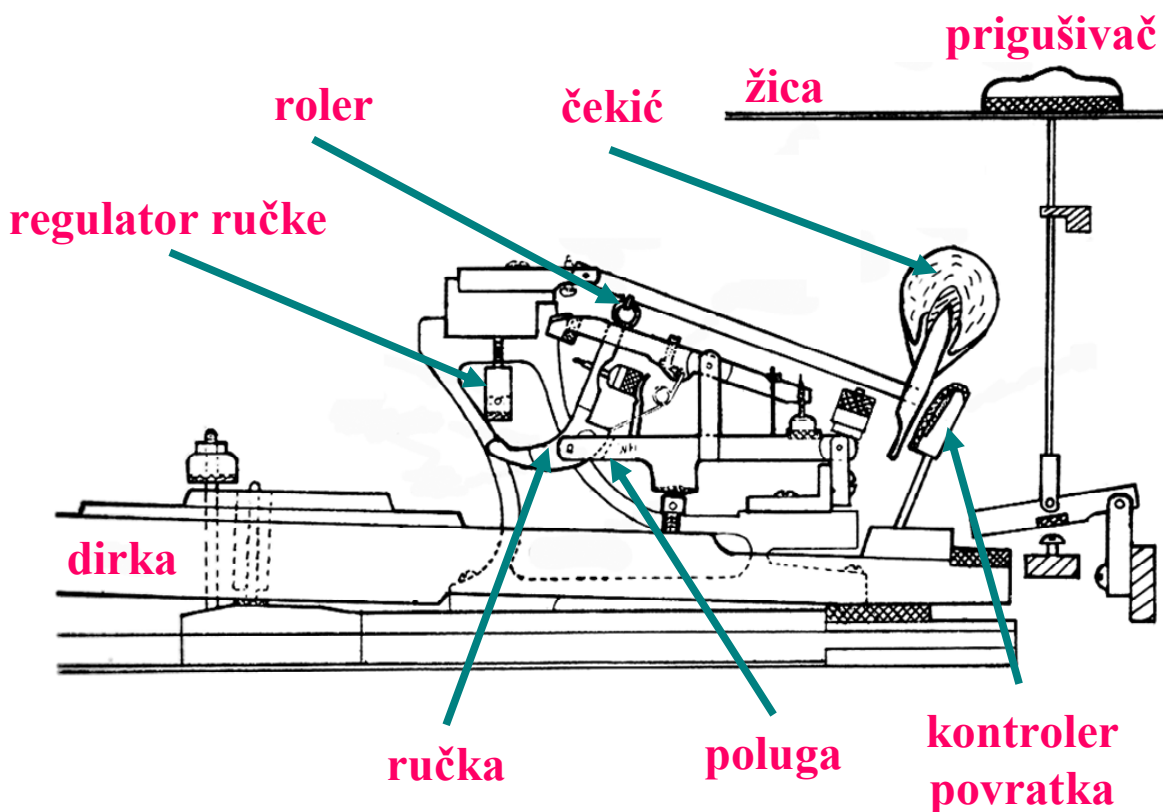
## Pojednostavljena šema klavira



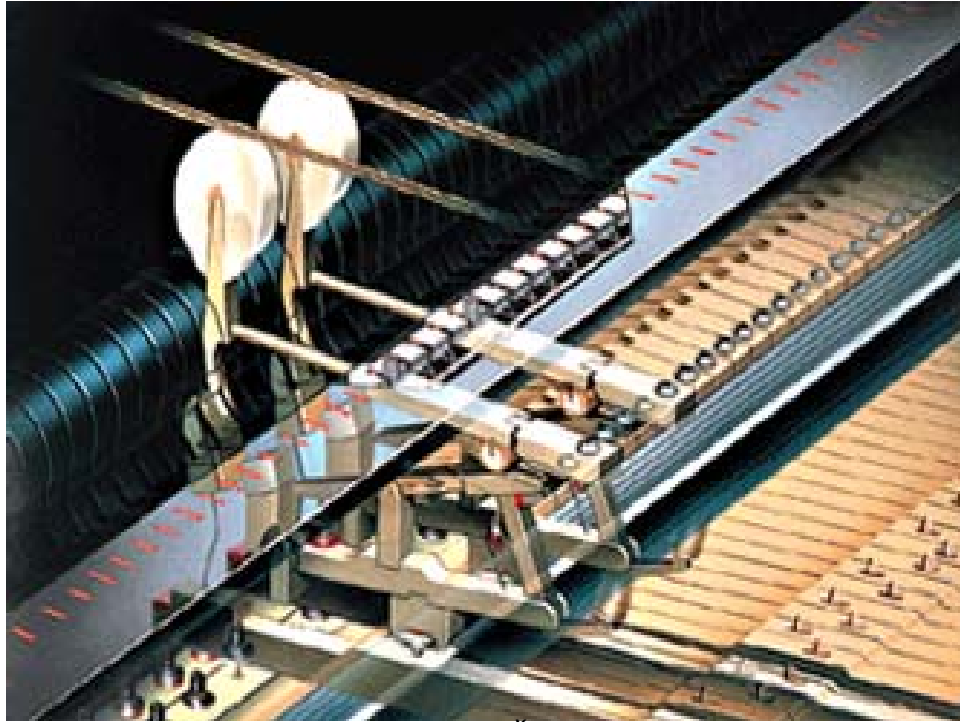
Kada se dirka pritisne, prigušivač se podigne i čekić udari žicu. Vibracije žice se prenose na zvučnu ploču preko mosta.

Slika 3.1.13.2: Pojednostavljena šema klavira

## Mehanizam koncertnog klavira



Slika 3.1.13.3: Mehanizam koncertnog klavira



*Slika 3.1.13.4: Čekići klavira*



**pianino**

*Slika 3.1.13.5: Pianino*

***Pianino*** je kućna verzija klavira. Mehanizam je postavljen vertikalno. Sve ostalo je slično kao kod klavira, osim suštinske razlike: rezonator je drugačiji, pa je samim tim i zvuk pianina mnogo drugačiji.

### 3.2 DUVAČKI MUZIČKI INSTRUMENTI (AEROFONI)

Duvački instrumenti se razlikuju prema vrsti jezička kojim se stvara ton. Postoje duvački instrumenti sa: vazdušnim jezičkom, jezičkom od trske, sa usnenim jezičkom i sa metalnim jezičkom.

Kod instrumenata sa **vazdušnim jezičkom** ton se obrazuje udarom vazdušnog mlaza iz pluća u tzv. usnu instrumenta. Usna je oštra ivica na ulazu cevi. Vazdušni mlaz se na usni cepa na dve struje: jedna ulazi u cev, a druga izlazi iz cevi. Vazdušna struja koja ulazi u cev stalno treperi oko usana i menja vazdušni stub usled kompresije i depresije. Učestanost tog oscilovanja zavisi od dužine vazdušnog stuba u cevi [37].

U muzičke instrumente sa vazdušnim jezičkom spadaju flauta i orgulje, kao glavni predstavnici, i svi instrumenti slični njima. U simfonijskom orkestru to su: flauta i pikolo. U folkloru to su razne vrste svirala, poprečnih i uzdužnih flauta: frula, Panova frula, dvojnice, blok flauta, indijska flauta, nemačka okarina, japanski šakuhači, kena (južna Amerika), launedas (Sardinija), diple, naj. Postoje i mnogi rani instrumenti na kojima se nekada sviralo i koji su preteča današnjih instrumenata: blok flauta, francuski flažolet, flauta u 1 ključu (Francuska, prelaz u 18. vek).

Orgulje su najsloženiji i najsavršeniji muzički instrument ikada napravljen. Postoje: kabinet orgulje i usne orgulje. Kabinet orgulje postoje u svim većim katoličkim crkvama. To je instrument koji ima meh u kome se akumulira vazduh, mehanizam za uduvavanje vazduha u cevi, cevi, nekoliko klavijatura, nožne pedale. Veličina orgulja se definiše po broju cevi koje imaju. Male orgulje, na primer, imaju po 2000, 3000, 4000 cevi. Velike orgulje imaju po 10000 cevi. Te cevi su različitog oblika i pomoću njih se dočarava zvuk muzičkih instrumenata celog orkestra (postoje cevi flaute, trube, violine, kontrabasa). Orgulje su tokom vekova pretrpele razne forme tehničke izvedbe. Na prvim orguljama u Bahovo vreme vazduh su u komoru upumpavali ljudi. Kasnije su napravljene mehaničke orgulje, elektromehaničke, električne orgulje i elektronske orgulje. Usne orgulje imaju metalni jezičak i ne spadaju u ovu grupu instrumenata.

Kod instrumenata sa **jezičkom od trske**, trske trepere ili jedna prema drugoj (instrumenti sa dvostrukom trskom), ili jedna trska od usne (instrumenti sa jednostrukom trskom). Na taj način stvaraju privremeno otvorenu i privremeno zatvorenu cev. Tako dolazi do kompresije i depresije vazduha u cevi. Visinu tona i ovde određuje dužina vazdušnog stuba. Postoje muzički instrumenti sa jednostrukom i dvostrukom trskom.

U muzičke instrumente sa jednostrukom trskom spadaju: klarinet, saksofon, gajde. U simfonijskom orkestru su klarinet i bas klarinet. Saksofon se koristi u jazz orkestrima i mnogim muzičkim ansamblima. U muzičke instrumente sa dvostrukom trskom spadaju: oboa, fagot. U simfonijskom orkestru su: oboa,

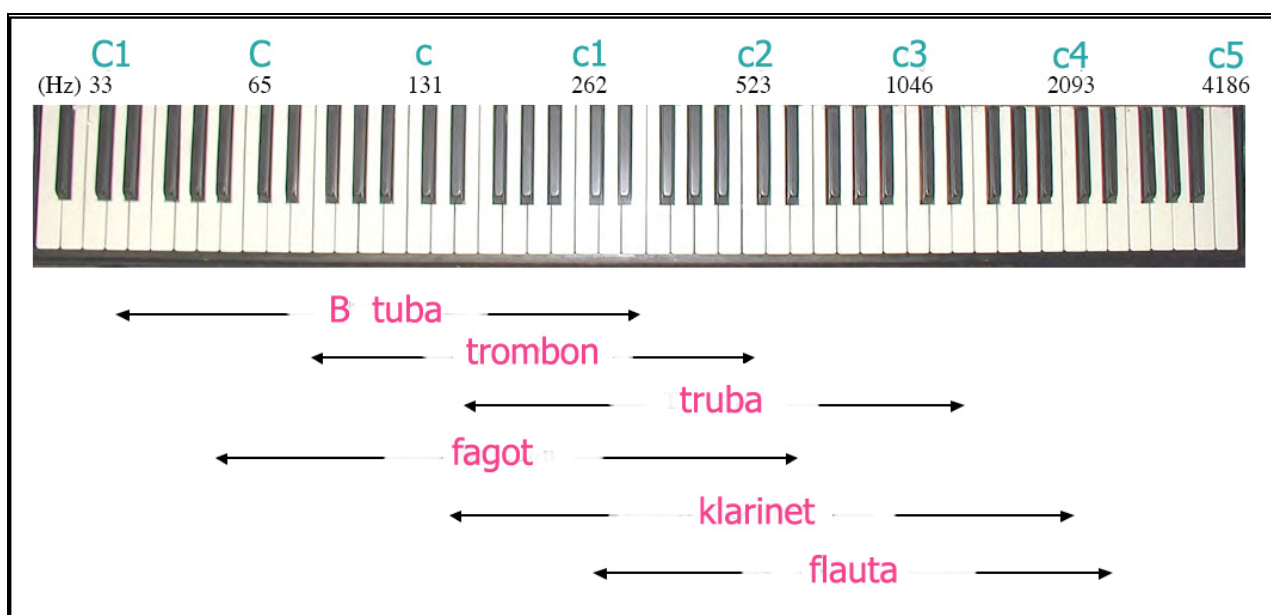
engleski rog, fagot, kontrafagot. U folkloru su: zurla, zurna (Turska), suona (Kina), pungi (Arabija), škotske gajde, duda (mađarske gajde), zamponja (italijanske gajde), zukra (Tunis i Alžir). Od ranih instrumenata to su: šaum (Evropa, 15. vek), baset horna ( 17. vek), šalmaj, bombardar (alt, tenor i bas), oboa da caccia, binu (gajde iz Bretanje, sredina 19. veka).

Kod instrumenata sa **usnenim jezičkom** sviračeve usne obrazuju jezičak. Vazdušni mlaz prekidaju usne samog svirača. Različitom napetosti usne i snage vazdušnog pritiska svirač formira alikvotne tonove (iz različitih alikvotnih nizova). Koriste se i ventili za dobijanje hromatskih tonova.

U simfonijskom orkestru od instrumenata sa usnenim jezičkom su: francuska horna, truba, trombon i tuba. U folkloru to su: nfir (marokanska truba), rog iz Konga, drveni rog gazele, diđeridu (Australija), alpski rog, konč (školjka). Od ranih instrumenata to su: vikinški rog, kornu (horna iz starog Rima), saracenska bucina, srednjevekovni lovački rog, lur, klarino truba, poštanski rog, drveni kornet, barokni trombon, serpent (Francuska, 1590.), eufonijum, suzafon ( 1898.), Vagner tuba.

Kod muzičkih instrumenata sa **metalnim jezičkom** koji nemaju cevi, dužina i debljina jezička određuju visinu tona. To su: harmonijum, harmonika, regal. Instrumenti koji imaju cevi su: orgulje (samo neke vrste cevi) i usne orgulje. Kod orgulja jezičak imaju cevi koje oponašaju instrumente sa trskom (cevi oboe, fagota). Usne orgulje su najrazvijenije u Kini. Postoje kineske usne orgulje šen, stare 3000 godina. Šen se svira uduvavanjem i isisavanjem vazduha iz vazdušne komore dok se prstima pokrivaju i otkrivaju rupice na cevima. Otvaranjem rupica propušta se vazduh do slobodnih jezičaka. Jezički su od metala obloženog voskom zbog štimovanja i smešteni su u osnovu cevi od bambusa.

Opseg nekoliko duvačkih instrumenata je prikazan na klavijaturi.



Slika 3.2.1: Opseg nekih duvačkih muzičkih instrumenata



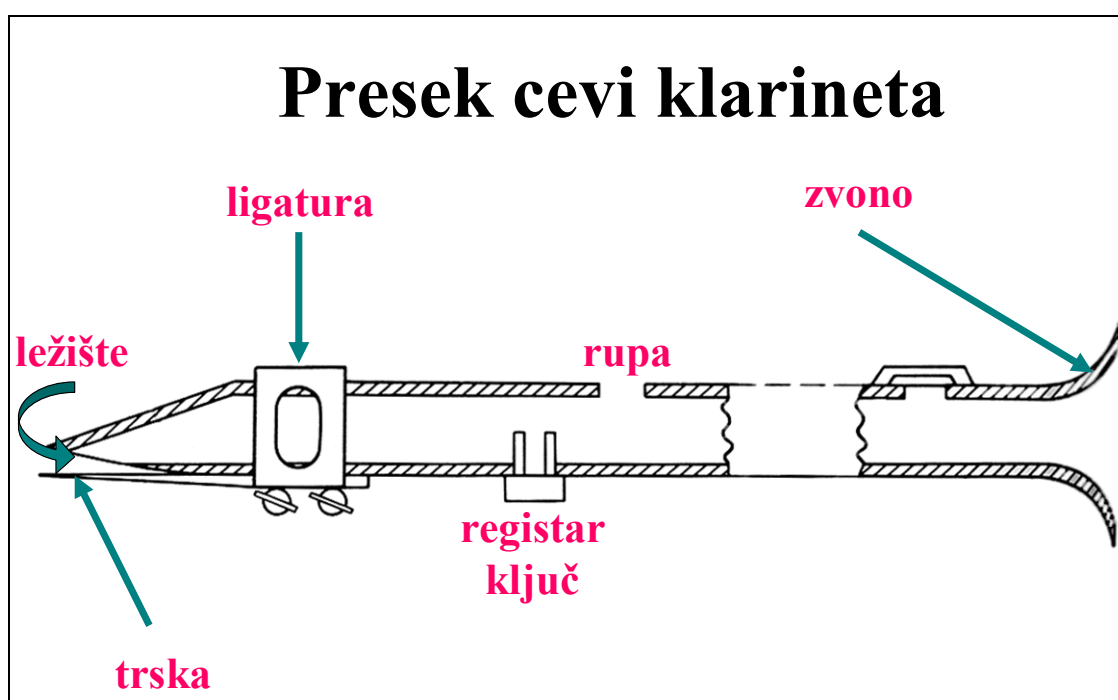
Kod duvačkih muzičkih instrumenata stojeći talasi se formiraju u vazdušnom stubu unutar cevi samog instrumenta. Ako nema cevi, onda u samom vazduhu. Mnogi ljudi imaju problem da zamisle refleksiju zvučnog talasa u vazdušnom stubu cevi duvačkog instrumenta na kraju same cevi. Mnogo je lakše zamisliti oscilacije žice i prenos vibracije preko kobilice. Treba uočiti da je nailazak talasa na vazdušni prostor izvan cevi, kada stigne do kraja same cevi, promena impedanse (impedansa se smanjuje) i da će se zbog toga deo talasa reflektovati nazad u cev [3].

Postoji još jedan način klasifikacije duvačkih instrumenata: drveni duvački instrumenti (sa vazdušnim jezičkom, sa trščanim jezičkom) i limeni duvački instrumenti (sa usnenim jezičkom). Izvorno su dobili to ime prema vrsti materijala od kojeg su bili pravljani. Danas to više nije striktno tako.

### 3.2.1 JEZIČAK SA TRSKOM

Na muzičkim instrumentima koji imaju jezičak sa trskom svirač može da proizvede ton uduvavajući vazduh u cev preko zategnute trske. To je nešto slično kao kad se zategne travka i svira se na njoj. Frekvenciju dobijenog tona određuje dužina cevi (frekvenciju oscilovanja trske).

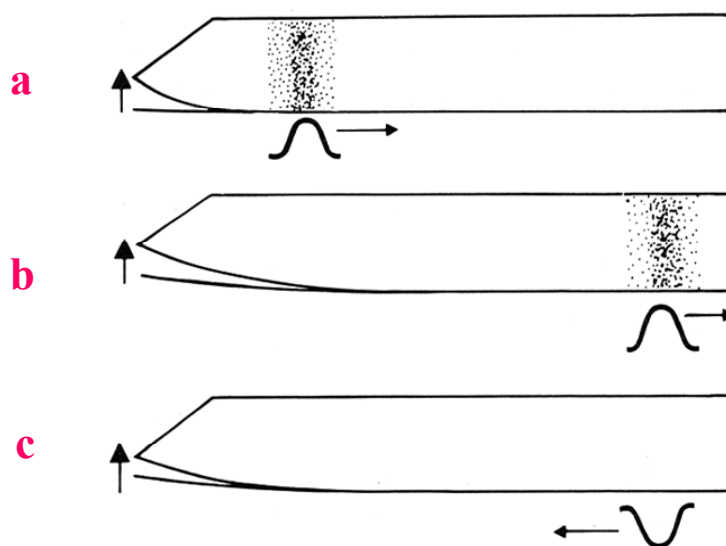
Kod **klarinet** se može objasniti mehanizam stvaranja tona.



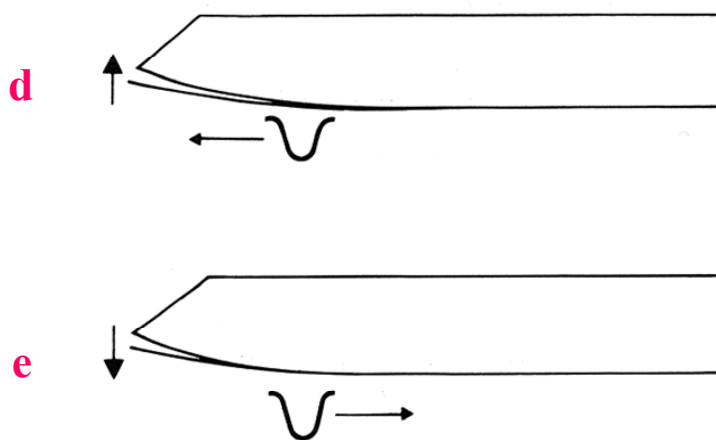
Slika 3.2.1.1: Presek cevi klarineta



Slika 3.2.1.2: Klarinet

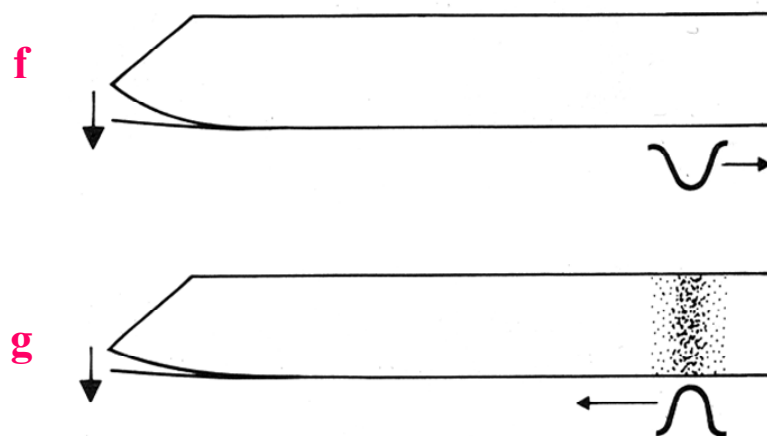


- a** Uduvani impuls vazduha putuje kroz cev do otvorenog kraja. Tu pritisak pada na 0.
- b i c** To prouzrokuje impuls negativnog pritiska koji se vraća kroz cev prema trsci.

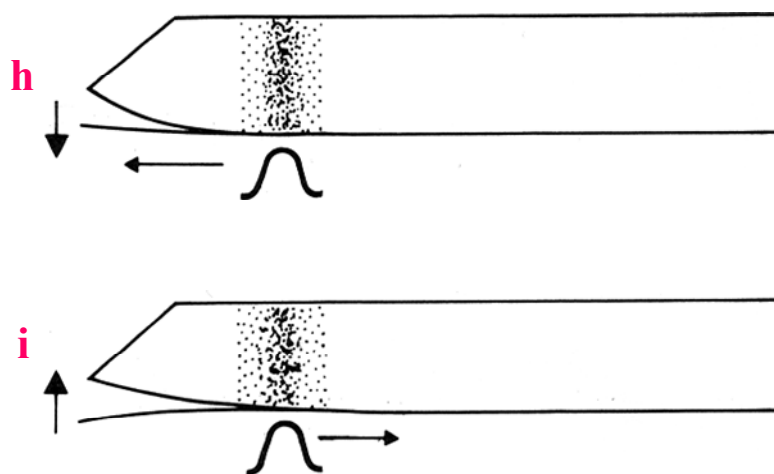


- d** Kad impuls stigne, trska se upravo zatvara. Impuls svojim potpritiskom dodatno zatvori trsku.
- e** Pošto je trska skoro potpuno zatvorila ulazni otvor i vrlo malo vazduha ulazi u cev, impuls negativnog pritiska se vraća kroz cev ka otvorenom kraju.

*Slika 3.2.1.3: Vazдушna povratna sprega kod klarineta – zatvaranje cevi trskom*



**f i g** Kad stigne do kraja, impuls potpritiska se popne na 0 (zapravo na normalni atmosferski pritisak) i impuls pozitivnog pritiska počinje da putuje nazad ka trsci.



**h** Kad impuls stigne, trska je otvorena i pritisak vazdušnog impulsa je dalje otvara.

**i** Sada je trska potpuno otvorena i klarinetista može ponovo da uduva vazduh u cev.

*Slika 3.2.1.4: Vazдушna povratna sprega kod klarineta – otvaranje cevi trskom*

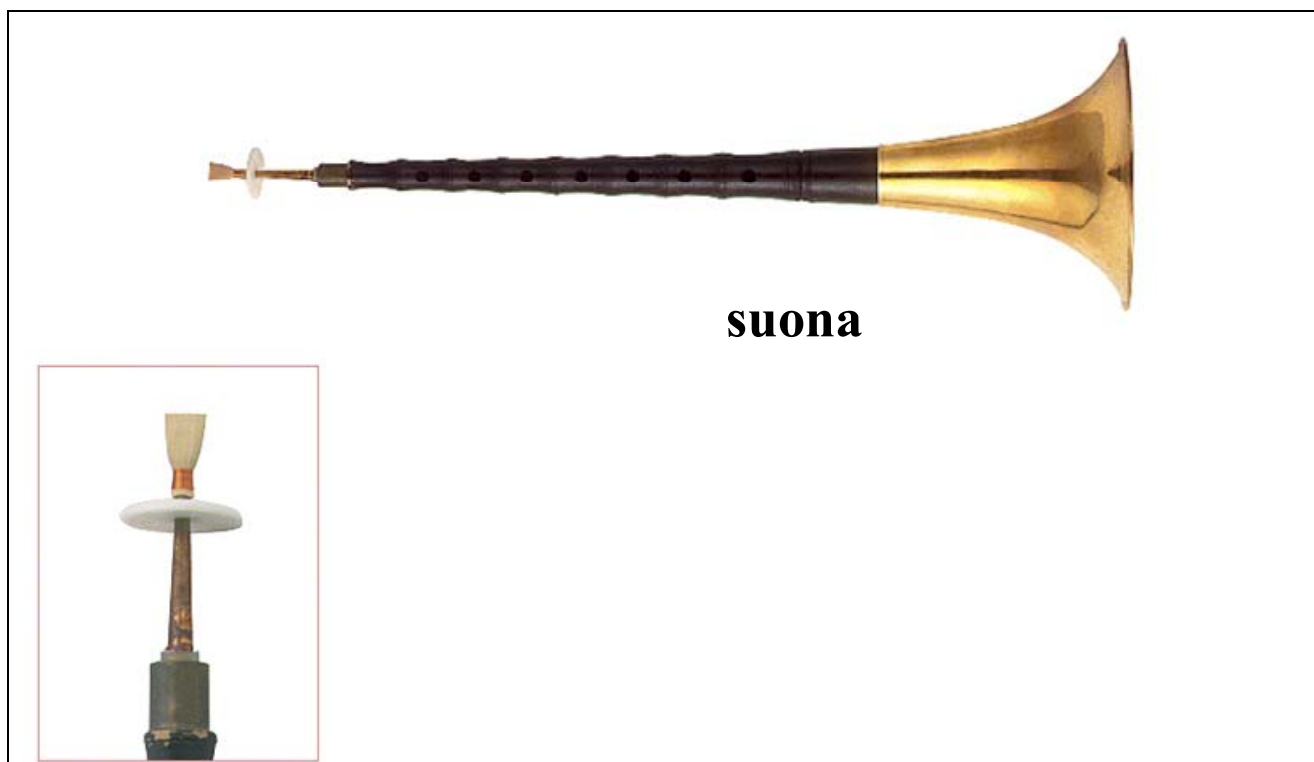
Sličan proces se dešava i kod instrumenata sa dvostrukom trskom, samo tu trske prijanjaju jedna uz drugu, a ne uz glavu instrumenta [104'] .

## trščani jezičci



*Slika 3.2.1.5: Trščani jezičci*

### 3.2.2 NEKI FOLKLORNI INSTRUMENTI SA TRŠČANIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.2.1: Zurna, suona i šanaj*

**Zurna** je instrument iz Turske koji liči na obou. Ima konusnu cev, jezičak od dvostruke trske i malo veće zvono od oboe.

**Suona** je muzički instrument iz Kine. Ima jezičak od dvostruke trske, konusnu cev i zvono na kraju cevi. Na taj način je obezbeđeno da ima sve harmonike u spektru.

**Šanaj** je instrument iz Indije. Ima dvostruku trsku, konusnu cev i zvono na kraju cevi. Kad se malo bolje pogleda, ova tri instrumenta su veoma slična, verovatno zato što su nastala na istom kontinentu.



**pungi**

*Slika 3.2.2.2: Zvuk pungija hipnotiše zmiju*

**Pungi** je muzički instrument iz Afrike. Poznat je po tome što njegov zvuk poziva zmije na ples. To je zapravo klarinet sa 2 cevi koje su jednim krajem u rezonatoru od tikve, a na drugom kraju se svira.



*Slika 3.2.2.3: Pungi*

### 3.2.3 NEKI RANI INSTRUMENTI SA TRŠČANIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.3.1: Šaum, baset horna i kramhorna*

**Šaum** je muzički instrument iz Evrope u 15. veku. Ima jezičak od dvostruke trske.

**Kramhorna** je rani instrument koji je danas izuzetno popularan u svim ansamblima koji sviraju ranu muziku.

**Baset horna** je preteča bas klarineta. Ima jezičak sa jednostrukom trskom.



**šalmaj i trombon  
( Španija, 17. vel)**

*Slika 3.2.3.2: Duvački instrumenti u Evropi u 17. veku*

### 3.2.4 INSTRUMENTI SA TRŠČANIM JEZIČKOM U SIMFONIJSKOM ORKESTRU

U simfonijskom orkestru se koriste instrumenti koji imaju jezičak od jednostruke i dvostruke trske.

**Klarinet** je muzički instrument koji ima jezičak od jednostruke trske. Vazduh u cevi klarineta osciluje tako da se stojeći talas ponaša kao da je cev zatvorena sa jedne strane. Da bi klarinet imao sve harmonike u spektru, dodato mu je zvono na kraju cevi i cev je konusnog oblika [4].

**Bas klarinet** ima savijenu cev i svira za oktavu niže od klarineta.

**Oboa** ima jezičak od dvostruke trske, konusnu cev i malo zvono.

**Engleski rog** ima ton sličan oboi, veoma karakteristično zvono, svira za kvintu niže od oboe.

**Fagot** ima jezičak od dvostruke trske. Cev je dugačka 254 cm i savijena.





*Slika 3.2.4.1: Bas klarinet, engleski rog i fagot*

### 3.2.5 USNENI JEZIČAK

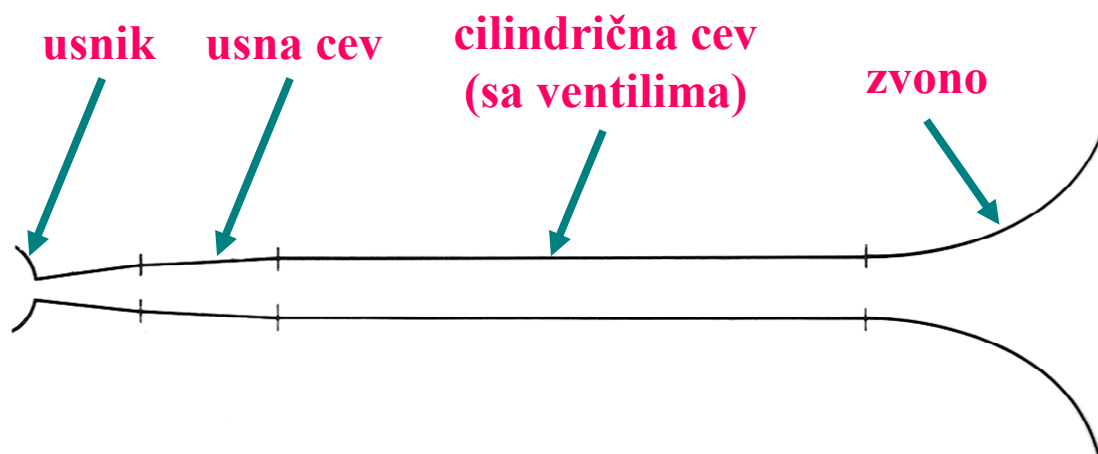
Kod limenih duvačkih instrumenata postoji usneni jezičak. Tu usne svirača igraju ulogu trske i, prijanjajući uz usnik, stvaraju povratnu spregu vazdušnog stuba u cevi instrumenta (sviračeve usne obrazuju jezičak). Različitom napetosti usne i snage vazdušnog pritiska svirač formira alikvotne tonove (iz različitih alikvotnih nizova). Koriste se i ventili za dobijanje hromatskih tonova.



*Slika 3.2.5.1: Usneni jezičci*

Usnik je različit za svaki instrument. Na slici su prikazani usnik za tubu, trubu, trombon, kornet i francusku hornu. Oni spolja izgledaju čašičasto, ali su iznutra levkastog oblika. Usnik za francusku hornu ima i spolja levkasti oblik.

## Presek cevi limenog duvačkog instrumenta



Postoji korelacija između usana svirača i oscilacija vazduha u cevi: svirač uvek oseti povratnu oscilaciju i zna kada treba da dopuni vazduh. To je **akustička povratna sprega**.

*Slika 3.2.5.2: Presek cevi*



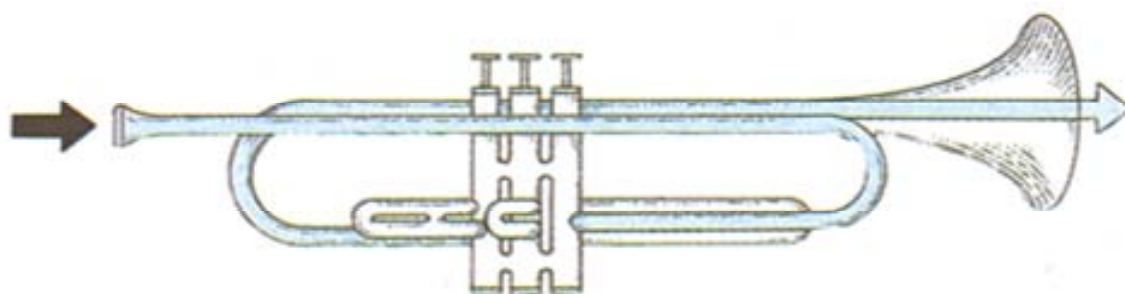
*Slika 3.2.5.3: Truba*

Za dobijanje hromatskih tonova koriste se ventili. Na trubi postoje 3 ventila, na Francuskoj horni 4 (jedan je za prebacivanje sa jedne cevi na drugu, pošto današnja horna ima dve cevi, različito naštimovane), na tubi 3 ili 4, a na trombonu 3, ako ih uopšte ima. Danas se mnogo češće svira trombon sa klizajućom cevi. Postoji ventil koji produžava cev za jedan polustepen, ventil koji produžava cev za ceo stepen, ventil koji produžava cev za stepen i po. Kombinacijom ta tri ventila mogu se dobiti svi intervali u okviru hromatske lestvice, koji se uklapaju u tonove preduvanih alikvota [31'].

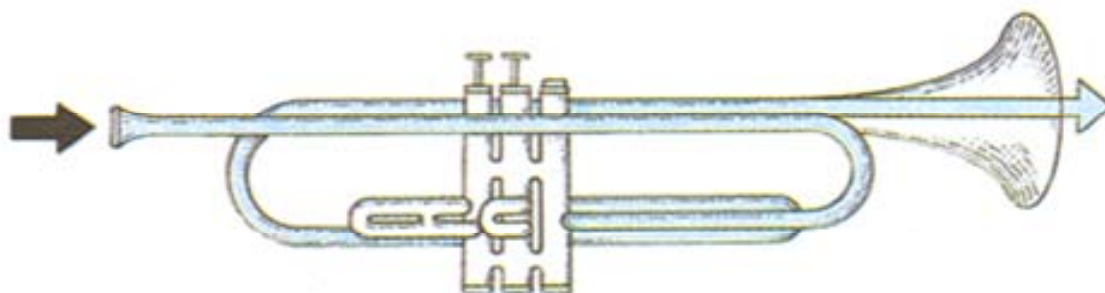
# Ventili



*Slika 3.2.5.4: Ventili*



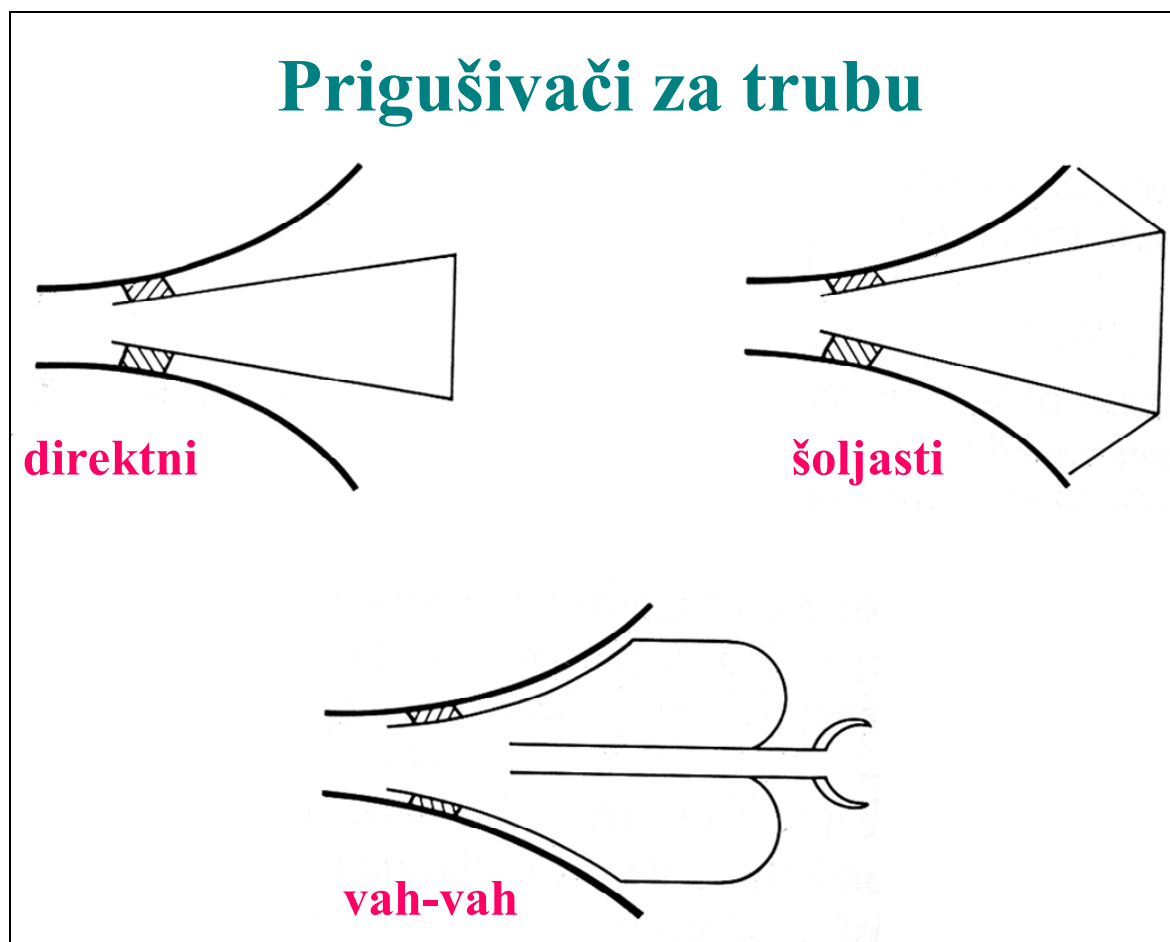
- **Ventili gore: stub vibrirajućeg vazduha prolazi pored ventila.**



- **Treći ventil dole: najduža dopunska cev se otvara. Ton je niži za 1,5 stepen.**

*Slika 3.2.5.5: Otvaranje i zatvaranje ventila*

Na limenim duvačkim instrumentima se svira i sa prigušivačima. Postoje različiti prigušivači koji na različite načine modifikuju boju tona muzičkog instrumenta.

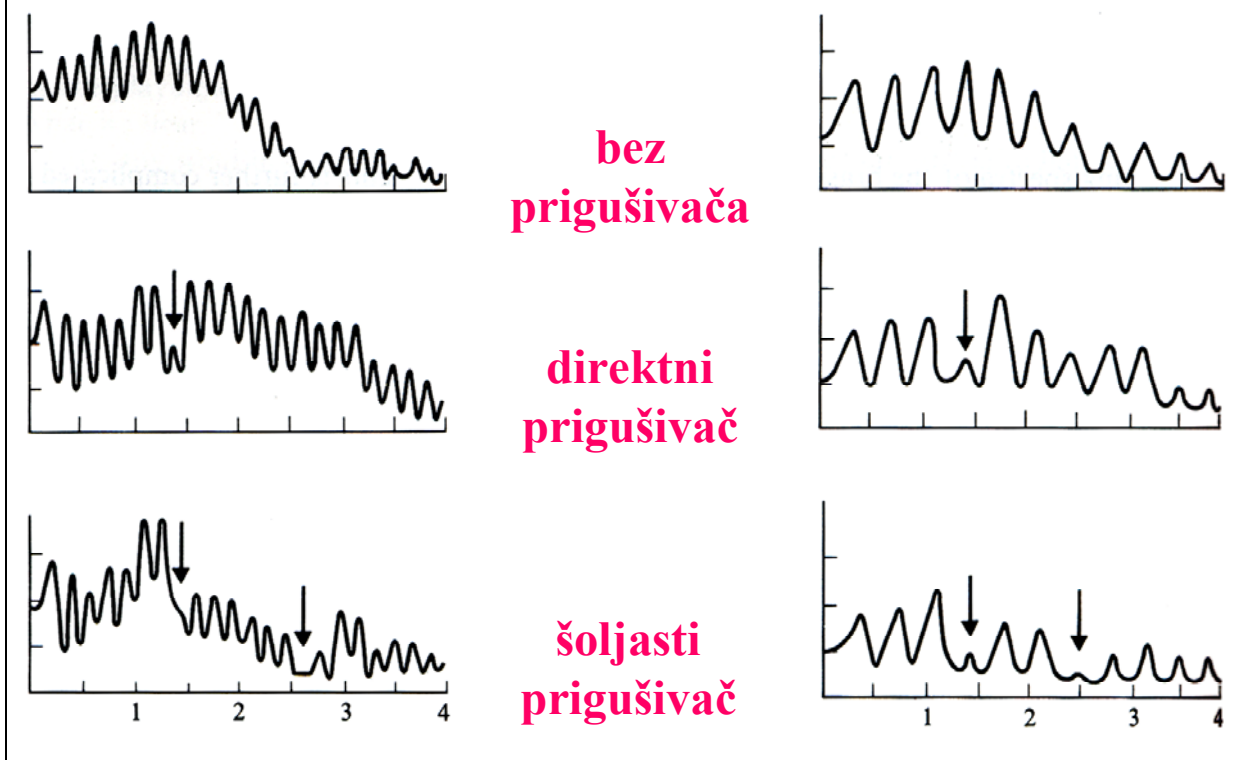


*Slika 3.2.5.6: Vrste prigušivača*



*Slika 3.2.5.7: Prigušivači*

## Frekvencijski spektar tona trube



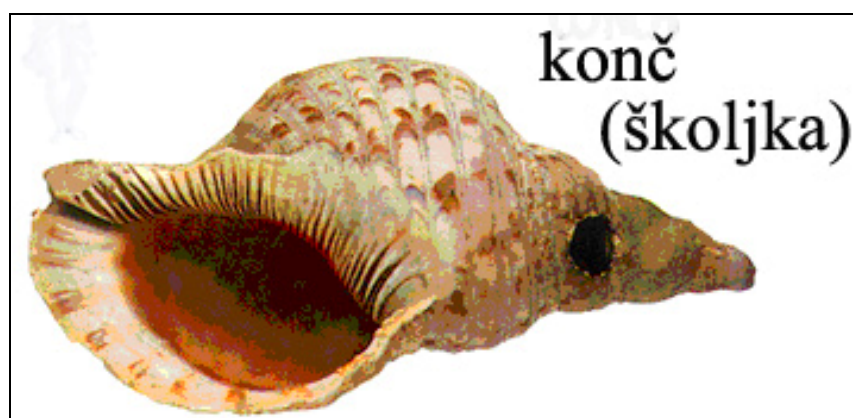
Slika 3.2.5.8: Frekvencijski spektar tona trube sa i bez upotrebe prigušivača

Prigušivači prigušuju pojedine harmonike u spektru limenih duvačkih instrumenata i na taj način deluje da oni tiše sviraju. Menja se i boja tona kada se upotrebljava prigušivač. Na slici je prikazano delovanje prigušivača na ton trube (u dve oktave) [5].

Prigušivači se koriste kod trube. Kod horne svirač stavlja svoju desnu ruku u zvono instrumenta i na taj način menja boju tona.

Trombon i tuba se uobičajeno sviraju bez prigušivača. Oni sviraju u nižem registru od trube i njihov ton nije toliko prodoran.

### 3.2.6 NEKI FOLKLORNI INSTRUMENTI SA USNENIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.6.1: Rog gazele, diđeridu i školjka*

**Rog gazele** je izdubljeni rog afričke gazele na čijem je kraju izbušena rupa za uduvavanje vazduha. Usne svirača služe umesto trske i formiraju usneni jezičak.

**Diđeridu** je drevni muzički instrument prastanovnika Australije Aboridžana. Pravi se od bambusove trske, a danas i od nekih drugih vrsta drveta. Izdubljen je celom dužinom i na kraju je probušena rupa. Kroz tu rupu svirač

uduvava vazduh tako što izgovara cele fraze, odnosno rečenice, sa smislom ili bez. Ima izrazito karakterističan zvuk.

**Školjka** je jedan od omiljenih muzičkih instrumenata današnjih poznatih jazz muzičara. Svira se kao ceo set instrumenata sortiranih po veličini. Na svakoj školjci se izbuši rupica za uduvavanje vazduha. Svaka školjka daje ton različite visine.



*Slika 3.2.6.2: Alpski rog*



*Slika 3.2.6.3: Nfir*

**Nfir** je marokanska truba. Potiče iz vremena starog Rima. Koristi se da označi kraj ramazanskog posta. Cev je dužine 1.5 m.

**Alpski rog** je služio za dozivanje na brdima Alpa. Ima prodoran zvuk zahvaljujući veoma dugačkoj cevi. Svirač nasloni zvono instrumenta na zemlju i tako svira.



### 3.2.7 NEKI RANI INSTRUMENTI SA USNENIM JEZIČKOM



**šalmaj, 1520.**

**truba 1520.**

*Slika 3.2.7.1: Duvački instrumenti u Evropi u 16. veku*

Na slikama iz različitih istorijskih perioda se vidi da su neki od muzičkih instrumenata koji se danas stalno koriste postojali još u vreme renesanse. **Truba** je imala jednostavno savijenu cev. Sistem ventila je uveden u 19. veku. Do tada nije bilo moguće svirati na trubi hromatsku lestvicu.

**Horna** je imala cev izuvijanu nekoliko puta i na taj način omogućenu veliku dužinu cevi. Cev je cilindričnog poprečnog preseka i zvono omogućava da horna ima sve harmonike u svom tonu [26].

**Poštanski rog** je kao mala horna, sa mnogo kraćom cevi.

**Serpent** je izuzetno karakterističan muzički instrument koji ima usnik kao truba, a napravljen je od drveta i ima rupice za sviranje tonova različite visine. Na taj način on pripada grupi muzičkih instrumenata sa usnenim jezičkom, ali istovremeno pripada i grupi drvenih duvačkih i limenih duvačkih instrumenata. Serpent je francuski instrument, napravljen 1590. godine. Ima dva niza otvora za prste, za levu i desnu ruku.



*Slika 3.2.7.2: Horna i serpent*



*Slika 3.2.7.3: Poštanski rog iz 19. veka*

### 3.2.8 INSTRUMENTI SA USNENIM JEZIČKOM U SIMFONIJSKOM ORKESTRU



*Slika 3.2.8.1: Francuska horna, trombon i tuba*

**Truba** je instrument koji ima najviši registar od svih limenih duvačkih instrumenata u simfonijskom orkestru. Ima 3 ventila.

**Francuska horna** nosi ime zahvaljujući engleskoj duhovitosti i džentlmenskoj opasci. Naime, među drvenim duvačkim instrumentima postoji instrument koji mi zovemo engleski rog jer se u originalu na francuskom jeziku zove Cor d' angle, što zapravo znači 'uglasti rog'. Pošto bi se isto tako izgovorio i engleski rog, jedan veliki engleski političar je nekom prilikom izjavio da se Englezi duboko zahvaljuju počasti koju su im Francuzi učinili i , da bi se revanširali, zvaće svoj instrument hornu 'francuskom hornom'. Horna

ima dve cevi sa zajedničkim usnikom i zajedničkim zvonom, 3 ventila za hromatsko sviranje i 4. ventil za prebacivanje sa jedne cevi na drugu.

**Trombon** u simfonijskom orkestru ima klizajuću cev, mada postoji trombon sa ventilima. Kada ima ventile, trombon ima 3 ventila. Trombon ima cilindričnu cev i zato ima zvono koje omogućava da se stvaraju svi harmonici u spektru tona.

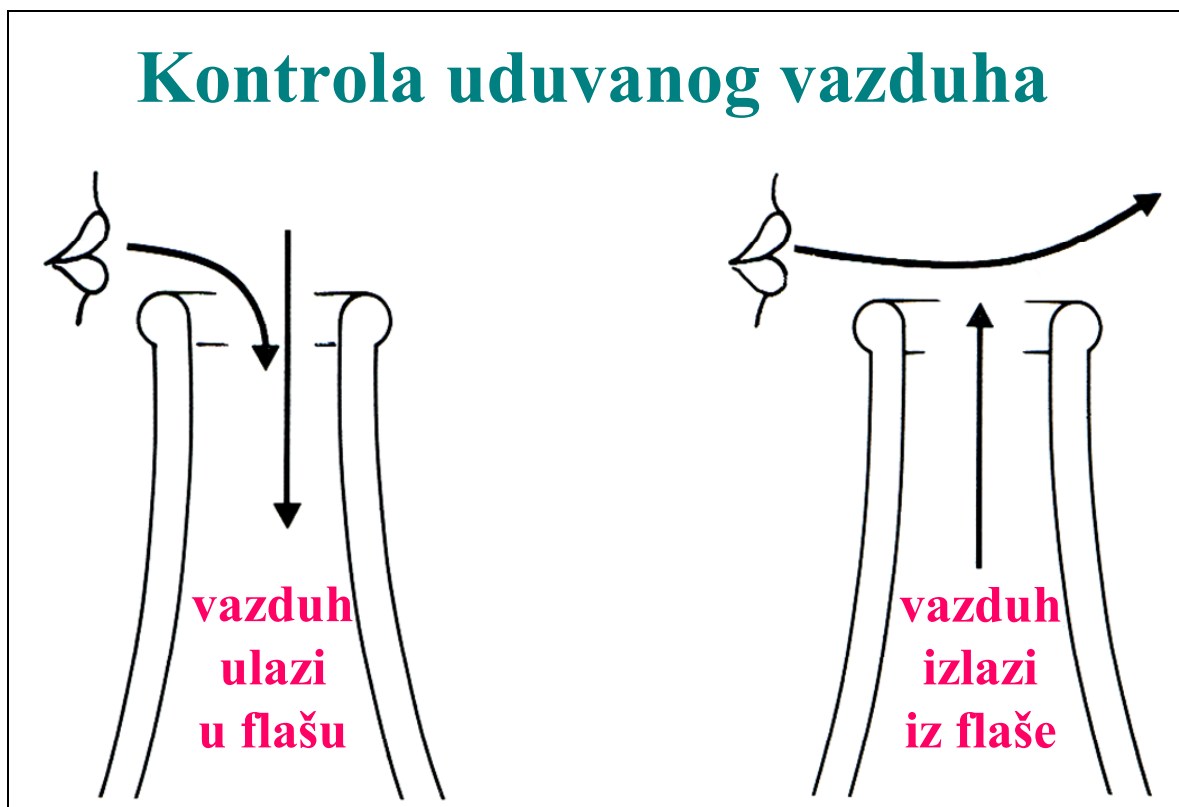
**Tuba** ima konusnu cev celom dužinom. Zbog problema sa 3 ventila često se dodaje i 4. koji služi za korekciju, za  $\frac{1}{4}$  stepena.

Postoji i tuba koja se nosi obmotana oko tela svirača – suzafon.

### 3.2.9 VAZDUŠNI JEZIČAK

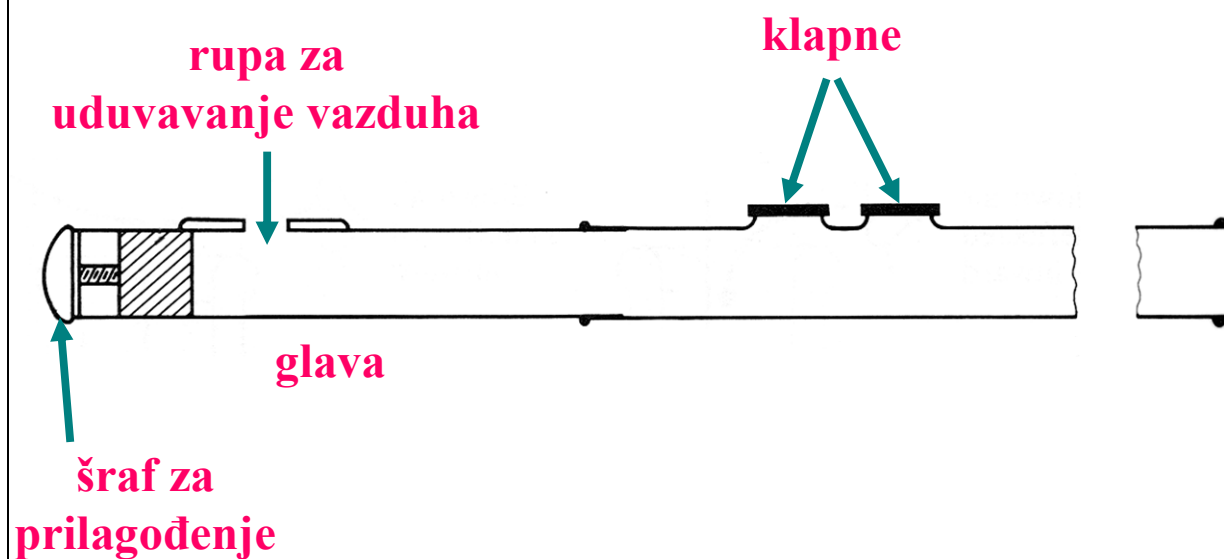
Kod instrumenata sa vazdušnim jezičkom ton se obrazuje udarom vazdušnog mlaza iz pluća u tzv. usnu instrumenta. Usna je oštra ivica na ulazu cevi. Vazdušni mlaz se na usni cepa na dve struje: jedna ulazi u cev, a druga izlazi iz cevi. Vazdušna struja koja ulazi u cev stalno treperi oko usana i menja vazdušni stub usled kompresije i depresije. Reflektovani talas igra ulogu trske. Učestanost tog oscilovanja zavisi od dužine vazdušnog stuba u cevi.

Kod ovih instrumenata uduvani vazduh ne kontroliše povratna sprega vazduha u cevi. Kontroliše ga pravac protoka vazduha prema stojećim talasima u cevi (vazdušni stub) [24].



Slika 3.2.9.1: Kontrola uduvanog vazduha

# Flauta

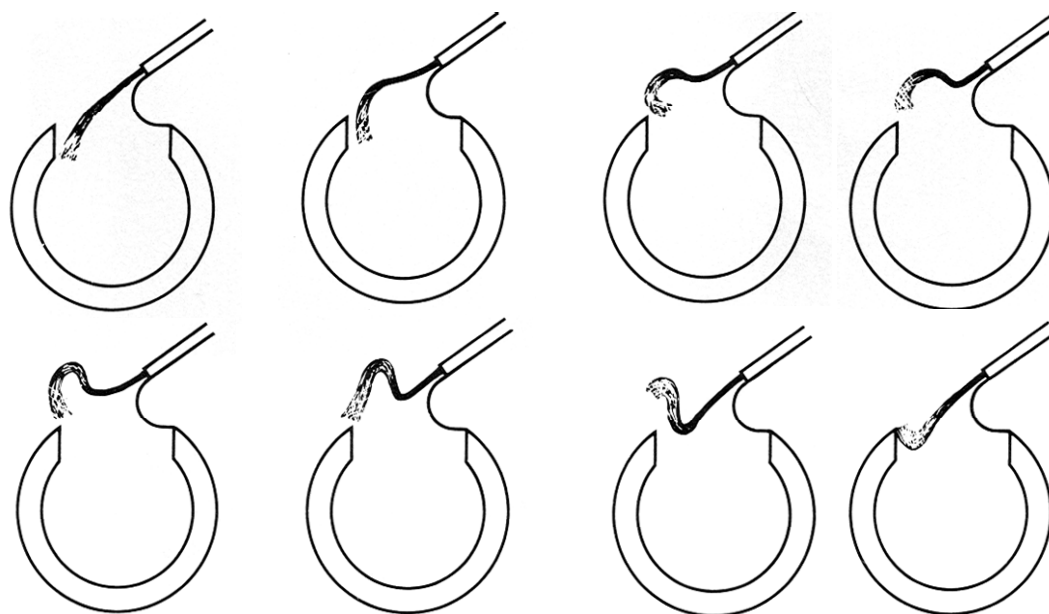


Slika 3.2.9.2: Šematski prikaz flaute



Slika 3.2.9.3: Flauta

## Oscilovanje vazdušnog stuba na rupi za uduvavanje vazduha kod flaute



**Kad je pritisak minimalan, vazduh ulazi najviše (suprotno od ostalih duvačkih instrumenata).**

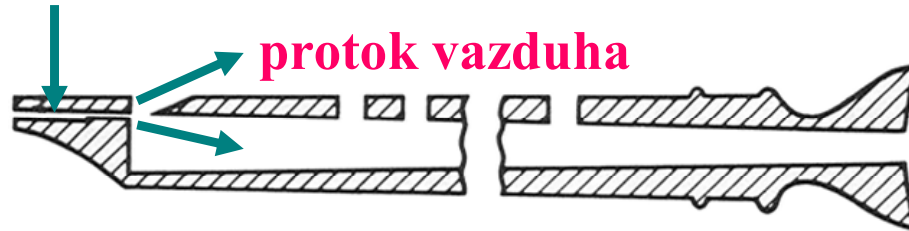
*Slika 3.2.9.4: Oscilovanje vazduha na usniku flaute*

**Flauta** može biti vertikalna i poprečna. Postoje razne flaute i među folklornim muzičkim instrumentima, a postoji i flauta koja se nalazi u stalnoj postavci simfonijskog orkestra. Flauta se ponaša kao cev otvorena na oba kraja. Ima sve harmonike u svom spektru [22']. Nije tako lako proizvesti ton na flauti. To se postiže dugotrajnim vežbanjem. Na flauti može da se svira u svim tonalitetima, zahvaljujući mehanizmu koji kontroliše klapne na rupicama. Osmislio ga je Teobald Bem u 19. veku.

Kod **blok flauta** je sličan sistem stvaranja tona kao kod flaute. Blok flauta je vrsta vertikalne flaute. Ima vazdušni jezičak. Uduvava se vazduh u cev i cepa se na dva mlaza: jedan koji ulazi u cev i drugi koji struji pored cevi. Takav se instrument ponaša kao cev otvorena sa dva kraja, pošto vazduh slobodno struji. Zahvaljujući tome ima sve harmonike u spektru [134'].

## Blok - flauta

ulazni vazduh



Slika 3.2.9.5: Šematski prikaz blok - flaute

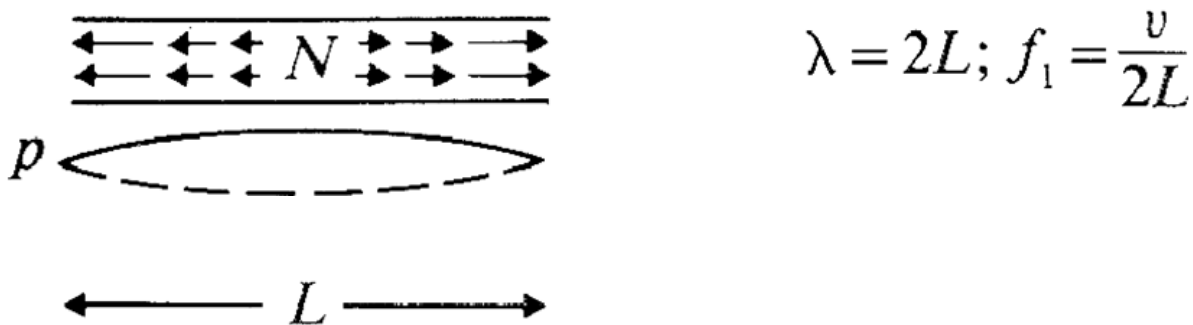


Slika 3.2.9.6: Blok - flauta

### 3.2.10 DUVAČKI INSTRUMENTI SA CEVI OTVORENOM NA OBA KRAJA

Flauta i blok flauta su primeri cevi otvorene sa oba kraja jer se na oba kraja instrumenta nalaze otvori kroz koje vazduh može slobodno da se kreće. U tom slučaju **na oba kraja cevi stojeći talas mora imati trbuh**.

Prvi stepen oscilacija cevi otvorene na oba kraja daje frekvenciju osnovnog harmonika.



Slika 3.2.10.1: Oscilovanje vazduha u cevi otvorenoj sa oba kraja – 1. stepen

Dužina cevi jednaka je  $\frac{1}{2}$  talasne dužine  $\lambda$ :

$$L = \lambda/2 \quad \rightarrow \quad \lambda = 2L$$

To je isto kao za žice.

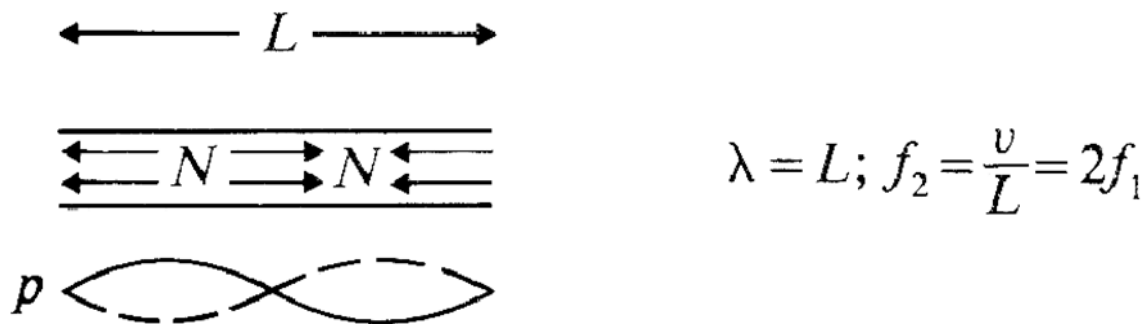
Frekvenciju ovog stepena vibracije možemo naći preko opšteg izraza:

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_1 = v / \lambda = v / 2L$$

Brzina prostiranja talasa u cevi je jednaka brzini prostiranja zvuka. To je znatno jednostavnije nego kod žica.

Frekvencija pojedinih stepena vibracije cevi otvorene na oba kraja zavisi samo od dužine cevi i temperature vazduha [31'].





Slika 3.2.10.2: Oscilovanje vazduha u cevi otvorenoj sa oba kraja – 2. stepen

Drugi stepen vibracija je sledeći najjednostavniji oblik oscilovanja stojećeg talasa u cevi otvorenoj na oba kraja. Ovaj stepen vibracije daje prvi viši harmonik, odnosno, drugi harmonik u frekvencijskom spektru.

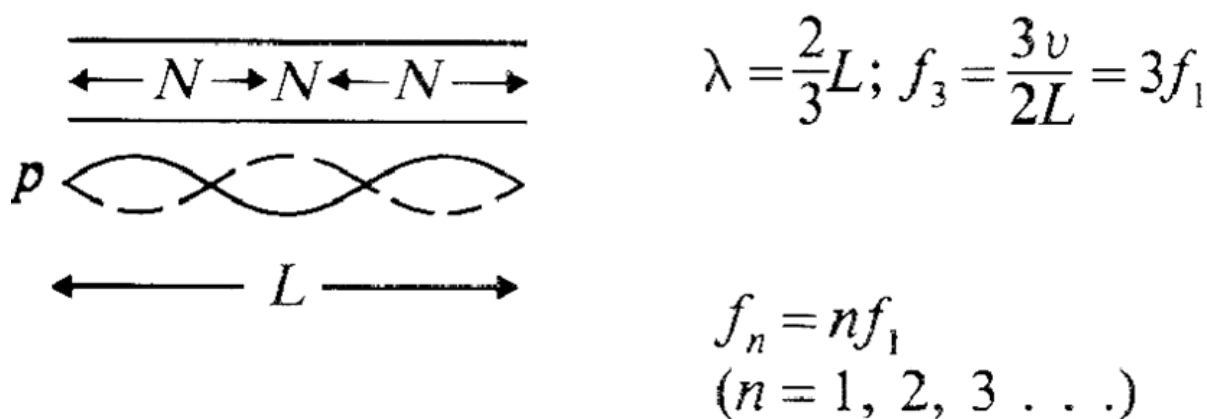
Dužina cevi je sada jednaka talasnoj dužini  $\lambda$ .

Frekvencija drugog stepena vibracije je:

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_2 = v / \lambda = v / L$$

To je dvostruko veća frekvencija od frekvencije prvog stepena oscilovanja.

$$f_2 = 2 \cdot f_1$$



Slika 3.2.10.3: Oscilovanje vazduha u cevi otvorenoj sa oba kraja – n - ti stepen

Kod trećeg stepena oscilovanja frekvencija je trostruko veća nego kod prvog stepena. Odatle se može izvući zaključak da je frekvencija svakog sledećeg harmonika jednaka celobrojnom umnošku frekvencije osnovnog harmonika.

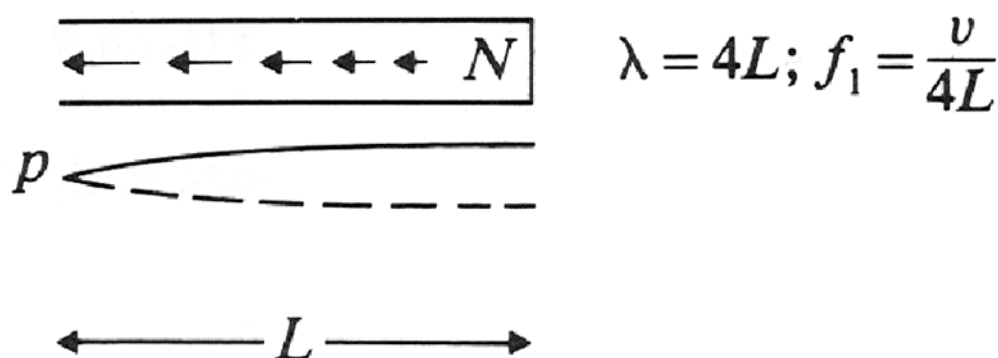
$$f_3 = 3 \cdot f_1 \quad \dots\dots\dots$$

$$f_n = n \cdot f_1$$

### 3.2.11 DUVAČKI INSTRUMENTI SA CEVI ZATVORENOM NA JEDNOM KRAJU

Truba i klarinet su primeri cevi zatvorene na jednom kraju jer u oba slučaja usne svirača sprečavaju vazduh da se slobodno kreće na jednom kraju cevi. Pošto je vazduh vazdušnog stuba na otvorenom kraju relativno slobodan da se kreće, a ograničen je na drugom kraju, **stojeći talas će imati trbuh na otvorenom kraju i čvor na zatvorenom kraju cevi.**

Prvi stepen oscilacija cevi zatvorene na jednom kraju daje frekvenciju osnovnog harmonika.



Slika 3.2.11.1: Oscilovanje vazduha u cevi zavorenoj na jednom kraju – 1. stepen

Dužina cevi jednaka je  $\frac{1}{4}$  talasne dužine  $\lambda$ :

$$L = \lambda/4 \quad \rightarrow \quad \lambda = 4L$$

Frekvenciju ovog stepena vibracije možemo naći preko opšteg izraza:

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_1 = v / \lambda = v / 4L$$

Drugi stepen vibracija je sledeći najjednostavniji oblik oscilovanja stojećeg talasa u cevi zatvorenoj na jednom kraju. Ovaj stepen vibracije daje prvi viši harmonik, odnosno, drugi harmonik u frekvencijskom spektru.

Dužina cevi je sada jednaka  $\frac{3}{4}$  talasne dužine  $\lambda$ .

Frekvencija drugog stepena vibracije je:

$$L = \frac{3}{4} \lambda \quad \rightarrow \quad \lambda = 4L/3$$

$$f = v / \lambda \quad \rightarrow \quad f_2 = v / \lambda = v / 4L/3 = 3v/4L = 3f_1$$

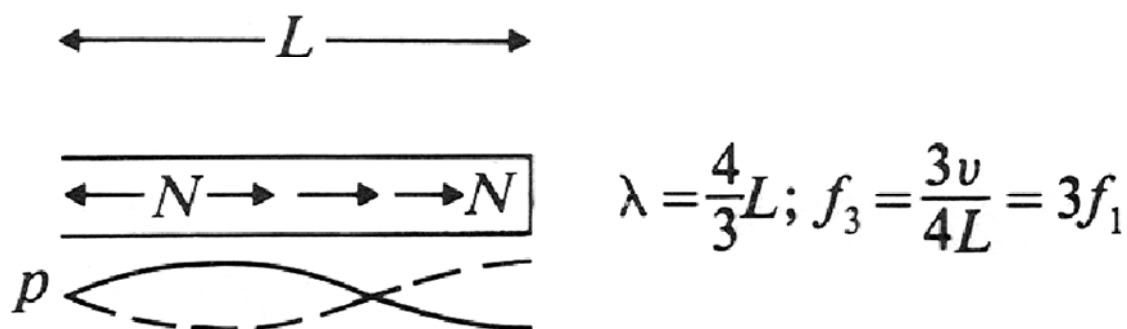
To je trostruko veća frekvencija od frekvencije prvog stepena oscilovanja.

$$f_3 = 3 \cdot f_1$$

Ovo je frekvencija 3. harmonika.

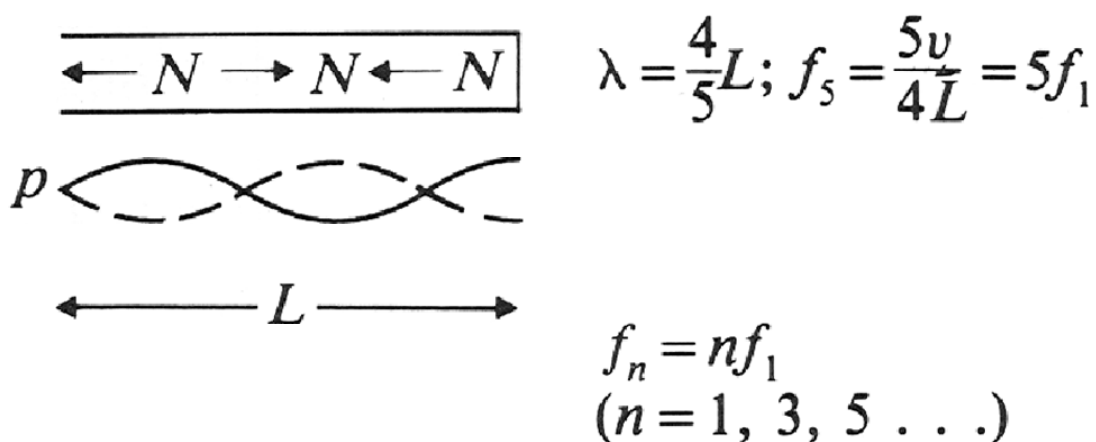
Ispostavlja se da nije moguće dobiti parne harmonike u cevi cilindričnog oblika zatvorenoj na jednom kraju.

Ako cev ima konusan poprečni presek ili ima zvono na kraju cilindrične cevi (kao truba), onda frekvencijski spektar ima sve harmonike, i parne i neparne. Kao da je cev otvorena na oba kraja.



Slika 3.2.11.2: Oscilovanje vazduha u cevi zavorenoj na jednom kraju – 3. stepen

Kod trećeg stepena oscilovanja frekvencija je petostruko veća nego kod prvog stepena. Odatle se može izvući zaključak da frekvencijski spektar cevi zatvorene na jednom kraju ima samo neparne harmonike.



Slika 3.2.11.3: Oscilovanje vazduha u cevi zavorenoj na jednom kraju – n - ti stepen

### 3.2.12 EFEKAT KRAJEVA CEVI

Sve što je rečeno o cevi otvorenoj na oba kraja i cevi zatvorenoj na jednom kraju je u osnovi tačno. Postoji još korekcija koja mora da se izvrši kada se prave duvački muzički instrumenti, da bi zvučali kako treba. U suprotnom će zvučati previše nisko.

Kod cevi sa jednim zatvorenim krajem na tom zatvorenom kraju ne postoji problem. Tu dolazi do čvrste refleksije o zid instrumenta.

Problem postoji kod otvorenog kraja cevi. Kod otvorenog kraja vazduh se ne reflektuje tako striktno odmah nazad u cev. Stojeći talas zapravo prvo malo zađe u spoljni vazduh pre nego što se reflektuje. To cev čini dužu u akustičkom smislu nego što je njena stvarna dužina. Ovaj efekat kraja iznosi 61 % širine unutrašnjeg poluprečnika cevi i mora se dodati jedanput na dužinu  $L$  za cevi zatvorene na jednom kraju i dvaput na dužinu  $L$  za cevi zatvorene na oba kraja.

### 3.2.13 PROMENA VISINE TONA DUVAČKIH INSTRUMENATA

Promenljive koje mogu da utiču na frekvenciju oscilovanja stojećeg talasa u cevi pa, samim tim i na visinu tona, su: stepen oscilovanja, brzina zvuka u vazduhu i dužina cevi [24']. To važi i za cevi otvorene na oba kraja i za cevi zatvorene na jednom kraju. Bilo bi teško, a možda i nemoguće menjati visinu tona na instrumentu promenom brzine zvuka. Zato se ograničavamo da visinu menjamo promenom stepena vibracije i promenom dužine cevi instrumenta.

Neki muzički instrumenti imaju cev fiksne dužine. Na primer: bjugel (duvački instrument iz vojnih i paradnih orkestara). Svirač može da menja visinu tona samo načinom na koji uduvava vazduh u cev i time menja stepen oscilovanja. Zato se ovim instrumentom ne mogu odsvirati svi tonovi dijatonske lestvice, već samo tonovi osnovnog trozvuka C – E – G – C.

Da bi na muzičkom instrumentu mogli da se odsviraju svi tonovi dijatonske ili hromatske lestvice, dužina cevi mora biti potencijalno promenljiva.

Kod limenih duvačkih instrumenata postoje dva načina za promenu dužine cevi u praksi. Kod trombona se primenjuje klizajuća cev pomoću koje svirač može da menja dužinu same cevi. Postoji sedam položaja cevi kojima se ostvaruje šest mogućih polustepena između osnovnog i 2. harmonika (oktave i kvinte). To je najveći interval u alikvotnom nizu koji se dobija preduvavanjem tonova kod limenih duvačkih instrumenata. Pomoću tih šest polustepena moguće je dobiti tonove sve visine hromatske lestvice. Kod trube, francuske horne i tube hromatika se postiže ventilima. Postoje tri ventila za promenu visine tona: jedan produžava cev za polustepen, drugi za ceo stepen, a treći za stepen i po. Pomoću sva 3 je moguće dobiti istih onih šest polustepena između osnovnog i 2. harmonika (oktave i kvinte) alikvotnog niza, kao kod trombona [72].

Kod drvenih duvačkih instrumenata promena visine tona ostvaruje se otvaranjem i zatvaranjem rupica. Ako je rupica dovoljno velika, može definisati virtuelnu dužinu cevi instrumenta.

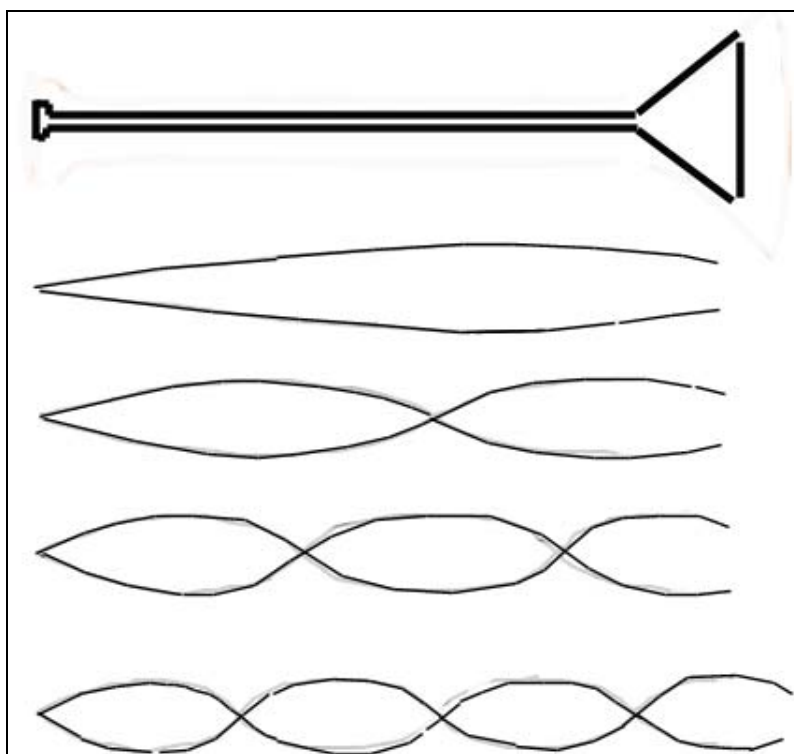
### 3.2.14 NEŠTO VIŠE O LIMENIM DUVAČKIM INSTRUMENTIMA

Truba, trombon i francuska horna su instrumenti sa cilindričnom cevi, zatvorenom na jednom kraju. Zbog toga bi se očekivalo da se na njima mogu proizvesti samo neparni harmonici. Međutim, usnik i zvono utiču na sadržaj frekvencijskog spektra.

Cilindrični deo cevi će reflektovati sve stepene oscilacija stojećih talasa u istu tačku, ka kraju cevi. Kad se doda zvono na kraj cevi, ono rasipa refleksije u različite tačke. Zvono skraćuje talasnu dužinu  $\lambda$  nižih harmonika i time povećava njihovu frekvenciju.

Usnik ima svoju osnovnu frekvenciju, svoj osnovni harmonik koji utiče na ton instrumenta i kada se prikači na instrument. Usnik smanjuje frekvencije visokih tonova i povećava njihovu istaknutost u spektru instrumenta.

Zvono i usnik zajedno doprinose činjenici da truba, trombon i francuska horna imaju sve harmonike u svom frekvencijskom spektru. Promene koje donose zvono i usnik pojačavaju akustičku povratnu spregu i omogućavaju sviraču da lakše odsvira odgovarajući ton alikvotnog niza. Frekvencije tonova koje se dobiju nisu u pravilnom odnosu i ne pripadaju dobrotemperovanoj lestvici, ali dobar svirač može da ih prilagodi slušajući ostale instrumente.



Slika 3.2.14.1: Stepene oscilacija u duvačkom instrumentu sa zvonom

### 3.2.15 NEŠTO VIŠE O DRVENIM DUVAČKIM INSTRUMENTIMA

Drveni duvački instrumenti nose to ime jer su originalno svi bili pravljeni od drveta ili trske. Danas se i dalje većina ovih instrumenata pravi od drveta, ali se flauta i saksofon prave od metala, a blok flauta od plastike.

Da bi se menjala visina tona kod ovih instrumenata otvaraju se i zatvaraju rupice. Otvorena rupica na cevi znači novu virtuelnu dužinu cevi. Tako se jedna cev fizičke dužine  $L$  može naštimovati na osam akustičkih dužina ukoliko se na njoj izbuši sedam rupica. Dužina virtuelne cevi će biti jednaka dužini do odgovarajuće rupice jer nju stojeći talas vidi kao kraj nove cevi.

Zamislimo da smo naštimovali rupice na tonove durske skale. Celu skalu možemo odsvirati ako pokrijemo sve rupice i odsviramo tonove otvarajući rupicu po rupicu (počevši od najbliže kraju cevi). Izbor pozicije za rupicu i njenog poprečnog preseka nije jednostavan. To ne znači samo proračunati dužinu cevi za željenu frekvenciju i probušiti rupicu na tom mestu. Veličina rupice ima presudnu ulogu. Ukoliko je prečnik rupice mali, stojeći talas neće ni primetiti rupicu i nastaviće da se prostire prema kraju cevi. Ukoliko rupica ima prečnik same cevi, onda će stojeći talas tu rupicu proglašiti za kraj cevi i reflektovaće se. Na mestu rupice se menja akustička impedansa kao i na kraju cevi, ako ona ima veliki prečnik [125]. Sa druge strane, tehnički je nepouzdan bušiti na instrumentu rupice koje sve imaju prečnik cevi jer se time smanjuje mehanička čvrstoća instrumenta. Ako su rupice prevelike, ne može se svirati na instrumentu jer se ni prstima ni klapnama ne mogu dovoljno dobro zatvoriti. Kod različitih drvenih duvačkih instrumenata su rupice različite veličine. Na fruli su male i mogu se zatvarati prstima. Sa povećanjem veličine instrumenta povećavaju se i rupice i njihovo međusobno rastojanje. Tako su kod saksofona rupice toliko velike da se otvaraju i zatvaraju složenim mehanizmom velikih klapni. Prsti čoveka ne bi mogli da se razapnu na tako velike razmake, a ni da zatvore tako velike rupe [37].

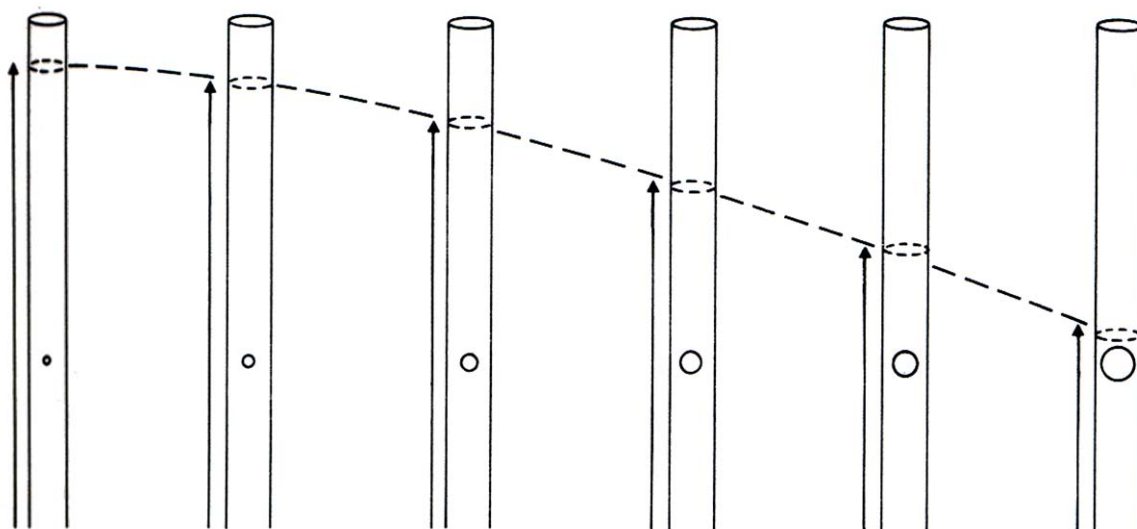
Ispostavlja se da je stojeći talas osetljiv i na zatvorenu rupicu. On primeti povećanje zapremine koje nastane u šupljini ispod poklopca (debljina drveta na mestu rupice). Cev dobije veću akustičku dužinu.

Postoji i efekat kraja za prvu otvorenu rupicu .

Čak i otvorene rupice koje se nalaze iza prve otvorene rupice imaju uticaja. Ako su raspoređene na ravnomerna rastojanja onda reflektuju više niske frekvencije od visokih. Prisustvo tih otvorenih rupica dovodi do efekta odsecanja frekvencija što instrumentu daje karakterističnu boju tona.

Zbog ovako složenog fizičkog mehanizma ne postoji jednačina po kojoj bi se moglo precizno definisati pozicija i veličina rupica na drvenim duvačkim instrumentima. Jednačine koje postoje su veoma složene i daju samo približne rezultate. Gradnja drvenih duvačkih instrumenata se zasniva na tradiciji, na iskustvima stečenim kroz istoriju prakse, na mnogobrojnim uspesima i greškama [48].

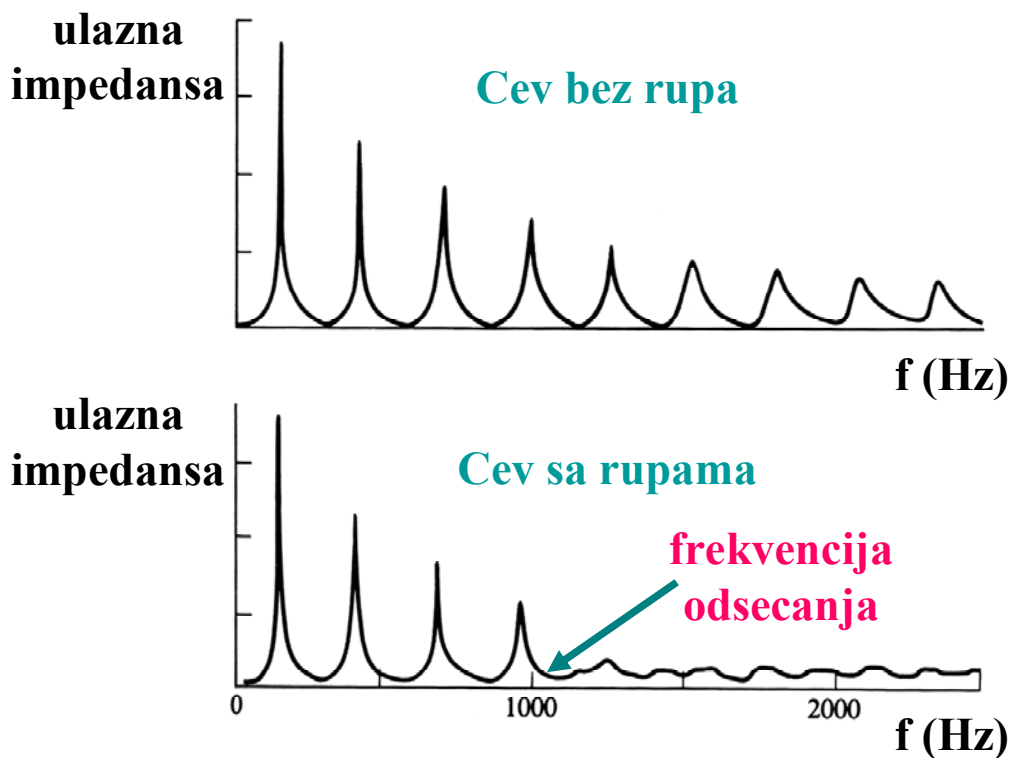
## Efektivna dužina cevi



Što je veća rupa na cevi, to je kraći vazdušni stub u cevi.

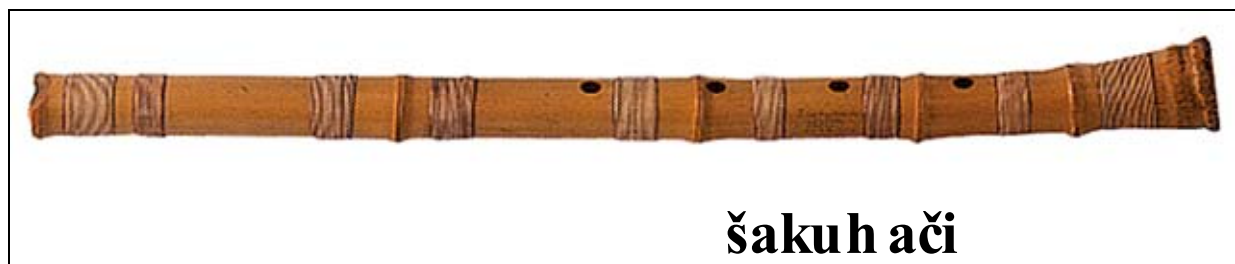
Slika 3.2.15.1: Efektivna dužina cevi

## Frekvencijski spektar cevi



Slika 3.2.15.2: Frekvencijski spektar

### 3.2.16 NEKI FOLKLORNI INSTRUMENTI SA VAZDUŠNIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.16.1: Dvojnice, okarina i šakuhači*

**Dvojnice** su folklorni instrument srpskog naroda. Imaju dve frule koje mogu da se sviraju odvojeno. Ovaj muzički instrument potiče još iz 13. veka.

**Šakuhači** je japanska vertikalna flauta.

**Okarina** je instrument na kome su izbušene rupice tako da se svira i levom i desnom rukom.

**Nosna flauta** ima otvore za vazduh na oba kraja. Postoje 3 rupice u sredini za prste. Svirač duva jednom nozdrvom. Drugu nozdrvu zatvori prstom.



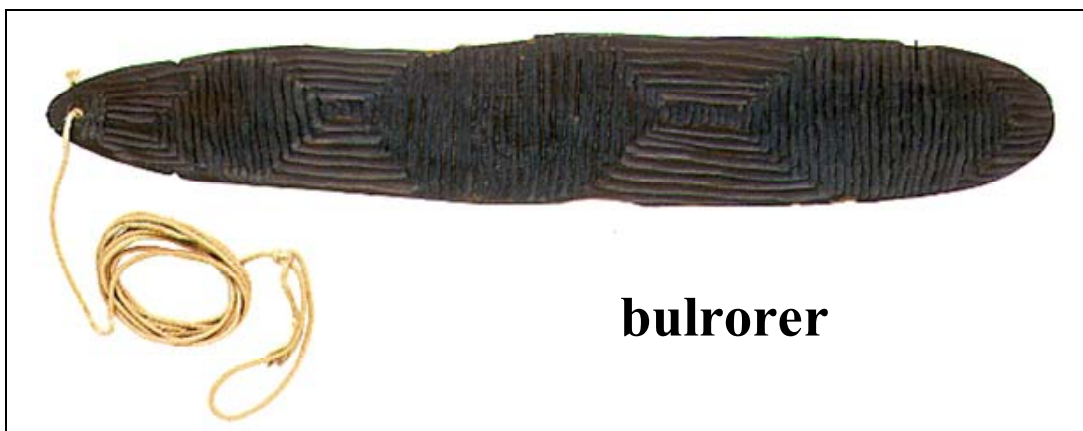
**nosna flauta  
(Fidži)**



**Panova frula**



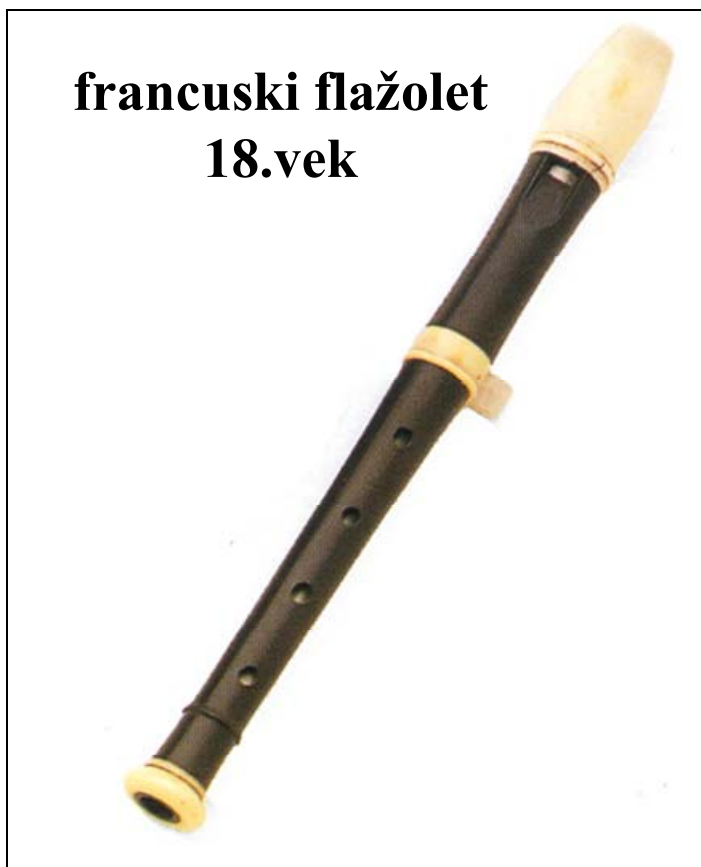
**bulrorer**



*Slika 3.2.16.2: Nosna flauta, Panova frula i bulrorer*

**Panova frula** ima cevi potpuno zatvorene na jednom kraju.  
**Bulrorer** se vrti kao laso i proizvodi zavijajući zvuk.

### 3.2.17 NEKI RANI INSTRUMENTI SA VAZDUŠNIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.17.1: flažolet i flauta koja svira samo u 1 tonalitetu*

**Flažoleti** su grupa instrumenata koji se sužavaju od otvora za usta na dole.

### 3.2.18 INSTRUMENTI SA VAZDUŠNIM JEZIČKOM U SIMFONIJSKOM ORKESTRU



*Slika 3.2.18.1: Pikolo*

**Pikolo** je mala flauta. U frekvencijskom spektru pikola pojavljuje se dopunski formant na oko 3000 Hz i doprinosi veoma jasnom tonu boje vokala 'I'.

### 3.2.19 METALNI JEZIČAK

Kod muzičkih instrumenata sa metalnim jezičkom koji nemaju cevi, dužina i debljina jezička određuju visinu tona. To su: harmonijum, harmonika, regal. Instrumenti koji imaju cevi su: orgulje (neke vrste cevi) i usne orgulje.

### 3.2.20 NEKI FOLKLORNI INSTRUMENTI SA METALNIM JEZIČKOM



*Slika 3.2.20.1: Harmonika*

Kod **harmonike** se pritiskanjem dirki i dugmića propušta vazduh iz meha do metalnih jezičaka. Postoje: klavirska harmonika, harmonika sa dugmadima, bandoneon i usna harmonika.

**Usna harmonika** ima dva niza slobodnih jezičaka koji daju zvuk. Svirač uduvava ili isisava vazduh kroz instrument. Nastala je tek u 20. veku, na principu starih azijskih usnih orgulja.



*Slika 3.2.20.2: Usna harmonika*

**Harmonijum** ima klavijaturu, pedale kojima se uduvava vazduh, registre kao kod harmonike.



*Slika 3.2.20.3: Harmonijum*

**Regal** ima klavijaturu i dva meha sa vazduhom iz kojih se naizmenično ispumpava vazduh.



*Slika 3.2.20.4: Regal*

### 3.2.21 NEKI RANI INSTRUMENTI SA VAZDUŠNIM I METALNIM JEZIČKOM

U ovu grupu spadaju orgulje. **Orgulje** su instrument koji ima meh za skladištenje vazduha, mehanizam za uduvavanje vazduha u cevi, same cevi, nožne pedale kao dodatni deo za sviranje, registre, nekoliko klavijatura. Postoji nekoliko tehničkih rešenja za orgulje: mehaničke, elektromehaničke, električne, elektronske. Pod klasičnim orguljama se smatraju prve dve grupe jer kod njih postoje prave cevi kroz koje struji vazduh i proizvodi zvuk [24']. Orgulje imaju mnogo različitih vrsta cevi jer su kao muzički instrument osmišljene da se na njima može dočarati zvuk celog orkestra. To znači da postoje cevi koje oponašaju zvuk gudačkih instrumenata, drvenih duvačkih instrumenata, limenih duvačkih instrumenata, a postoje i osnovne cevi orgulja koje daju osnovnu boju samog instrumanta (principal cevi). Sve te cevi su različite po konstrukciji. Postoje: otvorene cevi bez trske, otvorene cevi sa trskom, zatvorene drvene cevi. Cevi mogu biti cilindričnog i konusnog oblika, kao i cevi odgovarajućih duvačkih instrumenata. Mogu biti kružnog i četvrtastog poprečnog preseka. Cevi bez trske definišu orgulje kao muzički duvački instrument sa vazdušnom trskom, a cevi sa trskom definišu orgulje kao muzički duvački instrument sa metalnom trskom [31'].



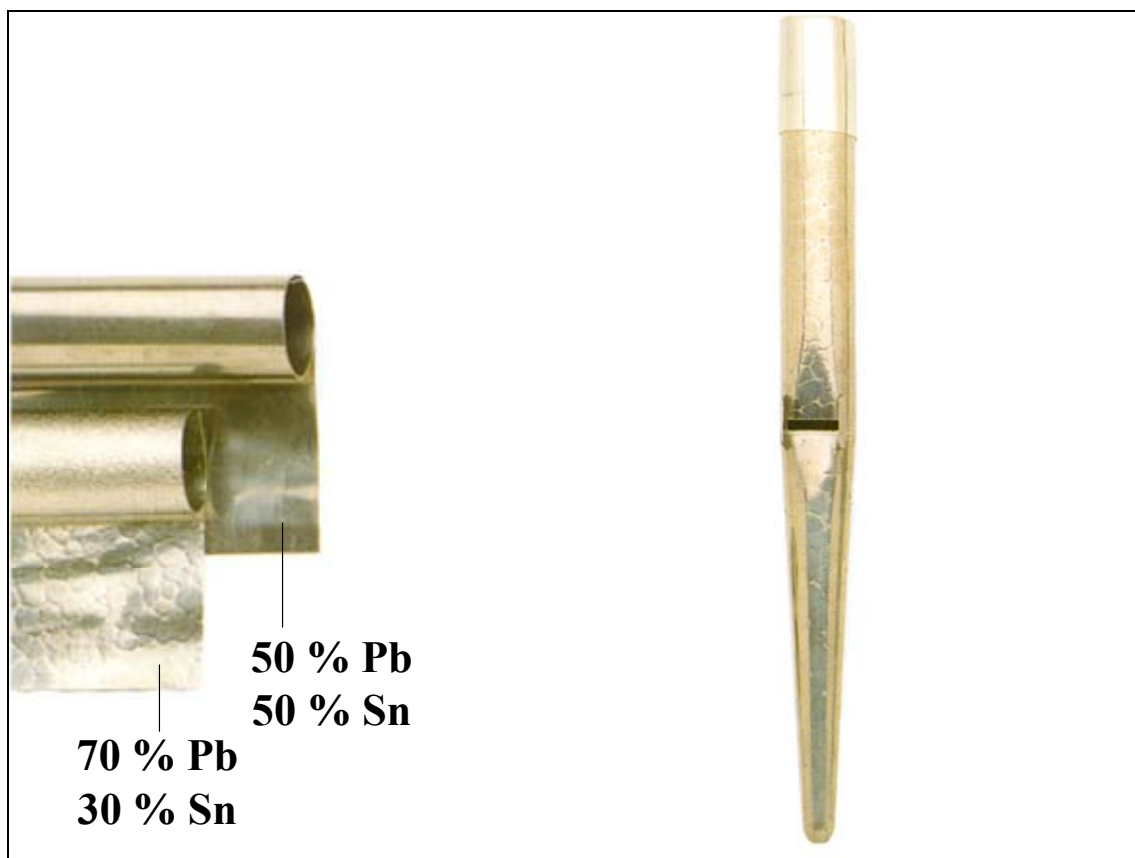
orgulje



*Slika 3.2.21.1: Orgulje*



Slika 3.2.21.2: Šematski prikaz otvorene cevi orgulja, bez trske



Slika 3.2.21.3: Otvorena cev orgulja, bez trske

## Zatvorena drvena cev



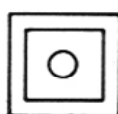
- Kada je cev zatvorena treba da je samo upola dugačka da bi proizvela ton iste frekvencije:

$$f_1 = v/2L$$

otvorena

$$f_1 = v/4L$$

zatvorena



- Otvorena cev ima sve harmonike.
- Zatvorena cev (na jednom kraju) ima samo neparne harmonike.
- Ove cevi su obično kvadratnog poprečnog preseka i zvuk im je sličan flauti.

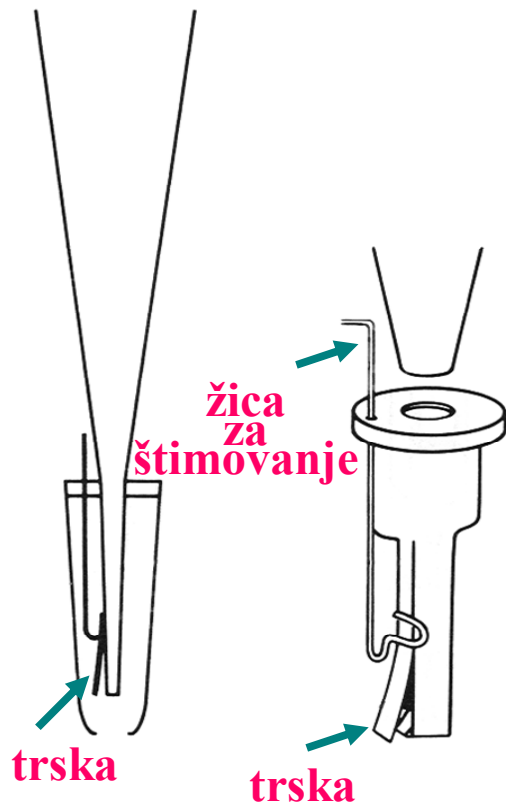
Slika 3.2.21.4: Šematski prikaz zatvorene cevi orgulja, bez trske



Slika 3.2.21.5: Zatvorena cev orgulja, bez trske

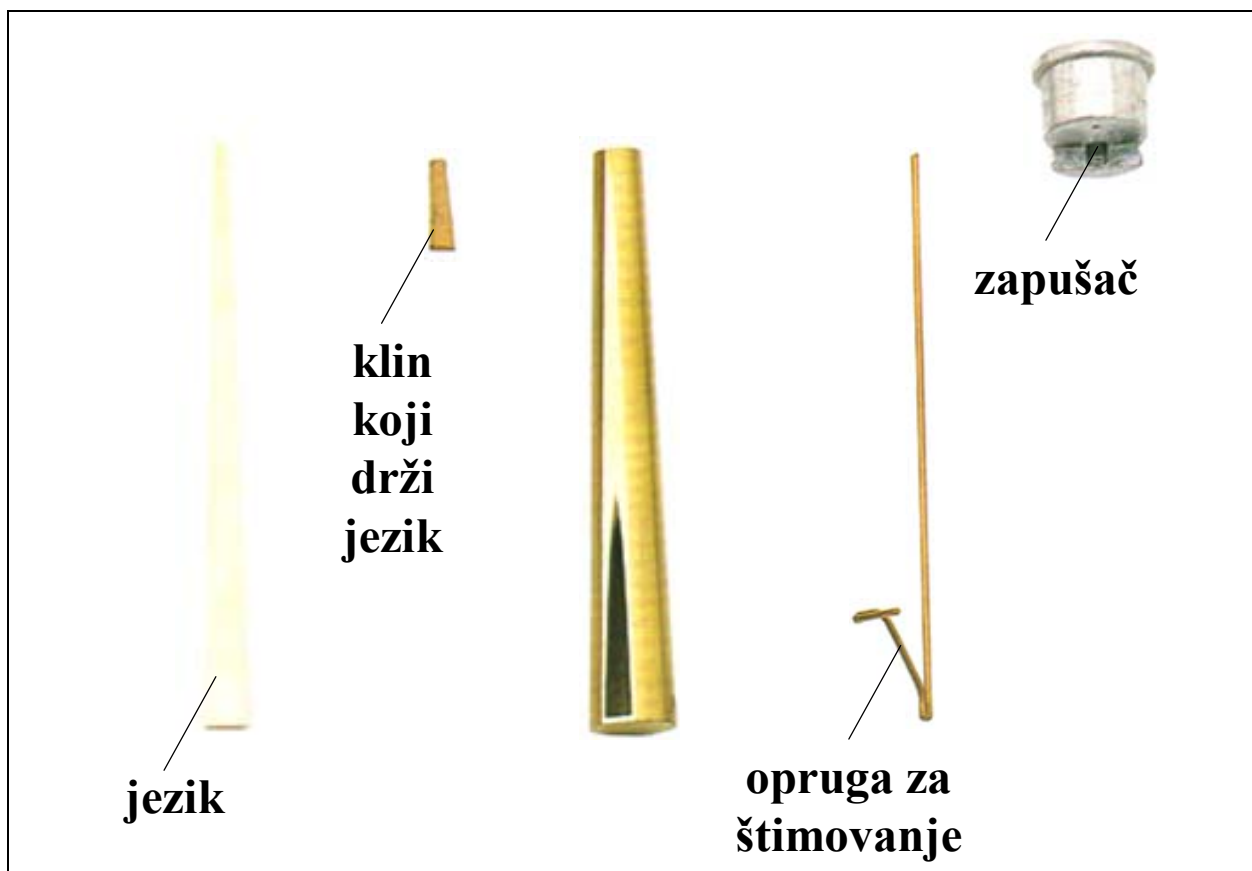


## Cev sa trskom



- Trska oblikuje vazduh koji prolazi ka rezonatoru.
- Trska je metalna i može biti štimovana.
- Cev je naštimovana isto kao trska.
- Ove cevi su bogate harmonicima.
- Ako je cev cilindrična, javiće se samo neparni harmonici.
- Ako je cev konusna, javiće se svi harmonici.

Slika 3.2.21.6: Šematski prikaz cevi orgulja, sa trskom



Slika 3.2.21.7: Delovi cevi orgulja



Slika 3.2.21.8: Cevi orgulja za različite instrumente

Postoje 3 familije cevi: **dijapazon** (otvorene cilindrične cevi većeg prečnika). **flautaste** (imaju najmanje harmonika, prave se različitih oblika i veličina, od drveta ili metala. Mogu biti otvorene i zatvorene.), **žičaste** (imaju najviše harmonika, cilindrične su i zatvorene).

Flautaste cevi daju zvuk muzičkih instrumenata flaute i pikola.

Žičaste cevi se zovu tako jer daju zvuk žičanih instrumenata epohe u kojoj su orgulje nastale. Tako imamo cevi za viol, violu di bardone, ...

Principal cevi su osnovne cevi orgulja. One se nalaze u spoljnjem krugu cevi i daju osnovnu boju tona orgulja [24].

Cevi orgulja su najčešće podeljene sa leve i desne strane prema nekoj zakonitosti. Na primer: zbog simetrije se na italijanskim orguljama sve cevi osnovnih tonova ( c, d, e, f, g, a, h) nalaze sa leve strane svirača, a cevi povišenih tonova ( cis, dis, fis, gis, ais) sa desne strane.



*Slika 3.2.21.9: Familije cevi orgulja*

### 3.3 UDARAČKI MUZIČKI INSTRUMENTI

Udarački muzički instrumenti su najstariji instrumenti, pored ljudskog glasa. Postoji mnogo instrumenata i mnogo načina da se oni klasifikuju.

Jedna od podela udaračkih muzičkih instrumenata klasifikuje te instrumente prema načinu na koji se dobija zvuk na njima:

- idiofoni (ksilofon, marimba, metalofon, vibrafon, čelesta, zvona, činele, gong)
- membranofoni (bubnjevi)
- kordofoni (klavir, klavikord)
- aerofoni (zviždaljke, sirene)

Kordofoni udarački muzički instrumenti su analizirani u poglavlju o instrumentima sa žicama. U ovom poglavlju ćemo analizirati idiofone, lamelofone i membranofone muzičke instrumente.

Postoji podela udaračkih muzičkih instrumenata prema definisanosti visine tona:

- muzički instrumenti sa definisanom visinom tona
- muzički instrumenti sa nedefinisanom visinom tona

Ova podela je značajna jer instrumente sa definisanom visinom tona kompozitor može uključiti u muzičku deonicu kao harmonsku celinu. Instrumenti sa nedefinisanom visinom tona se najčešće uključuju u kompoziciju kao ritam sekcija.

Udarački instrumenti koriste nekoliko vrsta vibracija:

- žice
- pločice
- membrane
- tanjire
- vazdušne stubove ili vazdušne prostore

Vibracije na žicama, pločicama, membranama i tanjirima su mehaničke.

Vibracije vazdušnih stubova i vazdušnih prostora su pneumatske. Pri tome se ovde misli na vibraciju vazdušnih stubova proizvedenih udarom.

Žice i vazdušni stubovi imaju harmonike. Pločice, membrane i tanjiri, u prirodnom oscilovanju, nemaju harmonike.

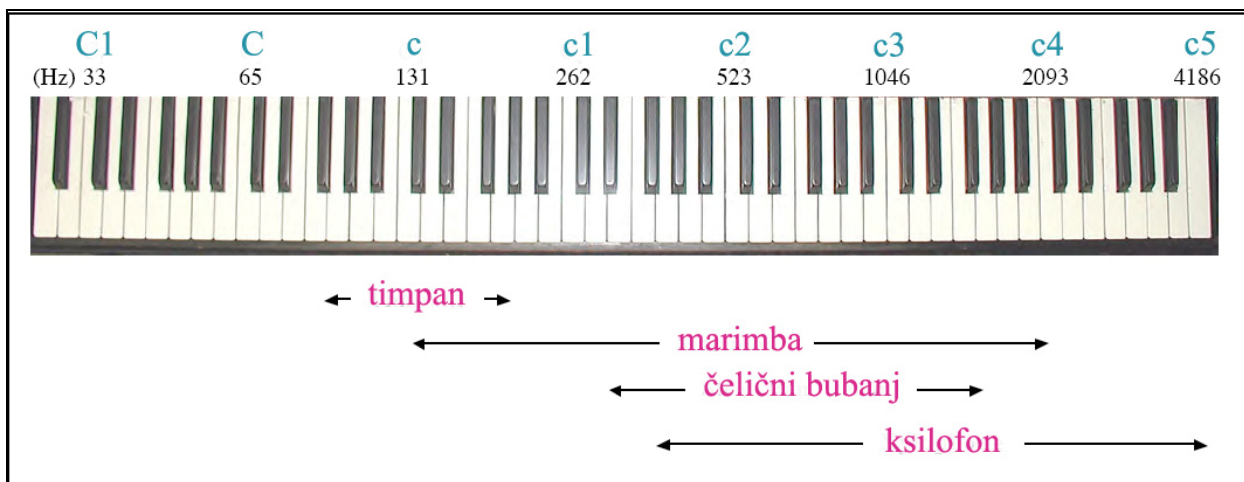
### 3.4 IDIOFONI

Postoje muzički instrumenti na kojima se zvuk proizvodi udaranjem i lupkanjem po cevima ili pločicama. Taj zvuk se razlikuje od zvuka koji se dobija na kordofonim i aerofonim instrumentima zato što ovde viši harmonici nisu u harmoničnom odnosu. Ovakvi muzički instrumenti se zovu idiofoni.

Skoro svi ovi muzički instrumenti koriste oscilovanje pločice slobodne na oba kraja. Pločice mogu da osciluju longitudinalno i transverzalno. Kod perkusija se skoro isključivo koriste transverzalne vibracije.

Frekvencija oscilovanja zavisi od dužine pločice i elastičnosti materijala od kojeg je napravljena. Kod transverzalnih vibracija frekvencija oscilovanja zavisi i od debljine pločice. Frekvencijski odnos transverzalnih vibracija je: 1: 2.76 : 5.40 : 8.90...Ovo je sve osim harmonično i ne odgovara ni jednom muzičkom intervalu [48].

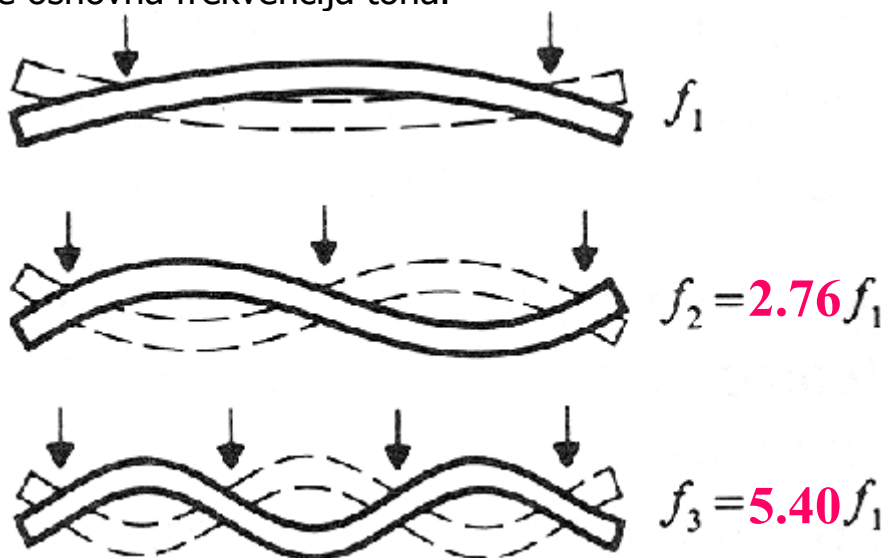
Opseg nekoliko udaračkih instrumenata je prikazan na klavijaturi:



Slika 3.4.1: Opseg nekih udaračkih instrumenata

### 3.4.1 PLOČICE ILI CEVI SA DVA SLOBODNA KRAJA

Kod pločice koja je slobodna na oba kraja stojeći talas se formira kada pločicu udarimo na kraju (kao kod marimbe). Da bi se vibracije ostvarile u ovom slučaju, oba kraja pločice moraju biti trbusi stojećeg talasa. Najjednostavniji način da pločica vibrira sa ovim ograničenjem je da ima trbuhe stojećeg talasa na oba kraja i na sredini. Čvorovi se pojavljuju na  $0.224L$  i na  $0.776L$ . Tako nastaje osnovna frekvencija tona.



Slika 3.4.1.1: Oscilovanje pločice, slobodne na oba kraja

Drugi stepen vibracija ima 4 trbuha. Čvorovi su raspoređeni u centar, na 0.132L i na 0.868L. Ovaj stepen vibracija je drugi harmonik. Matematički proračun frekvencije harmonika je dosta složen. Frekvencija  $n$  – tog stepena oscilovanja je:

$$f_n = \frac{\pi v K}{8L^2} m^2 \quad (3.4.1.1)$$

gde je:  $v$  – brzina prostiranja zvuka u materijalu od kojeg je načinjena pločica  
 $L$  – dužina pločice

$m$  – konstanta

$m = 3.011$	, za	$n = 1$
$m = 5$	, za	$n = 2$
$m = 7$	, za	$n = 3, \dots, (2n + 1)$

$K$  – debljina pločice/ 3.46 , za pravougaone pločice

$K = \frac{\sqrt{R_u^2 + R_s^2}}{2}$  , za cevi

materijal	brzina zvuka (m/s)
bor	3300
lim	3500
bakar	3650
hrast	3850
gvožđe	4500
staklo	5000
aluminijum	5100
čelik	5250

Slika 3.4.1.2: Brzina zvuka u različitim materijalnim sredinama

### 3.4.2 PLOČICE ILI CEVI SA JEDNIM SLOBODNIM KRAJEM

Kada je pločica slobodna na jednom kraju, njen drugi kraj je uvek pričvršćen. Ovakva pločica osciluje tako što je pričvršćeni kraj uvek čvor stojećeg talasa, a slobodni kraj je uvek trbuh stojećeg talasa. Osnovni stepen oscilovanja je kada postoji samo jedan čvor i samo jedan trbuh. To je osnovni stepen i daje osnovni harmonik.

Drugi stepen oscilovanja je sa 2 čvora i 2 trbuha. To je drugi harmonik. Frekvencija viših harmonika se proračunava na isti način kao kod pločica slobodnih na oba kraja, osim što konstanta  $m$  ima drugačije vrednosti.

$$f_n = \frac{\pi v K}{8L^2} m^2 \quad (3.4.1.2)$$

gde je:

$v$  – brzina prostiranja zvuka u materijalu od kojeg je načinjena pločica

$L$  – dužina pločice

$m$  – konstanta

$m = 1.194$  za  $n = 1$

$m = 2.988$  za  $n = 2$

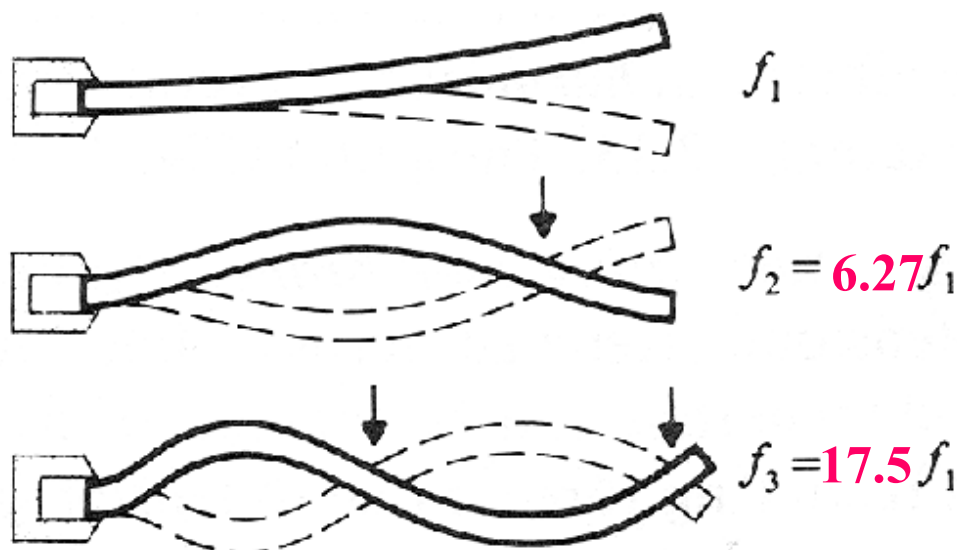
$m = 5$  za  $n = 3, \dots, (2n - 1)$

$K$  – debljina pločice/ 3.46

za pravougaone pločice

$$K = \frac{\sqrt{R_u^2 + R_s^2}}{2}$$

za cevi



Slika 3.4.2.1: Oscilovanje pločice, fiksirane na jednom kraju

Iz navedenih izraza se vidi da su frekvencije viših harmonika srazmerne  $m^2$  i da, samim tim, nisu celobrojni umnošci osnovnog harmonika.

### 3.4.3 HARMONIZOVANJE VIŠIH HARMONIKA

Od idiofonih instrumenata najčešće se koriste oni koji imaju pločice slobodne na oba kraja. Kod njih su frekvencije viših harmonika u odnosu: 2.76 za drugi harmonik i 5.40 za treći. To definitivno nisu celobrojni umnošci frekvencije

osnovnog tona. Pokušaćemo da proračunamo u kakvom su harmonijskom odnosu zaista.

U poglavlju o muzičkim lestvicama pomenuto je da je u dobrotemperovanoj skali odnos drugog harmonika prema prvom 2:1, da oktava ima 12 polustepena, da je polustepen međusobni frekvencijski odnos od 1.05946 i da je  $(1.05946)^{12} = 2$ . Ovi međusobni frekvencijski odnosi mogu da se proračunaju i za tonove koji ne pripadaju jednoj oktavi.

Ako je:

$$\log (1.05946)^{12} = \log 2 \quad \rightarrow \quad 12 \log (1.05946) = \log 2 \quad \rightarrow$$

$$12 = \frac{\log 2}{\log(1.05946)}$$

Iz ovog izraza može da se izvede precizniji izraz za određivanje harmonijskog odnosa viših harmonika kod pločice slobodne na dva kraja:

$$\text{broj polustepena} = \frac{\log (\text{interval})}{\log(1.05946)}$$

Za pločicu koja transverzalno osciluje broj polustepena između prvog i drugog harmonika je:

$$\frac{\log (2.76)}{\log (1.05946)} = 17.6$$

Interval između prvog i trećeg harmonika je:

$$\frac{\log (5.40)}{\log (1.05946)} = 29.2$$

Ovi frekvencijski odnosi nisu oktava (12 polustepena), dve oktave (24 polustepena) ni tri oktave (36 polustepena). Predstavljaju neki drugi konsonantni odnos. 17 polustepena je 12 + 5 i to čini oktavu + kvartu. 19 polustepena je 12 + 7 (oktava + kvinta). 29 polustepena je 24 + 5 (2 oktave + kvarta). Ovo poslednje je približno odnosu za treći harmonik i ta mala razlika od 0.2 nije značajna jer se treći harmonik brzo prigušuje. Veći problem



predstavlja odstupanje za drugi harmonik od 0.6 polustepena jer drugi harmonik dugo traje. Ukoliko se ne izvrši korekcija harmoničnosti, visina tona ove pločice neće biti jasno definisana. A to znači da ceo muzički instrument neće imati jasno definisanu visinu tona. Zato se na pločicama ksilofona i marimbe izvodi mala modifikacija.

Centar pločice koji transverzalno osciluje ima trbuh za prvi stepen, a čvor za drugi stepen oscilovanja. Ako se malo izdubi pločica sa donje strane, postaće manje kruta i smanjiće se frekvencija osnovnog tona. Ali to ne utiče na drugi harmonik. Zato se pločica sa donje strane izdubljuje tako da se frekvencija osnovnog tona smanji na 1/4 frekvencije drugog harmonika kod marimbe, a kod ksilofona na 1/3 frekvencije drugog harmonika (izdubi se manje drveta).

To je praktično štimovanje instrumenta sa pločicama [72] .

Ova korekcija daje i marimbi i ksilofonu definisanu visinu tona, ali se boja tona ovih instrumenata značajno razlikuje jer je frekvencijska razlika između prva dva harmonika 2 oktave kod marimbe, a duodecima kod ksilofona .

#### 3.4.4 NEKI IDIOFONI SA PLOČICAMA SLOBODNIM NA OBA KRAJA

Među svim muzičkim instrumentima na svetu može se reći da su najbrojniji udarački instrumenti. Svaki narod na planeti ima neke svoje bubnjeve. Mnogi narodi imaju neku folklornu verziju ksilofona.



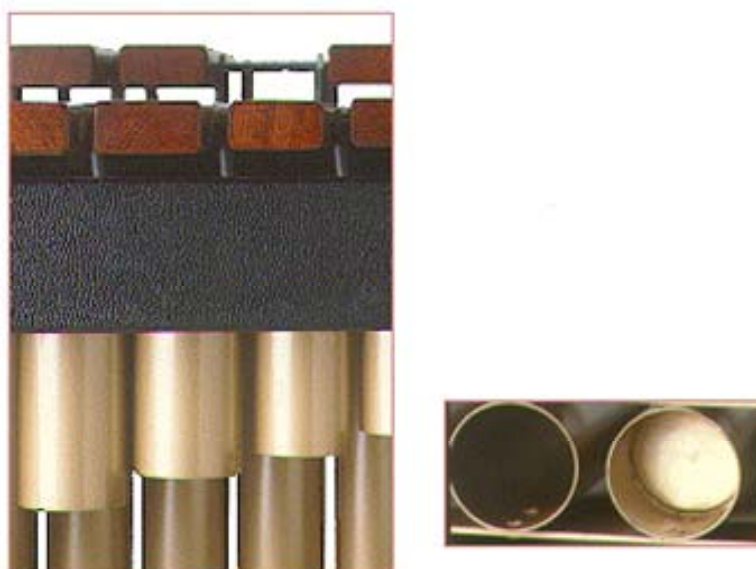
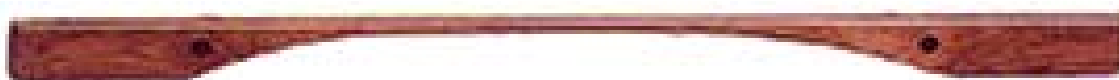
**ilimba  
( Zimbabwe )**

*Slika 3.4.4.1: Ilimba*

**Marimba** je jedan od tri najčešće korišćena idiofona instrumenta. Pločice se prave od ružinog drveta, širine 4.5 – 6.4 cm. Ispod svake pločice nalazi se cev naštimovana na osnovni ton. Tonski opseg instrumenta je 4.5 oktave. U pločicama u niskom registru je sa donje strane isečen luk. To dozvoljava štimovanje viših harmonika. Drugi harmonik je naštimovan za dve oktave više od osnovnog.

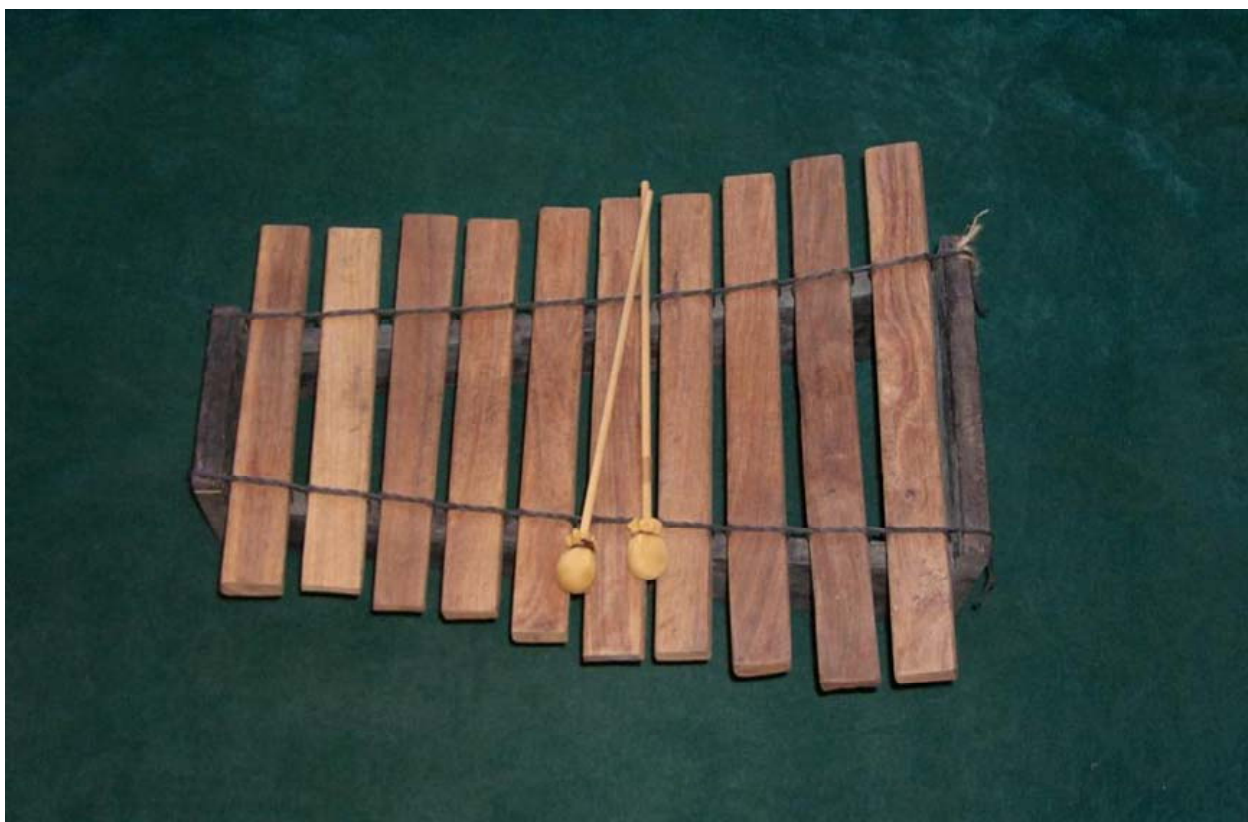


**marimba**

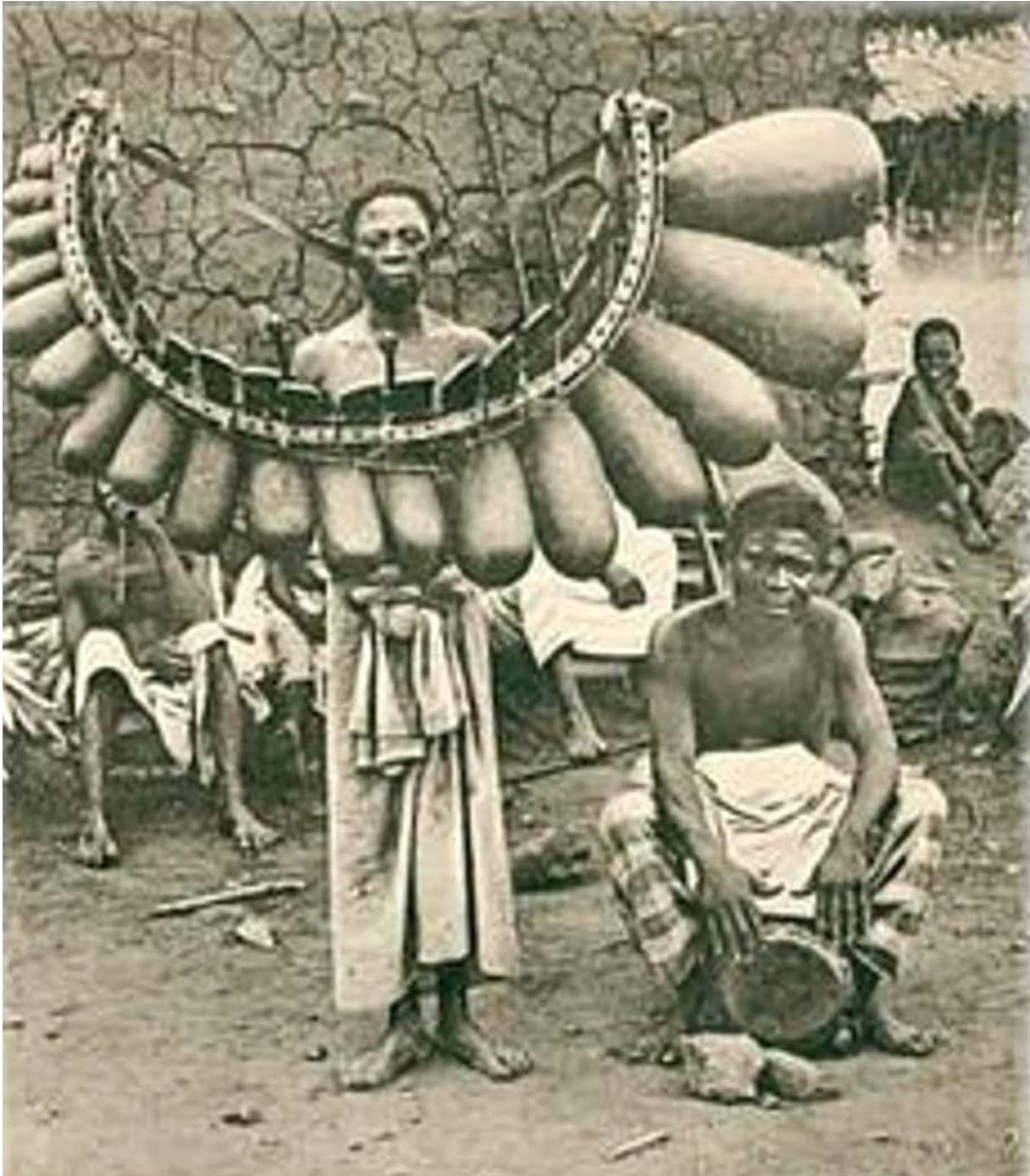


*Slika 3.4.4.2: Marimba*

Postoje marimbe različitih veličina i različitih tonskih opsega: sopran je najmanja i najviši joj je opseg, tenor, bariton i bas marimba. Postoje mnoge folklorne marimbe.



*Slika 3.4.4.3: Folklorni muzički instrumenti sa drvenim pločicama*



*Slika 3.4.4.4: Marimba u nekom afričkom plemenu*

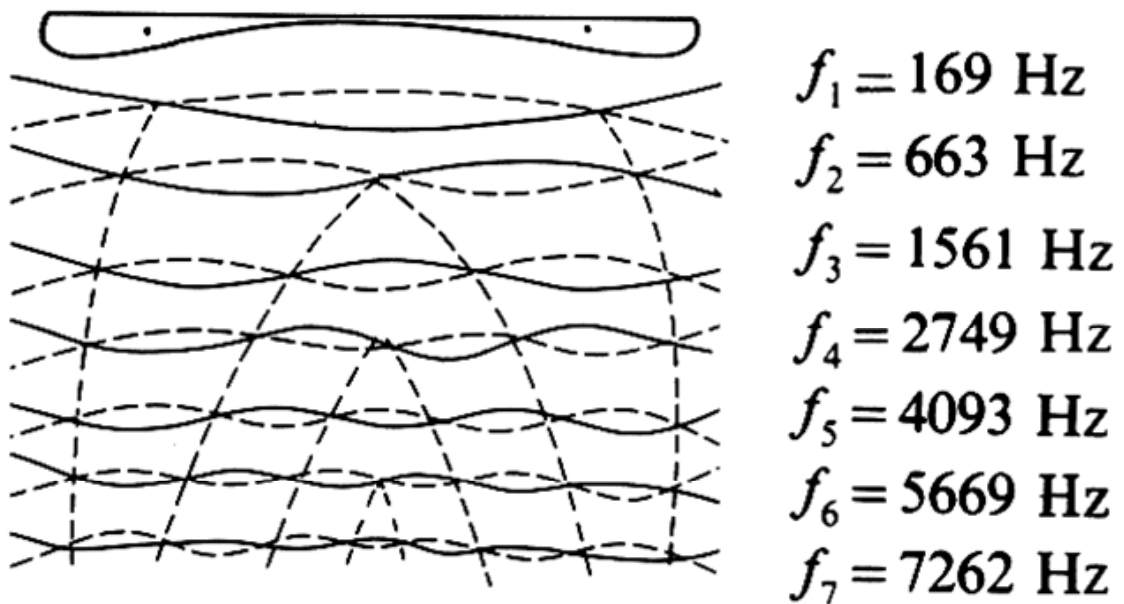
Na marimbi se svira palicama koje na vrhu štapića imaju lopticu napravljenu od mekih vlakana.

Rezonator marimbe su cilindrične cevi naštimentovane na osnovni ton. Cev je sa jedne strane zatvorena, a sa druge strane otvorena i rezonira kada je akustička dužina cevi  $\lambda/4$ .



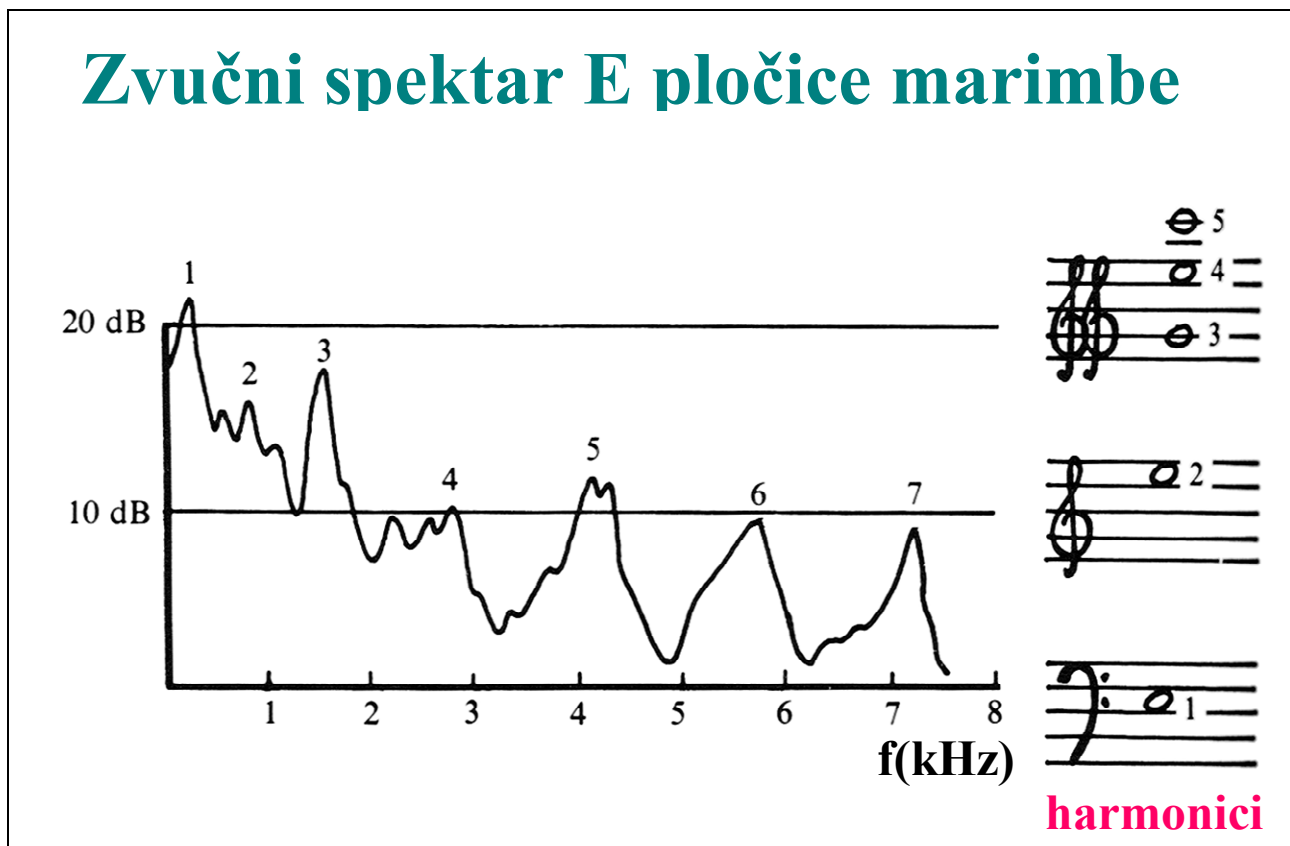
Slika 3.4.4.5: Palice za marimbu

## Oscilacije E pločice marimbe (226 Hz)



Slika 3.4.4.6: Oscilacije pločice marimbe

Svrha cevi je da pojača zvuk. To je u suprotnosti sa skraćanjem dužine trajanja tona. Dužina trajanja tona ružinog drveta na 60 dB u niskom registru (e) je 1.5 s sa i 3.2 s bez rezonatora. U gornjem registru (e<sup>3</sup>) dužina trajanja tona je 0.4 s sa i 0.5 s bez rezonatora.



Slika 3.4.4.7: Frekvencijski spektar oscilujuće pločice marimbe

**Ksilofon** je stariji od marimbe. Pločice ksilofona se prave od drveta kao kod marimbe. Sečene su u luk sa donje strane. Drugi harmonik je naštimovan za duodecimu više od osnovnog tona (frekvencijski odnos 3:1). Pošto su cevi zatvorene sa jedne strane, mogu da osciluju sa 3 puta većom frekvencijom od frekvencije osnovnog tona. Zato se duodecima čuje i u cevima. Ksilofon ima mnogo hrapaviji zvuk nego marimba, zbog ovog frekvencijskog odnosa i zbog jakih palica za sviranje.

Tonski opseg ksilofona je 3.5 oktave.



**ksilofon**

*Slika 3.4.4.8: Ksilofon*

Postoje mnoge varijante ksilofona u folkloru.



*Slika 3.4.4.9: Balo*

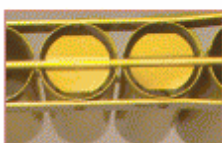
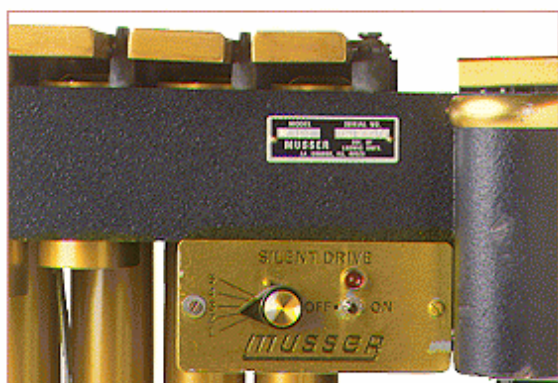
**Vibrafon** ima aluminijske pločice. Pločice su mnogo usečene i drugi harmonik ima 4 puta veću frekvenciju od osnovnog tona (kao kod marimbe). Metalne pločice rezoniraju mnogo duže od drvenih i svaka pločica vibrafona ima prigušivač. Dužina trajanja zvuka na 60 dB je 40 s bez rezonatora i 9 s sa potpuno otvorenom cevi (vibrafon ima zatvarače na cevima koji se mogu po potrebi otvoriti).

Tonski opseg vibrafona je 3 oktave.



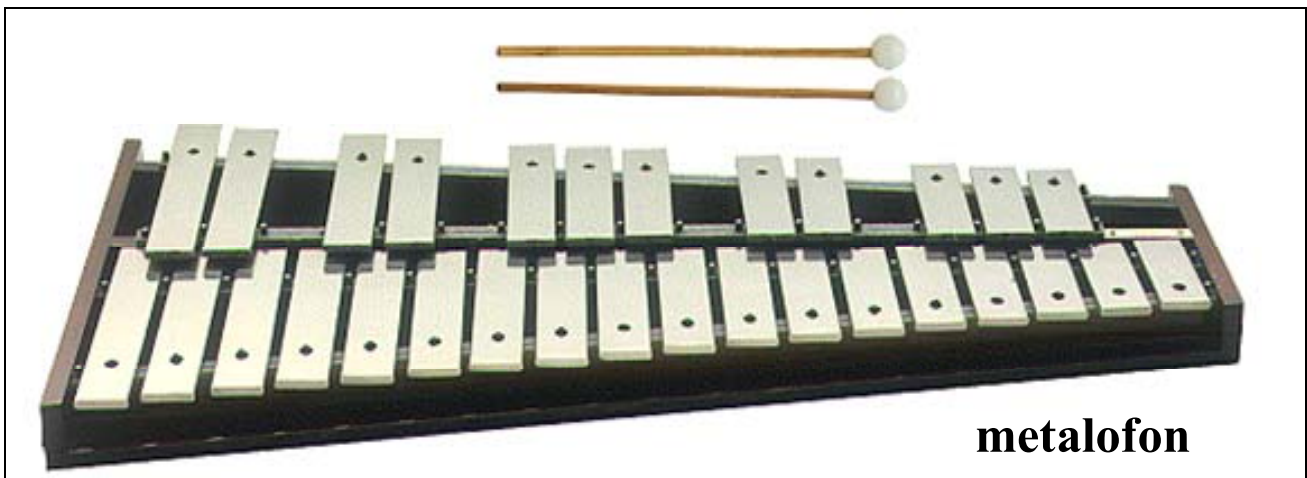


**vibrafon**



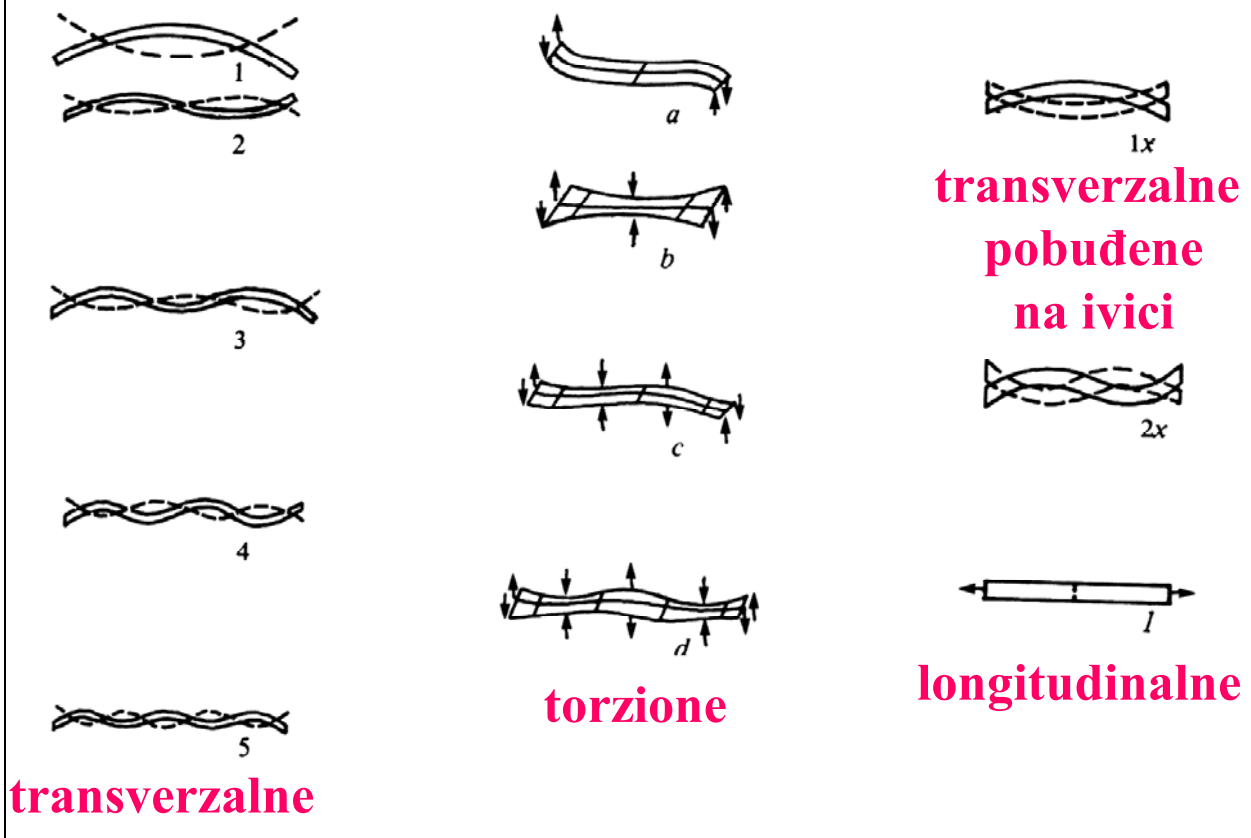
*Slika 3.4.4.10: Vibrafon*

**Metalofon** ima metalne pločice pravougaonog oblika, širine 2.5 – 3.2 cm, debljine 0.61 – 1 cm. Proizvodi svetao metalni zvuk. Nema harmonike. Tonski opseg je 3 oktave.



Slika 3.4.4.11: Metalofon

## Oscilacije pločice metalofona



Slika 3.4.4.12: Oscilacije pločice metalofona

### 3.4.5 KRUŽNI TANJIRI

Pored instrumenata sa pločicama u idiofone spadaju: činele, gong, tam-tam, zvona.

**Činele** su jedan od najstarijih muzičkih instrumenata. Korišćene su u religioznim obredima kod mnogih kultura.

Turske činele se koriste u orkestrima.

Kineske činele imaju podignute ivice.

Orkestarske činele su obično 40 – 55 cm u prečniku i napravljene su od bronze.

Najpuniji zvuk se dobija ako se činela udari na 1/3 od ivice.

Činele se udaraju:

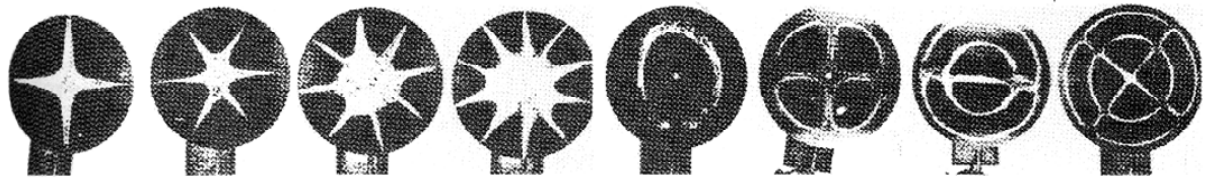
- mekom palicom
- drvenom palicom
- drugom činelom.



Slika 3.4.5.1: Činele

Postoje razne vrste činela. Koriste se u simfonijskom orkestru, u jazz – u, rock'n roll – u. Imaju različite nazive.

## Oscilacije kružnog tanjira

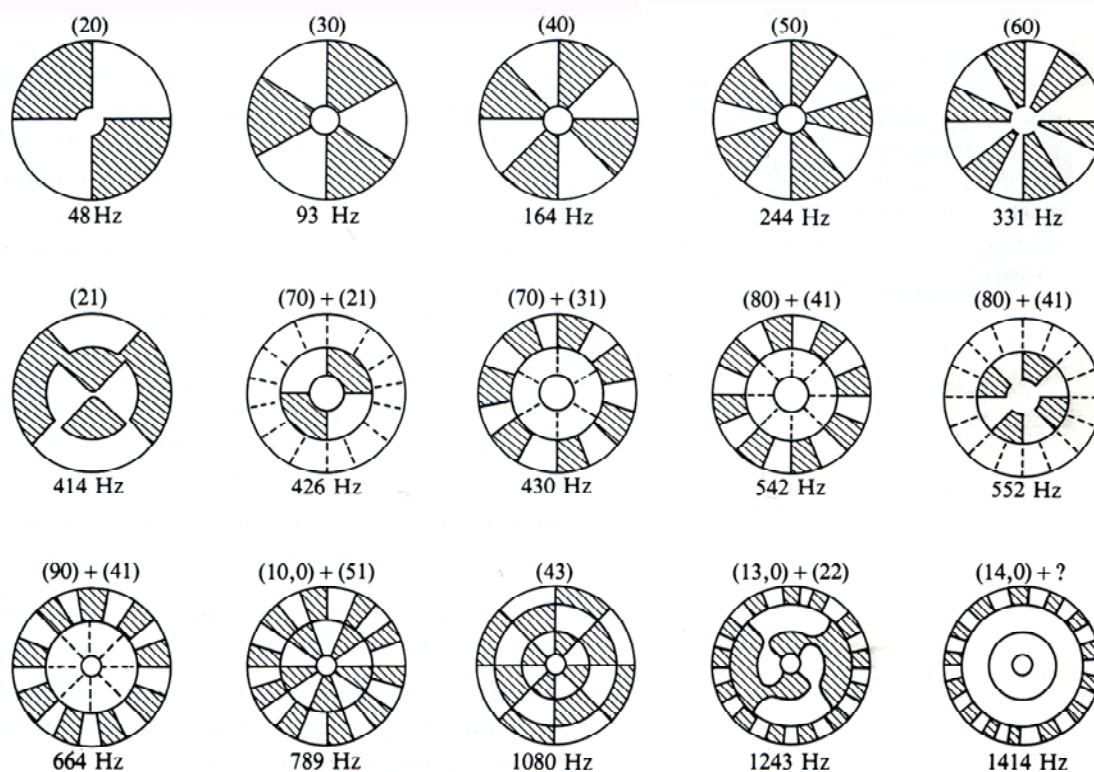


Prva četiri slučaja imaju linije simetrije.

Druga četiri slučaja imaju krugove simetrije.

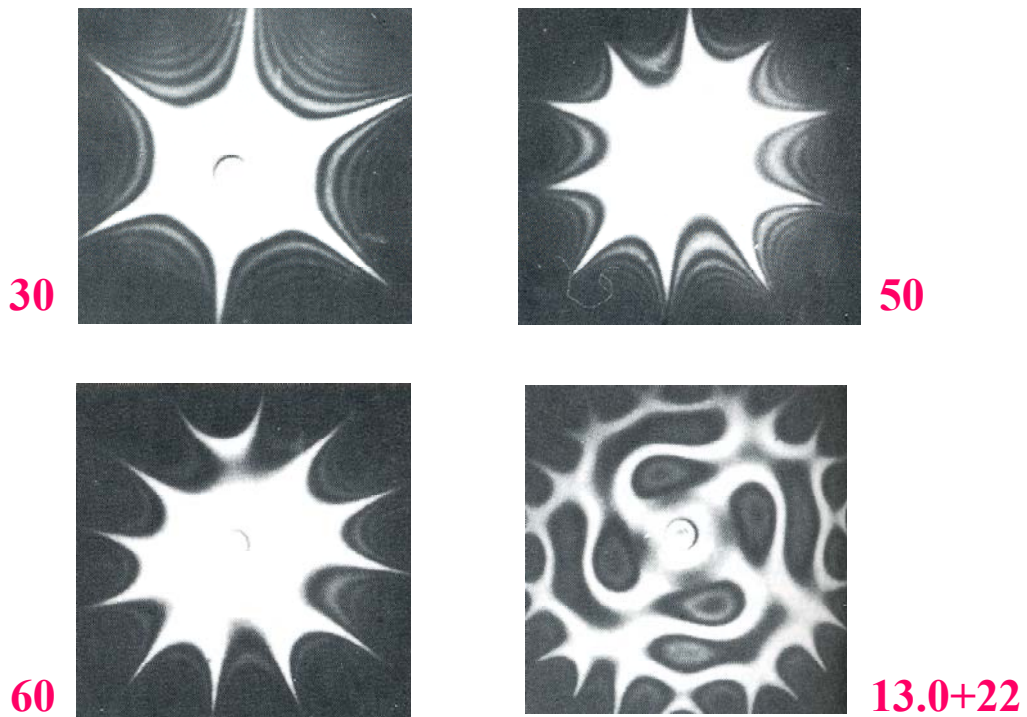
Slika 3.4.5.2: Oscilovanje kružnog tanjira

## Stepeni oscilovanja činele



Slika 3.4.5.3: Stepni oscilovanja činele

## Hologram 4. stepena oscilovanja



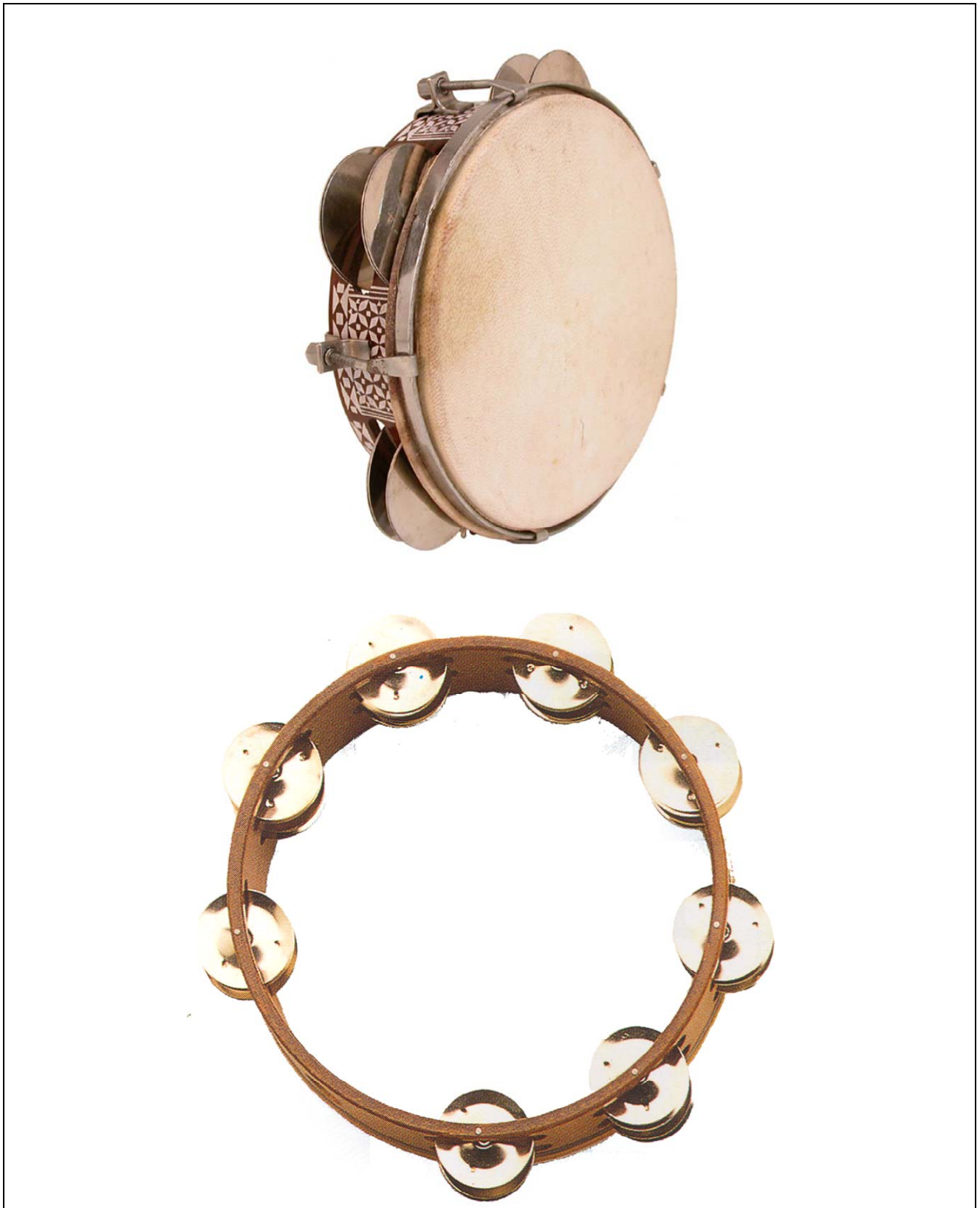
*Slika 3.4.5.4: Hologram 4 stepena oscilovanja činele*

**Daire** su muzički instrument sa malim činelama.



**daire**

*Slika 3.4.5.5: Daire*



*Slika 3.4.5.6: Daire različite konstrukcije*

Postoje mnoge folklorne činele.



**zili masa  
( Indija)**

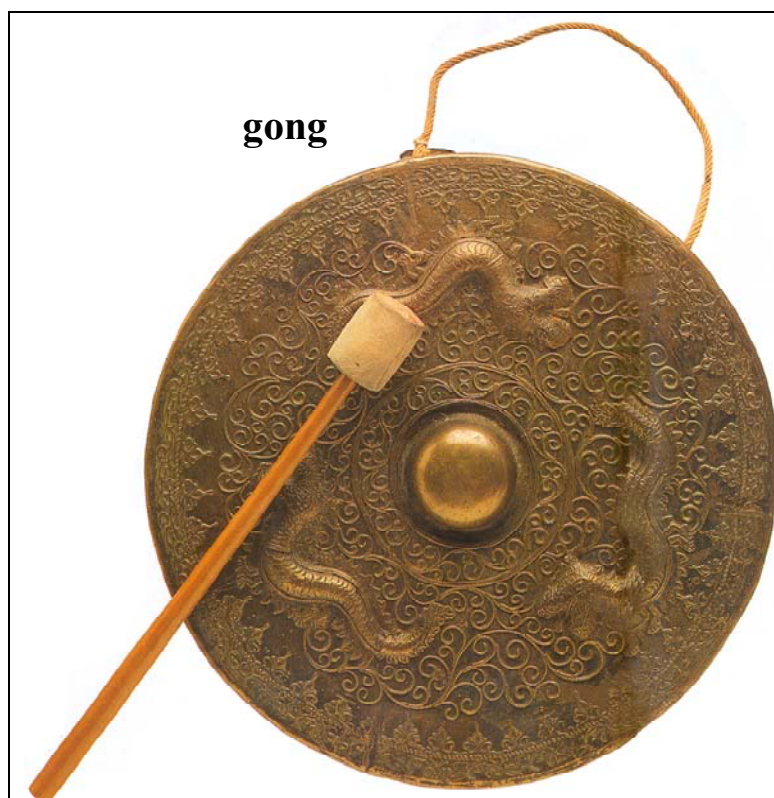
*Slika 3.4.5.7: Zili masa*

**Gong** je važan u orkestarskoj muzici. Obično se pravi od bronzе, sa dubokim obodom. Prečnik gonga je 0.5 – 1 m. Gong je naštimovan na određenu visinu tona.

Kada se udari u blizini centra, zvuk se razvija polako i dugotrajno.

Masivni gongovi su centralni deo svakog gamelan orkestra u Indoneziji.

Značajni su i gongovi koji se koriste u kineskim operskim orkestrima. Preko njih se prevlači palicom, posle udarca.

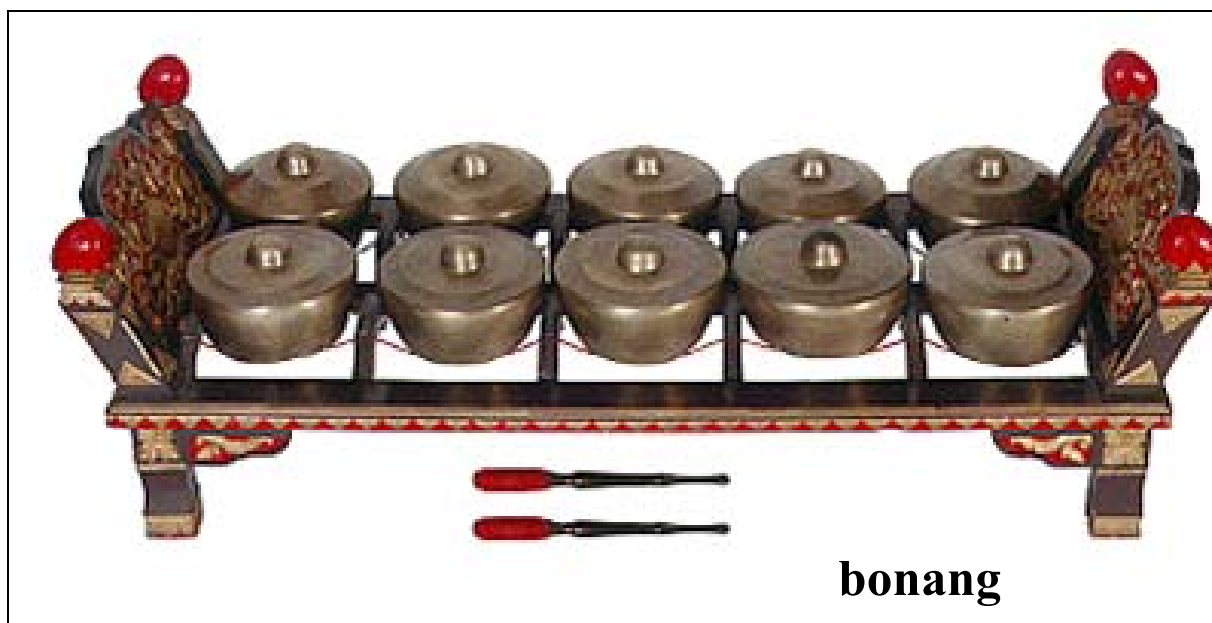


*Slika 3.4.5.8: Gong*

Gong ima visinu tona određenu, ako se udari u centar. Tako je naštimovan.



*Slika 3.4.5.9: Gongovi različite veličine*



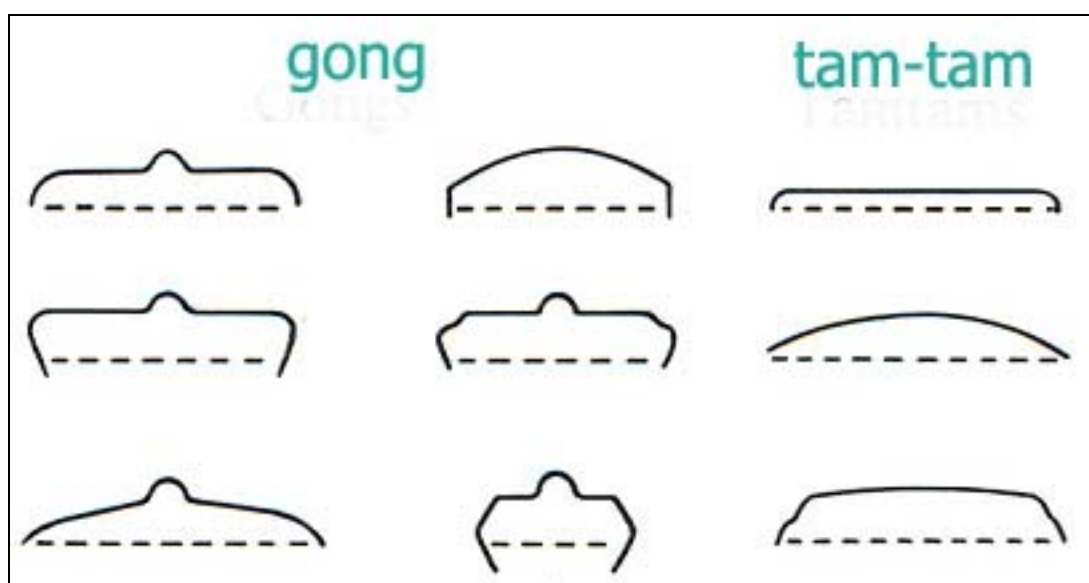
*Slika 3.4.5.10: Bonang*



**Tam–tam** je na prvi pogled sličan gongu, ali nema definisan zvuk. Zvuk tam– tama se razvija sporo, menja se od niskog ka visokom i ima nekoliko visokih frekvencija.



*Slika 3.4.5.11: Tam - tam*



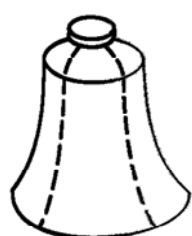
*Slika 3.4.5.12: Šematski prikaz gonga i tam - tama*

**Zvona** su deo svake kulture u istoriji. Postojala su na Bliskom Istoku još 1000 g.p.n.e. U Kini se pominju u dinastiji Šang ( 1600 g.p.n.e.). U zapadnoj kulturi zvona su se razvila u 17. veku, kad su ljudi otkrili kako da ih štимуju harmonično [76].

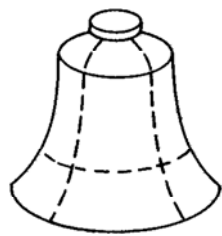
Princip oscilovanja zvona je veoma složen. Može da se posmatra ako se izdela na kružne i meridijan stepene vibracije. Neka zvona imaju frekvenciju udarenog tona, a neka ne. Udareni ton je definisan oktavom, duodecimom i gornjom oktavom (frekvencijski odnos 2:3:4).



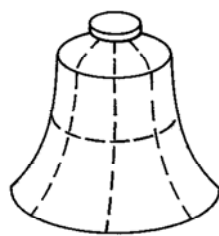
## Kružni i meridijan stepeni oscilovanja



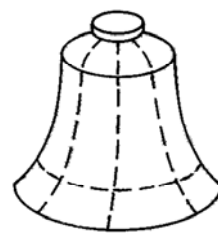
prizvuk



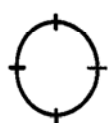
osnovni ton



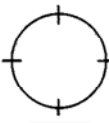
m.3



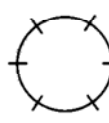
č.5



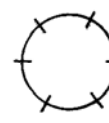
$f/f_0 = 0,5$



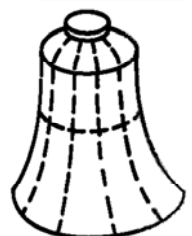
1,0



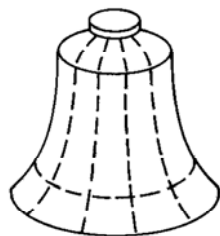
1,2



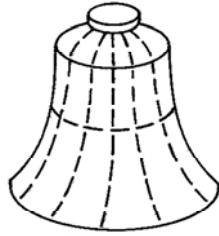
1,5



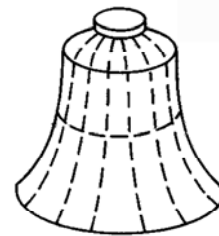
8



gornja 3



8 + 5



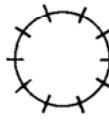
gornja 8



2,0



2,5



3,0



4,0

Slika 3.4.5.13: Šematski prikaz stepena oscilovanja zvona

**Ručno zvono** postoji nekoliko vekova. Koristi se u nekim školama. Ranije su ga koristili zvonari crkava za vežbanje.

Današnja štimovana zvona postoje iz 18. veka u Engleskoj.

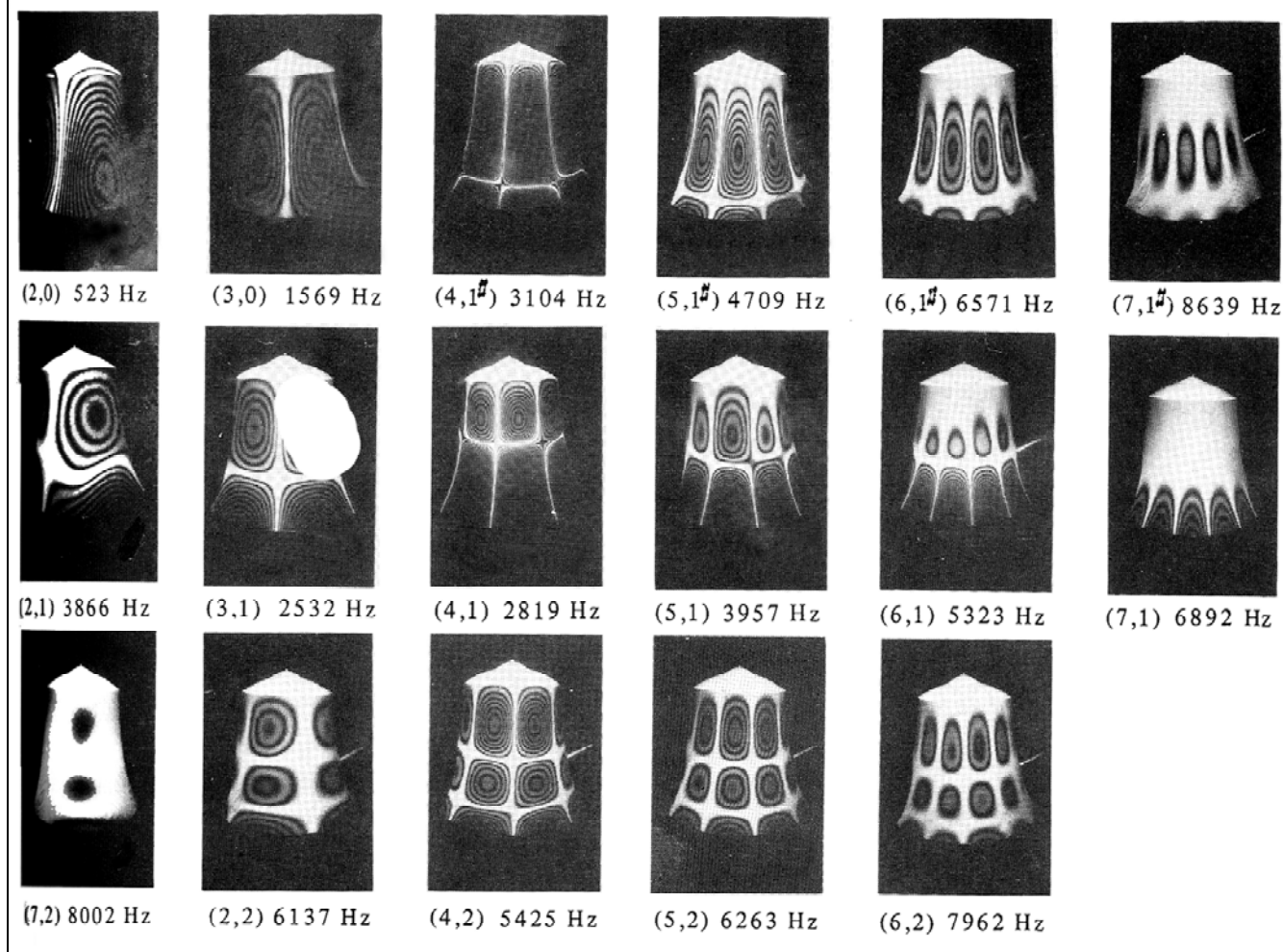
Iako su i crkvena i ručna zvona napravljena od istog materijala (bronze) i iste su konstrukcije, ona ipak zvuče različito. Kod ručnog zvona postoje samo 2 stepena vibracije koja su harmonično naštimovana, a kod crkvenih zvona barem 5 [75].

Palica za ručno zvono je meka, a za crkveno je jaka i čvrsta, da bi se crkveno zvono čulo u daljini.



*Slika 3.4.5.14: Ručno zvono*

## C<sup>2</sup> ručno zvono



Slika 3.4.5.15: Oscilovanje ručnog zvona

**Tubularna zvona** ili orkestarska zvona su cevi prečnika 3 – 4 cm. Sa gornje strane cev je zatvorena i poklopac ima ram u koji se udara.

Karakteristično za zvona je da ne postoji frekvencija harmonika ni tačno ni blizu tonu koji se čuje. Frekvencije pobuđene kada se cev udara su vrlo slične kao kod marimbe i ksilofona: 4., 5. i 6. harmonik se pojavljuju da definišu udareni ton. Okidač na vrhu pomaže i da se priguše veoma visoki harmonici.

Ako cev nije idealno okrugla, ili ako je površina zidova cevi hrapava, nastaju udari (javljaju se transverzalne vibracije u dva različita pravca i udari za dva različita harmonika). Ako su cevi dobro naštimovane, nema udara.

Zvuk zvona je jako popularan u kompozicijama za orkestar.

Postoje razna folklorna zvona.



*Slika 3.4.5.16: Tubularna zvona i ang - kling*



*Slika 3.4.5.17: Različita kineska zvona*



**kuge  
(Brazil)**

*Slika 3.4.5.18: Kuge*

### **3.5 LAMELOFONI**

Lamelofoni su zapravo muzički instrumenti sa nekom vrstom tankih pločica (metalnih listova), slobodnih na jednom kraju. Najviše ovakvih instrumenata ima u folkloru.

Uglavnom se sviraju prstima, okidanjem tih pločica na slobodnom kraju.



**sansa**

*Slika 3.5.1: Sansa*



**mbira**



*Slika 3.5.2: Mbira*



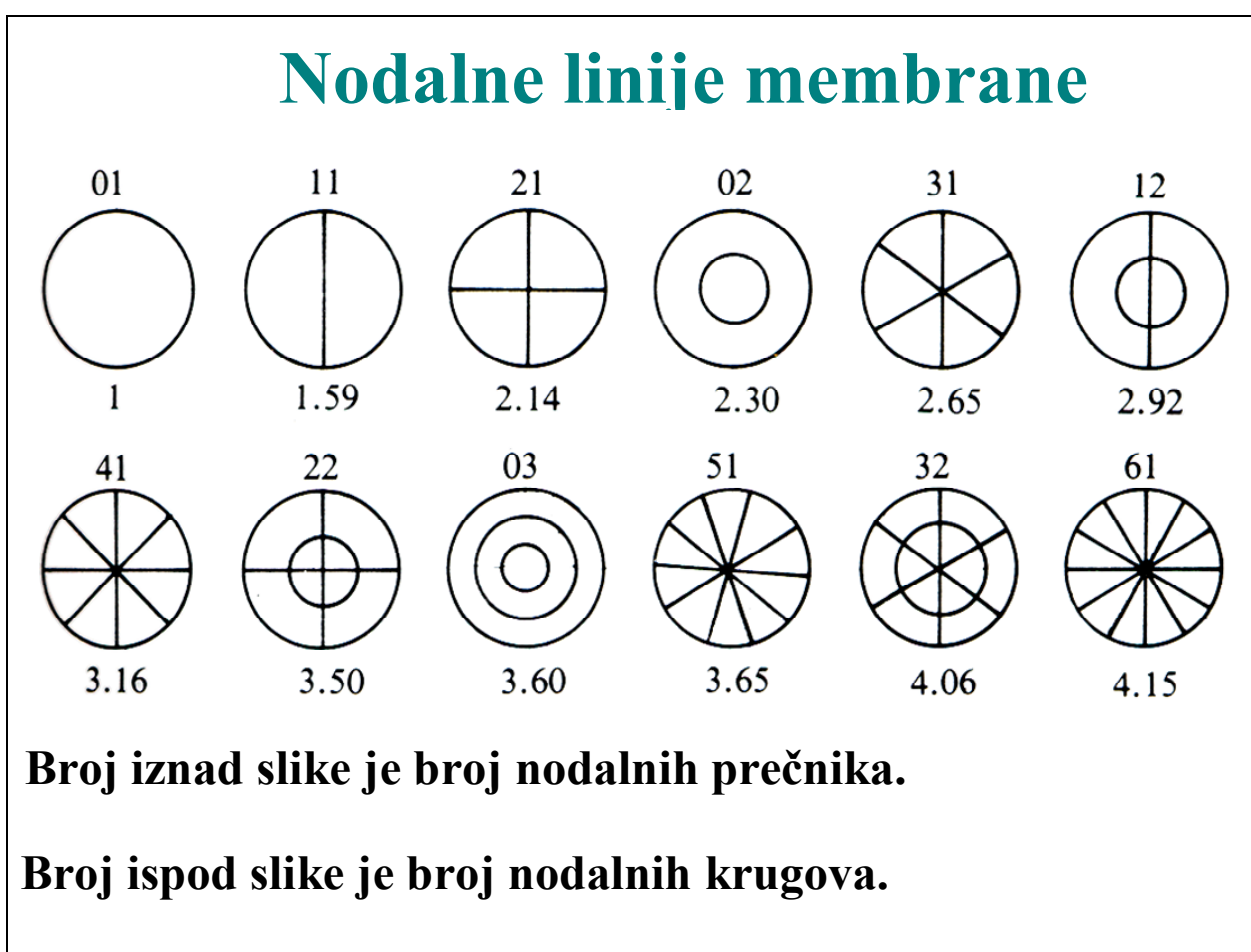
### 3.6 MEMBRANOFONI

Membranofoni su muzički instrumenti sa zategnutom membranom. Membrana može biti napravljena od kože, plastike, metala.

Kao i žica, membrana može biti štimovana promenom zategnutosti. Razlika je u tome što su kod žice stepeni vibracije harmonici osnovnog tona, a kod membrane nisu.

Kod membrane ne postoje čvorovi vibracije stojećeg talasa već nodalne linije i nodalni krugovi.

U membranofone spadaju sve vrste bubnjeva.



*Slika 3.6.1: Nodalne linije oscilovanja membrane*

Bubnjevi su muzički instrumenti koji mogu imati definisanu ili nedefinisanu visinu tona. Jako su važni u skoro svim kulturama.

Membrana bubnjeva se pravi od kože životinja, plastike i metala.

Postoje:

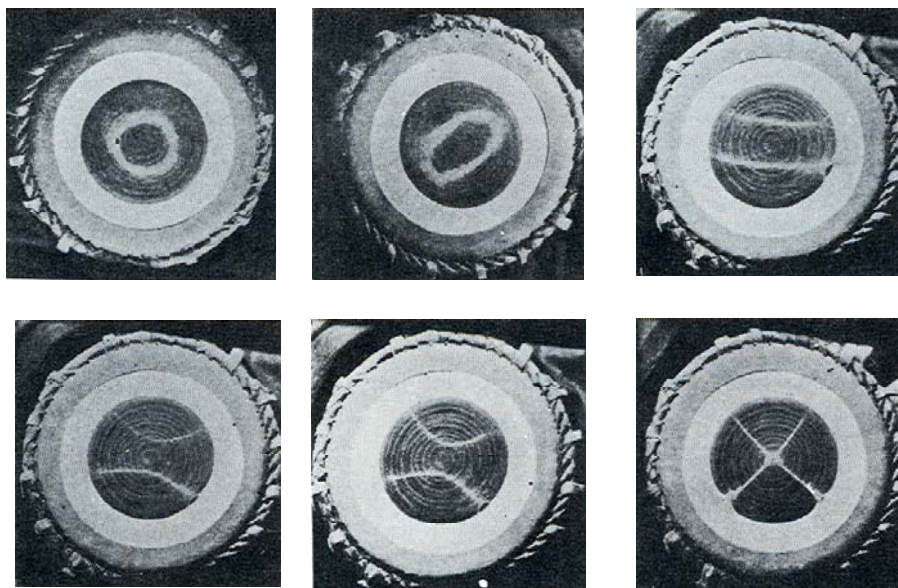
- bubnjevi sa kotlom
- bubnjevi sa 1 membranom
- bubnjevi sa 2 membrane

Neki bubnjevi se koriste u simfonijskom orkestru (timpani, bas bubanj), a neki samo u folkloru.

### 3.6.1 NEKI FOLKLORNI MEMBRANOFONI

**Tabla** i **bajan** su najpopularniji bubnjevi iz Indije. Imaju po 1 glavu koja se često zateže konopcima, od vrha ka dnu. Membrana se premazuje pastom oksida gvožđa, ugljem, gumom. To je učvršćuje, a ipak ostaje elastična. Prva 4 stepena vibracije table su harmonici osnovnog tona.

## Oscilacije membrane table

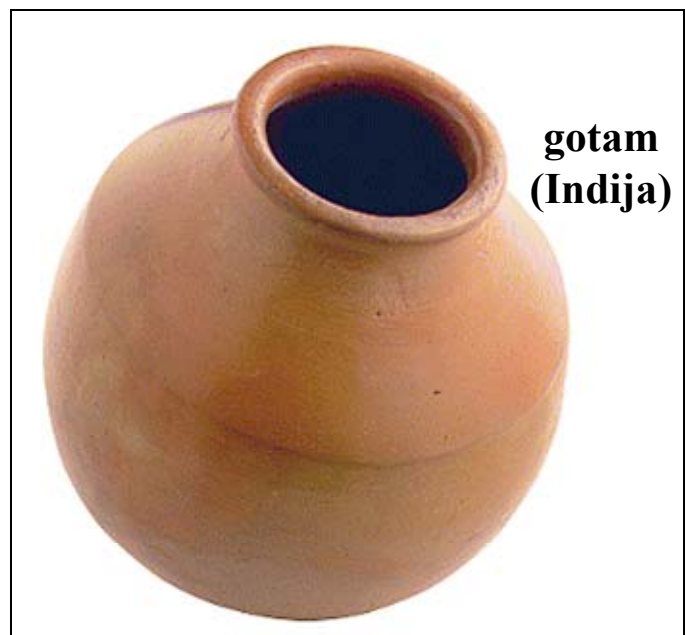


**Kladni:** svi stepeni vibracija imaju frekvencije blizu 3. harmonika.

*Slika 3.6.1.1: Kladni metoda za otkrivanje izgleda oscilacija membrane*



*Slika 3.6.1.2: Tabla i bajan*



*Slika 3.6.1.3: Mrdanga i gotam*

**Mrdanga** je indijski veliki bubanj sa dve glave. Kože su tretirane oksidom gvožđa, kao kod table.

**Gotam** je indijski kotao bubanj koji nema kožnu membranu već sam zemljani ćup predstavlja membranu.

**Nakara** je indijski mali bubanj sa kotlom. Ima jednu kožu razapetu na svakoj glavi. Pravi se u paru.



**nakara  
(Indija)**

*Slika 3.6.1.4: Nakara*

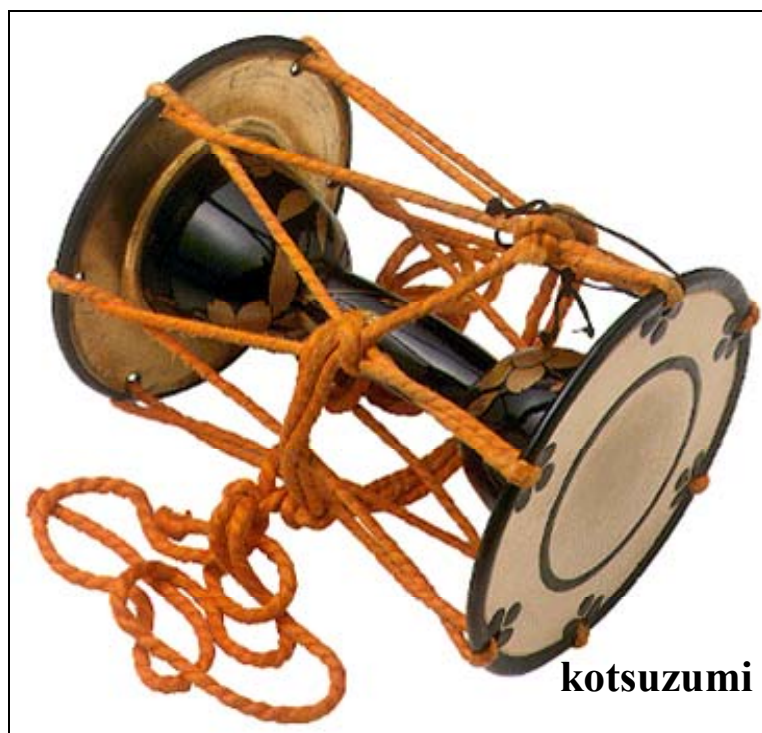
**Odaiko** je tradicionalni bubanj iz Japana. Ima dve glave i dve membrane.  
**Kotsuzumi** je stari muzički instrument iz Japana. Ima dve glave spojene uskim rezonatorom i konopce kojima se zatežu membrane.



**odaiko  
(Japan)**

*Slika 3.6.1.5: Odaiko*

Postoji mnogo različitih vrsta bubnjeva i u Africi. Oni takođe imaju ili jednu ili dve glave sa membranom.

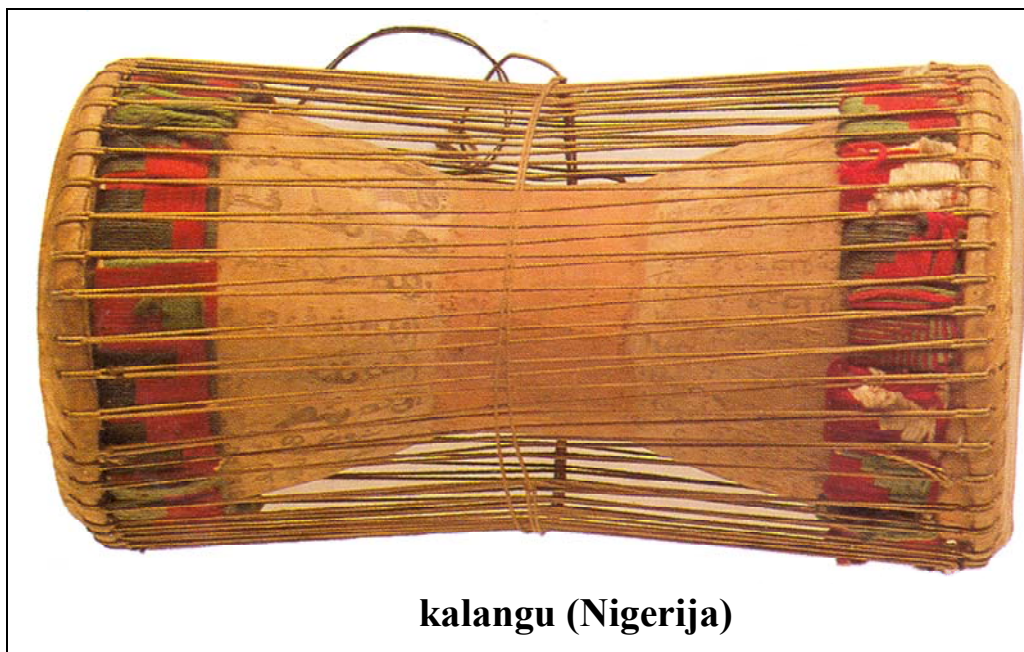


*Slika 3.6.1.6: kotsuzumi i dembe*

Mnogi bubnjevi se prave i sviraju u paru, za obe ruke. Nije definisano kojom rukom se svira koja membrana, već se najčešće obe sviraju sa obe ruke naizmenično.



*Slika 3.6.1.7: Atimpan*



**kalangu (Nigerija)**

*Slika 3.6.1.8: Kalangu*



**darabuka**

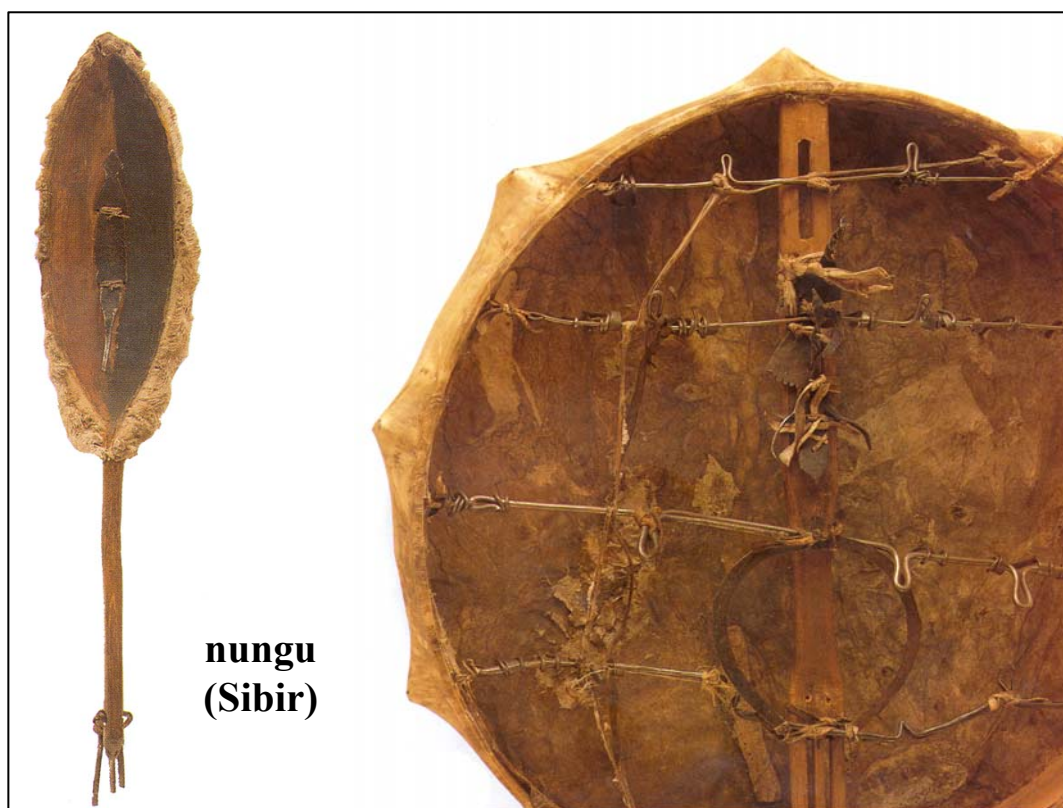
*Slika 3.6.1.9: Darabuka*

**Dembe** je mali kotao bubanj sa 1 membranom. Svira se obema rukama.

**Atimpan** je kotao bubanj koji se svira u paru. Svaki ima po 1 glavu sa kožnom membranom.

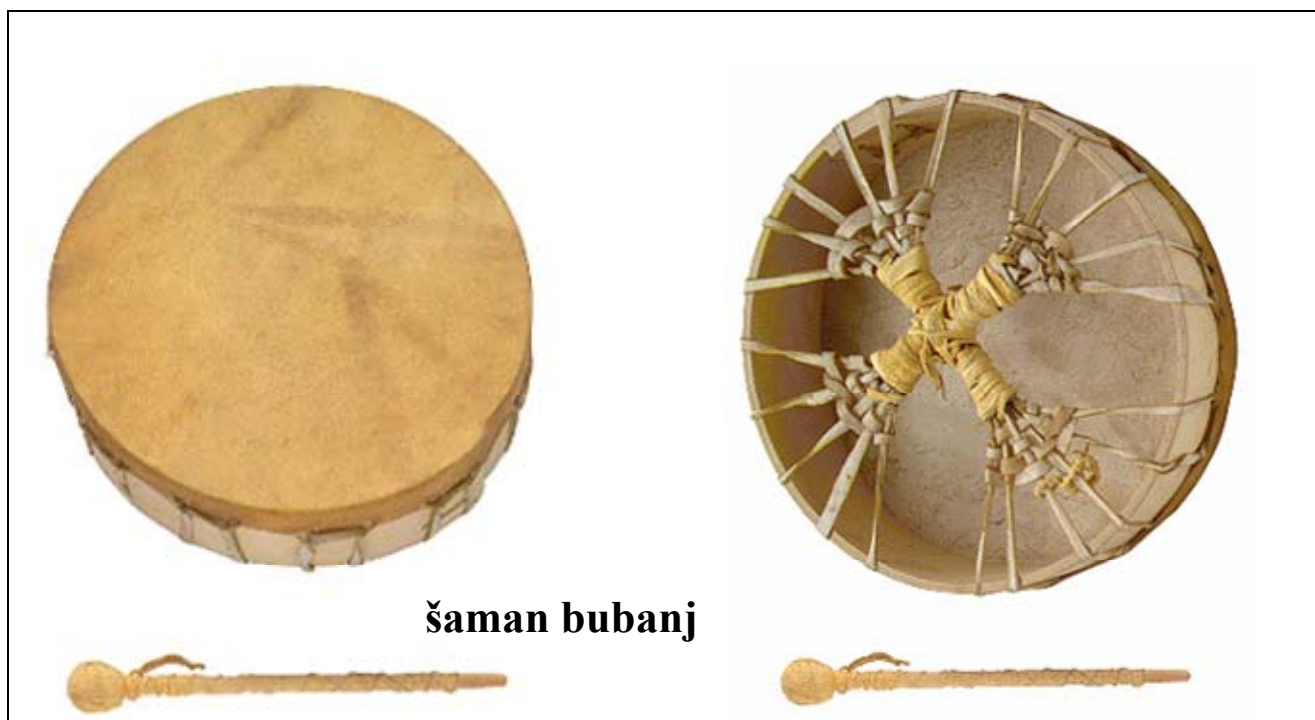
**Darabuka** je mali kotao bubanj sa 1 glavom na kojoj je razapeta membrana.

**Kalangu** je dvoglavi bubanj iz Nigerije.



**nungu  
(Sibir)**

*Slika 3.6.1.10: Nungu*



**šaman bubanj**

*Slika 3.6.1.11: Šaman bubanj*

**Šaman bubanj** je muzički instrument na kome ritualno svira poglavica plemena (vrač).

**Kvika** je brazilski bubanj sa vrlo specifičnim zvukom koji se dobija provlačenjem metalne sajle kroz centar membrane.





**kvika  
(Brazil)**

*Slika 3.6.1.12: Kvika*

Postoje i **bubnjevi sa čeličnom membranom**. Poreklom su sa Trinidada. Pojavili su se polovinom 20. veka, uglavnom zbog karnevala. Prvo su bile obične kante, a kasnije su se razvili štimovani metalni bubnjevi veoma prijatnog zvuka.

Obično se prave od buradi za naftu. Čekićem se štimuju na običnoj i povišenoj temperaturi. Postoje: sopran, alt, tenor, bariton i bas bubanj. Zvuk ovih bubnjeva je bogat harmonicima.



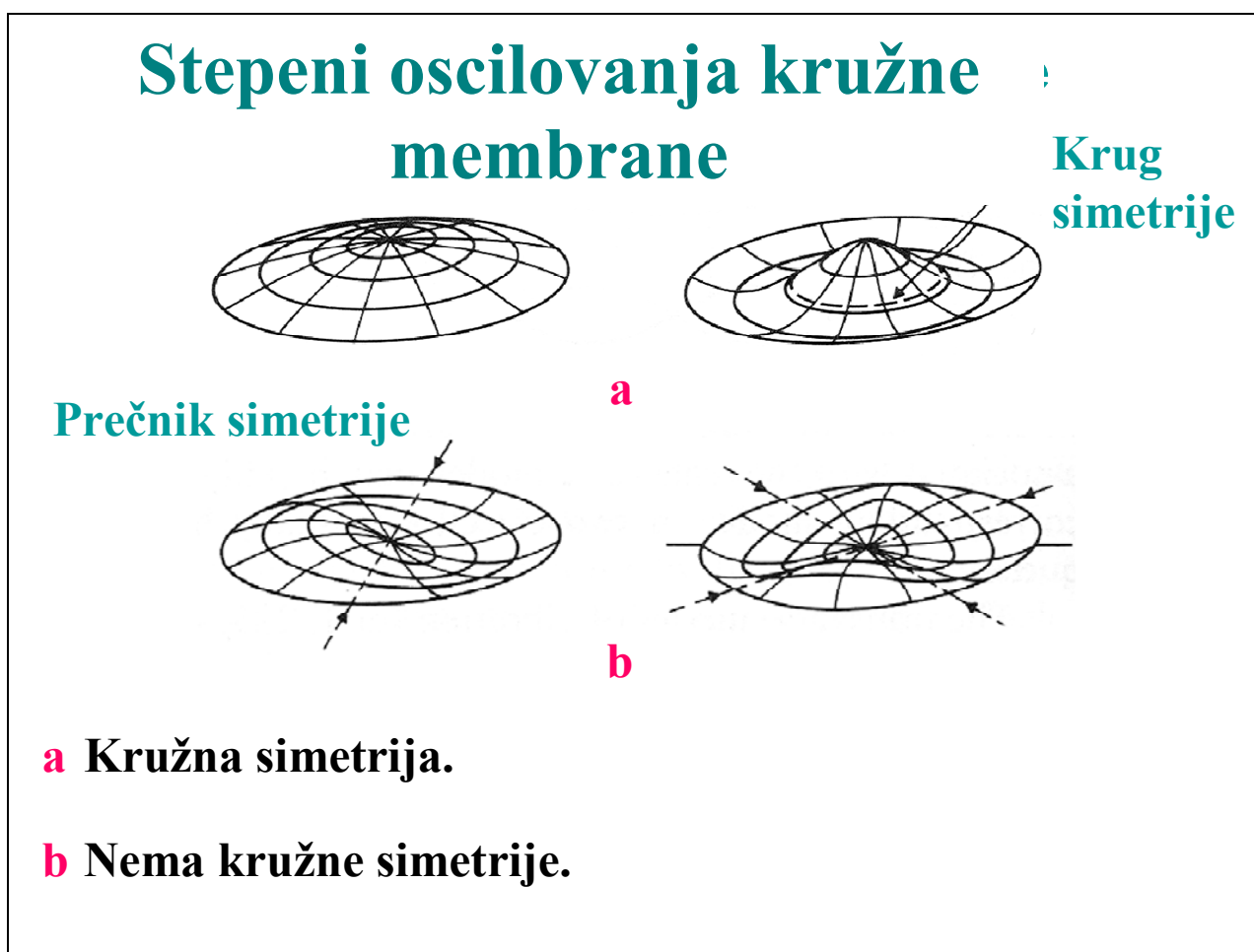
*Slika 3.6.1.13: Čelični bubnjevi*

### 3.6.2 BUBNJEVI U SIMFONIJSKOM ORKESTRU

**Timpani** su najvažniji bubanj u simfonijskom orkestru. Sastoji se od metalnog kotla preko koga je prevučena membrana. Prečnik kotla je 65 cm. Timpani se štимуju pedalama i šrafovimа koji su raspoređeni po ramu kotla. Membrana timpana se dugo pravila od teleće kože. Danas se pravi od polietilena.

Koža timpana ima jak osnovni ton. Vazduh zatvoren u kotlu ima sopstvenu rezonanciju. Rezonancija tog vazduha će se podudariti sa rezonancijom membrane sličnog oblika. Veća zategnutost membrane (kao i kod žice) povišava frekvenciju osnovnog harmonika.

Timpani imaju definisanu visinu tona. Postoji nekoliko timpana uvek u orkestru koji su različite veličine. Tako se na njima mogu odsvirati različiti tonovi (najčešće 1., 4. i 5. stupanj lestvice).



Slika 3.6.2.1: Stepni oscilovanja kružne membrane



*Slika 3.6.2.2: Timpan*

**Bas bubanj** je najglasniji od svih muzičkih instrumenata u orkestru. Postoje jednoglavi i dvoglavi. Jednoglavi bubanj proizvodi jasniji zvuk, ali je dvoglavi omiljeniji u orkestrima. Najjači mu je prvi harmonik. Obično ima 50 – 100 cm u prečniku.

Orkestarska verzija doboša ima dve glave. Prečnik je 35 cm, dubina do 20 cm. Sa donje strane su razapete žice. Kada se udari gornja glava, donja glava rezonira suprotno od žica.

**Konge** i **bongosi** su bubnjevi sa tankom kožom. Sviraju se rukama. Uvek su u paru.



*Slika 3.6.2.3: Bongosi*



*Slika 3.6.2.4: Konge*

### **3.7 UDARAČKI MUZIČKI INSTRUMENTI SA NEDEFINISANOM VISINOM TONA**

#### **3.7.1 ZVEČKE**



*Slika 3.7.1.1: Marakas*

**Marakas** su najpoznatije zvečke. Vode poreklo iz centralne i južne Amerike.



*Slika 3.7.1.2: Različite afričke zvečke*

Afrika ima mnogo vrsta zvečki: sa košticama od voća nanizanim po površini instrumenta i sa košticama ubačenim u neku tikvu.



**praporci**



**kabasa  
(J.Amerika)**

*Slika 3.7.1.3: Praporci i kabasa*

### 3.7.2 LUPKALICE

Lupkalice takođe spadaju među najstarije instrumente na svetu. Pre svega su ljudske šake, kao prve lupkalice, stare koliko i prvi čovek.

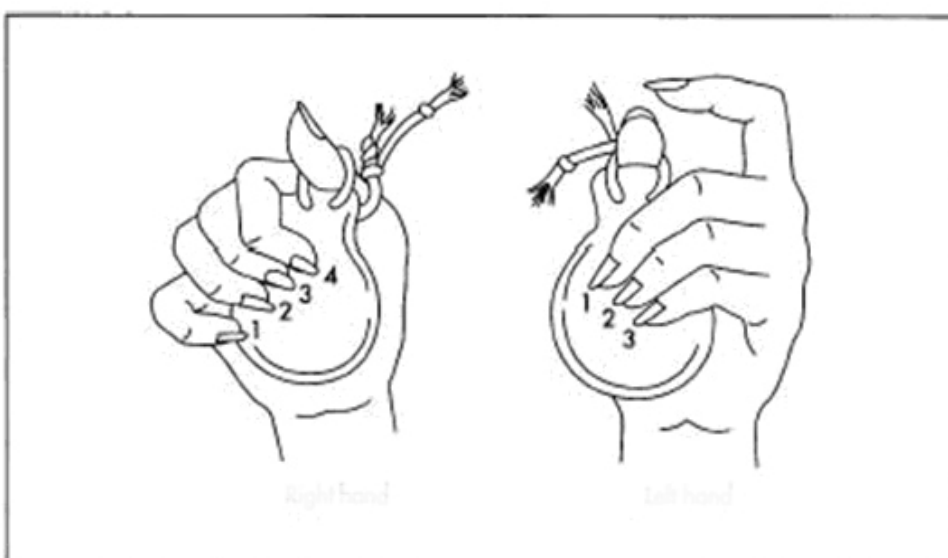
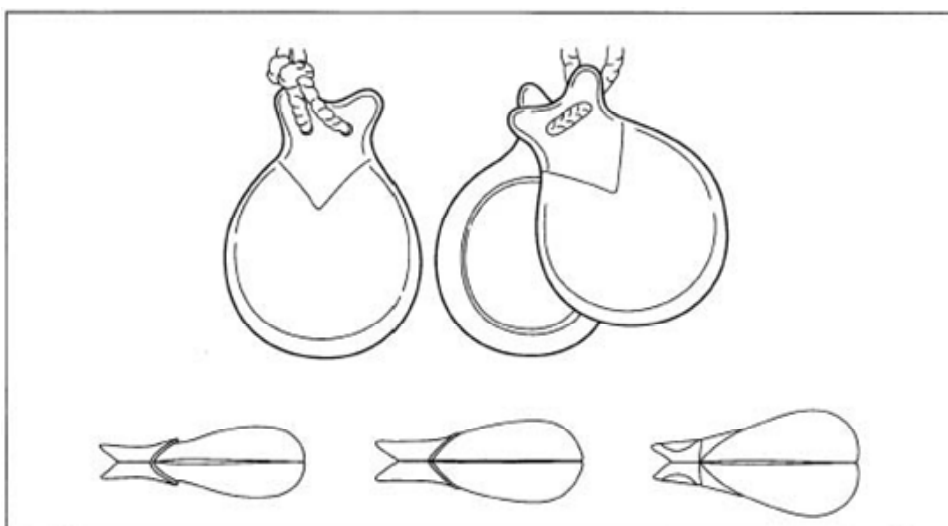


*Slika 3.7.2.1: Klope*

Najpoznatije su španske **kastanjete**. One sabijaju vazduh i tako proizvode zvuk.



*Slika 3.7.2.2: Kastanjete*



*Slika 3.7.2.3: Šematski prikaz sviranja na kastanjetama*



*Slika 3.7.2.4: Klaves*



**Klaves** su valjkaste palice od palisanderovog drveta.

**Bič** je lupkalica koja se koristi u simfonijskom orkestru za oponašanje zvuka pravog biča (korbača).



*Slika 3.7.2.5: Bič*

Postoje razne drvene kutije, dvotonski blokovi, koji imaju različitu, ali ipak nedefinisanu visinu zvuka.

### 3.7.3 ZUJALICE

Zujalice se zovu po zvuku zujanja koji proizvode. Najpoznatije su **drombulje** i **jevrejska farfa**. Veoma liče.



*Slika 3.7.3.1: Jevrejska harfa*

### 3.7.4 GREBALICE

Najpoznatija grebalica je **giro**. To je drvena kutija sa izdeljanim rebrima preko kojih se prevlači drvenim štapom ili drvenom palicom i na taj način proizvodi zvuk grebanja.



*Slika 3.7.4.1: giro*

Zvuk udaračkih muzičkih instrumenata sa nedefinisanom visinom tona se ne može objasniti preko harmonika. U tom smislu ga nije lako analizirati u spektru.

## 4. DRVENI DUVAČKI MUZIČKI INSTRUMENT FRULA

### 4.1 ISTORIJAT

Frula je muzički instrument sa ovog podneblja još od davnina. Od kad postoje pisani dokumenti o dešavanjima na prostorima današnje Srbije, frula se pojavljuje na svim prelima i svim svetkovinama. To je muzički instrument koji karakteriše svetovne prilike, vezan je za svetovnu muziku srpskog naroda. Frula je ovekovečena u spisima, u pesmama, na platnima slikara. Potpuno je sastavni deo srpske narodne nošnje. Verovatno je frula nastala kao razbibriga za razbijanje dosade malih pastira dok su na nekom proplanku usamljeni po celi dan sedeli na pašnjacima. Pretpostavljamo da je prvo izdeljana zviždaljka, pa malo po malo, definisala se frula. Ali se frula razvila u instrument za koji graditelji kriju svoje tajne jedni od drugih, takmiče se ko će napraviti što bolji instrument, a frulaši se takmiče u virtuoznom sviranju.

Svaki kraj Srbije je drugačiji i svaki kraj Srbije se različito razvijao. To važi i za frulu. Postoje različiti štimovi, različitosti u konstrukciji u zavisnosti od kraja u kojem je neka frula nastala. Otuda i potreba da se sve to sakupi u jednu bazu podataka i da se nekako pokuša standardizovati.

### 4.2 PODELA

Postoje različite frule. Mogu se razlikovati po obliku, konstrukciji, vrsti drveta od koje su napravljene, veličini.

Po obliku i konstrukciji postoji:

- jednodelna frula
- dvodelna frula

Po veličini postoje:

- frule različite dužine cevi
- frule sa različitim unutrašnjim prečnikom cevi

### 4.3 VRSTA DRVETA

Po vrsti drveta ih može biti toliko grupa koliko ima vrsta drveta. Frula je jednostavan narodni instrument koji se može napraviti od svake vrste drveta. To ne znači da sve one podjednako dobro zvuče. U tom smislu je i išlo ovo istraživanje. Koja to frula najbolje zvuči i zbog čega? Da li na to utiče vrsta drveta i kako [19']?

Uobičajeno je da se drvo koje se koristi za izradu frule dobro osuši prirodnim putem (na vazduhu se provetrava, zaštićeno od kiše pod nekom strehom). Za to je potrebno za neku vrstu drveta 1 godina (javor), a za neku drugu vrstu drveta 5 godina (bagrem). Javor je kvalitetan u smislu da se drvo ne vitoperi.

Za bagrem je potrebno da bude dobro osušen da bi se dobile podjednako kvalitetne frule.

Graditelji kažu da nema nekog čvrstog pravila da li treba koristiti meko ili tvrdo drvo. Odličnu boju ima i frula od javora (meko drvo), bagrema (tvrđe) i šimšira (izuzetno tvrdo drvo). Karakteristično je da su frule izrađene od tvrdog drveta virtuoznije, brže reaguju kod sviranja pasaža.

Najbolji ton i najkvalitetnije frule dobiju se ako se prave od srca drveta. To je centralni deo debla koji je tamne boje. Te frule odlično zvuče.

Zanimljivo je da se kvalitetnije frule dobiju od drveta koje je raslo u pitomom kraju i ima ređe godove nego od drveta koje se probijalo i izrastalo u nekim gudurama i ima gušće godove.

Vrsta drveta od koje se frule najčešće prave su:

- sa koštunjavim plodom (šljiva, trešnja, višnja, badem, kruška)
- bagrem, dren, šimšir
- egzotične vrste drveta (abonos, palisander, bambus)

Bagrem ima specifičnu strukturu. Na pojedinim mestima je razređen, a na pojedinim mestima je zgusnut, tvrdi.

Nekada su se frule najviše pravile od trske. Zatim od zove. Zova je pogodna za izradu frule jer se savršeno može bušiti drvo. Velika je pogodnost ako je drvo ravno i može se cepati uzduž tako da se što veći broj vlakana spušta od vrha do dna cevi. Tako se dobiju izuzetno kvalitetne frule. Zova je takva vrsta drveta.

Ako se koristi vrsta drveta koja se ne cepa, seče se drvo uzduž za izradu frule.

#### 4.4 UNUTRAŠNJA OBRADA

Što je unutrašnja obrada drveta finija, frula ima čistiji zvuk. Zato se vodi računa i o najsitnijim detaljima. Ako se drvo ne obradi kako treba, biće dodatnih refleksija koje mogu biti nepoželjne.

#### 4.5 IMPREGNACIJA DRVETA

Da bi se poboljšale karakteristike budućeg instrumenta, vrši se impregnacija drveta, Kada se drvo za izradu frule poseče i osuši koliko je potrebno, mora se impregnisati. Za to se koriste različita sušiva i nesušiva ulja.

Ako se koriste sušiva ulja, drvo mora pre obrade dugo da bude potopljeno i to pri povišenoj temperaturi (ispeče se drvo pre obrade). Na taj način se zapeče površina drveta i ostane konzervisana i kasnije. Problem sa sušivim uljima je što se vremenom hvata skrama, po površini, koja je neprijatna pod prstima.

Nesušiva ulja su: biljna ulja za šivaće mašine (sva ulja koja se koriste za mašine, da ne bi zaribale vremenom), ulja za oružje, briljantin.

Dobro je i gotovu frulu u toku prve godine nakon izrade potopiti u ulje, ili je premazati iznutra. Najbolje prima na presečenim delovima, sa čela i na rupicama.

#### 4.6 KONSTRUKCIJA

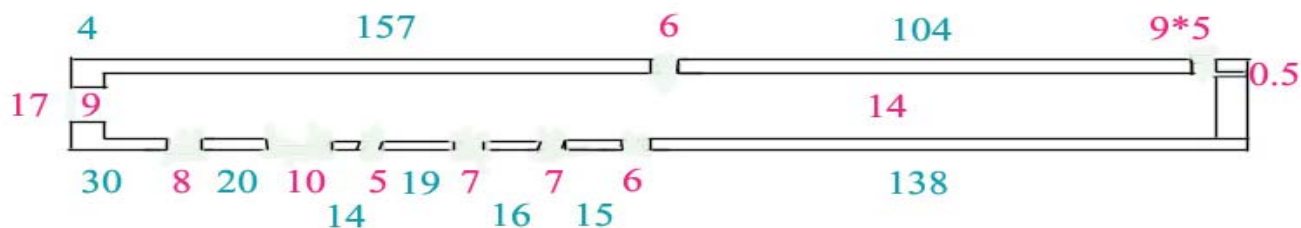
Po konstrukciji ima očiglednih razlika: jednodelne i dvodelne frule. Ima i suptilnijih razlika koje doprinose boji tona frule.

Na izlazu frule se može staviti prsten određene debljine koji sužava cev na kraju i menja boju tona.

Boja tona se menja i sa promenom udaljenosti jezička od otvora iz kojeg izlazi mlaz vazduha. Ako je otvor (u obliku pravougaonika) duži, ton je snažniji, ali hrapaviji. Ako je otvor kraći, ton je slabiji, ali čistiji [20] .

#### 4.7 JEDNODELNE FRULE

Jednodelne frule su nazvane po tome što su urađene iz komada drveta i nemaju nastavak. Zbog toga imaju karakterističan izgled. Mogu biti napravljene od različitih vrsta drveta.



Slika 4.7.1: Šematski prikaz jednodelne frule. Dimenzije su date u mm.

Na fruli postoji:

- usnik, koji čini prorez u čepu od drveta i rupica na bočnom zidu
- suženje na suprotnom kraju cevi od usnika koje modifikuje akustičku dužinu cevi i, samim tim, boju tona instrumenta
- 6 rupica za sviranje dijatonske lestvice
- 1 rupica na suprotnoj strani cevi koja služi za sviranje gornjeg registra (kad je rupica zatvorena, svira se u donjem registru, kad je otvorena, svira se u gornjem registru)

Na ovoj fruli može se odsvirati dijatonska skala u opsegu od 2 oktave.

Tonovi niskog registra imaju manji nivo od tonova visokog registra i prirodnije zvuče.

Prvo se napravi cev frule. Zatim se pravi usnik. To je najvažniji i najfiniji deo procesa izrade frule. Od usnika svih duvačkih muzičkih instrumenata zavisi kakav će biti ton na tom instrumentu, pa samim tim i da li će instrument biti dobar ili ne. Isto je i kod frule. Usnik se pravi tako što se ubaci drveni čep određene debljine u početak frule. Na bočnom zidu frule se izbuši pisak – pravougaoni otvor određene dužine i širine. U čepu se izbuši uzan pravougaoni prorez do piska. Na kraju se napravi ivica u koju udara vazduh kad izlazi, tako što se napravi kosina na bočnom otvoru.

Kada se završi usnik, prave se rupice. Kreće se od najniže pa se ide na gore, ka usniku. Teži se da sve rupice budu na istom rastojanju zbog prstometa, da bi se lakše sviralo na fruli. To uslovljava da onda same rupice moraju biti različite veličine, zbog akustičke dužine cevi za pojedine rupice koje će odgovarati tonovima dijatonske lestvice. Svaka frula je naštimovana u samo jednom durskom tonalitetu i njemu srodnom molskom tonalitetu. Prvo se odrede lokacije rupica. Zatim se rupica izbuši, uvek manja nego što je potrebno. To je grubo štimovanje. Kada se sve rupice izbuše, doteruje se štim finim šmirglanjem rupica, dok se ne postigne željena visina tona. To nije tako lak proces i zato većina frula nije idealno naštimovana.



*Slika 4.7.2: C frula, bukva,  $\Phi = 14\text{ mm}$*



*Slika 4.7.3: C frula, mahagoni,  $\Phi = 14$  mm*



*Slika 4.7.4: C frula, šljiva,  $\Phi = 14$  mm*



*Slika 4.7.5: C frula, bagrem,  $\Phi = 14$  mm*

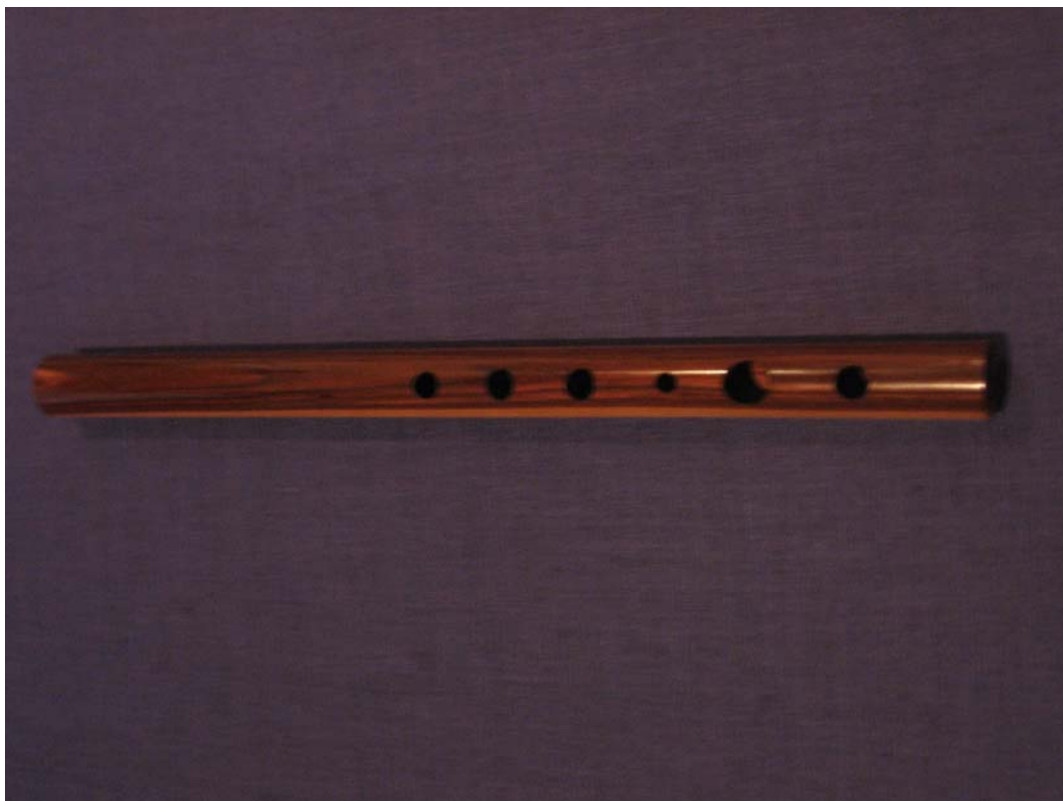


*Slika 4.7.6: C frula, orah,  $\Phi = 14$  mm*





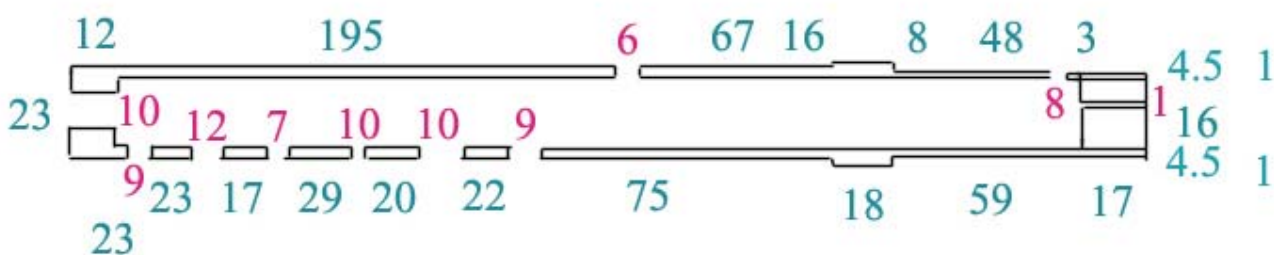
*Slika 4.7.7: C frula, bagrem,  $\Phi = 15\text{ mm}$*



*Slika 4.7.8: C frula, trešnja,  $\Phi = 15\text{ mm}$*

## 4.8 DVODELNE FRULE

Dvodelne frule su nazvane po tome što su napravljene iz dva dela: imaju posebno usnik i posebno cev sa rupicama. Oba dela su izrađena od drveta, a na pojedinim mestima mogu biti ukrašena metalnim prstenovima (na ulaznom i izlaznom kraju i na sastavu usnika i cevi).



Slika 4.8.1: Šematski prikaz dvodelne frule. Dimenzije su date u mm.

Na gornjem delu frule postoji:

- usnik koji čini prorez u čepu od drveta i rupica na bočnom zidu
- dva ukrasna metalna prstena, jedan na samom vrhu i drugi na sastavnom delu

Na cevi frule postoji:

- suženje na donjem kraju cevi koje modifikuje akustičku dužinu cevi i, samim tim, boju tona instrumenta
- 6 rupica za sviranje dijatonske lestvice
- 1 rupica na suprotnoj strani cevi koja služi za sviranje gornjeg registra (kad je rupica zatvorena, svira se u donjem registru, kad je otvorena, svira se u gornjem registru)
- dva metalna prstena, jedan na samom kraju cevi i drugi na sastavnom delu.

Na dvodelnim frulama može se odsvirati dijatonska skala. Boja tona ovih frula je mekša i finija nego kod jednodelnih. Jednodelne frule imaju nekako robustan zvuk. Nastavak frule je dragocena stvar za boju tona.

Konstrukcija frule iz dva dela omogućava korekcije u štimovanju frule. Naime, na kraju nastavka postoji metalni prsten dužine nekoliko cm (u zavisnosti od dužine same frule) koji služi da se može menjati stvarna dužina cevi frule, a samim tim i njena akustička dužina. Promenom dužine cevi može se dodatno naštimovati frula, da intonacija bude još preciznija.

Tehnologija izrade rupica je ista kao i kod jednodelnih frula.

Frule se prave različite po dužini i po unutrašnjem prečniku cevi. Ako je unutrašnji prečnik cevi veći, veća je i dužina cevi, ukoliko želimo da dobijemo

frulu istog tonaliteta (U poglavlju o duvačkim instrumentima smo objasnili kako zavisi dužina cevi od željene frekvencije tona.).  
Dvodelne frule se smatraju kvalitetnijim muzičkim instrumentom od jednodelnih.



*Slika 4.8.2: A frula, bagrem,  $\Phi = 18$  mm*



*Slika 4.8.3: As frula, šljiva,  $\Phi = 18$  mm*



*Slika 4.8.4: G frula 1, bagrem,  $\Phi = 18$  mm*



*Slika 4.8.5: G frula 2, bagrem,  $\Phi = 18$  mm*



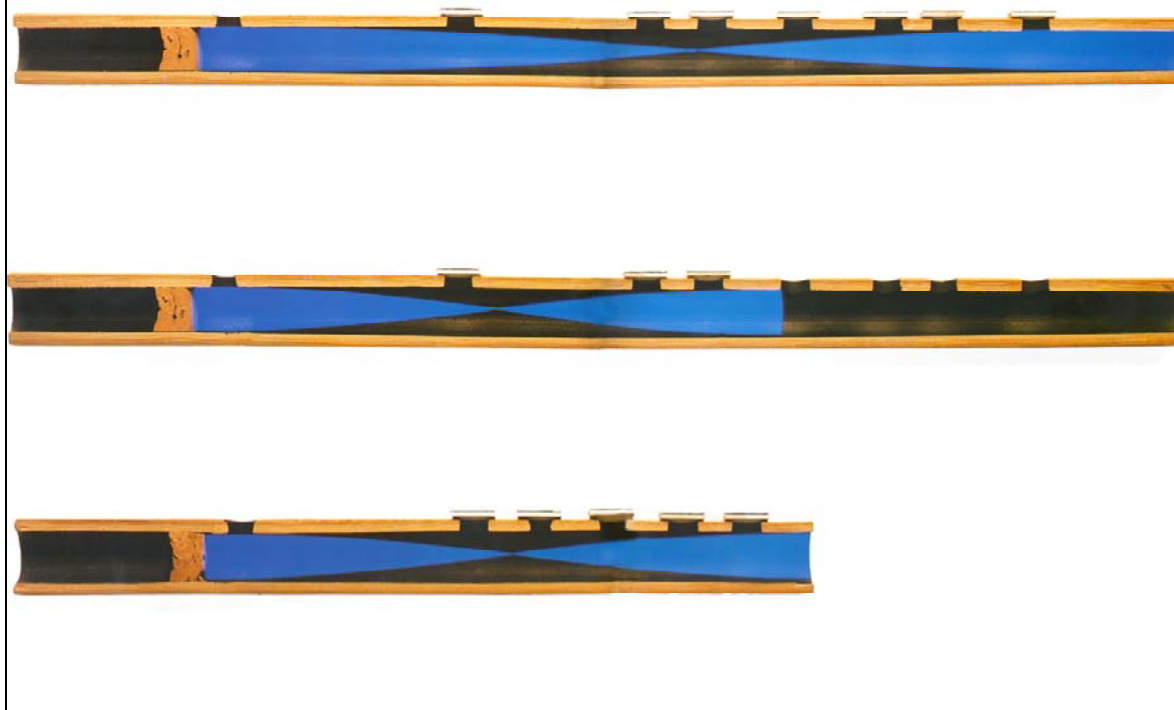
*Slika 4.8.6: Jednodelne i dvodelne C frule, napravljene od različitih materijala,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ ,  $14 \text{ mm}$ ,  $15 \text{ mm}$*

#### 4.9 TRADICIJA I INOVACIJE

Svi naši etnomuzikolozi proučavaju frulu. Proučavaju kako izgleda frula u različitim krajevima Srbije, kako se pravi i od koje vrste drveta, kakva su predanja o fruli u tom kraju i, najviše, istražuju muziku koja se na fruli svira. Među njima postoje, kao i u svakoj profesiji, različita stanovišta o tome kakav odnos danas treba da imamo prema fruli kao muzičkom instrumentu i da li frula treba da ostane ista kao što je bila u začetku, ili smemo da je menjamo i istražujemo na njoj.

Kada govorimo o fruli i o ljudima koji sviraju frulu, bez ikakve dileme, prvo ime kojeg se setimo je Bora Dugić. Sa punim pravom možemo reći da je Bora naš ambasador frule u svetu. Nastupao je u najvećim koncertnim dvoranama u Engleskoj, Americi, Australiji, ... i svojim izvođenjima ostavljao slušaoce bez teksta, u suzama ili u najvećem oduševljenju. Ono što ne znaju svi je da se Bora Dugić već decenijama bavi i izradom frula i da istražuje kako se menja boja tona frule ako se na njoj izvedu neke tehničke izmene.

# Frula



*Slika 4.9.1: Unutrašnji presek dvodelne frule*

Prva velika novina koju je Bora osmislio i konstruisao je frula koja može da svira u svim tonalitetima. Poznavaoци muzičkih instrumenata znaju da je to na fruli, imače, nemoguće. Čak i klarinetisti moraju da poseduju dva uparena klarineta, čiji su tonaliteti pomereni za polustepen, da bi na njima moglo da se svira u bilo kom tonalitetu. Bora Dugić je konstruisao frulu po principu cevi u cevi. Na unutrašnjoj cevi su izbušene sve rupice za tonalitete D i Es (dakle, dvostruko više rupica nego što ima na jednoj fruli). Na spoljašnjoj cevi koja se vidi, sa jedne strane su izbušene rupice za D, a sa druge strane su izbušene rupice za Es tonalitet. Pri tome je osmišljeno desetak mehanizama koji omogućavaju da se prebacivanje frule iz jednog tonaliteta u drugi može izvesti u toku kompozicije, bez ikakvog rizika od proklizavanja ili zaglavljivanja cevi (Unutrašnja cev je izrađena od specijalne kože, a ne od drveta ili metala, da se ne bi previše zaglavljivala, a i da ne bi proklizavala. Napravljen je poseban granični prsten koji fiksira unutrašnju cev u spoljašnjoj cevi. Izrađen je specijalan spoljašnji prsten sa uskim žljebovima koji fiksira spoljašnju cev tako da se nesmetano može okretati u krug glava u odnosu na cev i time menjati tonalitet, bez bojazni da će se pri tome pomeriti i unutrašnja cev.). Ovaj pronalazak je zasigurno revolucionaran i velika je prekretnica u istoriji izrade frule. Taj proces je prošla i flauta, ali još u 19. veku (Theobald Behm, 1847.) i zahvaljujući tome je postala veoma popularan instrument u svetu. Bora je izradio još jednu ovakvu frulu, sa dvojnim tonalitetom H i C.

Druga velika, a za boju tona frule izuzetno značajna, novina je ta da je Bora osmislio kako da postigne neke specifične i drugačije nijanse u boji same frule, a da frula nakon te obrade zvuči zaista fantastično i potpuno primereno zadatku koji je pred nju postavljen. Naime, naš poznati reditelj Siniša Kovačević poverio je Bori Dugiću da za film 'Sinovci' komponuje muziku. Bora je napisao predivnu kompoziciju koju je nazvao 'Balada nerođenih Srba'. Muzika je bila odlična, ali je Bori tu nešto nedostajalo. Koliko god da ne postoji čovek koji bolje svira frulu od Bore Dugića, on sam nije bio zadovoljan kako ta pesma zvuči na fruli. Želeo je da frula zaista plače dok svira. I uspeo je u tome. Konstruisao je specijalne tanke opne koje kada se ugrade na cev frule, daju fruli novu, potresnu boju tona.

Jedna od prvih Borinih inovacija je implantat na usniku od frule. To je tanka pločica izrađena od jelenskog roga, koja se uglavi u žljeb na usniku i daje fruli poseban ton.

Postoji čitav niz inovacija u alatima za izradu frule koje je Bora Dugić sam osmislio, projektovao i izradio. Za svaki korak u proizvodnji jedne frule, Bora je napravio poseban alat. Kada posmatrate sa strane taj proces, vidi se da ništa nije ni zaboravljeno, ni preskočeno, ni nedovoljno usavršeno. Sve je razrađeno do maksimuma. Zato su i frule na kojima Bora svira zaista tako posebne.



*Slika 4.9.2: Frula 1 – C – crni bagrem –  $\Phi = 23.5$  mm*



*Slika 4.9.3: Frula 2 – D – šljiva, presvučena celuloidom –  $\Phi = 21$  mm*



*Slika 4.9.4: Frula 3 – G – crni dud –  $\Phi = 16$  mm*





*Slika 4.9.5: Frula 4 – A – šljiva, presvučena celuloidom –  $\Phi = 12.5$  mm*



*Slika 4.9.6: Frula 5 – C – šljiva, presvučena celuloidom –  $\Phi = 14.5$  mm*



*Slika 4.9.7: Frula 6 – C – glava dren, čep bagrem, cev mesing –  $\Phi = 12$  mm*



*Slika 4.9.8: Frula 7 – Es – glava plastika, cev prohrom čelik, presvučena celuloidom –  $\Phi = 9$  mm*



*Slika 4.9.9: Frula 8 – D – šimšir –  $\Phi = 10$  mm*



*Slika 4.9.10: Frula 9 – D – šljiva –  $\Phi = 12$  mm*



*Slika 4.9.11: Frula 10 – G – dren –  $\Phi = 10$  mm*

## 5.1 PONAŠANJE ZVUČNIH TALASA U FRULI

U ovom poglavlju će biti proučeno zvučno polje unutar cevi drvenih duvačkih instrumenata, sa posebnim osvrtom na frulu. Cev frule je otvorena na oba kraja (vazduh nesmetano struji na oba kraja) i ima rupice za sviranje cele lestvice. Potrebno je razmotriti i emisiju zvuka na kraju cevi i emisiju zvuka iz rupica za prste, da bi analiza bila potpunija.

### 5.1.1 CILINDRIČNA CEV BESKONAČNE DUŽINE

Najjednostavniji mogući sistem je beskonačna cev ili tuba sa osom paralelnom pravcu prostiranja ravanskog talasa kroz sredinu. Ako su zidovi cevi kruti, savršeno glatki i termički izolovani, onda prisustvo zidova cevi nema uticaja na prostiranje talasa [31].. Pritisak talasa koji se prostire u pravcu  $x$  – ose ima oblik:

$$p(x,t) = p e^{j(-kx+\omega t)}. \quad (5.1.1.1)$$

i rezultujući akustički protok je:

$$U(x,t) = \frac{Sp}{\rho c} e^{j(-kx+\omega t)}. \quad (5.1.1.2)$$

gde je:

- $\omega$  - kružna učestanost
- $k$  - ugaoni talasni broj ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$
- $S$  - unutrašnji poprečni presek cevi
- $\rho$  - gustina
- $c$  - brzina zvuka u vazduhu.

Akustička impedansa cevi u bilo kojoj tački na rastojanju  $x$  definisana je kao:

$$Z_0(x) = \frac{p(x,t)}{U(x,t)} = \frac{\rho c}{S}. \quad (5.1.1.3)$$

Da bismo detaljnije proučili ovaj problem, moramo da rešimo talasnu jednačinu u polarnom koordinatnom sistemu  $(r, \phi, x)$ [26]. Ako je  $a$  poluprečnik cevi i ako je površina cevi idealno kruta, onda je granični uslov:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \text{ za } r = a \quad (5.1.1.4)$$

što ukazuje da nema dodatnog pritiska i samim tim, nema protoka normalnog na zidove cevi. Talasna jednačina u cilindričnim koordinatama je:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (5.1.1.5)$$

Rešenje je:

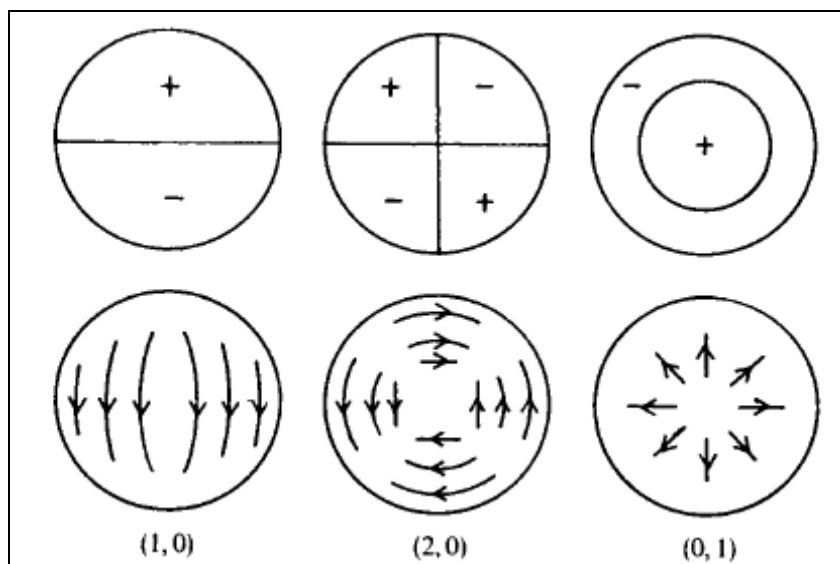
$$p_{mn}(r, \phi, x) = p_{\sin}^{\cos}(m\phi) J_m \left( \frac{\pi q_{mn} r}{a} \right) e^{j(-k_{mn} x + \omega t)}, \quad (5.1.1.6)$$

gde je:

-  $J_m$  - Beselova funkcija.

Veličina  $q_{mn}$  je definisana graničnim uslovom tako da je prvi izvod  $J_m'(\pi q_{mn})$  jednak nuli. Tako  $(m, n)$  stepen ima  $(r, \phi)$  oblik za akustički pritisak  $p$ , sa  $n$  nodalnih krugova i  $m$  nodalnih prečnika. Posmatrano u tri dimenzije ovo postaju nodalni cilindri, paralelni sa osama, i nodalne ravni, u pravcu osa, respektivno [37].

Na slici 5.1.1.1 dat je prikaz pritiska i brzine protoka za prva tri transverzalna stepena oscilovanja vazduha u cevi (stepen za ravanski talas nije prikazan). Pritisak ima nodalne linije kao što je već uočeno, a slične nodalne prečnike ima i transverzalna brzina protoka. Nodalni krugovi za pritisak pojavljuju se kod stepena  $(0, n)$ . Osnovni stepen  $(m, n)$  ima i nodalne linije i nodalne krugove, za pritisak.



Slika 5.1.1.1: Prikaz pritiska i brzine protoka za prva tri transverzalna stepena oscilovanja vazduha u cevi

Zamenom rešenja (5.1.1.6) u talasnu jednačinu (5.1.1.5) dobija se izraz za prostiranje talasnog vektora  $k_{mn}$  za stepen  $(m,n)$ :

$$k_{mn}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi q_{mn}}{a}\right)^2. \quad (5.1.1.7)$$

Dok će se stepen ravanskog talasa (najniži stepen oscilacija) sa  $m = n = 0$  uvek prostirati kao  $k = k_{00} = \omega/c$ , to ne mora nužno da bude tačno za više stepene. Da bi se prostirali viši stepeni  $(m,n)$ , frekvencija mora da dostigne kritični nivo:

$$\omega_c = \frac{\pi q_{mn} c}{a}. \quad (5.1.1.8)$$

Za frekvencije manje od  $\omega_c$ ,  $k_{mn}$  je imaginaran i talasna jednačina pokazuje da oscilacija opada eksponencijalno sa rastojanjem. Opadanje je naglo za frekvencije koje su znatno niže od frekvencije odsecanja i amplituda opada sa faktorom  $e$  (oko 10 dB) u okviru razdaljine manje od unutrašnjeg poluprečnika cevi [37].

Prvi sledeći stepen je nesimetričan  $(1,0)$ , ima jednu nodalnu ravan iznad frekvencije odsecanja  $\omega_c = 1.84 c/a$ . Sledeći stepen je  $(2,0)$ , sa dve nodalne ravni, za  $\omega > 3.05 c/a$ . Sledi najniži neravanski, aksijalni stepen  $(0,1)$ , za  $\omega > 3.80 c/a$ . Prostiranje viših stepena oscilovanja je moguće samo ako je prečnik cevi veći od oko 2/3 slobodne akustičke talasne dužine. Nepostojanje viših stepena oscilovanja pomaže da se objasni protok oko nepravilnosti zidova cevi, rupica za prste i usnika. Moguće je objasniti bilo kakav poremećaj koji se prenosi na ulazu ili na oscilujućim površinama u cevi odgovarajućom linearnom kombinacijom stepena oscilovanja cevi. Komponenta ravanskog

talasa ove kombinacije će se uvek prostirati duž cevi, udaljujući se od poremećaja. To neće važiti za stepene kod kojih su nivoi  $q_{mn}$  veliki. Tako će progresivni talas biti kao da je ulazni poremećaj propušten kroz filter propusnik niskih učestanosti, a neprogresivne oscilacije će samo modifikovati protok u okolini izvora poremećaja [22'].

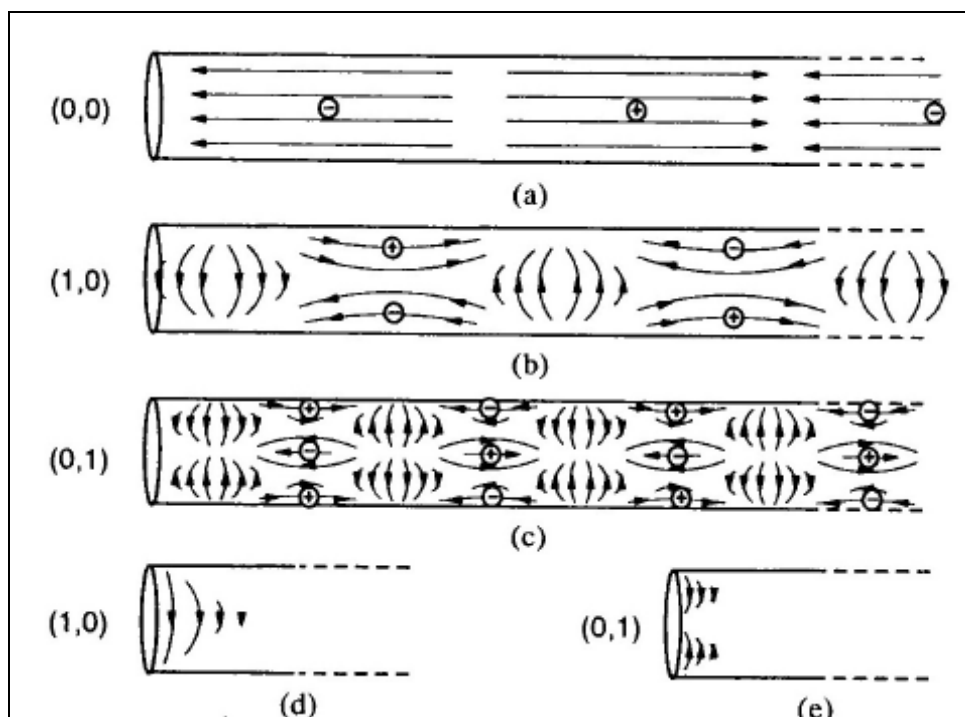
Prostiranje zvuka u cevi se može lakše zamisliti ako se nacrtaju trodimenzionalne linije akustičke brzine protoka. Oblik linija se može odrediti iz talasne jednačine i relacije:

$$u = \frac{j}{\rho\omega} \nabla p, \quad (5.1.1.9)$$

gde je:

- $u$  - brzina protoka za stepen oscilovanja na frekvenciji  $\omega$ .

Na slici 5.1.1.2 prikazane su linije akustičkog protoka za oscilacije  $(1,0)$  i  $(0,1)$ . U slučaju progresivnih oscilacija linije protoka se pomeraju duž cevi, nekom karakterističnom faznom brzinom oscilovanja. Brzina je približno jednaka brzini prostiranja zvuka  $c$ , osim blizu frekvencije odsecanja, gde je fazna brzina veća od  $c$ .



Slika 5.1.1.2: Linije akustičkog protoka i maksimuma i minimuma pritiska za više stepene oscilovanja u cilindričnoj cevi. (a)-(c) su oscilacije koje se prostiru udesno, na frekvenciji malo iznad frekvencije odsecanja. (d) i (e) su iščezavajuće oscilacije ispod frekvencije odsecanja.



Ponašanje impedanse viših stepena oscilovanja zavisi mnogo od geometrije. Impedansa je uvek realna funkcija pomnožena sa  $\omega/k_{mn}$ . To znači da ima realnu vrednost za  $\omega$  iznad frekvencije odsecanja, ima beskonačnu vrednost za frekvenciju odsecanja i ima imaginarnu vrednost za frekvencije ispod frekvencije odsecanja [26].

### 5.1.2 GUBICI U ZIDU CEVI MUZIČKOG INSTRUMENTA

U dosadašnjem izlaganju smo pretpostavili da su zidovi muzičkog instrumenta kruti i da nema nikakvih drugih poremećaja. U praksi je to nemoguće postići. Zidovi muzičkog instrumenta nikada nisu dovoljno kruti da bi se mehaničke vibracije mogle zanemariti. Još značajniji su termalni efekti i efekti viskoznosti na koje ni jedan realan muzički instrument nije neosetljiv.

Zidovi doprinose viskoznom otporu impedanse i ubrzanja vazduha u cevi [125']. Relativna vrednost otpora zavisi od debljine viskoznog graničnog sloja. Debljina viskoznog sloja zavisi od viskoznosti  $\eta$  i kružne frekvencije  $\omega$ . To se može predstaviti preko koeficijenta (odnos poluprečnika cevi i debljine graničnog sloja):

$$r_v = \sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}}a, \quad (5.1.2.1)$$

gde je:

- $\eta$  - viskoznost
- $a$  - poluprečnik cevi
- $\omega$  - kružna učestanost.

Termička razmena između vazduha i zidova dodaje otpornost gubitaka postojećoj elastičnosti vazduha. Relativna veličina ovih gubitaka zavisi od odnosa poluprečnika cevi  $a$  i debljine termičkog graničnog sloja, izraženo koeficijentom:

$$r_t = \sqrt{\frac{\omega\rho C_p}{k}}a, \quad (5.1.2.2)$$

gde je:

- $C_p$  - specifična toplota vazduha pri konstantnom pritisku

- $a$  - poluprečnik cevi
- $k$  - termalna provodnost.

Odnos  $(r_t/r_v)^2 = C_p \eta / k$  je Prandtlov broj [26]. Na temperaturi bliskoj sobnoj (300 K = 27°C) je :

$$r_v \approx 632.8a\sqrt{f}(1 - 0.0029\Delta T) \quad (5.1.2.3)$$

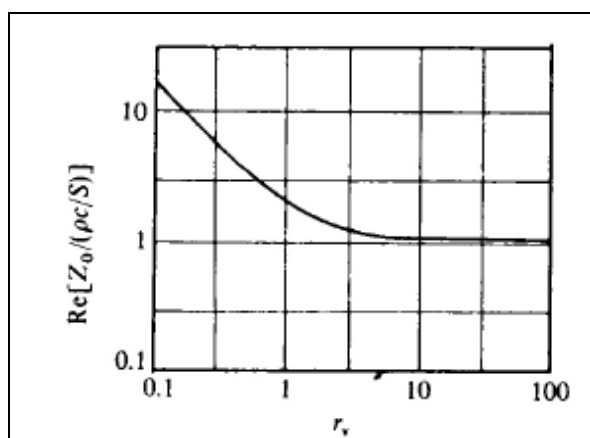
$$r_t \approx 532.8a\sqrt{f}(1 - 0.0031\Delta T), \quad (5.1.2.4)$$

gde je:

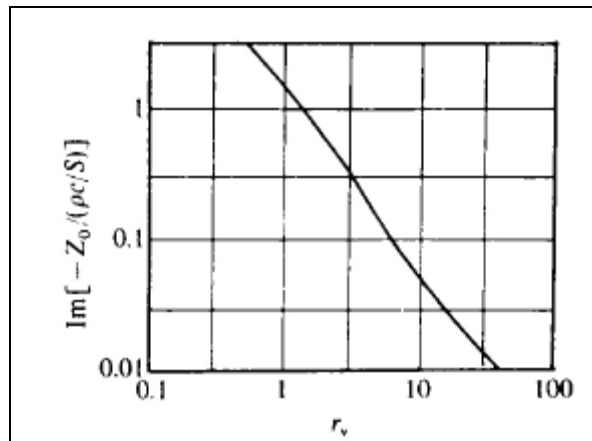
- $a$  - poluprečnik cevi izražen u metrima
- $f$  - frekvencija izražena u hercima
- $\Delta T$  - temperaturna razlika u odnosu na 300 K

Efekat ovih gubitaka je promena karakteristične impedanse cevi  $Z_0$  sa njene idealne realne vrednosti  $\rho c / S$  na kompleksnu veličinu. To čini talasni broj kompleksnim i dovodi do prigušenja talasa tokom prostiranja duž cevi.

Realan i imaginaran deo karakteristične impedanse  $Z_0$  prikazane su na slikama 5.1.2.1 i 5.1.2.2, obe u funkciji  $r_v$ . Korekcija impedanse je primetna za  $r_v < 10$ , dok su za  $r_v < 1$  realni i imaginarni deo  $Z_0$  skoro jednaki i menjaju se kao  $r_v^{-1}$ .



Slika 5.1.2.1: Realan deo karakteristične impedanse  $Z_0$ , u zavisnosti od parametra  $r_v$



Slika 5.1.2.2: *Imaginaran deo karakteristične impedanse  $Z_0$ , u zavisnosti od parametra  $r_v$*

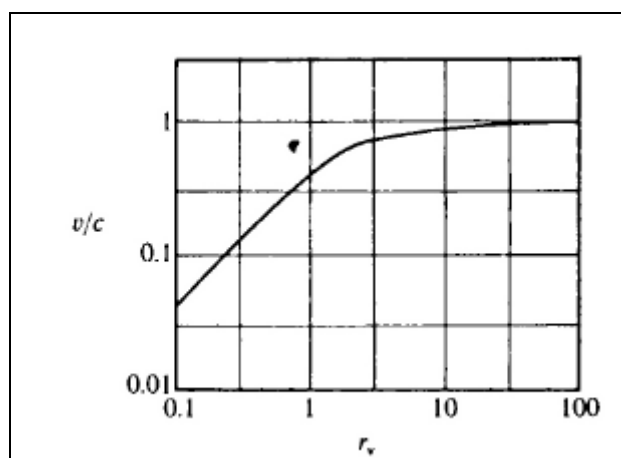
Talasni vektor  $k$  može da se napiše i u kompleksnom obliku:

$$k = \omega v - j\alpha \quad (5.1.2.5)$$

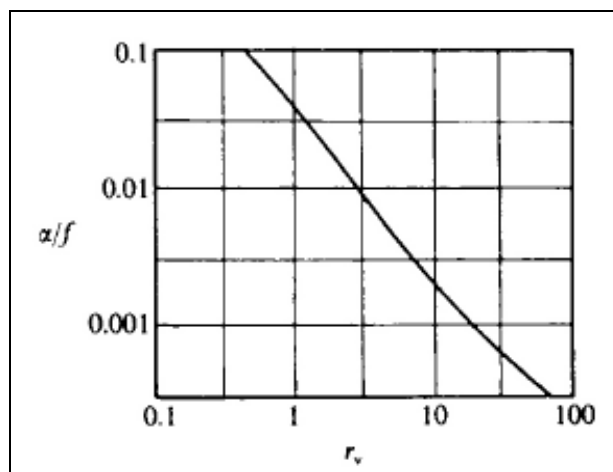
gde je:

- $\alpha$  - koeficijent prigušenja po jedinici dužine puta
- $v$  - fazna brzina.

Na slikama 5.1.2.3 i 5.1.2.4 prikazana je relativna fazna brzina i koeficijent prigušenja u zavisnosti od koeficijenta  $r_v$ .



Slika 5.1.2.3: *Zavisnost relativne fazne brzine od parametra  $r_v$*



Slika 5.1.2.4: Zavisnost koeficijenta prigušenja  $\alpha$  (izraženog u  $m^{-1}$ , mereno za frekvenciju  $f$ ), od parametra  $r_v$

Fazna brzina  $v$  je značajno manja od brzine zvuka u vazduhu  $c$  za cevi koje su toliko uske da je  $r_v < 10$ , dok koeficijent prigušenja dostiže  $\lambda^{-1}$  za  $r_v < 6$ . Za relativno široke cevi fazna brzina i koeficijent prigušenja su [3] od fundamentalnog značaja za fiziku muzičkih instrumenata. Zato ćemo da se podsetimo Benadove verzije Rajlijevih aproksimacionih formula [26], koje važe za  $r_v > 10$ , a primenjive su za  $r_v = 3$ :

$$v \approx c \left[ 1 - \frac{1}{r_v \sqrt{2}} - \frac{\gamma - 1}{r_t \sqrt{2}} \right] \approx c \left[ 1 - \frac{1.65 \times 10^{-3}}{a \sqrt{f}} \right] \quad (5.1.2.6)$$

$$\alpha \approx \frac{\omega}{c} \left[ \frac{1}{r_v \sqrt{2}} + \frac{\gamma - 1}{r_t \sqrt{2}} \right] \approx \frac{3 \times 10^{-5} \sqrt{f}}{a}, \quad (5.1.2.7)$$

gde je:

- $\alpha$  - koeficijent prigušenja izražen u  $m^{-1}$ , ako je poluprečnik  $a$  izražen u  $m$ .
- $\gamma$  - odnos specifičnih toplota  $C_p / C_v$ , koji za vazduh iznosi oko 1.40 .

U većini praktičnih razmatranja smatra se adekvatnom upotreba kompleksnog oblika za  $k$ , sa realnim i imaginarnim delom dobijenim iz Benadovih jednačina. Činjenica da  $Z_0$  ima mali imaginarni deo nije od presudnog značaja za glavne cevi muzičkih instrumenata [31].

Kada se razmatraju male cevi koje čine rupice za prste, neophodno je uraditi sveopštu analizu [125].

### 5.1.3 CILINDRIČNA CEV KONAČNE DUŽINE

Sve cevi muzičkih instrumenata su očigledno konačne dužine. Zato se mora razmotriti refleksija talasa od udljenog kraja cevi, bez obzira da li je cev zatvorena ili otvorena na tom kraju. Pošto nas cevi zanimaju više kao blisko spregnuti pobudni sistemi, a ne kao pasivni rezonatori, mi ćemo se baviti proračunom ulazne impedanse za konačne dužine cevi, zatvorene konačnom impedansom opterećenja.

Impedansa opterećenja  $Z_L$  obično predstavlja otvoreni ili zatvoreni kraj cevi. Uzmimo da se cev prostire od  $x = 0$  do  $x = L$  i da je na  $x = L$  zatvorena impedansom  $Z_L$ . Pritisak u cevi čini superpozicija dva talasa koji se kreću desno i levo, respektivno. Amplitude talasa A i B uzete su kao kompleksne vrednosti tako da mogu da uključe i faktor faznog pomeraja. Tako je u tački  $x$ :

$$p(x,t) = [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\omega t}. \quad (5.1.3.1)$$

Ako se pretpostavi da je akustička brzina čestica superpozicija brzine čestica i ova dva talasa, za akustički protok se dobije:

$$U(x,t) = \frac{S}{\rho c} [Ae^{-jkx} - Be^{jkx}]e^{j\omega t}. \quad (5.1.3.2)$$

Na udaljenom kraju cevi  $x = L$  pritisak i protok su povezani preko granične impedanse:

$$\frac{p(L,t)}{U(L,t)} = Z_L. \quad (5.1.3.3)$$

Ova jednačina je dovoljna da definiše kompleksni odnos amplituda talasa  $B/A$ . Ako za karakterističnu impedansu cevi napišemo:

$$Z_0 = \frac{\rho c}{S}, \quad (5.1.3.4)$$

za odnos amplituda dobije se:

$$\frac{B}{A} = e^{-2jkL} \left[ \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right]. \quad (5.1.3.5)$$

Odnos reflektovane i ulazne snage je:

$$R = \left| \frac{B}{A} \right|^2 = \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|^2. \quad (5.1.3.6)$$

Iz prethodnog izraza se vidi da refleksija ne postoji ako je  $Z_L = Z_0$  i da je refleksija maksimalna ako je  $Z_L = 0$  ili  $Z_L = \infty$ . Pošto je  $Z_0$  realna za cevi bez gubitaka, potpuna refleksija nastaje i kada je  $Z_L$  čisto imaginarna. Ako  $Z_L$  ima realan deo koji nije nula (nije čisto imaginarna), onda će uvek postojati gubici refleksije.

Nas takođe interesuje i ulazna impedansa za  $x = 0$ . Iz jednačina za pritisak i karakterističnu impedansu za ulaznu impedansu dobije se:

$$Z_u = Z_0 \left[ \frac{A+B}{A-B} \right]. \quad (5.1.3.7)$$

Iz jednačine (5.1.3.5) za odnos amplituda, dobije se:

$$Z_u = Z_0 \frac{Z_L \cos kL + jZ_0 \sin kL}{jZ_L \sin kL + Z_0 \cos kL}. \quad (5.1.3.8)$$

Postoje dva idealna slučaja. Prvi odgovara cevi koja se naglo završava na  $x = L$  tako da je  $Z_L = \infty$ . Za ovakvu cev:

$$Z_u^s = -jZ_0 \operatorname{ctg} kL. \quad (5.1.3.9)$$

Drugi idealan slučaj je potpuno suprotan, odgovara idealno otvorenoj cevi, tako da je  $Z_L = 0$ :

$$Z_u^o = jZ_0 \operatorname{tg} kL. \quad (5.1.3.10)$$

Ako primenimo idealizovan uslov da je ulazni kraj cevi za  $x = 0$  takođe otvoren, dobiju se rezonantne frekvencije za otvorenu i zavorenu cev. Ako je cev otvorena na udaljenom kraju, rezonancija nastupa za ulaznu impedansu  $Z_u = 0$ . Za cev zatvorenu na udaljenom kraju, rezonancija nastupa za  $\operatorname{ctg} kL = 0$ :

$$\omega^s = \frac{(2n-1)\pi c}{2L}. \quad (5.1.3.11)$$

Ovo odgovara neparnom broju četvrtina talasne dužine za dužinu cevi.  
 Za idealno otvorenu cev  $tg kL = 0$  :

$$\omega^o = \frac{n\pi c}{L}. \quad (5.1.3.12)$$

Ovo odgovara parnom broju četvrtina talasne dužine (ili bilo kojem broju polovina talasne dužine) za dužinu cevi [3'].

Jednačina za ulaznu impedansu se potpuno korektno može primeniti na slučaj cevi fizički zatvorene na jednom kraju. Slučaj otvorene cevi je složeniji. Iako je  $Z_L \ll Z_0$ , nije dovoljno  $Z_L$  aproksimirati sa nulom. Bolje je proračunati impedansu zračenja  $Z_L$  cevi završene u ravni dimenzija mnogo većih od talasne dužine (praktično beskonačne ravni). Po Rajliju, Morsu i Olsonu [26], pretpostavka je da je talasni front na otvorenom kraju cevi potpuno ravan. Veoma dobrom aproksimacijom dobije se da je:

$$Z^f = R + jX, \quad (5.1.3.13)$$

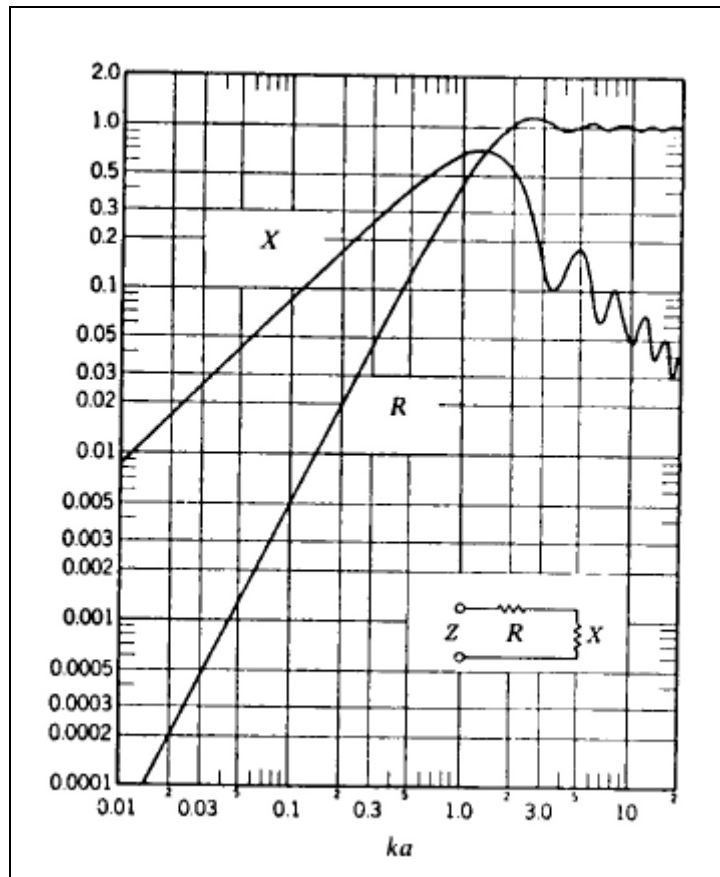
$$R = Z_0 \left[ \frac{(ka)^2}{2} - \frac{(ka)^4}{2^2 - 3} + \frac{(ka)^6}{2^2 - 3^2 - 4} - \dots \right] \quad (5.1.3.14)$$

$$X = \frac{Z_0}{\pi k^2 a^2} \left[ \frac{(2ka)^3}{3} - \frac{(2ka)^5}{3^2 - 5} + \frac{(2ka)^7}{2^2 - 5^2 - 7} - \dots \right], \quad (5.1.3.15)$$

gde je:

-  $a$  - poluprečnik cevi

Na slici 5.1.3.1 prikazana je zavisnost  $R$  i  $X$  od frekvencije, gde je frekvencija izražena preko bezdimenzionalne veličine  $ka$ . Sa slike se može videti da ako je  $ka \ll 1$ ,  $Z_f \ll Z_0$  i većina talasne energije se reflektuje od otvorenog kraja. Ako je  $ka > 2$ , onda je  $Z_f \approx Z_0$  i većina talasne energije se prostire iz cevi instrumenta u spoljašnju sredinu. ( $Z_f$  je impedansa zračenja cevi završene u beskonačnoj ravni.)



Slika 5.1.3.1: Zavisnost akustičke otpornosti i reaktanse (obe izražene po  $\rho c/\pi a^2$ ) otvorene cevi poluprečnika  $a$  u beskonačnoj ravni od parametra  $ka$

Kod muzičkih instrumenata barem osnovni harmonik ima  $ka \ll 1$  (ne mora da važi i za sve više harmonike). Zato je korisno ispitati ponašanje cevi u području ovih nižih učestanosti. Za  $ka \ll 1$  je  $X \gg R$ , pa iz jednačina za  $R$  i  $X$  sledi:

$$Z^f \approx jZ_0 k \frac{8a}{3\pi}. \quad (5.1.3.16)$$

Ovo je tačno impedansa idealno otvorene kratke cevi dužine:

$$\Delta^f = 8a / 3\pi \approx 0.85 a \quad (5.1.3.17)$$

Ovo je dovoljno dobra aproksimacija u ovom frekvencijskom opsegu da može da zameni realnu cev završenu u beskonačnoj ravni sa idealnom otvorenom cevi dužine  $L + \Delta^f$ , i da se zanemare gubici zračenja. Korekcija krajeva  $\Delta^f$ , proporcionalna je  $X/ka$ , polako opada kako  $ka \rightarrow 1$ , a opada sve više kada  $ka$  premaši ovu vrednost.



Realna cev generalno nije završena u beskonačnoj ravni i potrebno nam je da znamo kako se ponaša impedansa opterećenja u tom slučaju. Ovaj proračun je veoma složen, ali je rezultat veoma približan [26], kao i za cev završenu u ravni. Osnovna razlika je da je za  $ka \ll 1$ ,  $R$  smanjeno za faktor 0.5 i  $X$  za faktor 0.7 jer talas izvan cevi nastoji da se prostire pod punim prostornim uglom ( $4\pi$ , a ne samo  $2\pi$ ).

Tako se za korekciju krajeva cevi na niskim frekvencijama dobija

$$\Delta \approx 0.61 a. \quad (5.1.3.18)$$

## 5.2.1 KVANTNA TEORIJA INDIVIDUALNOG FONONA

Mehaničke vibracije su poznate kvantnoj fizici od pre mnogo godina. Kvanti mehaničkih vibracija se nazivaju fononi i tretirani su kvantnomehanički, uglavnom u statističkim proračunima i problemima. Fononi se tretiraju Bozeovim operatorom i zadovoljavaju Boze – Ajnštajnovu statistiku [1]. U teoriji čvrstog stanja proučavane su interakcije drugih elementarnih pobuda sa fononima.

Kvantna teorija fonona je široko razvijena i primenjena. Sa druge strane, individualne karakteristike fonona su nedovoljno proučene. Da bi se to pokazalo, može se poći od formule za kinetičku energiju mehaničkih vibracija u malom opsegu momenta:

$$E = \pm u \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (5.2.1.1)$$

gde je:

- $u$  - prosečna brzina prostiranja fonona
- $p_x, p_y$  i  $p_z$  - komponente momenta

Kada prikažemo Hamiltonijan:

$$\hat{H} = \pm u \sqrt{\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2} \quad (5.2.1.2)$$

gde je  $\hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ ,  $\hat{p}_y = -i\hbar \frac{\partial}{\partial y}$  i  $\hat{p}_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial z}$ , može se zaključiti da nije linearni operator i ne može se upotrebiti u kvantnim problemima u vezi sa individualnim fononom. Neophodno je linearizovati operator  $\hat{H}$ . Kao posledica linearizacije, ispostavlja se da fonon poseduje ukupni momenat kao integral kretanja, da Šredingerova jednačina za fonon prelazi u klasičnu jednačinu za oscilovanje.

### 5.2.1.1 LINEARIZACIJA HAMILTONIJANA FONONA I ŠREDINGEROVA JEDNAČINA ZA INDIVIDUALNI FONON

U prvoj fazi treba linearizovati Hamiltonijan pomoću transformacije:

$$\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2 = (\hat{\alpha}\hat{p}_x + \hat{\beta}\hat{p}_y + \hat{\gamma}\hat{p}_z)^2 \quad (5.2.1.1.3)$$

To je moguće postići ako su  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  i  $\hat{\gamma}$   $2 \times 2$  Paulijeve matrice. Tako je:

$$\hat{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \hat{\beta} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \text{i} \quad \hat{\gamma} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} . \quad (5.2.1.1.4)$$

Za ove matrice važi pravilo komutacije:

$$[\hat{\alpha}, \hat{\beta}] = 2i\hat{\gamma} \quad , \quad [\hat{\gamma}, \hat{\alpha}] = 2i\hat{\beta} \quad . \quad [\hat{\beta}, \hat{\gamma}] = 2i\hat{\alpha} \quad . \quad (5.2.1.1.5)$$

Kada izračunamo prethodno izneto, dobijemo Hamiltonijan fonona kao linearan operator:

$$\hat{H} = \pm u \begin{pmatrix} \hat{p}_z & \hat{p}_x - i\hat{p}_y \\ \hat{p}_x + i\hat{p}_y & -\hat{p}_z \end{pmatrix} = \mp i\hbar u \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} - i\frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} + i\frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (5.2.1.1.6)$$

Pošto je linearizovani Hamiltonijan matrica 2 x 2, stanje fonona će biti kolona  $\begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix}$  i red  $(\Psi_1^* \ \Psi_2^*)$  navedene matrice. Odavde sledi da je gustina verovatnoće :

$$\rho = (\Psi_1^* \ \Psi_2^*) \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix} = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 , \quad (5.2.1.1.7)$$

dok je verovatnoća gustine struje fonona:

$$j = \frac{\hbar}{2mi} \left[ (\Psi_1^* \ \Psi_2^*) \begin{pmatrix} \nabla \Psi_1 \\ \nabla \Psi_2 \end{pmatrix} - (\Psi_1 \ \Psi_2) \begin{pmatrix} \nabla \Psi_1^* \\ \nabla \Psi_2^* \end{pmatrix} \right] \quad (5.2.1.1.8)$$

U sledećoj fazi je data forma Šredingerove jednačine za fonon. Na osnovu linearizovanog oblika Hamiltonijana (5.2.1.1.6), Šredingerova jednačina ima oblik:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Psi_1(x, y, z, t) \\ \Psi_2(x, y, z, t) \end{pmatrix} = -i\hbar u \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} - i\frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} + i\frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_1(x, y, z, t) \\ \Psi_2(x, y, z, t) \end{pmatrix} \quad (5.2.1.1.9)$$

gde su:  $\frac{\partial}{\partial t} = D_t$  ,  $\frac{\partial}{\partial z} = D_z$  ,  $\frac{\partial}{\partial x} + i\frac{\partial}{\partial y} = D_{xy}$  ,  $\frac{\partial}{\partial x} - i\frac{\partial}{\partial y} = D_{xy}^*$  . (5.2.1.1.10)

Kada se ovi operatori zamene u prethodno navedenu Šredingerovu jednačinu

(5.2.1.1.9), dobija se sistem od dve jednačine:

$$(D_t + uD_z)\Psi_1(x, y, z, t) + uD_{xy}^*\Psi_2(x, y, z, t) = 0 \quad (5.2.1.1.11)$$

$$uD_{xy}\Psi_1(x, y, z, t) + (D_t - uD_z)\Psi_2(x, y, z, t) = 0. \quad (5.2.1.1.12)$$

Iz druge jednačine navedenog sistema (5.2.1.1.12) dobije se:

$$\Psi_2(x, y, z, t) = -(D_t - uD_z)^{-1}uD_{xy}\Psi_1(x, y, z, t). \quad (5.2.1.1.13)$$

Kada ovu talasnu funkciju uvedemo u prvu jednačinu navedenog sistema (5.2.1.1.11) i unesemo u proračun da je:

$$[D_t, D_z] = [D_t, D_{xy}] = [D_t, D_{xy}^*] = [D_z, D_{xy}] = [D_z, D_{xy}^*] = 0, \quad (5.2.1.1.14)$$

dobija se za komponentu  $\Psi_1$  jednačina hiperbole:

$$\frac{\partial^2 \Psi_1(x, y, z, t)}{\partial t^2} - u^2 \left( \frac{\partial^2 \Psi_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (5.2.1.1.15)$$

koja je formalno identična sa klasičnom jednačinom mehaničkih vibracija. Ako iz prve jednačine gore navedenog sistema (5.2.1.1.11) uzmemo da je :

$$\Psi_1 = (D_t + uD_z)^{-1} = -uD_{xy}^*\Psi_2 \quad (5.2.1.1.16)$$

i zamenimo u drugu jednačinu tog sistema (5.2.1.1.12), na isti način se dobije :

$$\frac{\partial^2 \Psi_2(x, y, z, t)}{\partial t^2} - u^2 \left( \frac{\partial^2 \Psi_2(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (5.2.1.1.17)$$

Jednačine za  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$  su formalno identične i obe imaju isti oblik kao jednačina klasičnih vibracija. Rešenja ovih Šredingerovih jednačina su ravanski talasi:

$$\Psi_1 = D_1 e^{+ik\vec{r} - iukt} \quad (5.2.1.1.18)$$

$$\Psi_2 = D_2 e^{-ik\vec{r} + iukt} \quad (5.2.1.1.19)$$

gde su:

-  $D_1$  i  $D_2$  - proizvoljne konstante.

To znači da rešenje Šredingerove jednačine fonona može biti napisano u obliku:

$$\hat{\Psi} = \begin{pmatrix} D_1 e^{i\vec{k}\vec{r} - i\omega t} \\ D_2 e^{-i\vec{k}\vec{r} + i\omega t} \end{pmatrix} . \quad (5.2.1.1.20)$$

### 5.2.1.2 INTEGRAL KRETANJA FONONA

Poznato je da u nerelativističkoj kvantnoj mehanici operator ugaonog momenta

$$\hat{L} = \hat{\vec{r}} \times \hat{\vec{p}} = \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x & y & z \\ \hat{p}_x & \hat{p}_y & \hat{p}_z \end{pmatrix} \quad (5.2.1.2.1)$$

može biti zamenjen Hamiltonijanom elektrona i predstavljati integral kretanja nerelativističkog elektrona.

U relativističkoj Dirakovoj teoriji elektrona, ugaoni momenat nije integral kretanja. Integral kretanja relativističkog elektrona je ukupni momenat  $\hat{J}$  koji predstavlja sumu ugaonih momenata  $\hat{L}$  i momenta spina  $\hat{S}$ .

Pošto je Hamiltonijan fonona sličan Hamiltonijanu relativističkog elektrona, prihvatljivo je da integral kretanja fonona ne bude ugaoni momenat, već ukupni momenat [109]. Ova pretpostavka se može dokazati.

Ako se pođe od komutacionih pravila za operator spina:

$$[S^x, S^y] = i\hbar S^z, \quad [S^z, S^x] = i\hbar S^y, \quad [S^y, S^z] = i\hbar S^x \quad (5.2.1.2.2)$$

može se utvrditi da je veza između Paulijevih matrica i komponenta spina:

$$\hat{\alpha} = \frac{2}{\hbar} \hat{S}^x, \quad \hat{\beta} = \frac{2}{\hbar} \hat{S}^y, \quad \hat{\gamma} = \frac{2}{\hbar} \hat{S}^z. \quad (5.2.1.2.3)$$

Tako se Hamiltonijan fonona može izraziti u funkciji operatora spina:

$$\hat{H} = \pm \frac{2}{\hbar} u (\hat{S}^x \hat{p}_x + \hat{S}^y \hat{p}_y + \hat{S}^z \hat{p}_z) . \quad (5.2.1.2.4)$$

Zamenom komponentata spina u Hamiltonijanu (zamenjeni su moment spina  $\hat{S}$  i translacioni moment  $\hat{p}$ ), dobija se:

$$[\hat{S}^x, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^z \hat{p}_y - \hat{S}^y \hat{p}_z) \quad (5.2.1.2.5)$$

$$[\hat{S}^y, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^x \hat{p}_z - \hat{S}^z \hat{p}_x) \quad (5.2.1.2.6)$$

$$[\hat{S}^z, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^y \hat{p}_x - \hat{S}^x \hat{p}_y) . \quad (5.2.1.2.7)$$

Vidi se da spin nije integral kretanja fonona.

U daljem tekstu će biti razmotrena zamena komponentata ugaonog momenta  $\hat{L}_x = y\hat{p}_z - z\hat{p}_y$ ,  $\hat{L}_y = z\hat{p}_x - x\hat{p}_z$  i  $\hat{L}_z = x\hat{p}_y - y\hat{p}_x$  Hamiltonijanom izraženim preko operatora spina [1]. U proračun je uneto da je:

$$[x, \hat{p}_x] = [y, \hat{p}_y] = [z, \hat{p}_z] = i\hbar . \quad (5.2.1.2.8)$$

Dobija se:

$$[\hat{L}_x, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^y \hat{p}_z - \hat{S}^z \hat{p}_y) \quad (5.2.1.2.9)$$

$$[\hat{L}_y, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^z \hat{p}_x - \hat{S}^x \hat{p}_z) \quad (5.2.1.2.10)$$

$$[\hat{L}_z, \hat{H}] = 2iu(\hat{S}^x \hat{p}_y - \hat{S}^y \hat{p}_x) , \quad (5.2.1.2.11)$$

iz čega sledi da ugaoni moment nije integral kretanja fonona.

Sumiranjem prvih, drugih i trećih jednačina za moment spina i ugaoni moment, respektivno, dobije se:

$$[(\hat{L}_x + \hat{S}_x), \hat{H}] = [(\hat{L}_y + \hat{S}_y), \hat{H}] = [(\hat{L}_z + \hat{S}_z), \hat{H}] = 0 . \quad (5.2.1.2.12)$$

Ovo je dokaz da ukupni moment, čije su komponente :  $\hat{J}_x = \hat{L}_x + \hat{S}_x$ ,  $\hat{J}_y = \hat{L}_y + \hat{S}_y$  i  $\hat{J}_z = \hat{L}_z + \hat{S}_z$  može biti zamenjen Hamiltonijanom fonona i, posledično, predstavlja integral kretanja fonona.

### 5.2.1.3 PROBLEM PRIMENE KOMUTACIONIH RELACIJA ZA FONONE

Izložene karakteristike i formule za individualni fonon izrodile su veoma ozbiljan problem primene kinematike fonona u različitim analizama fonona i sistemima u kojima su predstavljeni fononi. Opšte je poznato da se u problemima mehaničkih oscilacija komutaciono pravilo  $[u, p] = i\hbar$  koristi svugde (naučni radovi, knjige, itd.), čak i u slučajevima gde je  $u$  intenzitet vektora pomeraja  $\vec{u}$  i  $p$  je intenzitet vektora  $\vec{p}$ . Intenziteti pomenutih vektora su:  $|\vec{u}| \equiv u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$  i  $|\vec{p}| \equiv p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}$ , i jasno je da oni nisu linearni operatori. Zato ne mogu biti upotrebljeni u rešavanju kvantnomehaničkih problema. Moraju biti linearizovani, i to se može postići transformacijom sume kvadrata u kvadrat sume. U ovom slučaju linearizovani operatori  $u$  i  $p$  su kvadratne matrice:

$$\hat{u} = \pm \begin{pmatrix} u_z & u_x - iu_y \\ u_x - iu_y & u_z \end{pmatrix}, \quad \hat{p} = \pm \begin{pmatrix} p_z & p_x - ip_y \\ p_x - ip_y & p_z \end{pmatrix}. \quad (5.2.1.3.1)$$

Treba istaći da će, zbog veće jasnoće, u daljem tekstu samo kvadratne matrice biti pisane sa simbolom kapice (^).

U poređenju sa  $[u, p] = i\hbar$  može se očekivati da komutator linearizovanih operatora  $\hat{u}$  i  $\hat{p}$  ima formu:

$$[\hat{u}, \hat{p}] = i\hbar \hat{\delta}, \quad (5.2.1.3.2)$$

gde je:

-  $\hat{\delta}$  - jedinična kvadratna matrica.

Ispostavlja se da je:

$$[\hat{u}, \hat{p}] = \begin{pmatrix} A - iB & C + iD \\ C - iD & A + iB \end{pmatrix}, \quad (5.2.1.3.3)$$

gde je:

$$A = [u_x, p_x] + [u_y, p_y] + [u_z, p_z] = 3i\hbar \quad (5.2.1.3.4)$$

$$B = \{u_x, p_y\} - \{p_x, u_y\} \quad (5.2.1.3.5)$$

$$C = \{u_z, p_x\} - \{u_x, p_z\} \quad (5.2.1.3.6)$$

$$D = \{u_y, p_z\} - \{u_z, p_y\} \quad (5.2.1.3.7)$$

i da je:

$$\{\alpha, \beta\} = \alpha\beta + \beta\alpha \quad (5.2.1.3.8)$$

Vidi se da je komutator za kvadratne matrice operatora  $\hat{u}$  i  $\hat{p}$  приметно drugačiji od  $[\hat{u}, \hat{p}] = i\hbar\hat{\delta}$ .

U potrazi za nesvodljivim oblikom za matricu operatora  $\bar{u}$  i  $\bar{p}$ , dobija se dijagonalna matrica sledećeg oblika:

$$[\hat{u}, \hat{p}] = \begin{pmatrix} A + \sqrt{C^2 + D^2 - A^2} & 0 \\ 0 & A + \sqrt{C^2 + D^2 - A^2} \end{pmatrix}, \quad (5.2.1.3.9)$$

koja se takođe razlikuje od  $[\hat{u}, \hat{p}] = i\hbar\hat{\delta}$ .

Ispitano je i komutaciono pravilo za ravanske vektore  $\bar{u}$  i  $\bar{p}$ , gde je  $|\bar{u}| \equiv u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$  i  $|\bar{p}| \equiv p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ . Linearizovani oblici operatora  $\bar{u}$  i  $\bar{p}$  su:

$$\hat{u} = \pm \begin{pmatrix} u_x & u_y \\ u_y & -u_x \end{pmatrix} \quad \text{i} \quad \hat{p} = \pm \begin{pmatrix} p_x & p_y \\ p_y & -p_x \end{pmatrix} \quad (5.2.1.3.10)$$

i njihov komutator je dat kao:

$$[\hat{u}, \hat{p}] = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}, \quad (5.2.1.3.11)$$

gde je:

$$a = [u_x, p_x] + [u_y, p_y] = 2i\hbar \quad (5.2.1.3.12)$$

Dijagonalna forma komutatora je:

$$[\hat{u}, \hat{p}] = \begin{pmatrix} a + ib & 0 \\ 0 & a - ib \end{pmatrix}. \quad (5.2.1.3.13)$$

To znači da se, čak i u slučaju ravanskih vektora  $\bar{u}$  i  $\bar{p}$ , komutator njihovih intenziteta razlikuje od očekivanih nivoa  $[\hat{u}, \hat{p}] = i\hbar\hat{\delta}$ .



Ova kratka analiza ukazuje da primena kinematike fonona u kvantnim problemima zahteva ozbiljnu reviziju. Po našem mišljenju, komutaciono pravilo  $[u, p] = i\hbar$ , koje se uobičajeno upotrebljava, je automatski preneto iz klasične teorije Poasonovih zagrada, po kojoj linearnost posmatranih veličina nije neophodna. Prihvatanje komutacionih relacija  $[u, p] = i\hbar$ , u skladu sa prethodnim izlaganjem, zahteva dodatna objašnjenja, pošto su rezultati dobijeni primenom ovog pravila manje – više ispravni.

## 5.2.2 PONAŠANJE ZVUČNIH TALASA U FRULI ZASNOVANO NA KVANTNOJ TEORIJI INDIVIDUALNOG FONONA

U prethodnom izlaganju iznete su esencijalne formule koje karakterišu kvantne osobine individualnog fonona. Operator kinetičke energije individualnog fonona  $\hat{H} = \pm u \sqrt{\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2}$  nije linearan i mora biti linearizovan. Operator  $\hat{H}$  je matrica:

$$\hat{H} = \pm u \begin{pmatrix} \hat{p}_z & \hat{p}_x - i\hat{p}_y \\ \hat{p}_x + i\hat{p}_y & -\hat{p}_z \end{pmatrix} \quad (5.2.2.1)$$

Pokazano je da fonon poseduje ugaoni momenat i spin i da je njegovo integralno kretanje (ukupni momenat) jednako sumi ugaonog momenta i spina. Hamiltonijan fonona može biti izražen u linearnoj formi preko operatora momenta i spina:

$$\hat{H} = \pm \frac{2}{\hbar} u (\hat{S}^x \hat{p}_x + \hat{S}^y \hat{p}_y + \hat{S}^z \hat{p}_z) \quad (5.2.2.2)$$

Najvažnija činjenica na osnovu koje je kvantna teorija individualnog fonona primenjena u proučavanju teorije zvuka je ta da je Šredingerova jednačina za individualni fonon identična sa klasičnom jednačinom mehaničkih vibracija:

$$\frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial t^2} - u \Delta \Psi_i = 0 \quad (5.2.2.3)$$

gde  $i=1,2$  označava komponente talasnog vektora individualnog fonona [1]. Navedene formule su primenjene u analizi nekih zvučnih pojava koje nastaju kod duvačkog muzičkog instrumenta kome je cev paralelopipednog ili cilindričnog oblika.

### 5.2.2.1 PROSTIRANJE ZVUKA KROZ LINEARAN MUZIČKI INSTRUMENT OTVOREN NA OBA KRAJA

Šredingerova jednačina za individualan fonon je hiperboličnog tipa kao i klasična talasna jednačina.

Pošto je Hamiltonijan linearizovanog fonona kvadratna matrica i sastoji se od kolona i redova, Šredingerova jednačina za individualni fonon može se napisati kao:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \Psi_1(x, y, z, t) \\ \Psi_2(x, y, z, t) \end{pmatrix} = -i\hbar u \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} & -\frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_1(x, y, z, t) \\ \Psi_2(x, y, z, t) \end{pmatrix} \quad (5.2.2.1.1)$$

Ako uvedemo operatore:

$$\frac{\partial}{\partial t} = D_t \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial z} = D_z \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} = D_{xy} \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} = D_{xy}^* \quad (5.2.2.1.2)$$

Prethodna jednačina se može svesti na sistem parcijalnih jednačina

$$\begin{aligned} (D_t + uD_z)\Psi_1(x, y, z, t) - uD_{xy}^*(D_t - uD_z)^{-1}uD_{xy}\Psi_1(x, y, z, t) = \\ = (D_t + uD_z)\Psi_1(x, y, z, t) - u^2(D_t - uD_z)^{-1}D_{xy}^*D_{xy}\Psi_1(x, y, z, t) = 0 \end{aligned} \quad (5.2.2.1.3)$$

iz kojih se mogu dobiti izrazi za  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$ , komponente talasnog vektora individualnog fonona

$$\frac{\partial^2 \Psi_s(x, y, z, t)}{\partial t^2} - u^2 \left( \frac{\partial^2 \Psi_s(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_s(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_s(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) = 0 \quad ; \quad s = 1, 2 \quad (5.2.2.1.4)$$

Dobijena jednačina je jednačina hiperbole i njen oblik je identičan sa oblikom klasične jednačine talasnog prostiranja.

U ovoj analizi je proučavan duvački muzički instrument frula. Dužina frule  $L$  je značajno veća od unutrašnjeg prečnika frule i zato se frula može smatrati linearnom strukturom gde talasna funkcija zavisi samo od  $z$  i  $t$ . To znači da se za frulu može napisati:

$$\frac{\partial^2 \Psi(z, t)}{\partial t^2} = u^2 \frac{\partial^2 \Psi(z, t)}{\partial z^2} \quad (5.2.2.1.5)$$

Pošto je frula po konstrukciji cev otvorena na oba kraja, granični uslovi [109] su:

$$\frac{d\Psi}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_1 \Psi(0, t) \quad ; \quad \frac{d\Psi}{dx} \Big|_{x=L} = -\lambda_2 \Psi(L, t) \quad (5.2.2.1.6)$$

gde je:

- $L$  - dužina frule
- $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  - pozitivni koeficijenti proporcionalnosti.

Talasna jednačina je rešena D'alambertovim metodom, što znači da je prevedena u sistem linearnih parcijalnih jednačina

$$\frac{\partial \Psi(z,t)}{\partial t} - u \frac{\partial \Psi(z,t)}{\partial z} = 0 \quad (5.2.2.1.7)$$

$$\frac{\partial \Psi(z,t)}{\partial t} + u \frac{\partial \Psi(z,t)}{\partial z} = 0 \quad (5.2.2.1.8)$$

čija su rešenja, respektivno,:

$$\Psi_I = f_1(ut - z) \quad ; \quad \Psi_{II} = f_2(ut + z) \quad (5.2.2.1.9)$$

gde su:

-  $f_1$  i  $f_2$  - proizvoljne funkcije.

Uzimajući u obzir da smo Šredingerovu jednačinu rešili za slobodan fonon koji ima samo kinetičku energiju, smatraćemo da su  $f_1$  i  $f_2$  ravanski talasi

$$f_1 = e^{ik(ut-z)} \quad ; \quad f_2 = e^{ik(ut+z)} \quad (5.2.2.1.10)$$

Da bi granični uslovi bili zadovoljeni, uzima se za rešenje jednačine linearna kombinaciju ravanskih talasa  $f_1$  i  $f_2$ :

$$\Psi(z,t) = C_1 e^{ik(ut-z)} + C_2 e^{ik(ut+z)} \quad (5.2.2.1.11)$$

Smenom se dobija sistem homogenih jednačina:

$$(\lambda_1 + ik)C_1 + (\lambda_1 - ik)C_2 = 0 \quad (5.2.2.1.12)$$

$$(-\lambda_2 + ik)C_1 e^{-ikL} - (\lambda_2 + ik)C_2 e^{ikL} = 0 \quad (5.2.2.1.13)$$

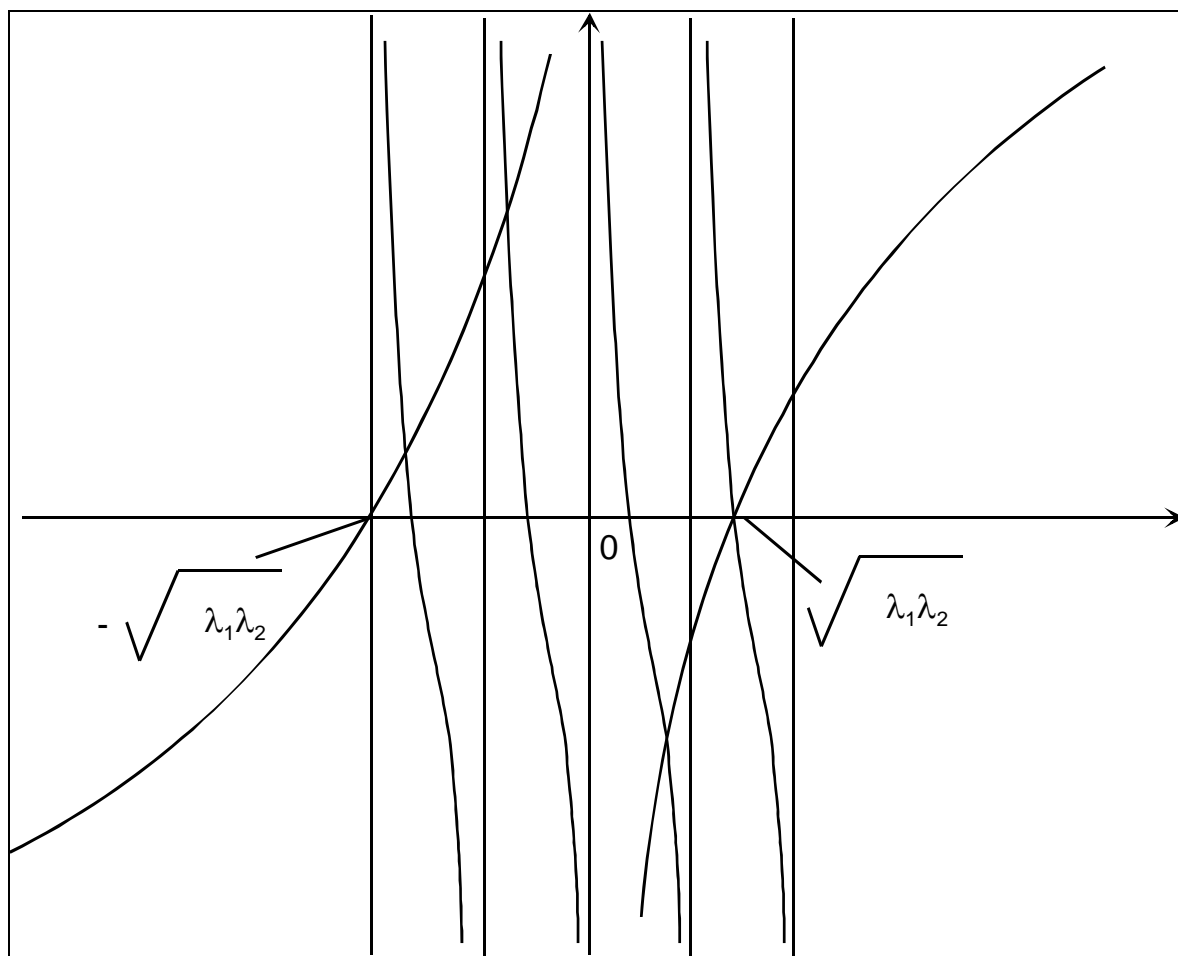
gde su:

-  $C_1$  i  $C_2$  - konstante.

Kada se sekularna jednačina sistema izjednači sa nulom, dobije se transcendentalna jednačina koja definiše talasni vektor  $k$  individualnog fonona u fruli

$$\operatorname{ctg}kL = \frac{k^2 - \lambda_1\lambda_2}{k(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (5.2.2.1.14)$$

Na slici 5.2.2.1.1 je dat grafički prikaz vektora  $k$  u intervalu  $(0, \pi)$ .



Slika 5.2.2.1.1: Dijagram za određivanje dozvoljenih vrednosti  $k_n$ ,  $n=1,2,\dots$

Sa dijagrama se može zaključiti da energetski spektar  $E_n = \hbar u k_n$  nije ravnomeran. To znači da su vrednosti frekvencije zvuka frule iznijansirane. Pošto frekvencija zavisi od ulaznog i izlaznog koeficijenta  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$ , respektivno, pažljivim izborom koeficijenata možemo proizvesti željene vrednosti za frekvenciju.

#### 5.2.2.2 OSNOVNI PROBLEM LINEARIZOVANOG HAMILTONIJANA FONONA U DEKARTOVOM I CILINDRIČNOM KOORDINATNOM SISTEMU

U želji da ispitamo razliku između paralelopipedne i cilindrične cevi, probali smo da nađemo rešenje osnovnog problema linearizovanog Hamiltonijana fonona u Dekartovom i cilindričnom koordinatnom sistemu.

U **Dekartovom koordinatnom sistemu** osnovni problem je dat na sledeći način. Iz

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} & -\frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix} = \pm ik \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{pmatrix}; \quad k = \frac{E}{\hbar u} \quad (5.2.2.2.1)$$

dobija se sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina:

$$(D_z \mp ik)\Psi_1 + D_{xy}^* \Psi_2 = 0 \quad (5.2.2.2.2)$$

$$D_{xy} \Psi_1 - (D_z \pm ik)\Psi_2 = 0 \quad (5.2.2.2.3)$$

gde su:  $D_z = \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $D_{xy} = \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y}$ ;  $D_{xy}^* = \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y}$ . (5.2.2.2.4)

Iz poslednje dve jednačine (5.2.2.2.2) i (5.2.2.2.3) dobije se:

$$\frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial z^2} + k^2 \Psi_1 = 0 \quad (5.2.2.2.5)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial z^2} + k^2 \Psi_2 = 0 \quad (5.2.2.2.6)$$

Na dalje smo proučavali sledeću jednačinu:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k^2 \Psi = 0 \quad (5.2.2.2.7)$$

Ako se uzme da je  $\Psi(x, y, z) = a(x)b(y)c(z)$  i  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ , prethodna jednačina postaje:

$$\frac{1}{a(x)} \frac{d^2 a(x)}{dx^2} + k_x^2 + \frac{1}{b(y)} \frac{d^2 b(y)}{dy^2} + k_y^2 + \frac{1}{c(z)} \frac{d^2 c(z)}{dz^2} + k_z^2 = 0 \quad (5.2.2.2.8)$$

Odavde slede tri diferencijalne jednačine čija su rešenja, respektivno:

$$a(x) = A_1 e^{ixk_x} + A_2 e^{-ixk_x} \quad (5.2.2.2.9)$$

$$b(y) = B_1 e^{iyk_y} + B_2 e^{-iyk_y} \quad (5.2.2.2.10)$$

$$c(z) = C_1 e^{izk_z} + C_2 e^{-izk_z} \quad (5.2.2.2.11)$$

Kada se ova rešenja zamene u jednačinu  $\Psi(x, y, z) = a(x)b(y)c(z)$ , dobije se rešenje u obliku ravanskog talasa:

$$\Psi = e^{i\vec{k}\vec{r}} \quad (5.2.2.2.12)$$

Za komponentu  $\Psi_1$  uzet je progresivni ravanski talas  $\Psi_1 = e^{i\vec{k}\vec{r}}$ , a za drugu komponentu regresivni ravanski talas  $\Psi_2 = e^{-i\vec{k}\vec{r}}$ .

Na osnovu ovoga može se napisati osnovna funkcija fonona kao:

$$\Psi = \begin{pmatrix} D_1 e^{i\vec{k}\vec{r}} \\ D_2 e^{-i\vec{k}\vec{r}} \end{pmatrix} \quad (5.2.2.2.13)$$

Mora se uraditi normalizacija talasnog vektora na "delta funkciju", pošto su  $k_x, k_y, k_z$  kontinualne promenljive. Tako se dobija:

$$|D_1|^2 + |D_2|^2 = \frac{1}{(2\pi)^3} \quad (5.2.2.2.14)$$

**U cilindričnom koordinatnom sistemu**  $x = \rho \cos \varphi$  ;  $y = \rho \sin \varphi$  ;  $z = z$  , rešićemo jednačinu za  $\Psi$  .

Laplasov operator  $\Delta$  u cilindričnom koordinatnom sistemu je dat kao:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (5.2.2.2.15)$$

Ako se prethodna jednačina zameni u:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k^2 \Psi = 0 \quad (5.2.2.2.16)$$

i uvede smena  $\Psi \rightarrow \Phi$  , dobija se jednačina:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + q^2 \Phi = 0 \quad (5.2.2.2.17)$$

U ovoj jednačini  $\Phi$  predstavlja komponente  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$ .

Zatim se uvede da je

$$q^2 = k^2 + k_z^2 \quad (5.2.2.2.18)$$

gde je:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (5.2.2.2.19)$$

Zatim se uvodi razdvajanje promenljivih:

$$\Phi(\rho, \varphi, z) = F(\rho, \varphi)D(z) \quad (5.2.2.2.20)$$

Zamenom dobijemo sledeće jednačine:

$$\frac{d^2D}{dz^2} + k_z^2 D = 0 \quad (5.2.2.2.21)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} + k^2 F = 0 \quad (5.2.2.2.22)$$

Rešenje jednačine (5.2.2.2.21) je:

$$D_{k_z}(z) = C_{1k_z} e^{izk_z} + C_{2k_z} e^{-izk_z} \quad (5.2.2.2.23)$$

U jednačini (5.2.2.2.22) ponovo razdvajamo promenljive:

$$F(\rho, \varphi) = A(\rho)B(\varphi) \quad (5.2.2.2.24)$$

Dobija se :

$$\frac{d^2B}{d\varphi^2} + m^2 B = 0 \quad (5.2.2.2.25)$$

Rešenja su:

$$B_m(\varphi) = C_{1m} e^{im\varphi} + C_{2m} e^{-im\varphi} \quad (5.2.2.2.26)$$

$$\frac{d^2A}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dA}{d\rho} + \left( k^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) A = 0 \quad (5.2.2.2.27)$$

Bitno je da se naglasi da je  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  pošto jedino ovaj izbor parametra razdvajanja promenljivih daje jednoznačno rešenje za  $\Phi$ .



Uvođenjem novog argumenta  $\rho = a\xi$  ;  $a = const$  , u prethodnu jednačinu, dobija se

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dA}{d\xi} + \left( k^2 a^2 - \frac{m^2}{\xi^2} \right) A = 0 \quad (5.2.2.2.28)$$

Ako definišemo da je  $k^2 a^2 = 1$  , dobija se:

$$\xi = k\rho \quad (5.2.2.2.29)$$

i ova jednačina postaje Beselova jednačina parametra  $m$  :

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dA}{d\xi} + \left( 1 - \frac{m^2}{\xi^2} \right) A = 0 \quad (5.2.2.2.30)$$

Tako je:

$$A(\rho) \rightarrow J_m(k\rho) \quad (5.2.2.2.31)$$

Po teoriji Beselovih funkcija poznato je da  $J_{-m}$  i  $J_m$  nisu linearno nezavisni i zato  $J_{-m}$  ne može biti uzeto kao drugo partikularno rešenje Beselove jednačine. Pored toga, kada  $k\rho \rightarrow +\infty$  , Beselova funkcija se ponaša kao  $\frac{\sin k\rho}{\sqrt{k\rho}}$

ili  $\frac{\cos k\rho}{\sqrt{k\rho}}$  . To znači da se Beselova funkcija ne može linearizovati za beskonačne granice [87']. To je razlog da se rešenje potraži u granicama intervala  $0 \leq \rho \leq R$  , gde je  $R$  konačni, unutrašnji poluprečnik cevi. Sa stanovišta kvantne mehanike to znači da se fonon kreće na nultom potencijalu u cilindru  $\rho \leq R$  i na beskonačnom potencijalu za  $\rho > R$  . Kada ovo unesemo u proračun, dobija se uslov  $J_m(k\rho) = 0$  iz koga se može zaključiti da talasni vektor  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  ima diskretne vrednosti:

$$k_n = \frac{x_n(m)}{R} \quad (5.2.2.2.32)$$

gde su:

-  $x_n(m)$  - nule Beselove funkcije.

Kombinacijom prethodnih jednačina (5.2.2.2.23), (5.2.2.2.26), (5.2.2.2.31) i (5.2.2.2.32) dobijaju se komponente talasnog vektora fonona:

$$\Phi_1(\rho, \varphi, z) = C_1 J_m \left( x_n(m) \frac{\rho}{R} \right) e^{im\varphi} e^{izk_z} \quad (5.2.2.2.33)$$

$$\Phi_2(\rho, \varphi, z) = C_2 J_m \left( x_n(m) \frac{\rho}{R} \right) e^{im\varphi} e^{-izk_z} . \quad (5.2.2.2.34)$$

Iz ove analize može se zaključiti sledeće. U cevi paralelopipednog oblika komponenta  $k_z$  talasnog vektora ima diskretne nivoe međusobno nejednako udaljene, dok komponente  $k_x$  i  $k_y$ , zahvaljujući neprobojnosti zidova muzičkog instrumenta, imaju diskretne nivoe međusobno jednako udaljene. U fruli cilindričnog oblika komponenta  $k_z$  ponaša se identično kao i  $k_z$  u paralelopipednom instrumentu, dok intenzitet  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  ima nejednako udaljene nivoe.

Iz prethodne analize proizlazi da se u paralelopipednom instrumentu zvuk prostire samo duž  $z$  ose, dok se u instrumentu cilindričnog oblika, pored ravanskih talasa duž  $z$  ose, pojavljuju i prigušeni talasi u  $x,y$  ravni.

### 5.2.2.3 EFEKAT PRIGUŠENJA U LINEARNOM MUZIČKOM INSTRUMENTU

Za potrebe istraživanja analizirana je veoma duga paralelopipedna cev sa malim poprečnim presekom, tako da se može smatrati linearnom strukturom duž  $z$  ose. Ovde granični uslovi (izneti na početku) neće biti uključeni u proračun zbog velike dužine instrumenta. Sa druge strane je uvedena pretpostavka da je instrument izrađen od sloja materijala koji propušta zvuk duž  $z$  ose. Zidovi instrumenta su nepropusni za zvuk duž  $x$  i  $y$  pravaca. U opisanim uslovima imamo fonon koji udara u potencijalnu barijeru i ponaša se slično ponašanju kvantnih čestica. Instrument i sloj postavljen u njemu su prikazani na slici 5.2.2.3.1.

Ispitana je refleksija i propustljivost fonona u opisanoj situaciji.

Talaska funkcija za  $z < 0$  je:

$$\Psi_I(z) = C_1 e^{izk_z} + C_2 e^{-izk_z} \quad ; \quad k_z = \frac{E_z}{\hbar u_v} \quad (5.2.2.3.1)$$

gde je:

-  $u_v$  - brzina zvuka u vazduhu.

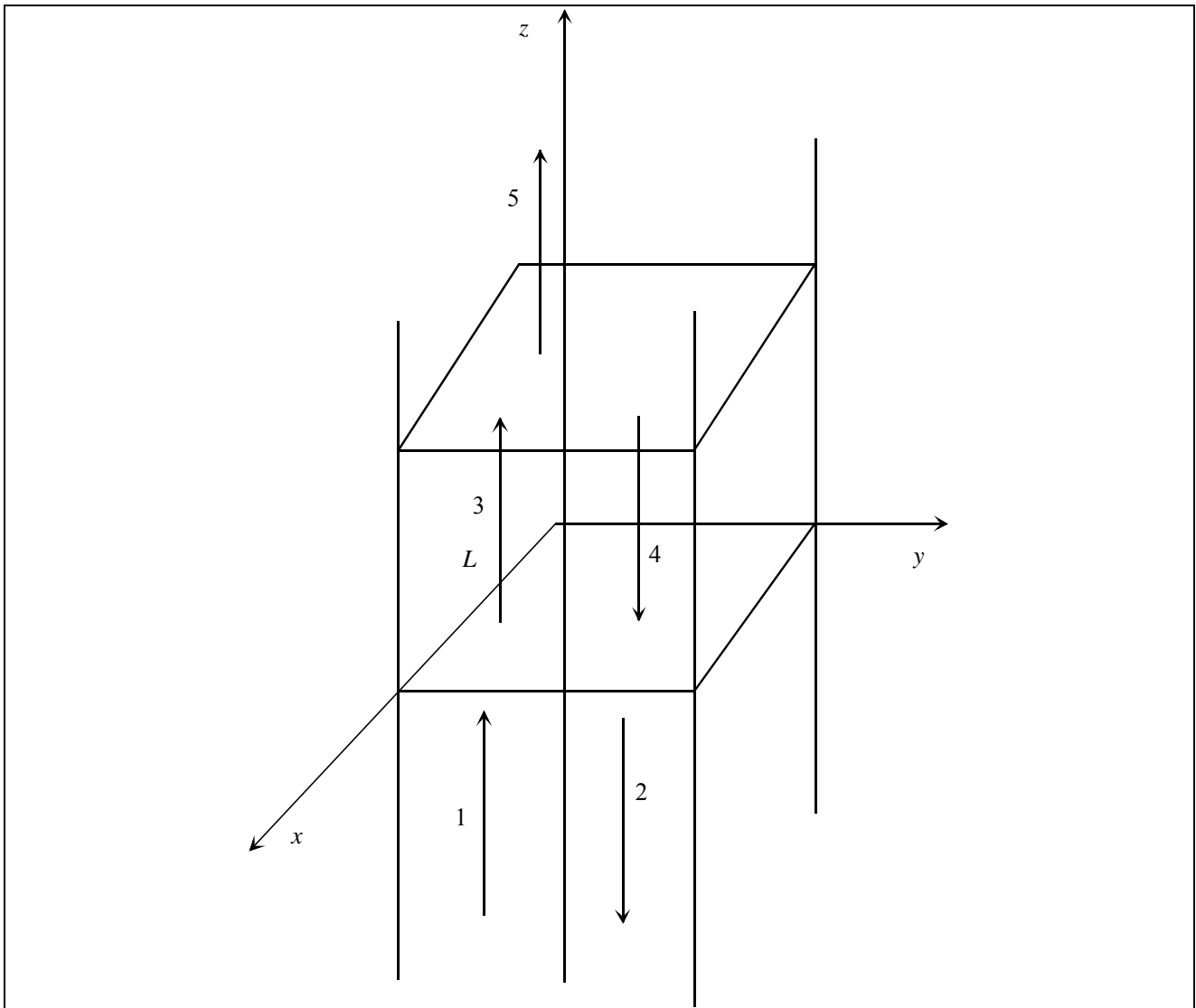
To znači da je  $\Psi_I$  talaska funkcija fonona koji se prostire kroz vazduh.

Za interval  $0 \leq z \leq L$  talaska funkcija fonona je:

$$\Psi_2(z) = C_3 e^{izq} + C_4 e^{-izq} \quad ; \quad q_z = \frac{E_z}{\hbar u_m} \quad (5.2.2.3.2)$$

gde je:

-  $u_m$  - brzina zvuka u materijalu.



Slika 5.2.2.3.1: Linearni muzički instrument sa prigušivačem

Za  $z > L$  fonon nema nikakvu barijeru tokom svog prostiranja i zato je koeficijent regresivnog talasa  $C_6 = 0$ . Talasna funkcija fonona za  $z > L$  je:

$$\Psi_3(z) = C_5 e^{izk_z} \quad ; \quad k_z = \frac{E_z}{\hbar u_v} \quad (5.2.2.3.3)$$

Kontinuitet talasne funkcije ne sme biti poremećen za granične vrednosti  $z=0$  i  $z=L$ . To znači da u tim tačkama moraju biti iste funkcije i njihovi izvodi u odnosu na  $z$ .

To znači da za  $z=0$  mora da važi:

$$C_1 + C_2 = C_3 + C_4 \quad (5.2.2.3.4)$$

$$C_1 - C_2 = \frac{q_z}{k_z} (C_3 - C_4) \quad (5.2.2.3.5)$$

dok za  $z=L$  mora biti zadovoljen sistem jednačina:

$$C_3 e^{iq_z L} + C_4 e^{-iq_z L} = C_5 e^{ik_z L} \quad (5.2.2.3.6)$$

$$C_3 e^{iq_z L} - C_4 e^{-iq_z L} = \frac{k_z}{q} C_5 e^{ik_z L} \quad (5.2.2.3.7)$$

Iz poslednje dve jednačine sledi:

$$C_3 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_z}{q_z} \right) e^{i(k_z - q_z)L} C_5 \quad (5.2.2.3.8)$$

$$C_4 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_z}{q_z} \right) e^{i(k_z + q_z)L} C_5 \quad (5.2.2.3.9)$$

Takođe se mogu izraziti  $C_1$  i  $C_2$  preko  $C_3$  i  $C_4$ . Dobija se:

$$C_1 = \left[ \frac{(a+1)^2}{4a} e^{i(k_z - q_z)L} - \frac{(a-1)^2}{4a} e^{i(k_z + q_z)L} \right] C_5 \quad (5.2.2.3.10)$$

$$C_2 = \left[ \frac{1-a^2}{4a} e^{i(k_z - q_z)L} - \frac{1-a^2}{4a} e^{i(k_z + q_z)L} \right] C_5 \quad (5.2.2.3.11)$$

gde je:

$$a = \frac{k_z}{q_z} = \frac{u_m}{u_v} \gg 1 \quad (5.2.2.3.12)$$

Uslov  $a \gg 1$  znači da je materijal koji se koristi za građu instrumenta čvrst. Pošto je brzina prostiranja zvuka u čvrstim materijalima veća nego brzina prostiranja zvuka u vazduhu, poslednji izraz je važeći.

Kada se poslednji izraz unese u proračun, dobiju se aproksimativne formule:

$$\frac{a^2 \pm 1}{2a} \approx \pm \frac{1}{2\varepsilon} \quad ; \quad \frac{a^4 - 1}{4a^2} \approx \frac{1}{4\varepsilon^2} \quad ; \quad \left( \frac{a^2 \pm 1}{2a} \right) \approx \pm \frac{1}{4\varepsilon^2} \quad (5.2.2.3.13)$$

gde:

$$\varepsilon = \frac{u_v}{u_m} \ll 1 \quad (5.2.2.3.14)$$

Sada može da se odredi izraz za koeficijent refleksije  $R$ , koji je definisan kao:

$$R = \left| \frac{C_2}{C_1} \right|^2 \quad (5.2.2.3.15)$$

Ako se zamene  $C_1$  i  $C_2$  u prethodni definicioni izraz, dobije se:

$$R = \left| \frac{C_2}{C_1} \right|^2 = \frac{\left( \frac{a^4 - 1}{4a^2} \sin^2 q_z L \right)^2 + \left( \frac{a^2 - 1}{2a} \sin q_z L \cos q_z L \right)^2}{\left[ \cos^2 q_z L + \left( \frac{a^2 + 1}{2a} \right) \sin^2 q_z L \right]^2} \quad (5.2.2.3.16)$$

Korišćenjem aproksimacije prethodni izraz se može svesti na:

$$R = 1 - 4\varepsilon^2 \operatorname{ctg}^2 q_z L = 1 - 4\varepsilon^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (5.2.2.3.17)$$

Koeficijent propustljivosti  $T$  je definisan kao:

$$T = \left| \frac{C_5}{C_1} \right|^2 \quad (5.2.2.3.18)$$

Kada u ovaj izraz zamenimo  $C_1$ , dobija se:

$$T = \frac{1}{\left( \cos k_z L \cos q_z L - \frac{a^2 + 1}{2a} \sin k_z L \sin q_z L \right)^2 + \left( \cos k_z L \cos q_z L + \frac{a^2 + 1}{2a} \sin k_z L \sin q_z L \right)^2} \quad (5.2.2.3.19)$$

Na osnovu aproksimacija prethodni izraz postaje:

$$T = \frac{4\varepsilon^2}{\sin^2 q_z L} = \frac{4\varepsilon^2}{\sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} L} \quad (5.2.2.3.20)$$

Iz aproksimacionog izraza za koeficijent refleksije  $R$  može se zaključiti da on ima najveću vrednost kada je  $ctg^2 \frac{2\pi}{\lambda} L = 0$ , odnosno da je:

$$\lambda(\max R) = 4L \quad (5.2.2.3.21)$$

Maksimalna vrednost koeficijenta refleksije iznosi jedan.

Minimalna vrednost koeficijenta refleksije je nula.

Kada se to zameni u aproksimacioni izraz za koeficijent refleksije, dobije se:

$$4\varepsilon^2 ctg^2 \frac{2\pi}{\lambda} L = 1 \quad (5.2.2.3.22)$$

Iz prethodnog izraza dobija se:

$$\sin^2 \frac{2\pi}{\lambda} L = \frac{4u_v^2}{4u_v^2 + u_m^2} \quad (5.2.2.3.23)$$

$$\lambda(\min R) = \frac{2\pi L}{\arcsin \frac{2u_v}{\sqrt{4u_v^2 + u_m^2}}} \quad (5.2.2.3.24)$$

Može se uočiti da veća refleksija prouzrokuje manju propustljivost zvuka, i obrnuto. Za maksimalnu vrednost koeficijenta propustljivosti dobija se:

$$\max T = \frac{4 \left( \frac{u_v}{u_m} \right)^2}{\frac{4u_v^2}{4u_v^2 + u_m^2}} = \frac{4u_v^2 + u_m^2}{u_m^2} \quad (5.2.2.3.25)$$

Kada se u aproksimacioni izraz za koeficijent propustljivosti zameni  $\lambda = 4L$ , dobije se:

$$\min T = 4 \left( \frac{u_v}{u_m} \right)^2. \quad (5.2.2.3.26)$$

Ako se uporede izrazi za maksimalni i minimalni koeficijent refleksije, može se ustanoviti da je  $\lambda(\min R) > \lambda(\max R)$ . To znači da je refleksija dominantna na visokim frekvencijama, a propustljivost na niskim frekvencijama. Ovo se smatra osnovnim efektom upotrebe prigušivača od čvrstog materijala.

## 6.1 MERENJA U AKUSTICI

Merenja u akustici su veoma raznorodna ako posmatramo različite oblasti akustike. U muzičkoj akustici, kada analiziramo neki muzički instrument, važno je proučiti intenzitet, visinu i boju tona tog instrumenta, način na koji se dobija ton na instrumentu, koji sve delovi instrumenta osciluju i na koji način, kakva je prostorna emisija tona instrumenta u zavisnosti od frekvencije tonova, kakva je dinamika muzičkog instrumenta. Svaka od navedenih veličina može biti proučena mnogo detaljnije i na osnovu dobijenih rezultata svih urađenih merenja mi stvaramo potpuniju sliku o muzičkom instrumentu.

### 6.1.1 MERENJE AKUSTIČKOG NIVOA

Merenje nivoa zvuka, odnosno merenje zvučnog pritiska prisutno je u skoro svim razmatranjima u akustici. U ovom delu su objašnjene tehnike merenja nivoa zvučnog pritiska, nivoa zvuka i nivoa snage u frekvencijskim opsezima različite širine. Objasnjene su tehnike koje se koriste za merenje promenljivih zvukova i kako upadni ugao utiče na očitavanje sa merača nivoa zvuka. Objasnjeno je kako treba izabrati mikrofone, analizatore i snimače za različita merenja.

#### 6.1.1.1 NIVO ZVUČNOG PRITISKA I NIVO AKUSTIČKE SNAGE

U većini slučajeva parametar zvučnog polja koji se meri je zvučni pritisak jer je lakše napraviti i kalibrisati mikrofone sa stabilnom pobudom na pritisak, da rade u širokom opsegu zvučnog pritiska i frekvencije nego mikrofone sa pobudom na brzinu čestica ili uređaje za merenje intenziteta zvuka [ 8]. Drugi razlog što se najčešće meri zvučni pritisak je to što je uho, koje je često jedini odlučujući receptor željenih ili neželjenih zvukova koje merimo, takođe instrument koji 'radi na pritisak'.

Zbog širokog opsega zvučnog pritiska na koji se nailazi upraksi, merenja se obično izražavaju u terminu **nivoa zvučnog pritiska**, koji definišemo kao:

$$L[dB] = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (6.1.1.1.1)$$

gde je:

- $p$  - zvučni pritisak izražen u Pa, koji želimo da izrazimo preko nivoa u dB
- $p_0$  - zvučni pritisak na pragu čujnosti (odgovara intenzitetu zvuka na pragu čujnosti), iznosi  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Osnovna oprema za merenje zvučnog pritiska sastoji se od kalibrisanog mikrofona, kalibrisanog pojačavača i kalibrisanog indikatora (osciloskop, npr.). Ako je zvuk koji merimo bilo šta drugo osim čistog tona (jedan harmonik), neophodno je da osnovni uređaj ima jedinstveni frekvencijski odziv za ceo frekvencijski spektar složenog zvuka. Takav uređaj se smatra za merač nivoa zvučnog pritiska.

#### 6.1.1.2 MERENJE NIVOVA ZVUČNOG PRITISKA U ZAVISNOSTI OD FREKVENCIJE

Ako je zvuk koji merimo složen, ili je u pitanju šum sa kontinualnim spektrom, pojedinačna vrednost ukupnog nivoa zvučnog pritiska dobijena osnovnom konfiguracijom merača najčešće nije dovoljna za preciznu analizu. Često je potrebno analizirati i zavisnost nivoa zvučnog pritiska od frekvencije. U tom slučaju u osnovnu opremu mora biti pridodat i filter propusnik opsega čiji je centralni deo frekvencijskog opsega ili kontinualno ili diskretizovano promenljiv. Zahvaljujući tome zvučni pritisak može biti izmeren u poznatim frekvencijskim opsezima.

Generalno posmatrano koriste se tri tipa analizatora: sa konstantnom širinom propusnog opsega, sa propusnim opsegom u konstantnom procentu i sa oktavnim, poluoctavnim ili trećinsko oktavnim propusnim opsegom.

Analizator sa konstantnim propusnim opsegom ima fiksni broj oscilacija u propusnom opsegu. Uobičajena širina propusnog opsega je između 5 i 200 Hz . Ovakav uređaj najviše se koristi da definiše harmonske komponente zvuka kada su frekvencije dovoljno stabilne da se ne pomeraju unutar i izvan granica propusnog opsega tokom merenja.

Drugi tip analizatora (sa propusnim opsegom u konstantnom procentu) ima propusni opseg koji je fiksni procenat centralne frekvencije opsega. Tako, na visokim frekvencijama propusni opseg ovog analizatora pokriva širi opseg (veći broj oscilacija u sekundi) nego na niskim frekvencijama, zahvaljujući čemu je potrebno manje očitavanja na visokim frekvencijama tokom merenja ovim analizatorom nego analizatorom prvog tipa. Analizator sa propusnim opsegom konstantnog procenta je posebno koristan kod merenja harmonskih komponentata talasa čiji se fundamental koleba po frekvenciji. Ako je opseg dovoljno širok da obuhvati oscilujući fundamental, biće dovoljno širok i na višim frekvencijama da obuhvati više harmonike.

Treći često korišćeni uređaj je analizator sa oktavnim, poluoctavnim ili trećinskooctavnim širinom propusnog opsega. Ovaj uređaj ima veliku primenu kod analize šuma kontinualnog spektra pri kojoj se ne zahteva detaljna preciznost.

Kao što samo ime kaže, gornja frekvencija odsecanja propusnog opsega oktavnog analizatora je dvostruko veća od donje frekvencije odsecanja. Za



poluoktavnog analizator odnos gornje i donje frekvencije odsecanja je  $\sqrt{2}$ , a kod trećinsko oktavnog taj odnos je  $\sqrt[3]{2}$ . Najčešće korišćeni propusni opsezi kod oktavnog analizatora u komercijalnoj opremi su 37.5 – 75, 75 – 150, 150 – 300, 300 – 600, 600 – 1200, 1200 – 2400, 2400 – 4800, 4800 – 9600 Hz. Za svaki tip analizatora mora se voditi računa da prigušenje filtra izvan propusnog opsega bude adekvatno. To je posebno važno u slučajevima kada spektar šuma značajno opada ili kada se meri zvuk niskog nivoa u prisustvu zvuka visokog nivoa.

Kada odredimo nivo zvučnog pritiska u funkciji frekvencijskih opsega, može se definisati spektralni nivo  $L(f)$  za svaki opseg, u funkciji frekvencije, prema relaciji:

$$L(f) = L - 10 \log \Delta f \quad [\text{dB}] \quad (6.1.1.2.1)$$

gde je:

- $L$  - nivo zvučnog pritiska meren za propusni opseg  $\Delta f$
- $\Delta f$  - propusni opseg izražen u Hz
- $f$  - centralna frekvencija

Nivo spektra je vrednost koja bi se dobila kada bi propusni opseg analizatora bio 1 Hz i kada bi spektralni nivo bio ravnomeran tokom celog propusnog opsega  $\Delta f$ . To je korisna veličina za upoređivanje podataka dobijenih merenjem analizatorima različitih propusnih opsega. Očigledno je da redukcija podataka propusnih opsega na spektralni nivo ima smisla samo ako je spektar šuma kontinualan i ne sadrži izražene komponente čistog tona.

### 6.1.1.3 MERENJE UKUPNE SNAGE I USMERENOSTI ZVUČNOG IZVORA

U mnogim slučajevima potrebno je izmeriti nivo zvučnog pritiska u okolini bučnih mašina ili nekih drugih bučnih uređaja i iz tih merenja izdvojiti karakteristike zvučnog izvora definisane prema sledećim parametrima:

1. Ukupna akustička snaga koju zrači zvučni izvor, izražena preko nivoa, je:

$$L_p = 10 \log P_a + 120 \text{ dB}, \quad (6.1.1.3.1)$$

2. Karakteristike usmerenosti zvučnog izvora moraju biti izražene preko dijagrama usmerenosti, ili, za pojedinačne prostorne uglove, preko faktora usmerenosti  $\gamma$ .

3. Frekvencijske karakteristike zvučnog izvora, izražene kao zavisnost nivoa snage od frekvencije, moraju biti definisane u diskretnim frekvencijskim opsezima.

#### 6.1.1.4 NEUSMERENI ZVUČNI IZVOR

Ako imamo neusmereni zvučni izvor lociran u slobodnom zvučnom polju, onda će merenje nivoa zvučnog pritiska u zavisnosti od frekvencije, na lokaciji dovoljno udaljenoj od zvučnog izvora, biti dovoljna da se odredi nivo zvučne snage tog zvučnog izvora u funkciji od frekvencije. Nivo zvučne snage je povezan sa nivoom zvučnog pritiska preko relacije:

$$L_p = L + 20 \log r + 10.5 \text{ Db} \quad (6.1.1.4.1)$$

gde je:

- $r$  - udaljenost mikrofona od zvučnog izvora

Ovaj izraz je neophodno korigovati za merenja u različitim atmosferskim prilikama (različita temperatura okoline i atmosferski pritisak).

Ako je neusmeren zvučni izvor smešten u zatvoreni prostor, dovoljno je obaviti pojedinačno merenje. Može da se kaže da, ako je merenje obavljeno u reverberantnom polju, na udaljenosti  $r$  od zvučnog izvora, i ako je  $16\pi r^2$  dovoljno veliko u poređenju sa konstantom prostorije  $R$ , onda se sledeći izraz može koristiti da definiše nivo zvučne snage za zadati frekvencijski opseg:

$$L_p = L + 10 \log R/4 - 0.5 \text{ dB} \quad (6.1.1.4.2)$$

gde je:

- $R$  - konstanta prostorije.

Da bi se odredilo  $R$ , moraju biti poznate apsorpcione karakteristike prostorije u funkciji od frekvencije. Ako ova aproksimacija ne daje zadovoljavajuće rezultate, onda se mora, ili koristiti precizniji proračun, ili se zvučni izvor mora prebaciti u anehoičnu sobu (gluvu sobu).

#### 6.1.1.5 USMERENI ZVUČNI IZVOR

Ako je zvučni izvor usmeren, merenja koja se obavljaju moraju biti mnogo opsežnija. Kada je zvučni izvor postavljen napolju, mora se izmeriti nivo zvučnog pritiska u mnogim tačkama sfere koja okružuje izvor (ili se barem mora aproksimirati). Poluprečnik te sfere bi trebalo da bude nekoliko puta

veći od dužine zvučnog izvora, tako da se može smatrati da su podaci izmereni u udaljenom zvučnom polju. U praksi, merenja se vrše samo u ograničenom broju pozicija oko izvora zvuka, a nivo zvuka u ostalim tačkama se aproksimira interpolacijom izmerenih vrednosti.

Merenja treba da budu izvedena u dovoljno velikom broju pozicija tako da maksimum varijacije izmerenih vrednosti ne bude veći od 6 dB. Prilikom očitavanja merača nivoa zvuka u tački merenja, treba zabeležiti samo one rezultate u kojima je ukupno kolebanje vrednosti nivoa manje od 6 dB. U protivnom, područje koje okružuje zvučni izvor bi trebalo podeliti u nekoliko oblasti.

Da bi se definisala ukupna akustička energija na datoj frekvenciji, sfera (ili polusfera) u kojoj se merenja izvode treba da se podeli u isti broj područja koliki je i broj mernih tačaka u kojima se sakupljaju merni podaci. Akustička snaga koja se prostire kroz svako definisano područje, izražena u W, pri normalnim atmosferskim uslovima, na datoj frekvenciji, može se aproksimirati kao:

$$P_{aS} = 10^{-12} \cdot S (\text{antilog } L/10) \quad (6.1.1.5.1)$$

gde je:

- $L$  - nivo zvučnog pritiska, izražen u dB
- $S$  - područje granične površine, izraženo u  $m^2$

Suma akustičkih snaga izraženih na ovaj način za sva definisana područja prostora oko zvučnog izvora, predstavlja ukupnu akustičku snagu koju emituje zvučni izvor na datoj frekvenciji, ili u datom oktavnom opsegu.

Proračun može mnogo da se pojednostavi ako se izračuna prosečni nivo zvučnog pritiska u dB kao aritmetička sredina nivoa zvučnog pritiska u jednakim mernim oblastima. Naravno da će tim postupkom biti učinjena neka greška (osim ako su svi nivoi zvučnog pritiska jednaki). Vrednost nivoa zvučnog pritiska dobijena na ovaj pojednostavljeni način je uvek previše niska. Maksimalna greška merenja za slučaj kada je 10 dB raspon, je – 2.6 dB za svake 4 ili 8 mernih oblasti. Za raspon merenja od 10 dB dodaje se korekcija od 1 dB. Za raspon merenja od 5 dB ili manje, ne dodaje se korekcija. U oba slučaja greška neće prevazići 1 dB.

Ako želimo da izdvojimo sferu na 10 do 20 delova jednake površine, za potrebe merenja, u praksi nije uvek moguće postići očitavanja merenja za ceo prostor oko izvora i na udaljenosti od nekoliko dužina zvučnog izvora. Model emisije zvuka zvučnog izvora često pokazuje određenu simetriju, tako

da se može pretpostaviti da je nivo zvučnog pritiska konstantan duž jedne linije. Tada je dovoljno uraditi merenje u horizontalnoj ravni, duž kružne linije koja okružuje zvučni izvor.

Ako se usmereni zvučni izvor nalazi u zatvorenom prostoru, treba voditi računa da se ne dozvoli da reflektovan zvuk utiče na merenje direktnog zvuka. Da bi se sprečilo da reflektujući zvuk utiče značajno na očitavanje prilikom merenja, treba obezbediti da prosečni nivo zvučnog pritiska u izabranim mernim tačkama u prostoru bude barem za 8 dB veći nego prosečni nivo zvučnog pritiska u udaljenim mernim tačkama, u kojima reflektovani zvuk preovladava. Pri svemu tome, udaljenost definisanih mernih tačaka mora i dalje biti reda veličine nekoliko dužina zvučnog izvora, da bismo bili sigurni da je merenje obavljeno u udaljenom zvučnom polju.

#### 6.1.1.6 PRORAČUN FAKTORA USMERENOSTI

Faktor usmerenosti može da se proračuna i nakon što se odredi prosečan nivo zvučnog pritiska. Prosečan nivo zvučnog pritiska može da se odredi metodom aproksimacije (naveden u prethodnom odeljku), ili:

$$L_p = L_P - 20 \log r - 10.5 \text{ dB} \quad (6.1.1.6.1)$$

gde je:

- $L_P$  - nivo snage zvučnog izvora u datom frekvencijskom opsegu
- $r$  - rastojanje za koje je definisan prosečni nivo zvučnog pritiska, izražen u fitima [7].

Indeks usmerenosti  $DI_{(\theta,\varphi)}$  u određenom pravcu definisan je uglovima  $\theta$  i  $\varphi$  i povezan sa nivoom zvučnog pritiska merenim na rastojanju  $r$  preko relacije:

$$DI_{(\theta,\varphi)} = L_{(r,\theta,\varphi)} - L_P r \quad (6.1.1.6.2)$$

Faktor usmerenosti  $\gamma_{\theta\varphi}$  dobija se iz indeksa usmerenosti, konvertovanjem vrednosti indeksa izražene u dB u:

$$\gamma_{(\theta,\varphi)} = \text{antilog } DI_{(\theta,\varphi)} / 10 \quad (6.1.1.6.3)$$

#### 6.1.1.7 IZBOR MIKROFONA

Mikrofon koji se koristi za merenje nivoa zvučnog pritiska treba izabrati prema njegovim karakteristikama u odnosu na mereni zvuk. Ako treba izmeriti zvuk izuzetno niskog nivoa, pogodne su samo pojedine vrste mikrofona. Ako treba izvesti merenja na veoma niskim, ili veoma visokim frekvencijama, neke druge vrste mikrofona su pogodne za to. Ako je važnija pouzdanost od optimalnog frekvencijskog odziva, opet neku treću vrstu mikrofona treba upotrebiti.

#### 6.1.1.8 NIZAK NIVO ZVUKA

Mikrofon koji se koristi za merenje zvuka niskog nivoa mora imati nizak sopstveni šum i mora proizvesti dovoljno veliki izlazni napon. Mikrofon sa kretnim kalemom su idealni za merenje zvuka niskog nivoa. Izlazni napon ovih mikrofona je dovoljno veliki da omogući merenje zvuka nivoa oko 20 dB (0.0002  $\mu$ bar). Nivo ambijentalnog šuma dinamičkog mikrofona je ekvivalentan nivou zvučnog pritiska od 15 dB. Korišćenjem dinamičkih mikrofona moguće je izmeriti nivoe zvuka od 20 dB sa sasvim zadovoljavajućom preciznošću.

#### 6.1.1.9 VISOK NIVO ZVUKA

Uobičajeno je da se dinamički i kondenzatorski mikrofoni mogu koristiti za merenja nivoa zvučnog pritiska koji ne premašuje 140 dB. Za merenja većih nivoa od 140 dB moraju se nabaviti posebno projektovani kondenzatorski mikrofoni sa krutom membranom.

#### 6.1.1.10 ZVUK NISKE FREKVENCIJE

Za merenja nivoa zvuka na niskim frekvencijama pogodniji su kondenzatorski mikrofoni. Sa ovim mikrofonima mogu da se izvedu merenja i na frekvencijama ispod 1 Hz. Ograničenje u merenju niskih frekvencija, ako uopšte postoji, u potpunosti zavisi od pojačavača, pošto mikrofoni podjednako dobro reaguju na spore i brze promene pritiska.

#### 6.1.1.11 ZVUK VISOKE FREKVENCIJE

Za merenja visokih frekvencija zadovoljavajuće rezultate daju kondenzatorski mikrofoni. Primarni zahtevi za precizna, pažljiva i tačna merenja zvuka visokih frekvencija su mala veličina i odsustvo rezonantnih pikova u frekvencijskoj karakteristici mikrofona. Ova ograničenja obično znače prilično smanjenje osetljivosti mikrofona.

#### 6.1.1.12 PROMENA TEMPERATURE

Ako se merenja obavljaju u sredini u kojoj se temperatura drastično menja, odziv mikrofona koji se upotrebljava i njegovi ostali relevantni parametri ne bi trebalo da mnogo zavise od temperature. Izlazni parametri mikrofona sa kretnim kalemom, trakom i kondenzatorskih mikrofona nisu zavisni od temperature i mogu poslužiti za mnoga merenja u uslovima promenljive temperature. Mnogi od ovih mikrofona se mogu koristiti na temperaturama čak i do 90°C, iako to nije navedeno u njihovoj specifikaciji.

#### 6.1.1.13 UTICAJ VLAGE

Mnogi savremeni mikrofoni su, generalno posmatrano, otporni na velike promene relativne vlažnosti. Treba izbegavati duže vremenske periode rada u uslovima u kojima je relativna vlažnost veća od 85 % i, ako je neophodno, primeniti neke mere isušivanja. Isušivanje je posebno od značaja za kondenzatorske mikrofone.

#### 6.1.1.14 DUGAČKI KABLOVI

Ako moramo da upotrebimo dugačke kablove, izlazna impedansa mikrofona treba da bude mala. Ovo se može postići korišćenjem transformatora sa prilagođenom impedansom, ili izborom mikrofona sa pretvaračkim elementom male impedanse. Mikrofoni sa kretnim kalemom mogu se upotrebiti sa standardnim mikrofonskim kablom relativno velike dužine. Kondenzatorski mikrofoni se obično mogu koristiti sa kablom dužine do nekoliko metara ukoliko u sebi nemaju ugrađen prepojačavač. Kondenzatorski mikrofoni sa ugrađenim prepojačavačem se mogu koristiti pod istim uslovima kao i dinamički mikrofoni.

#### 6.1.1.15 MERENJE ZVUKA PROMENLJIVOG INTENZITETA

Ako zvuk čiji nivo merimo menja intenzitet, vrednosti nivoa merenog zvučnog pritiska će zavisiti od dinamičkih karakteristika upotrebljenog indikatora. Tip indikatora koji ćemo upotrebiti u merenjima zavisice od osobina nivoa zvučnog pritiska koji merimo. Za istraživanje relativno naglih promena nivoa zvučnog pritiska mogu se upotrebiti brzi merači. Za dobijanje prosečne vrednosti nivoa tokom dužeg perioda vremena upotrebljavaju se spori merači. Prosečan nivo za duži vremenski period i opseg impulsnih maksimuma i minimuma zvučnog pritiska su, obično, dovoljni statistički podaci da okarakterišu zvuk za praktičnu primenu.

#### 6.1.1.16 MERENJE ZVUKA POD PROIZVOLJNIM UPADNIM UGLOM

Za ostvarivanje pravilnog merenja nivoa zvučnog pritiska treba da se podsetimo da se odziv većine mikrofona donekle menja u zavisnosti od pravca zvuka koji registruje. Za većinu tipova mikrofona sa membranom najpravilnija karakteristika odziva dobija se za zvuk slučajnog upadnog ugla. Međutim, odziv zvuka koji upada pod proizvoljnim uglom razlikuje se mnogo od odziva zvuka koji upada pod pravim uglom, za frekvencije za koje dimenzije mikrofona nisu više male u poređenju sa talasnom dužinom zvuka. Zato mikrofona treba da bude postavljen tako da, kada se merač nivoa zvučnog pritiska drži na uobičajen način, zvuk upada na membranu mikrofona tangentno. U reverberacionoj sobi zvuk se odbija nasumično i orijentacija mikrofona nije kritična. Ako, nekim slučajem, značajan deo reflektovanog zvuka na visokim frekvencijama upadne pod pravim uglom na membranu mikrofona, mogu nastati ozbiljne greške u merenju.

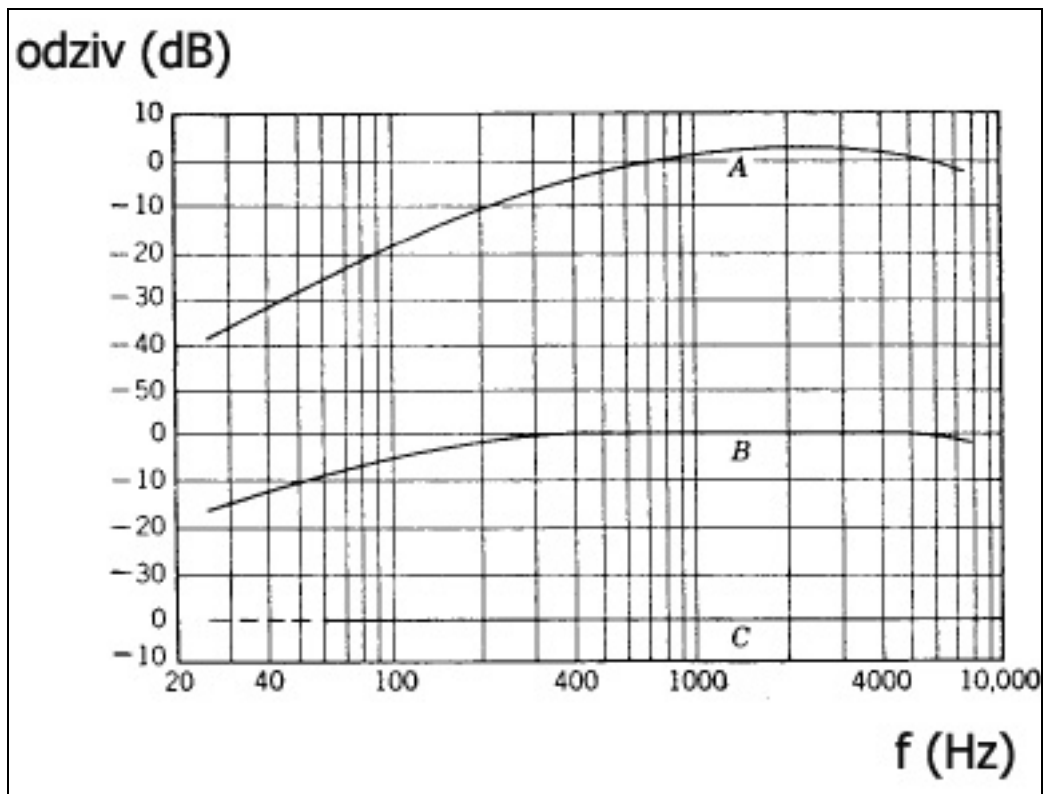
#### 6.1.2 NIVO ZVUKA I MERAČ NIVOVA ZVUKA

##### 6.1.2.1 KARAKTERISTIKE

U merenjima nivoa zvuka često je poželjno koristiti opremu čiji bi pokazivači bili podešeni na isti način na koje ljudsko uho reaguje na zvuk. U praksi se koristi merač standardizovan da meri nešto srodno glasnosti zvuka. Očitane vrednosti na tom meraču nazivaju se *nivoom zvuka*. Koriste se 3 ponderisane krive da simuliraju odziv mehanizma čula sluha na niski, srednji ili visoki nivo čistog tona. A, B i C krive predstavljaju karakteristike odziva koje su približno inverzne funkcije izofonskih linija za 40, 70 i 100 fona.

Nivo zvuka je, po definiciji, očitavanje merača nivoa zvuka: koristi se A kriva za očitavanja između 24 dB i 55 dB, B kriva za očitavanja između 55 dB i 85 dB i C kriva za očitavanja iznad 85 dB. Iz ovih očitavanja može se dobiti informacija u vezi sa frekvencijskom raspodelom šuma. Ako je nivo zvuka isti za sve tri krive, energija zvuka je najverovatnije dominantna na frekvencijama većim od 500 Hz. Ako je nivo zvuka isti za krive B i C, a manji za krivu A, najverovatnije je zvuk dominantan u opsegu od 150 do 1000 Hz. Ako je nivo zvuka najveći za krivu C, to znači da je zvuk dominantan na frekvencijama ispod 150 Hz. Treba istaći da su ove tri krive značajne za očitavanje nivoa jačine zvuka čistih tonova, ali ne i složenog šuma.

Pošto C kriva ima ravnomernu raspodelu po frekvencijama, može se koristiti i za očitavanje nivoa zvučnog pritiska.



Slika 6.1.2.1.1: Ponderisane A,B i C krive

### 6.1.2.2 UTICAJ POSMATRAČA I KUĆIŠTA MERAČA NA MERNE PODATKE

Ako se merač nivoa zvuka nalazi u rukama posmatrača, očitavanje na visokim učestanostima će biti poremećeno njegovim prisustvom. Veličina greške se može proceniti prema odgovarajućim krivama [8]. Razlika u očitavanju vrednosti sa i bez posmatrača može se uporediti sa odzivom mikrofona samog i mikrofona koji se koristi na kraju dugog kabla. Načinjena greška je najmanja ako se merač nivoa zvuka drži ispred posmatrača i zvuk dolazi sa njegove strane ( $0^\circ$ ).

Kućište merača takođe može da poremeti zvučno polje na lokaciji mikrofona. Uticaj kućišta na merenje je veći na visokim nego na niskim frekvencijama i značajno se menja sa upadnim uglom zvuka.

Kada se zahtevaju veoma precizni merni podaci, mikروفon treba povezati sa meračem produžnim kablom i pozicionirati ga tako da direktan zvuk koji merimo pristupa mikrofону tangентno na membranu.

### 6.1.3 EFEKAT AMBIJENTALNOG ŠUMA

Nivo zvučnog pritiska mora često da se izmeri u uslovima u kojima je nemoguće u potpunosti eliminisati šum od drugih izvora zvuka. Idealno bi bilo da merenjem definišemo samo direktan zvuk koji dolazi od izvora, bez ikakvih



značajnih doprinosa ambijentalnog šuma, zvukova drugih izvora. Ako ambijentalni šum na poziciji merenja treba da se zanemari, njegov nivo treba da bude najmanje 8 dB niži od nivoa zvuka koji merimo. Kada se postignu ti uslovi, greška merenja nivoa zvučnog pritiska biće reda veličine dela dB (pošto ipak postoji šum u pozadini).

Ako je nivo ambijentalnog šuma konstantan, može se primeniti korekcija izmerenih podataka.

#### 6.1.4 INFORMACIJE KOJE TREBA ZABELEŽITI

Posmatrač treba da naznači, kao deo svojih rezultata merenja, sve uslove pod kojima su podaci dobijeni. Treba da zabeleži:

1. Opis prostora u kome su izvršena merenja: priroda i dimenzije poda, zidova i plafona. Opis i poziciju predmeta i osoblja koji se nalaze u blizini.
2. Opis uređaja koji se ispituje (primarnog izvora zvuka): dimenzije, podaci sa specifikacione pločice, svi ostali pogodni podaci. Vrste delovanja i uslovi rada. Pozicija uređaja i način ugradnje (montiranja).
3. Opis sekundarnih izvora zvuka. Pozicija i vrsta. Vrste delovanja.
4. Serijski broj i broj tipa svih upotrebljenih mikrofona, merača nivoa zvuka i analizatora zvuka. Dužina i tipovi upotrebljenih kablova.
5. Pozicija posmatrača.
6. Pozicija i orijentacija mikrofona za vreme merenja.
7. Ponderacione krive i brzina merača upotrebljenog u meraču nivoa zvuka.
8. Temperatura mikrofona.
9. Spektar ambijentalnog šuma sa uređajem koji se meri, dok nije u stanju upotrebe.
10. Iznos kolebanja merača, plus ili minus.
11. Rezultati održavanja i provere kalibracije.
12. Ime posmatrača.
13. Datum i vreme održavanja merenja.

Kada se obave merenja, da bi se odredio uticaj zvuka na osoblje koje je bilo izloženo merenju, treba zabeležiti sledeće:

1. Osoblje koje je izloženo zvuku – direktno ili indirektno
2. Vremenski raspored izloženosti zvuku
3. Pokušaji kontrole zvuka i zaštite osoblja
4. Audiometrijsko ispitivanje

## 6.2 ANALIZA FREKVENCIJSKOG SPEKTRA JEDNODELNE C FRULE

### 6.2.1 PRIRODNA POBUDA

Tokom 2005. godine u saradnji sa Ministarstvom prosvete i Centrom za ranu muziku „Renesans“ iniciran je Projekat za uvođenje muzičkog instrumenta frula u plan i program predmeta Muzičko vaspitanje u osnovnim školama. Osmišljeno je da to bude C frula jer je najjednostavnija za učenje i sviranje. Zato su frule sa kojima su merenja urađena u C tonalitetu. S druge strane, neophodno je da se deci obezbede što kvalitetnije frule koje neće mnogo koštati. Zbog toga su uzete u razmatranje frule napravljene od različitih vrsta drveta. Pošto zvuk frule zavisi od konstrukcije i dimenzija same frule, oformljene su i grupe u zavisnosti od unutrašnjeg prečnika same cevi frule. Analiza frekvencijskog spektra frula izvršena je sa aspekta proučavanja frekvencije pojedinih harmonika svakog tona, upoređivanjem izmerene frekvencije pojedinih harmonika sa idealnom frekvencijom pojedinih harmonika i upoređivanjem međusobnih nivoa pojedinih harmonika. Radi analize frekvencijskog spektra izvršeno je merenje navedenih parametara zvuka frula koje je izradio i na njima odsvirao istu definisanu sekvencu graditelj frula i izvođač na fruli Milorad Marić.

Umetnik na fruli g. Marić je odsvirao tonove C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  na svakoj od 7 proučavanih frula, ujednačenim nivoom. Tonovi su bili ujednačenog trajanja, oko 2 sekunde svaki. Ovakvo merenje je nazvano merenje sa prirodnom pobudom.

#### 6.2.1.1 METODOLOGIJA MERENJA

Merenje je realizovano u tonskom studiju Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu koji se koristi za mnoga snimanja kao i za edukaciju studenata. Snimanje je urađeno u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4 s, temperatura oko 25 °C, vlaga mala, ambijentalna buka oko 35 dB). Studijski prostor je akustički obrađena prostorija (kosi zid, akustički obrađeni pod i tavanica). Frulaš je bio lociran u centar, okružen sa 5 akustičkih paravana dimenzija 2 m x 1 m x 0.25 m, koji su dodatno akustički obradili studio smanjujući neželjene refleksije. Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena tako da je osa mikrofona postavljena pod uglom od 30° u odnosu na osu frule (30 – tak cm ispred i 30 – tak cm iznad izlaza cevi), kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Na taj način je membrana mikrofona prikupila zvuk i sa donjeg kraja cevi frule i zvuk koji se emituje iz rupica frule.

Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa

Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

Formirane su 3 grupe frula: prvu grupu čini 5 frula izrađenih od različitih vrsta drveta ( bukva, mahagoni, šljiva, bagrem, orah) sa istim unutrašnjim prečnikom (  $\Phi = 14$  mm), drugu grupu čine dve frule izrađene od različitih vrsta drveta ( bagrem, trešnja ) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 15$  mm), treću grupu čine dve frule napravljene od iste vrste drveta ( bagrem ) sa različitim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  mm i  $\Phi = 15$  mm). Izabrana je sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno.

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest tonova za pet frula iz prve grupe, petnaest tonova za frule iz druge grupe i petnaest tonova za frule iz treće grupe. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

#### 6.2.1.2 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja za 1. grupu frula pokazala je: za frulu 18 ( bukva ) za ton  $c^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 9 dB, peti od četvrtog za oko 4 dB, deseti za oko 8 dB od sedmog, 6 dB od osmog i 3 dB od devetog harmonika. Za ton  $d^2$  treći i drugi harmonik su jednaki, peti je jači od četvrtog za oko 8 dB, osmi od sedmog za oko 2 dB, a šesti harmonik nedostaje. Za ton  $e^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, šesti od petog za oko 10 dB, deveti od osmog za oko 2 dB. Za ton  $f^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, sedmi od šestog za oko 8 dB, deveti od osmog za oko 8 dB. Za ton  $g^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, šesti od petog za oko 8 dB, sedmi od šestog za oko 3 dB, deveti od osmog za oko 14 dB. Za ton  $a^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 4 dB, peti od četvrtog za oko 0.5 dB, sedmi od šestog za oko 2.5 dB, deveti od osmog za oko 3 dB. Za ton  $h^2$  drugi harmonik je razliven od 1981 do 2143 Hz, treći harmonik je u skladu s tim jači od drugog od 22 do 28 dB, peti od četvrtog za oko 15 dB, šesti od četvrtog za oko 3 dB, sedmi od četvrtog za oko 7 dB i od šestog za oko 4 dB. Za ton  $c^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 11 dB, peti od četvrtog za oko 15 dB, šesti od četvrtog za oko 7 dB, osmi od sedmog za oko 4 dB. Za ton  $d^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, peti od četvrtog za oko 7 dB. Za ton  $e^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 17 dB, četvrti od drugog za oko 8 dB. Za ton  $f^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 15 dB, peti od četvrtog za oko 7 dB, sedmi od šestog za oko 9 dB. Za ton  $g^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 9 dB, peti od četvrtog za oko 8 dB. Za ton  $a^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 9 dB. Za ton  $h^3$  treći harmonik je jači od

drugog za oko 11 dB. Za ton  $c^4$  treći harmonik je jači od drugog za oko 19 dB. Za frulu 21 ( bagrem ) za ton  $c^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 7 dB, četvrti harmonik je dvoglav na 2134 i 2229 Hz, peti harmonik je dvoglav na 2680 i 2707 Hz, peti harmonik je jači od četvrtog za oko 9 dB. Za ton  $d^2$  peti harmonik je jači od četvrtog za oko 8 dB. Za ton  $e^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 15 dB, šesti od petog za oko 8 dB. Za ton  $f^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 20 dB, sedmi od šestog za oko 5 dB. Za ton  $g^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, peti od četvrtog za oko 14 dB. Za ton  $a^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 6 dB, šesti od petog za oko 2 dB, sedmi od petog za 1 dB. Za ton  $h^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 10 dB, peti od četvrtog za oko 9 dB, šesti od četvrtog za oko 3 dB. Za ton  $c^3$  treći harmonik je jači od drugog za 11 dB, peti od četvrtog za oko 20 dB, šesti od četvrtog za oko 7 dB. Za ton  $d^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 11 dB, četvrti od drugog za oko 7 dB. Za ton  $e^3$  drugi harmonik je razliven od 2047 do 2914 Hz, treći harmonik je jači od drugog za oko 24 dB, peti od četvrtog za oko 7 dB. Za ton  $f^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 7 dB, peti od četvrtog za oko 7 dB. Za ton  $g^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 15 dB, četvrti od drugog za oko 3 dB. Za ton  $a^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 8 dB, sedmi od šestog za oko 3 dB. Za ton  $h^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 12 dB, peti od četvrtog za oko 2 dB. Za ton  $c^4$  treći harmonik je jači od drugog za oko 13 dB, peti od četvrtog za oko 0.5 dB.

U tabeli 6.2.1.2.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule 18, napravljene od bukovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

Tabela 6.2.1.2.1: Osnovni rezultati merenja za frulu 18, napravljenu od bukve, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

<b>18</b>	<b>bukva</b>	<b><math>\Phi = 14</math></b>	<b>NEUMANN U 87</b>	<b>NORMAL</b>	<b><math>c^2 = 523,25</math> Hz</b>
<b>HARMONIK</b>	<b>IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>IZMERENA FREKVENCIJA <math>f_1</math></b>	<b>IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>ODSTUPANJE <math>\Delta f</math></b>	<b>IZMERENI NIVO [dB]</b>
1	1 : 1	528	1.009	4,75	- 53.0
2	2 : 1	1059	2.023	12,5	- 74.2
3	3 : 1	1588	3.034	18,25	- 65.9
4	4 : 1	2133	4.076	40	- 81.9
5	5 : 1	2648	5.060	31,75	- 77.3
6	6 : 1	3184	6.085	44,5	- 85.0
7	7 : 1	3689	7.050	26,25	- 94.3
8	8 : 1	4235	8.093	49	- 96.9
9	9 : 1	4774	9.123	64,75	- 91.7
10	10 : 1	5283	10.96	50,5	- 88.6

U tabeli 6.2.1.2.2 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule 19, napravljene od drveta mahagonija., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

U tabeli 6.2.1.2.3 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule 20, napravljene od drveta šljive, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

Tabela 6.2.1.2.2: Osnovni rezultati merenja za frulu 19, napravljenu od mahagonija, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

<b>19</b>	<b><i>mahagoni</i></b>	<b><math>\Phi = 14</math></b>	<b><i>NEUMANN U 87</i></b>	<b><i>NORMAL</i></b>	<b><math>c^2 = 523,25</math> Hz</b>
<b>HARMONIK</b>	<b>IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>IZMERENA FREKVENCIJA <math>f_1</math></b>	<b>IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>ODSTUPANJE <math>\Delta f</math></b>	<b>IZMERENI NIVO [dB]</b>
1	1 : 1	533	1.018	9,75	- 51.5
2	2 : 1	1059	2.023	12,5	- 69.0
3	3 : 1	1588	3.034	18,25	- 71.1
4	4 : 1	2133	4.076	40	- 80.4
5	5 : 1	2660	5.083	43,75	- 76.8
6	6 : 1	3198	6.111	58,5	- 84.5
7	7 : 1	3689	7.050	26,25	- 95.3
8	8 : 1	4255	8.133	69	- 87.1
9	9 : 1	4752	9.081	42,75	- 94.8
10	10 : 1	5307	10.042	74,5	- 87.6

Tabela 6.2.1.2.3: Osnovni rezultati merenja za frulu 20, napravljenu od šljive, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

<b>20</b>	<b><i>šljiva</i></b>	<b><math>\Phi = 14</math></b>	<b><i>NEUMANN U 87</i></b>	<b><i>NORMAL</i></b>	<b><math>c^2 = 523,25</math> Hz</b>
<b>HARMONIK</b>	<b>IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>IZMERENA FREKVENCIJA <math>f_1</math></b>	<b>IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA <math>f_1/f_0</math></b>	<b>ODSTUPANJE <math>\Delta f</math></b>	<b>IZMERENI NIVO [dB]</b>
1	1 : 1	531	1.015	7,75	- 51.4
2	2 : 1	1055	2.053	8,5	- 71.9
3	3 : 1	1590	3.038	20,25	- 71.4
4	4 : 1	2116	4.043	23	- 80.9
5	5 : 1	2649	5.062	32,75	- 83.3
6	6 : 1	3201	6.117	61,5	- 86.6
7	7 : 1	3702	7.075	39,25	- 103.3
8	8 : 1	4224	8.072	38	- 93.8
9	9 : 1	4778	9.131	68,75	- 93.8
10	10 : 1	5287	10.104	54,5	- 100.9

U tabeli 6.2.1.2.4 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ ,

odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule 21, napravljene od bagremovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

U tabeli 6.2.1.2.5 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule 22, napravljene od orahovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

Tabela 6.2.1.2.4: Osnovni rezultati merenja za frulu 21, napravljenu od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	539	1.03	15.76	-50.4
2	2 : 1	1071	2.048	24.5	-66.1
3	3 : 1	1618	3.092	48.25	-59
4	4 : 1	2134	4.078	41	-85.7
5	5 : 1	2680	5.121	63.75	-76.6
6	6 : 1	3223	6.159	83.5	-83.3
7	7 : 1	3820	7.3	157.25	-95.7
8	8 : 1	4271	8.162	85	-99.5
9	9 : 1	4893	9.351	183.75	-92.3
10	10 : 1	5340	10.205	107.5	-85.2

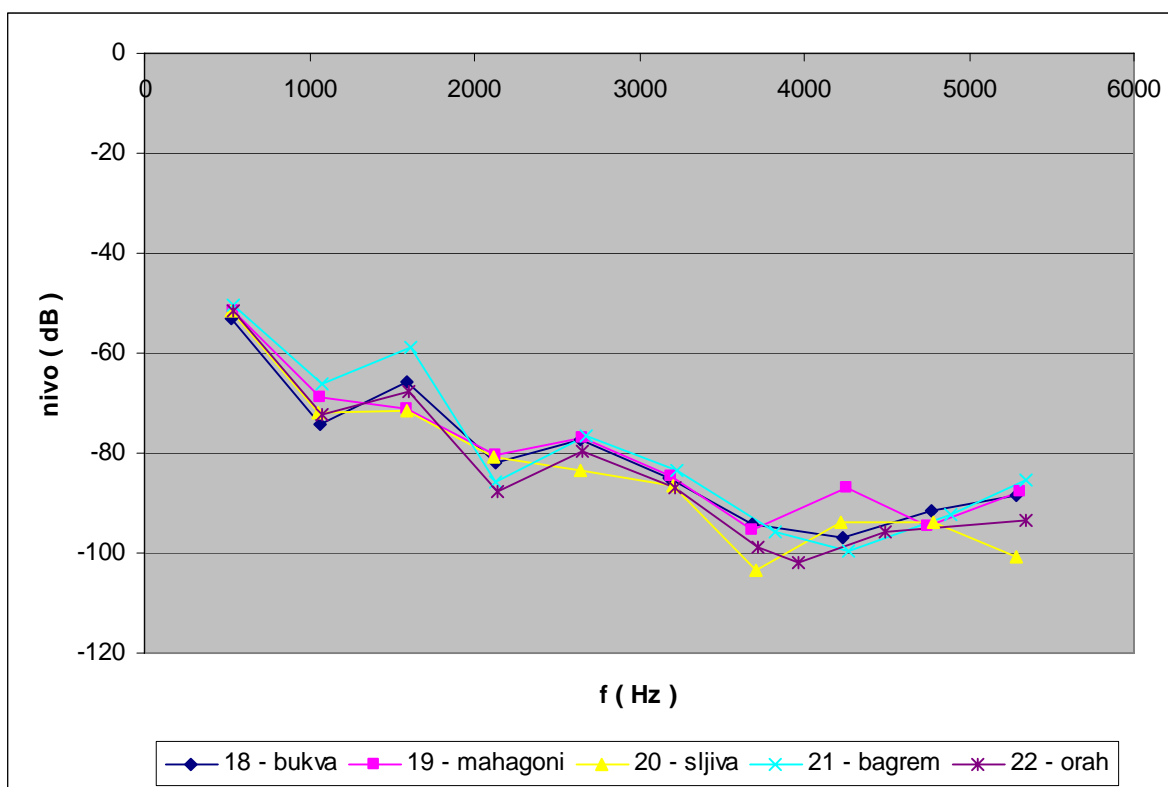
Tabela 6.2.1.2.5: Osnovni rezultati merenja za frulu 22, napravljenu od oraha, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	534	1.020	10,75	- 51.4
2	2 : 1	1073	2.050	26,5	- 72.3
3	3 : 1	1605	3.067	35,25	- 67.6
4	4 : 1	2141	4.091	48	- 87.6
5	5 : 1	2651	5.066	34,75	- 79.5
6	6 : 1	3218	6.150	78,5	- 87.1
7	7 : 1	3717	7.103	54,25	- 99.0
8	8 : 1	<b>4272</b>	8.164	86	- 102.0
9	9 : 1	<b>4863</b>	9.293	153.75	- 95.7
10	10 : 1	5342	10.209	109,5	- 93.3

Na slici 6.2.1.2.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za svih pet frula iz prve grupe. Može se uočiti da je slabljenje

harmonika najmanje za tonove odsvirane na fruli od bagremovog drveta, a zatim mahagonija.

Analiza rezultata merenja za drugu grupu frula pokazala je: za frulu 23 ( bagrem ) za ton  $c^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 9 dB, peti od četvtrog za oko 10 dB, šesti od četvtrog za oko 2 dB, šesti od petog za oko 1 dB. Za ton  $d^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 6 dB, peti od četvtrog za oko 10 dB, , šesti od četvtrog za oko 1 dB. Za ton  $e^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 15 dB, sedmi od petog za oko 1 dB, osmi od sedmog za oko 1 dB, deveti od šestog za oko 2 dB. Za ton  $f^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 9 dB, peti od četvtrog za oko 3 dB, osmi od šestog za oko 1.5 dB, osmi od sedmog za oko 6 dB. Za ton  $g^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 5 dB, peti od četvtrog za oko 21 dB, šesti od četvtrog za oko 23 dB, šesti od petog za oko 2 dB, sedmi od četvtrog za oko 22 dB, osmi od četvtrog



Slika 6.2.1.2.1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite vrste drveta ( $\Phi = 14$  mm)

za oko 13 dB, deveti od četvtrog za oko 6 dB, deseti od četvtrog za oko 6 dB. Za ton  $a^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 7 dB, šesti od četvtrog za oko 6 dB, šesti od petog za oko 8 dB, sedmi od četvtrog za oko 2 dB, sedmi od petog za oko 4 dB. Za ton  $h^2$  treći harmonik je jači od drugog za oko 6 dB, peti od četvtrog za oko 5 dB, šesti od četvtrog za oko 3 dB, deseti od devetog za oko 3 dB. Za ton  $c^3$  treći harmonik je jači od drugog za oko 5 dB, peti od četvtrog za oko 16 dB, šesti od četvtrog za oko 7 dB. Za ton  $d^3$  treći

harmonik je jači od drugog za oko 7 dB, peti od četvrtog za oko 10 dB. Za ton e<sup>3</sup> četvrti harmonik je jači od trećeg za oko 6 dB, četvrti od drugog za oko 4 dB. Za ton f<sup>3</sup> treći harmonik je jači od drugog za oko 5 dB, deveti od osmog za oko 3 dB, deseti od osmog za oko 2 dB. Za ton g<sup>3</sup> treći harmonik je jači od drugog za oko 22 dB, četvrti od drugog za oko 16 dB, peti od drugog za oko 10 dB, sedmi od šestog za oko 8 dB, osmi od šestog za oko 10 dB. Za ton a<sup>3</sup> treći harmonik je jači od drugog za oko 13 dB. Za ton h<sup>3</sup> treći harmonik je jači od drugog za oko 7 dB. Za ton c<sup>4</sup> treći harmonik je jači od drugog za oko 18 dB, peti od četvrtog za oko 8 dB, šesti od četvrtog za oko 1 dB.

U tabeli 6.2.1.2.6 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup>, odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup>, odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup> i izmereni nivo pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup> frule 23, napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 15$  mm.

Tabela 6.2.1.2.6: Osnovni rezultati merenja za frulu 23, napravljenu od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 15$  mm

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	c <sup>2</sup> = 523,25 Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA f1/f0	IZMERENA FREKVENCIJA f1	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA f1/f0	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	526	1.005	2.75	-50.9
2	2 : 1	1067	2.039	20.5	-79.5
3	3 : 1	1573	3.006	3.25	-70.4
4	4 : 1	2099	4.011	6	-90.9
5	5 : 1	2612	4.991	-4.25	-80.4
6	6 : 1	3139	5.999	-0.5	-89
7	7 : 1	3662	6.998	-0.75	-88
8	8 : 1	4167	7.963	-19	-94.7
9	9 : 1	4671	8.926	-38.25	-94.7
10	10 : 1	5237	10.003	4.5	-90.4

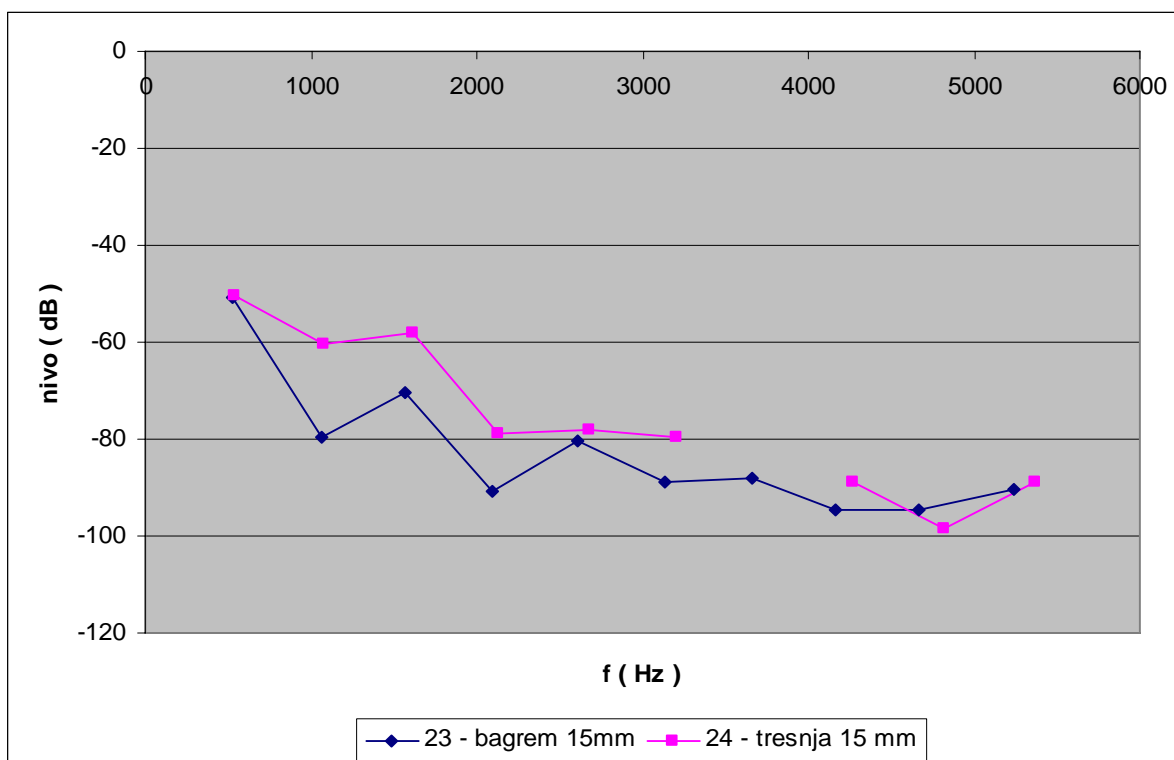
U tabeli 6.2.1.2.7 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup>, odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup>, odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup> i izmereni nivo pojedinih harmonika tona c<sup>2</sup> frule 24, napravljene od trešnjinog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 15$  mm.

Na slici 6.2.1.2.2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za obe frule iz druge grupe. Može se uočiti da je slabljenje harmonika manje za tonove odsvirane na fruli od trešnjinog nego bagremovog drveta.



Tabela 6.2.1.2.7: Osnovni rezultati merenja za frulu 24, napravljenu od trešnje, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 15$  mm

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	537	1.026	13,75	- 50.4
2	2 : 1	1073	2.050	26,5	- 60.4
3	3 : 1	1613	3.082	43,25	- 58.0
4	4 : 1	2130	4.070	37	- 79.0
5	5 : 1	2677	5.116	60,75	- 78.0
6	6 : 1	3202	6.119	62,5	- 79.5
7	7 : 1				
8	8 : 1	4272	8.164	86	- 89.0
9	9 : 1	4813	9.198	103,75	- 98.5
10	10 : 1	5369	10.260	136,5	- 89.0



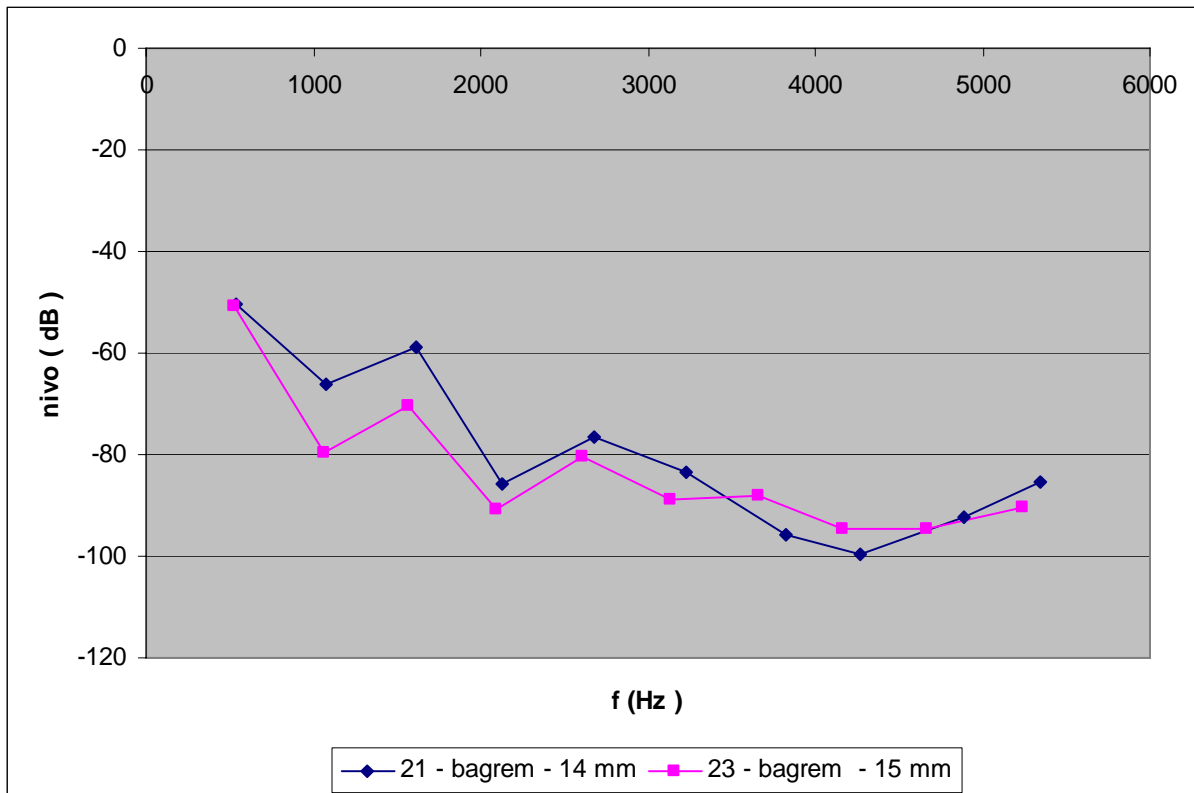
Slika 6.2.1.2.2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite vrste drveta ( $\Phi = 15$  mm)

Analiza rezultata merenja za treću grupu frula pokazala je: za frulu 21 ( bagrem,  $\Phi = 14$  ) treći harmonik je dominantan u odnosu na drugi kroz ceo opseg, izuzev za  $d^2$ , najveće slabljenje za osnovni harmonik je za  $c^2$  ( - 50.4 dB ). Intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova ( do - 17,1 dB za  $a^3$  ). Frula ima veliki sopstveni šum ( oko 24 dB ). Za frulu 23 ( bagrem,  $\Phi = 15$  ) treći harmonik je dominantan u odnosu na drugi kroz ceo

opseg, izuzev za  $e^3$ , najveće slabljenje je za osnovni harmonik za  $c^2$  (- 50.9 dB ).

Intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova ( do - 16.6 dB za  $h^3$  ). Frula ima veliki sopstveni šum ( oko 22 dB ).

Na slici 6.2.1.2.3 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za obe frule iz treće grupe. Može se uočiti da je slabljenje harmonika manje za tonove odsvirane na fruli od bagremovog drveta unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  nego  $\Phi = 15$  ( sa izuzetkom sedmog i osmog harmonika ).



Slika 6.2.1.2.3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite prečnike cevi (bagrem)

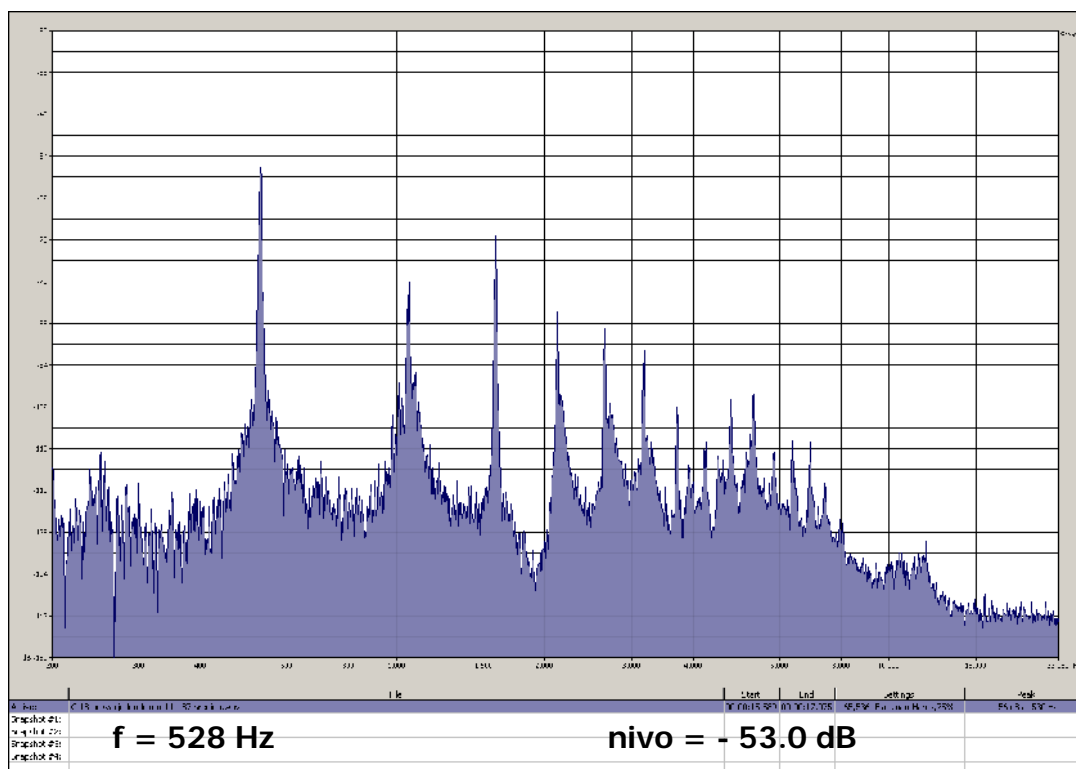
### 6.2.1.3 SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument ( prema frekvenciji zvučne viljuške ). Kod svih testiranih frula postoje određena odstupanja u štimu. Za prvu grupu frula tonski opseg instrumenta prostire se od 528 do 2123 Hz ( frula 18 ), od 533 do 2143 Hz ( frula 19 ), od 531 do 2135 Hz ( frula 20 ), od 539 do 2184 Hz ( frula 21 ), od 534 do 2162 Hz ( frula 22 ). Za drugu grupu od 526 do 2037 Hz ( frula 23 ), od 537 do 2109 Hz ( frula 24 ). U trećoj grupi su frule 21 i 23. Odstupanja frekvencija su od 5 do 16 Hz u drugoj oktavi i od 8 do 91 Hz u trećoj oktavi. Interval polustepena se prostire od 32

do 64 Hz za drugu oktavu i od 64 do 128 Hz za treću oktavu. Dobijeni rezultati ne premašuju osminu stepena.

Izračunati su viši harmonici za svaki ton pojedinačno za ceo opseg frule od dve oktave ( petnaest tonova ) i upoređeni sa rezultatima dobijenim merenjem. Postupak je ponovljen za svih pet frula prve grupe, obe frule druge grupe i obe frule treće grupe. Analiza pokazuje da su odstupanja frekvencija za frule prve grupe: od 4.75 do 64.75 Hz za ton  $c^2$ , od 30 do 166 Hz za ton  $c^4$  frule 18, od 9.75 do 74.5 Hz za  $c^2$  i od 50 do 166 Hz za  $c^4$  frule 19, od 7.75 do 68,75 Hz za  $c^2$  i od 42 do 349 Hz za ton  $c^4$  frule 20, od 15.76 do 183.75 Hz za ton  $c^2$  i od 91 do 442 Hz za  $c^4$  frule 21, od 10.75 do 153.75 Hz za  $c^2$  i od 69 do 511 Hz za ton  $c^4$  frule 22. Odstupanja frekvencija za frule druge grupe su: od 2.75 do - 38.25 Hz za ton  $c^2$  i od - 81 do - 406 Hz za ton  $c^4$  frule 23, od 13.75 do 136.5 Hz za  $c^2$  i od 2 do - 89 Hz za  $c^4$  frule 24.

Na slici 6.2.1.3.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 18 (bukva).

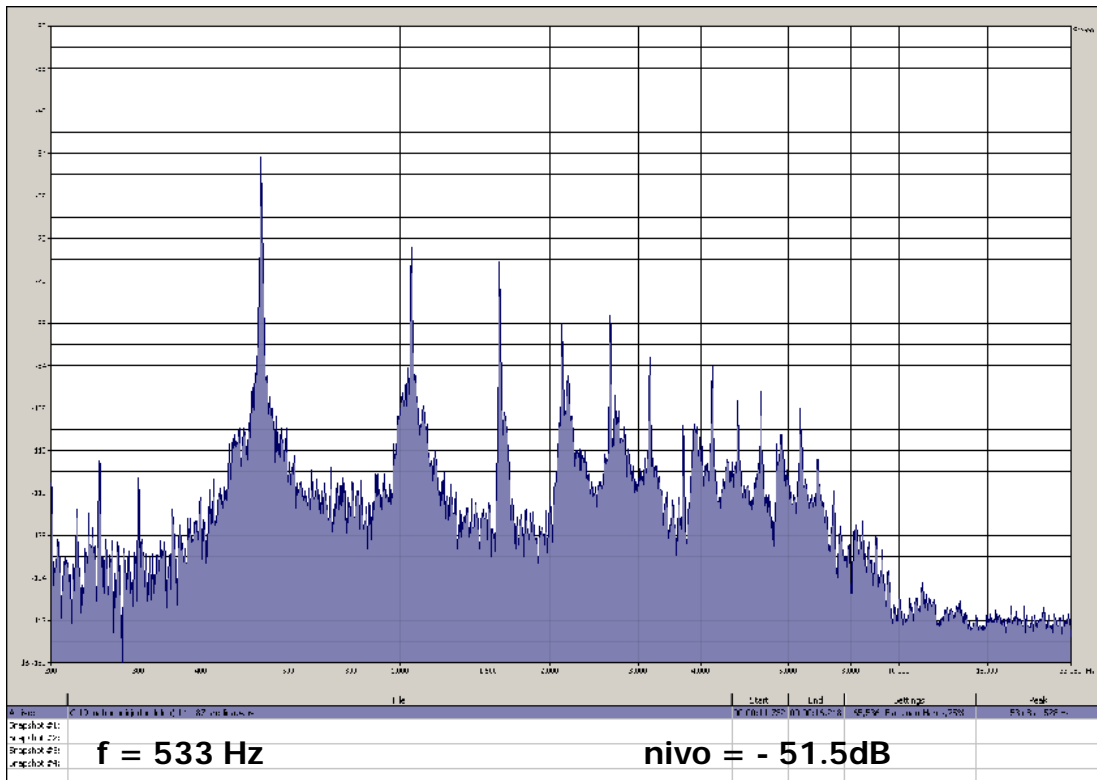


Slika 6.2.1.3.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

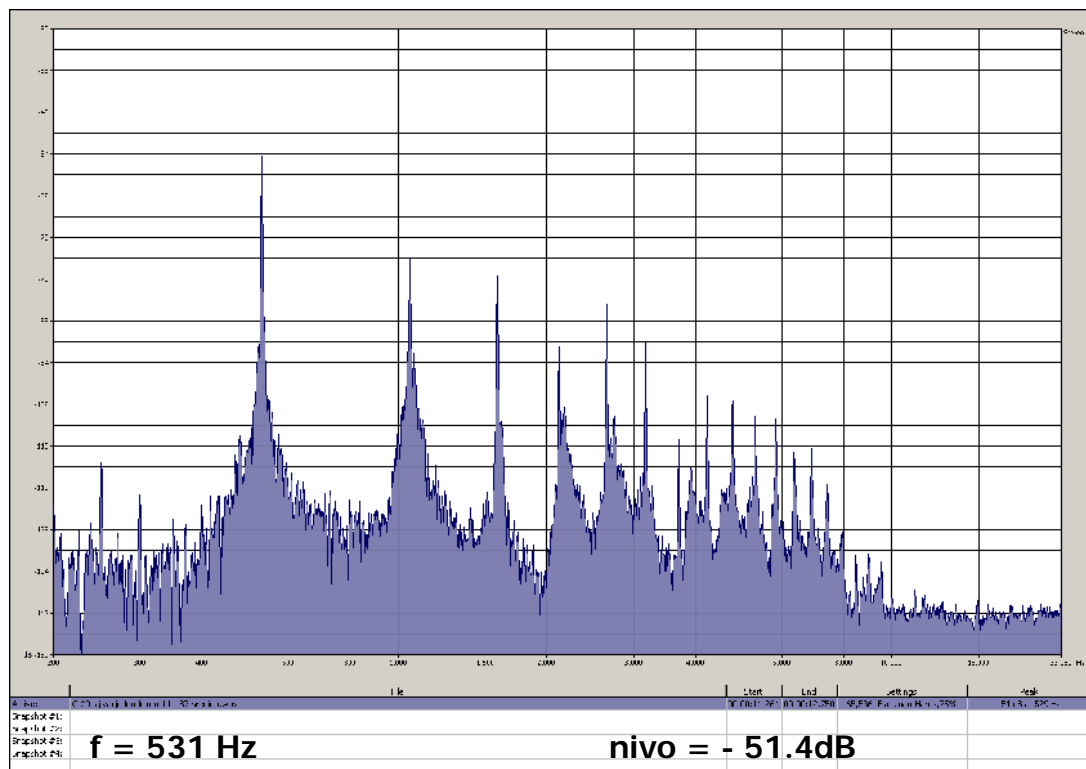
Na slici 6.2.1.3.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 19 (mahagoni).

Na slici 6.2.1.3.3 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 20 (šljiva).

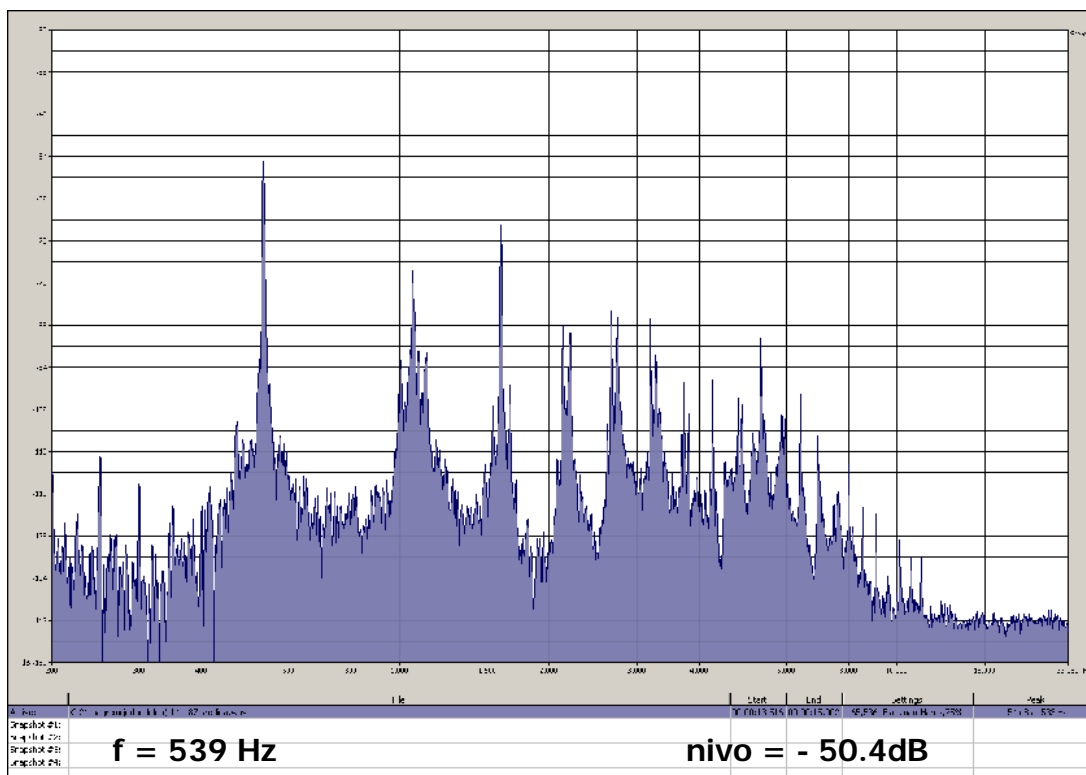
Na slici 6.2.1.3.4 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 21 (bagrem).



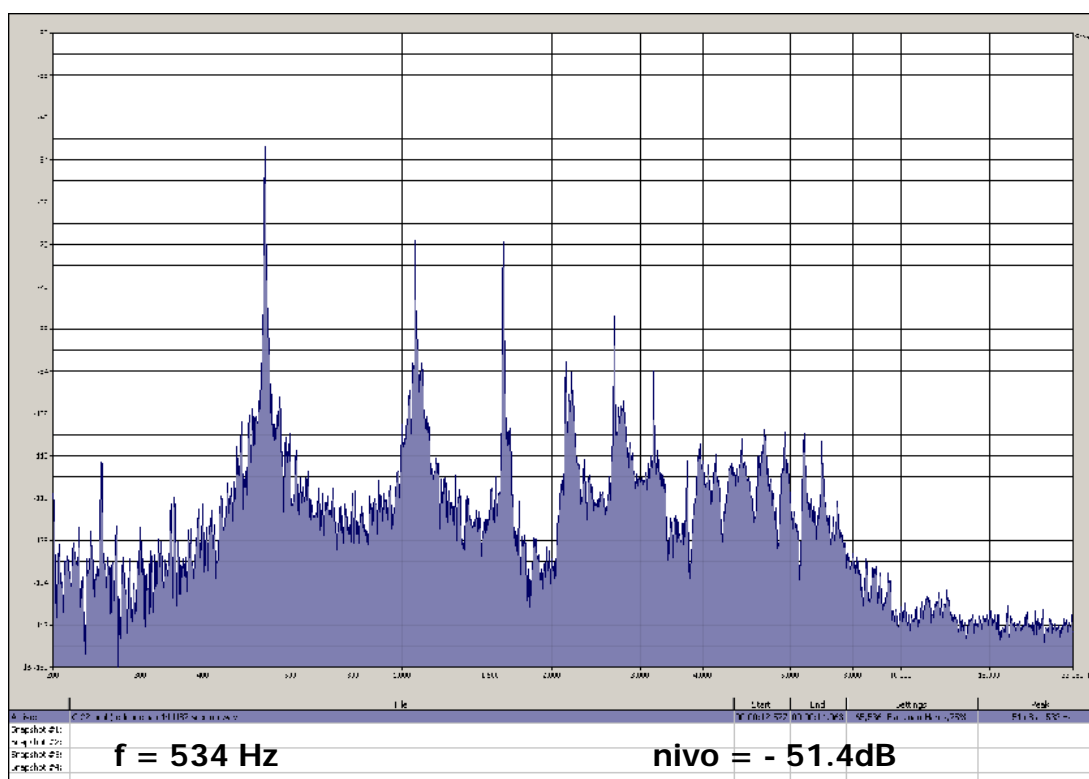
*Slika 6.2.1.3.2: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*



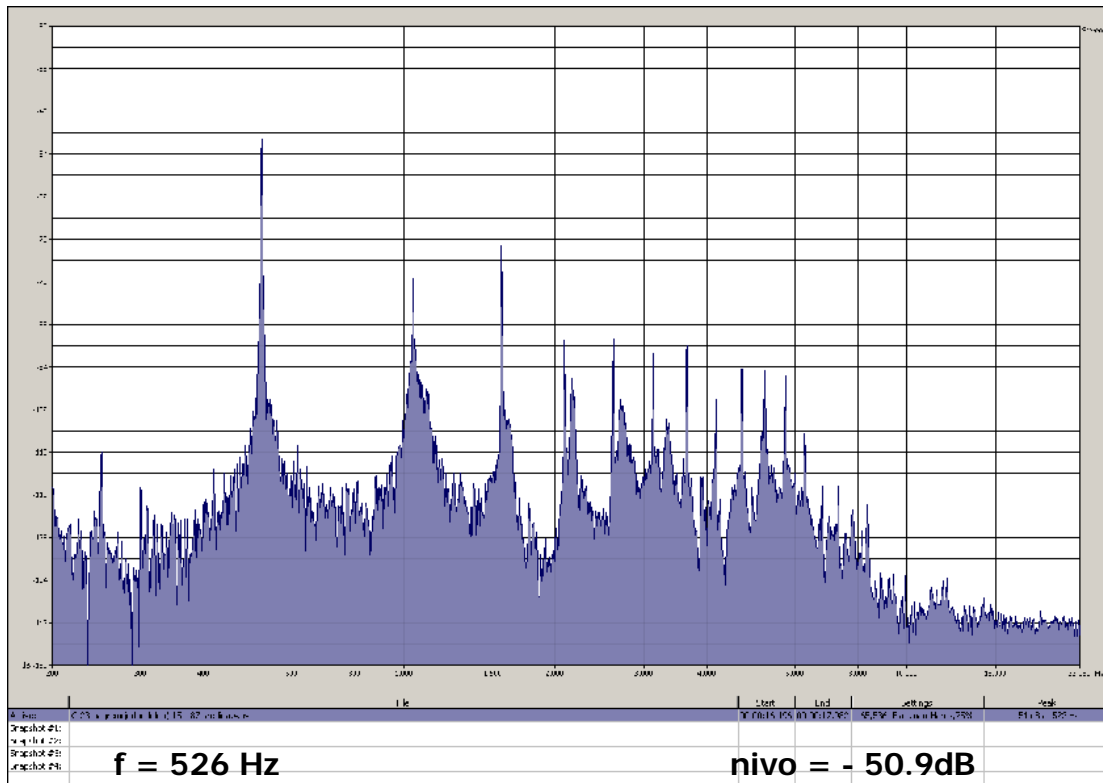
*Slika 6.2.1.3.3: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)*



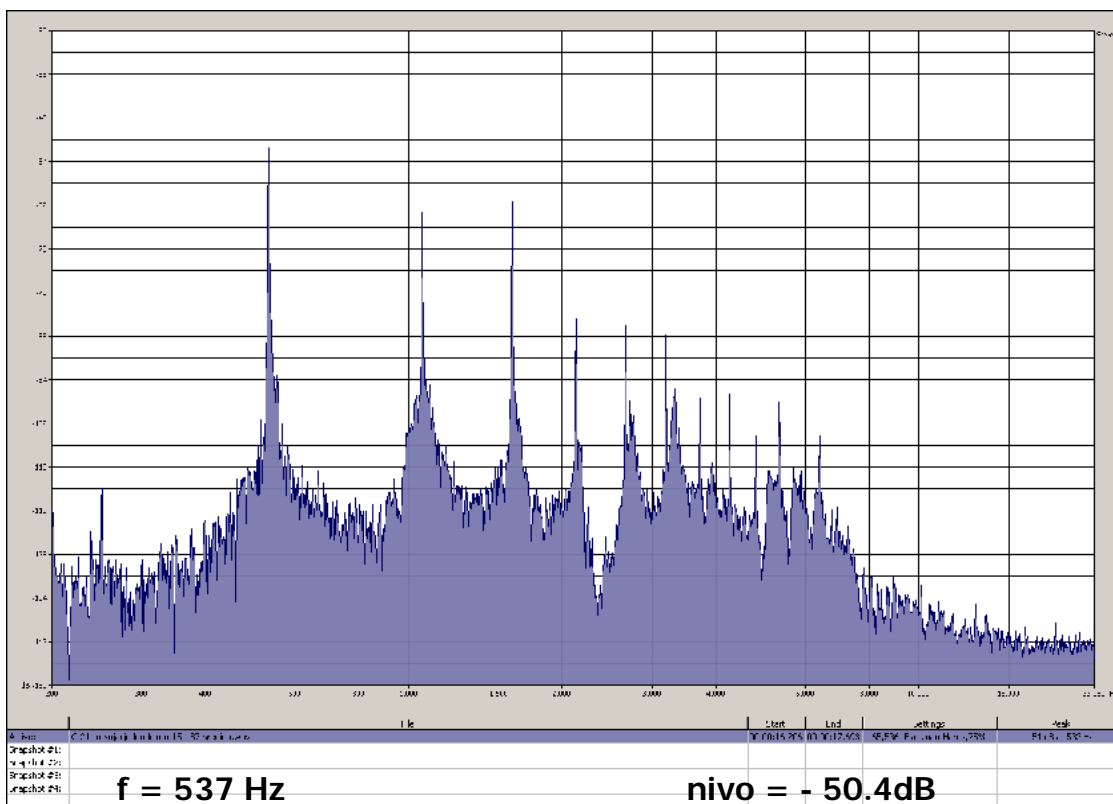
Slika 6.2.1.3.4: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 6.2.1.3.5: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 6.2.1.3.6: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



Slika 6.2.1.3.7: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

Na slici 6.2.1.3.5 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 22 (orah).

Na slici 6.2.1.3.6 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 23 (bagrem).

Na slici 6.2.1.3.7 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 24 (trešnja).

Analizom rezultata merenja može se izvesti zaključak da frekvencijski spektri proučenih frula : imaju veliki sopstveni šum, javlja se intenzivni šum ( skoro kao dodatni harmonik) na oko 0.5 i 1.5 frekvencije osnovnog harmonika u gornjem registru (preduvanoj oktavi ). Kod sve tri analizirane grupe frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi u celom tonskom opsegu. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu. Frule sa unutrašnjim prečnikom cevi  $\Phi = 15$  mm imaju bolje karakteristike : odstupanje frekvencije harmonika od idealne manje je nego kod frula sa unutrašnjim prečnikom  $\Phi = 14$  mm, frekvencijski odnos harmonika mnogo je bliži idealnom nego kod jednodelnih frula unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

## 6.2.2 VEŠTAČKA POBUDA

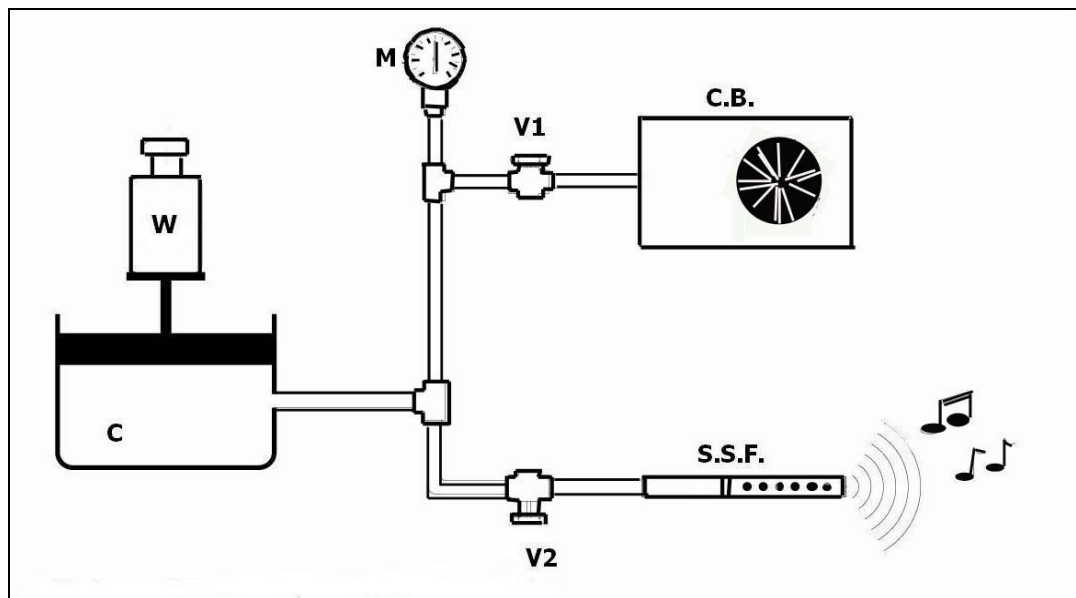
Merenje sa veštačkom pobudom je ono merenje kod kojeg je ton na fruli dobijen uduvavanjem vazduha pomoću aparature.

### 6.2.2.1 APARATURA

Aparatura je osmišljena prema polaznim pretpostavkama: potrebno je da postoji mogućnost regulacije pritiska za svaki odsvirani ton, pritisak uduvavanog vazduha u cev mora da bude konstantan tokom trajanja jednog tona, aparatura mora da bude bešumna da ne bi ometala snimanje zvuka frule. Osmišljeno je da se napravi komora u koju treba upumpati vazduh i stvoriti određeni nadpritisak. Zatim delovanjem tegova određene težine ispumpavati vazduh iz komore u frulu. Početna ideja da se vazduh upumpava u komoru pomoću aksijalnog ventilatora se pokazala neuspešnom jer je vazduh nakon dostizanja određenog nivoa pritiska u komori izlazio napolje kroz pera ventilatora. Rezultat je bio podjednako neuspešan i u slučaju upotrebljenog ventilatora male snage (25 mW) i velike snage (25 W). Tako smo osmislili da vazдушnu komoru zamenimo kombinovanom hidrauličnom komorom koja se sastoji od: cilindrične plastične cevi zatvorene s jedne strane unutrašnjeg prečnika 110 mm koja je otvorom naniže smeštena u plastičnu cilindričnu cev otvorenu s jedne strane prečnika 160 mm. Unutrašnja cev je spojena preko tanke mesingane cevi unutrašnjeg prečnika 6 mm sa spoljašnjom sredinom. Pumpom se uduvava vazduh u unutrašnju cev do željenog pritiska. Kada je postignut maksimalni nadpritisak vazduh se

iz cevi uduvava u frulu. Regulacija pritiska vazduha koji se uduvava u frulu vrši se izborom tegova različite težine. Regulacija smeru protoka vazduha u cev i u frulu vrši se pomoću dva ventila. Pritisak se meri manometrom za niske pritiske (do 500 mB).

Na slici 6.2.2.1.1 dat je šematski prikaz napravljene aparature.



Slika 6.2.2.1.1: Šematski prikaz aparature

### 6.2.2.2 METODOLOGIJA MERENJA

Pomoću aparature za uduvavanje vazduha odsvirani su tonovi C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  na svakoj od 7 proučavanih frula, ujednačenim nivoom. Tonovi su bili ujednačenog trajanja, oko 2 sekunde svaki.

Formirane su 3 grupe frula: prvu grupu čini 5 frula izrađenih od različitih vrsta drveta (bukva, mahagoni, šljiva, bagrem, orah) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$ ), drugu grupu čine dve frule izrađene od različitih vrsta drveta (bagrem, trešnja) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 15$ ), treću grupu čine dve frule napravljene od iste vrste drveta (bagrem) sa različitim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  i  $\Phi = 15$ ).

Izabrana je muzička sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno [5'].

Objektivnim merenjem nazvano je merenje kod koga je vazduh uduvavan u frulu pomoću aparature (merenje sa veštačkom pobudom). Pritisak uduvanog vazduha u muzički instrument je kontrolisan za svaki ton. Time je izbegnuta proizvoljnost koju u merenje može uneti sam frulaš.

Subjektivnim merenjem nazvano je merenje kod koga frulaš svira tonove na fruli (merenje sa prirodnom pobudom) i on sam spontano vrši regulaciju pritiska uduvanog vazduha u muzički instrument.



### 6.2.2.3 POSTAVKA MERENJA

Za potrebe merenja aparatura se postavi u vertikalni položaj. Spoljašnja cev se napuni vodom do maksimalnog nivoa za koji neće doći do izlivanja vode izvan cevi. Zatim se ubaci unutrašnja cev otvorom naniže i stavi se na vrh te cevi teg definisan za to merenje. Pumpom se uduvava vazduh u unutrašnju cev preko tanke mesingane cevi dok se ne postigne odgovarajući nadpritisak. Za to vreme zatvoren je ventil prema fruli. Kada se postigne željeni pritisak, zatvaramo ventil prema pumpi, otvaramo ventil prema fruli. Za svaki ton na fruli biramo određenu težinu tega. Korišćeni su tegovi od 0 kg, 1 kg, 2 kg, 3 kg, 5 kg, 8 kg i 9 kg.

Snimanje je urađeno u tonskom studiju VISER u Beogradu u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4 s). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika i frekvencijskog spektra je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu (44.1 KHz, 24 bita) na PC računaru.

### 6.2.2.4 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest tonova za pet frula iz prve grupe, petnaest tonova za frule iz druge grupe i petnaest tonova za frule iz treće grupe. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

Za frulu 21 (bagrem) za tonove  $c^2$ ,  $d^2$ ,  $e^2$  i  $f^2$  korišćen je teg od 0 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 7 mB, a u fruli 3 mB. Za tonove  $g^2$ ,  $a^2$ ,  $h^2$  i  $c^3$  korišćen je teg od 1 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 13 mB, a u fruli 5 mB. Za ton  $d^3$  korišćen je teg od 2 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 20 mB, a u fruli 9 mB. Za tonove  $e^3$ ,  $f^3$ ,  $g^3$  i  $a^3$  korišćen je teg od 5 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 41 mB, a u fruli 18 mB. Za tonove  $h^3$  i  $c^4$  korišćen je teg od 8 kg. Pri tome je pritisak u aparaturi 63 mB, a u fruli 24 mB.

U tabeli 6.2.2.4.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, dobijene merenjem sa prirodnom pobudom. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti

upotrebjene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije (sl. 6.2.2.4.1).

Tabela 6.2.2.4.1: Osnovni rezultati merenja za frulu 21, napravljenu od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, za prirodnu pobudu

21	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	subjektivno merenje	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealan odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	539	1.030	15.76	- 50.4
2	2:1	1071	2.048	24.5	- 66.1
3	3:1	1618	3.092	48.25	- 59
4	4:1	2134	4.078	41	- 85.7
5	5:1	2680	5.121	63.75	- 76.6
6	6:1	3223	6.159	83.5	- 83.3
7	7:1	3820	7.300	157.25	- 95.7
8	8:1	4271	8.162	85	- 99.5
9	9:1	4893	9.351	183.75	- 92.3
10	10:1	5340	10.205	107.5	- 85.2

U tabeli 6.2.2.4.2 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, dobijene merenjem sa veštačkom pobudom. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebjene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije (sl. 6.2.2.4.1).

Na slici 6.2.2.4.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frulu 21 ( bagrem  $\Phi = 14$  mm) iz prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih prilikom merenja sa prirodnom (subjektivno) i merenja sa veštačkom (objektivno) pobudom. Može se zaključiti da su mnoge spektralne karakteristike ove frule iste bez obzira na način uduvavanja vazduha u cev (treći harmonik je i kod merenja sa prirodnom pobudom i kod merenja sa veštačkom pobudom često jači od drugog). Kod merenja sa prirodnom pobudom su nivoi pojedinih harmonika ujednačeniji. Kod merenja sa prirodnom pobudom je ujednačeniji pritisak uduvavanja vazduha u cev pa je i nivo zvuka pojedinih tonova

ujednačeniji nego kod merenja sa veštačkom pobudom.

Tabela 6.2.2.4.2: Osnovni rezultati merenja za frulu 21, napravljenu od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, za veštačku pobudu

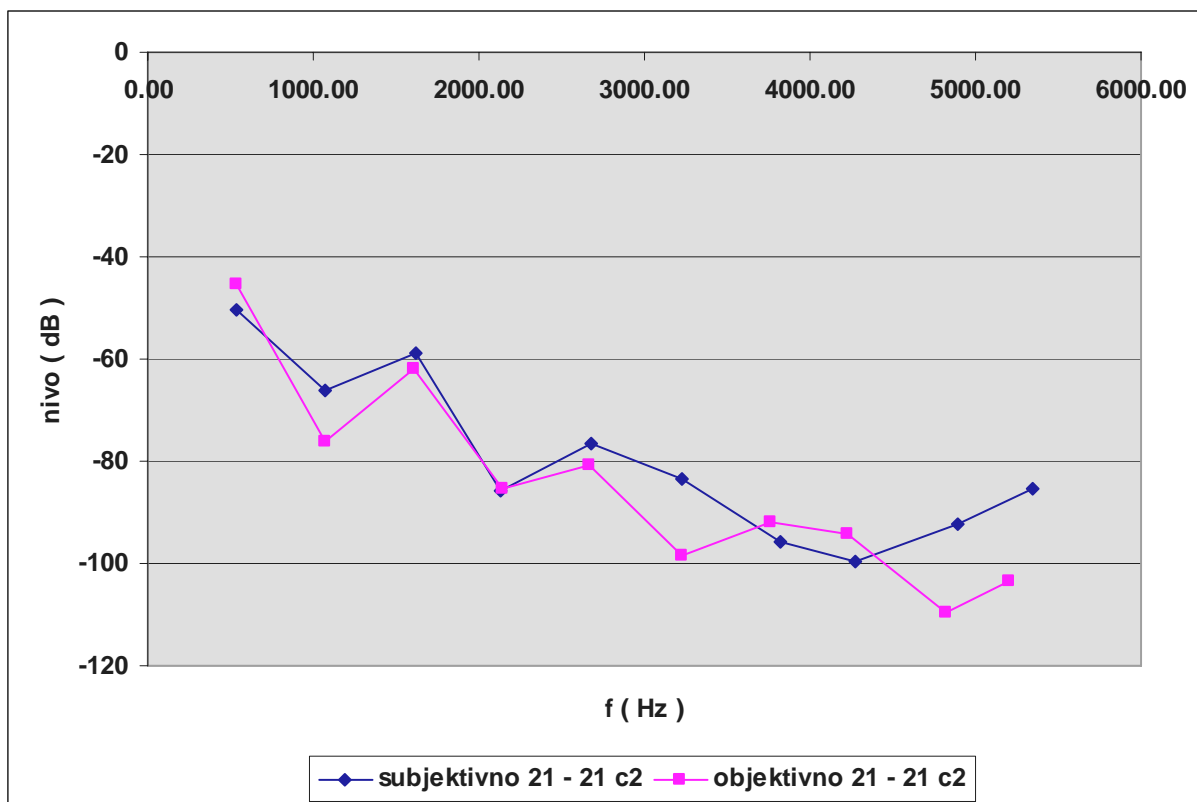
21	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	objektivno merenje	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealan odnos frekvencija $f / f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f / f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	537	1.026	13.75	- 45.2
2	2:1	1070	2.044	23.5	- 76.2
3	3:1	1613	3.082	43.25	- 62.1
4	4:1	2142	4.093	49	- 85.4
5	5:1	2671	5.104	54.75	- 80.7
6	6:1	3227	6.167	87.5	- 98.3
7	7:1	3760	7.185	97.25	- 92.1
8	8:1	4227	8.078	41	- 94.3
9	9:1	4817	9.205	107.75	- 109.5
10	10:1	5200	9.937	32.5	- 103.5

Na slici 6.2.2.4.2 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa prirodnom pobudom.

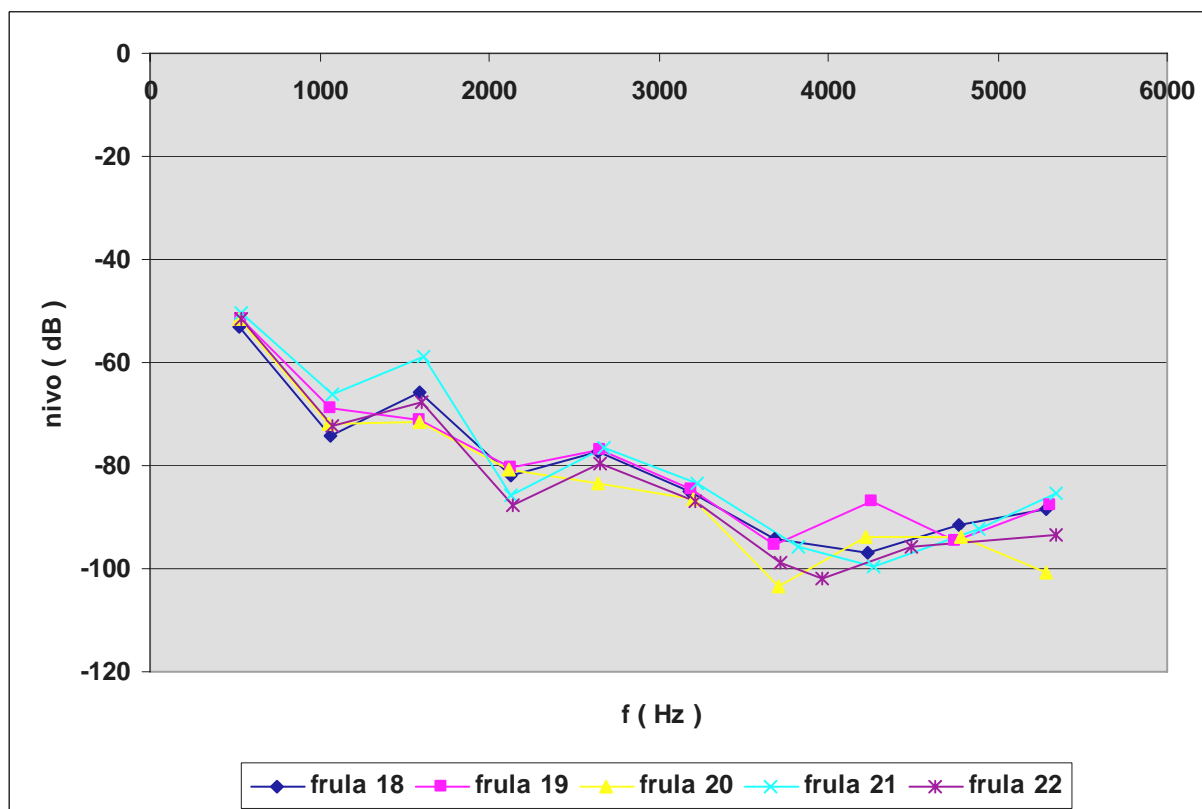
Na slici 6.2.2.4.3 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa veštačkom pobudom.

Sa sl. 6.2.2.4.2 i sl. 6.2.2.4.3 se vidi da zavisnost nivoa slabljenja harmonika od frekvencije za frule prve grupe ima mnogo više linearan oblik prilikom merenja sa veštačkom nego prilikom merenja sa prirodnom pobudom.

Na slici 6.2.2.4.4 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frulu 23 ( bagrem  $\Phi = 15$  mm) iz prve grupe, na osnovu rezultata dobijenih prilikom merenja sa prirodnom (subjektivno) i merenja sa veštačkom (objektivno) pobudom.



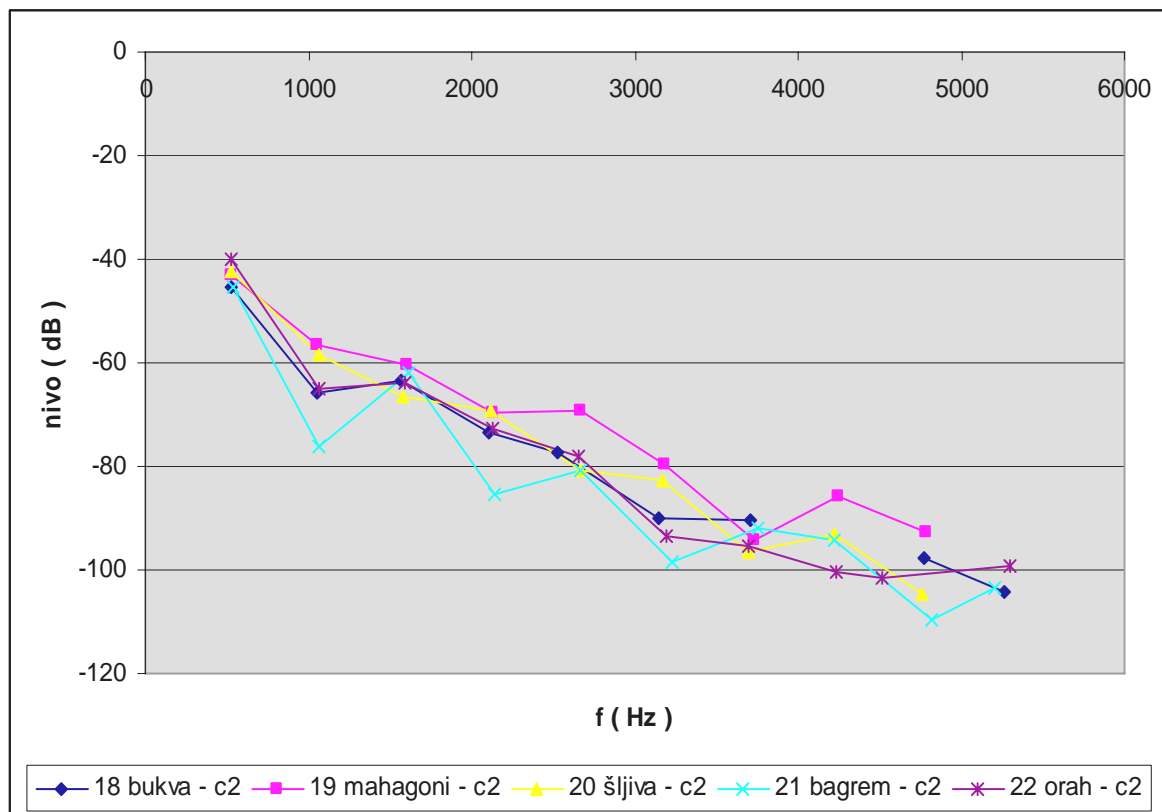
Slika 6.2.2.4.1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frulu 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 6.2.2.4.2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 1. grupe, za prirodnu pobudu

Na slici 6.2.2.4.5 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule druge grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa prirodnom pobudom.

Na slici 6.2.2.4.6 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule druge grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa veštačkom pobudom.



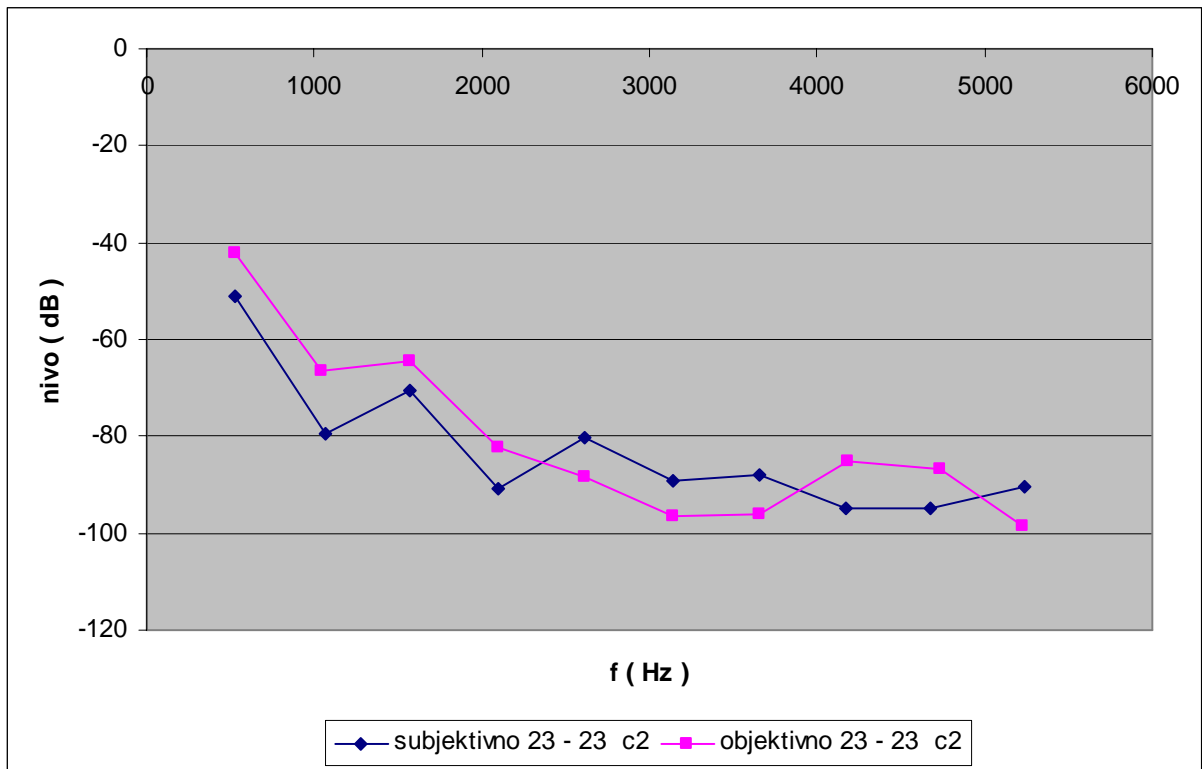
Slika 6.2.2.4.3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 1. grupe, za veštačku pobudu

Sa sl. 6.2.2.4.5 i sl. 6.2.2.4.6 se vidi da zavisnost nivoa slabljenja harmonika od frekvencije za frule druge grupe ima mnogo više linearan oblik prilikom merenja sa veštačkom nego prilikom merenja sa prirodnom pobudom.

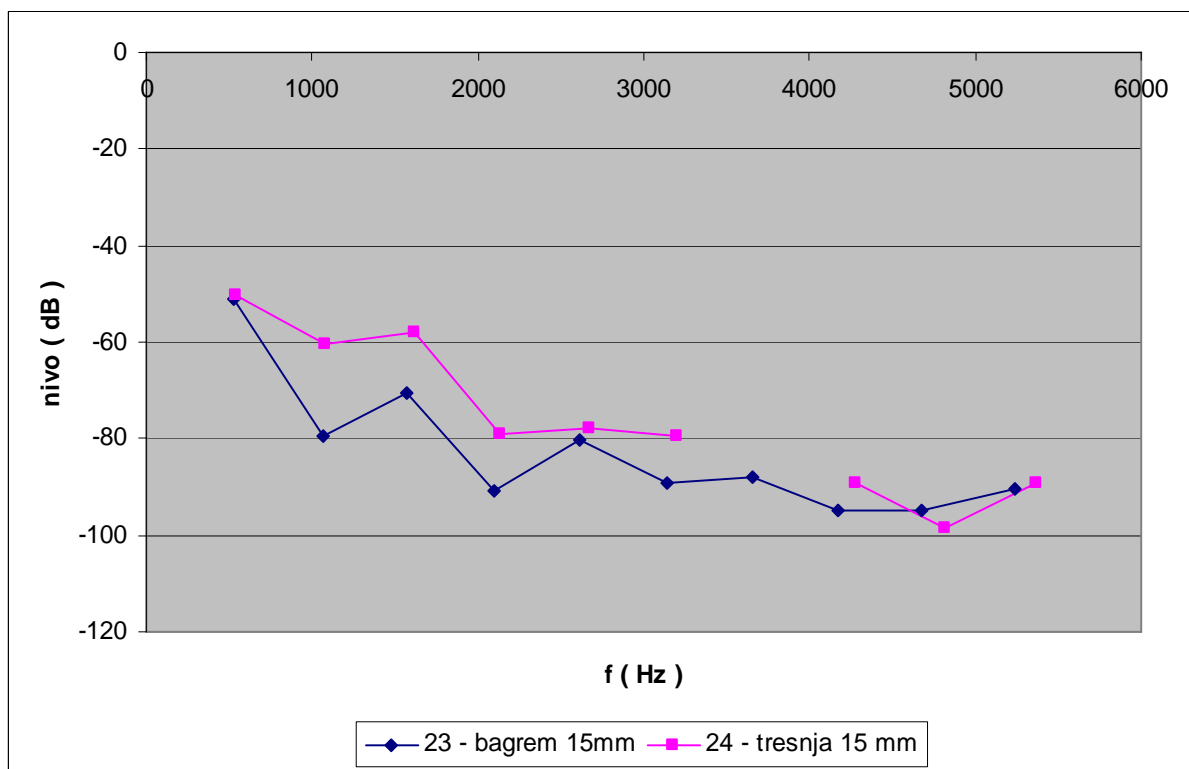
Na slici 6.2.2.4.7 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule treće grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa prirodnom pobudom.

Na slici 6.2.2.4.8 prikazano je slabljenje nivoa pojedinih harmonika odsviranih tonova u zavisnosti od izmerene frekvencije za frule treće grupe, na osnovu rezultata dobijenih merenjem sa veštačkom pobudom.

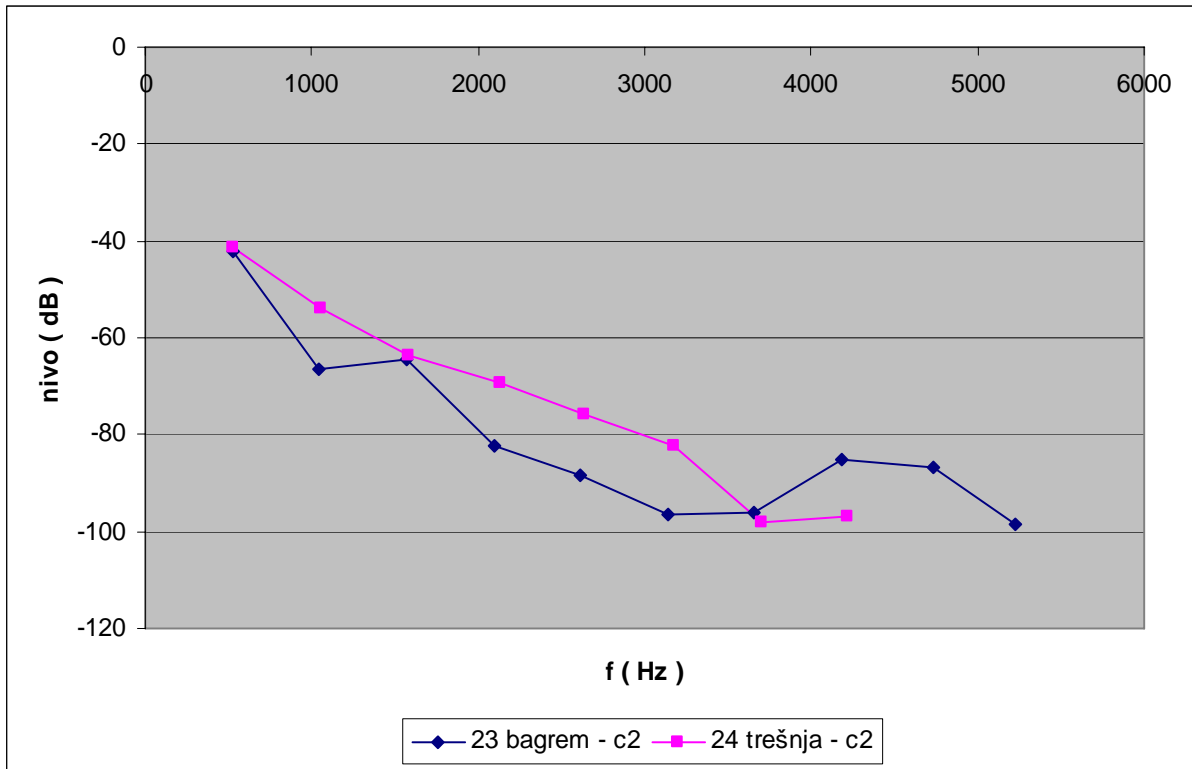
Sa sl. 6.2.2.4.7 i sl. 6.2.2.4.8 se vidi da zavisnost nivoa slabljenja harmonika od frekvencije za frule treće grupe ima mnogo više linearan oblik prilikom merenja sa veštačkom nego prilikom merenja sa prirodnom pobudom.



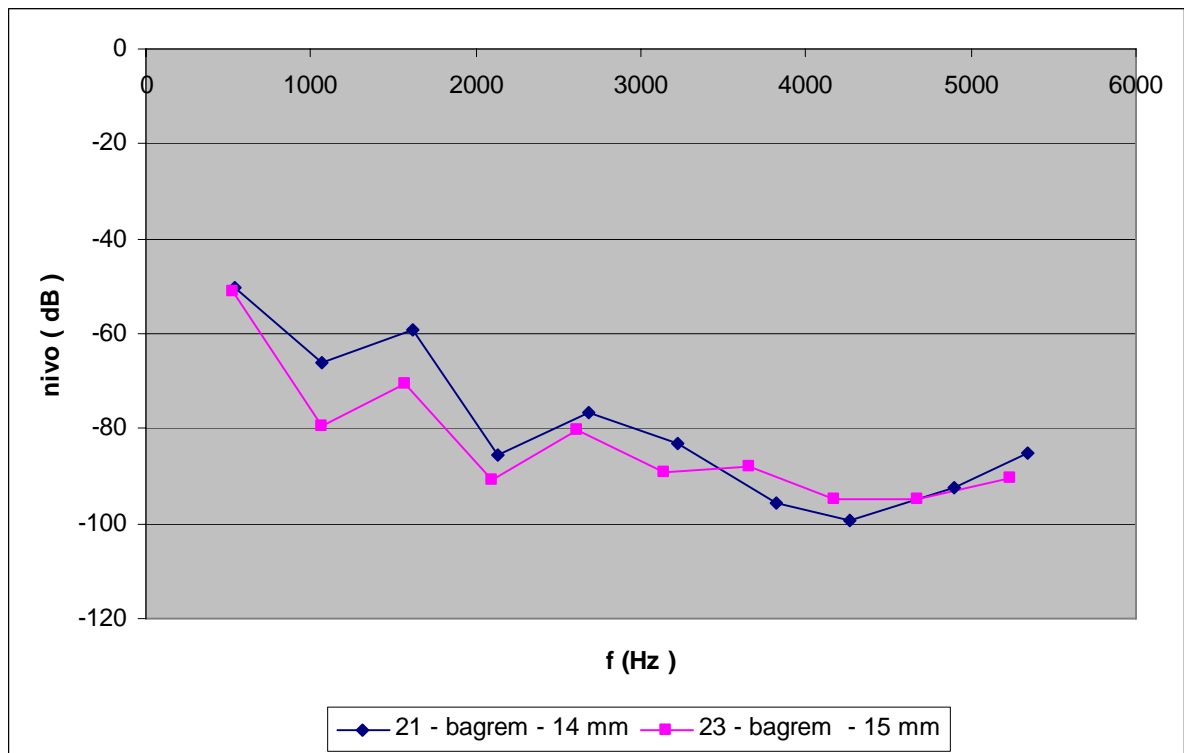
Slika 6.2.2.4.4: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frulu 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm), za prirodnu i veštačku pobudu



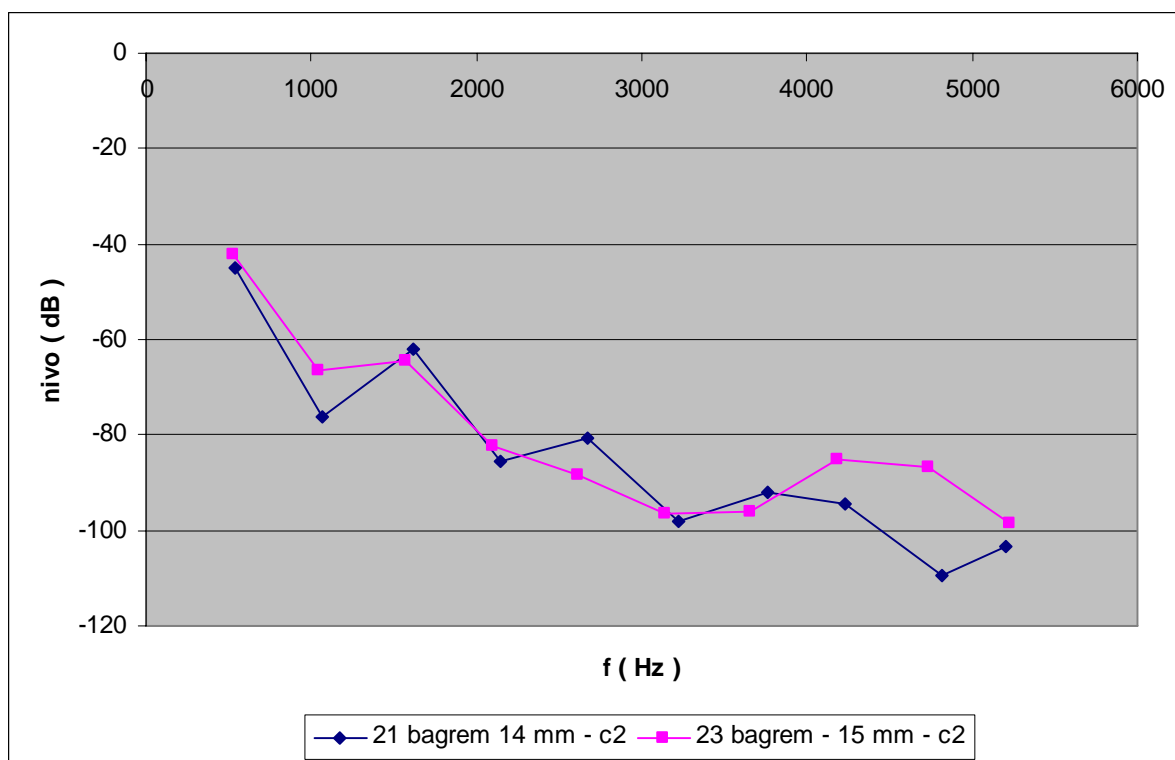
Slika 6.2.2.4.5: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 2. grupe, za prirodnu pobudu



Slika 6.2.2.4.6: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 2. grupe, za veštačku pobudu



Slika 6.2.2.4.7: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 3. grupe, za prirodnu pobudu



*Slika 6.2.2.4.8: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za frule 3. grupe, za veštačku pobudu*

### 6.2.2.5 SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške). Kod svih testiranih frula postoje određena odstupanja u štima.

U tabeli 6.2.2.5.1 prikazan je frekvencijski opseg za 1. grupu frula. Postoji odstupanje od idealnog štima (5 – 16 Hz za tonove druge oktave i 8 – 91 Hz za tonove treće oktave).

Proračun frekvencije viših harmonika urađen je za svih 15 tonova celog opsega ( $c^2 - c^4$ ) za svih 5 frula 1. grupe, obe frule 2. grupe i obe frule 3. grupe i upoređen je sa izmerenim vrednostima.

U tabeli 6.2.2.5.2 prikazan je frekvencijski opseg za 2. grupu frula. Takođe postoji odstupanje od idealnog štima.

U tabeli 6.2.2.5.3 prikazan je frekvencijski opseg 3. grupe frula. I ovde postoji odstupanje od idealnog štima.

Na slici 6.2.2.5.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), za prirodnu pobudu.

Na slici 6.2.2.5.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), za veštačku pobudu.



Tabela 6.2.2.5.1: Frekvencijski opseg 1. grupe frula

frekvencijski opseg		
1. grupa frula		$\Phi = 14 \text{ mm}$
bukva	528 – 2123	Hz
mahagoni	533 – 2143	Hz
šljiva	531 – 2135	Hz
bagrem	539 – 2184	Hz
orah	534 – 2162	Hz

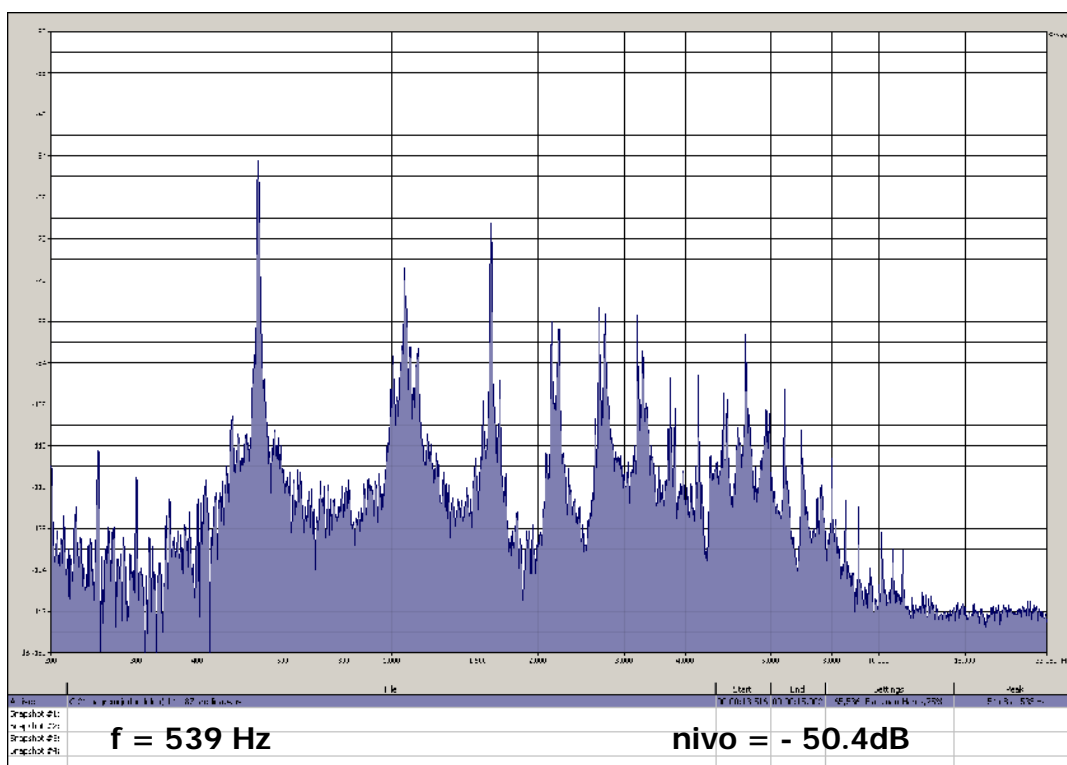
Tabela 6.2.2.5.2: Frekvencijski opseg 2. grupe frula

frekvencijski opseg		
2. grupa frula		$\Phi = 15 \text{ mm}$
bagrem	526 – 2037	Hz
trešnja	537 – 2109	Hz

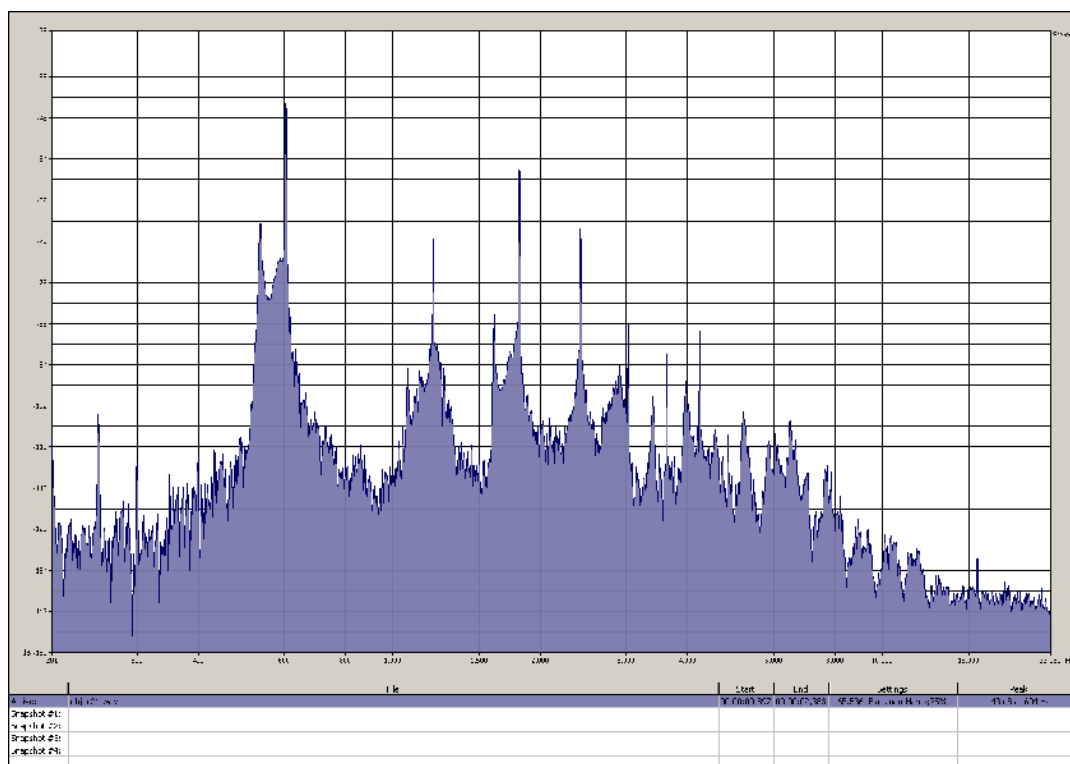
Tabela 6.2.2.5.3: Frekvencijski opseg 3. grupe frula

frekvencijski opseg		
3. grupa frula		bagrem
$\Phi = 14 \text{ mm}$	539 – 2184	Hz
$\Phi = 15 \text{ mm}$	526 – 2037	Hz

Analizom rezultata merenja može se izvesti zaključak da: frule imaju manji broj harmonika prilikom objektivnog merenja, da svaki ton ima mnogo nestabilniju frekvenciju osnovnog harmonika kod objektivnog merenja nego kod subjektivnog, da nije toliko čest slučaj neravnomerna raspodela harmonika po intenzitetu kod objektivnog merenja kao kod subjektivnog, da na samom početku tonovi imaju odgovarajuću frekvenciju, a kako vreme trajanja tona odmiče, frekvencija tona raste ( treba izvršiti bolju regulaciju pritiska). Nivo slabljenja harmonika je približniji idealnom za niske učestanosti kod objektivnog, a za visoke učestanosti kod subjektivnog merenja. Kod sve tri analizirane grupe frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi u celom tonskom opsegu [22']. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu [134']. Frule sa unutrašnjim prečnikom cevi  $\Phi = 15 \text{ mm}$  imaju bolje karakteristike: odstupanje frekvencije harmonika od idealne manje je nego kod frula sa unutrašnjim prečnikom  $\Phi = 14 \text{ mm}$ .



*Slika 6.2.2.5.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ), za prirodnu pobudu*



*Slika 6.2.2.5.2: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ), za veštačku pobudu*

### 6.2.3 UTICAJ VRSTE MATERIJALA I UNUTRAŠNJEG PREČNIKA CEVI NA ALIKVOTNI NIZ JEDNODELNE C FRULE

Zvuk frule zavisi od brojnih parametara. Oblik i konstrukcija same frule mogu biti različiti. U ovom merenju su razmatrane jednodelne frule. Intonacija frule takođe može biti različita. U ovom merenju su razmatrane C frule. Parametri koji su menjani tokom merenja su vrsta drveta od koje su frule pravljene i unutrašnji prečnik cevi frule. Analiza frekvencijskog spektra frula izvršena je sa aspekta proučavanja frekvencije pojedinih harmonika svakog tona, upoređivanjem izmerene frekvencije pojedinih harmonika sa idealnom frekvencijom pojedinih harmonika i upoređivanjem međusobnih nivoa pojedinih harmonika. Rezultati su prikazani i kao intervali alikvotnog niza za svaku frulu. Radi analize frekvencijskog spektra izvršeno je merenje navedenih parametara zvuka frula koje je izradio i na njima odsvirao istu definisanu sekvencu graditelj frula i izvođač na fruli Milorad Marić.

#### 6.2.3.1 METODOLOGIJA MERENJA

Frulaš g. Marić je odsvirao tonove C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  na svakoj od 7 proučavanih frula ujednačenim nivoom. Tonovi su bili ujednačenog trajanja, oko 2 sekunde svaki.

Formirane su 3 grupe frula: prvu grupu čini 5 frula izrađenih od različitih vrsta drveta ( bukva, mahagoni, šljiva, bagrem, orah) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  mm), drugu grupu čine dve frule izrađene od različitih vrsta drveta ( bagrem, trešnja ) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 15$  mm), a treću grupu frula čine dve frule napravljene od bagremovog drveta različitog unutrašnjeg prečnika ( $\Phi = 14$  mm i  $\Phi = 15$  mm).

Izabrana je muzička sekvencu od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno.

#### 6.2.3.2 POSTAVKA MERENJA

Snimanje je urađeno u tonskom studiju VISER u Beogradu u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4 s). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

### 6.2.3.3 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest tonova za pet frula iz prve grupe, petnaest tonova za frule iz druge grupe i petnaest tonova za frule iz treće grupe. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

Analiza rezultata merenja za 1. grupu frula pokazala je: za frulu 18 ( bukva ) za ton  $c^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 4.75 Hz, za drugi harmonik je 12.50 Hz, za treći harmonik je 18.25 Hz, za četvrti harmonik je 40.00 Hz, za peti harmonik je 31.75 Hz, za šesti harmonik je 44.50 Hz, za sedmi harmonik je 26.25 Hz, za osmi harmonik je 49.00 Hz, za deveti harmonik je 64.75 Hz, za deseti harmonik je 50.50 Hz. Sva odstupanja su manja od osmine stepena, osim za četvrti harmonik gde se uklapa u četvrtinu stepena. Za ton  $d^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 21.67 Hz, za drugi harmonik je 35.34 Hz, za treći harmonik je 62.01 Hz, za četvrti harmonik je 65.68 Hz, za peti harmonik je 62.35 Hz, za sedmi harmonik je 104.69 Hz, za osmi harmonik je 141.36 Hz, za deveti harmonik je 144.03 Hz. Šesti harmonik je izostao. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena, osim za prvi harmonik kod koga je za 4 Hz veće od četvrtine stepena. Za ton  $e^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 23.74 Hz, za drugi harmonik je 45.48 Hz, za treći harmonik je 68.22 Hz, za četvrti harmonik je 97.96 Hz, za peti harmonik je 99.70 Hz, za šesti harmonik je 126.44 Hz, za sedmi harmonik je 137.18 Hz, za osmi harmonik je 131.92 Hz, za deveti harmonik je 187.66 Hz, za deseti harmonik je 180.40 Hz. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena, osim za prva četiri harmonika. Za ton  $f^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 27.54 Hz, za drugi harmonik je 58.08 Hz, za treći harmonik je 87.62 Hz, za četvrti harmonik je 96.16 Hz, za peti harmonik je 145.70 Hz, za šesti harmonik je 143.24 Hz, za sedmi harmonik je 178.78 Hz, za osmi harmonik je 204.32 Hz, za deveti harmonik je 211.86 Hz, za deseti harmonik je 272.40 Hz. Sva odstupanja su na nivou četvrtine stepena. Za ton  $g^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 27.01 Hz, za drugi harmonik je 50.02 Hz, za treći harmonik je 74.03 Hz, za četvrti harmonik je 107.04 Hz, za peti harmonik je 143.05 Hz, za šesti harmonik je 203.06 Hz, za sedmi harmonik je 198.07 Hz, za osmi harmonik je 226.08 Hz, za deveti harmonik je 235.09 Hz. Sva odstupanja su u okviru četvrtine stepena. Za ton  $a^2$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 30.00 Hz, za drugi harmonik je 55.00 Hz, za treći harmonik je 82.00 Hz, za četvrti harmonik je 118.00 Hz, za peti harmonik je 138.00 Hz, za šesti harmonik je 138.00 Hz, za sedmi harmonik je 190.00 Hz, za osmi harmonik je 184.00 Hz, za deveti harmonik je 222.00 Hz, za deseti harmonik je 251.00 Hz. Sva odstupanja su u okviru četvrtine stepena. Za ton  $h^2$

odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 42.23 Hz, za drugi harmonik je 167.46 Hz, za treći harmonik je 105.69 Hz, za četvrti harmonik je 111.92 Hz, za peti harmonik je 200.15 Hz, za šesti harmonik je 194.38 Hz, za osmi harmonik je 239.84 Hz, za deveti harmonik je 287.07 Hz, za deseti harmonik je 371.30 Hz. Sva odstupanja su u okviru četvrtine stepena, osim za drugi harmonik kod koga je odstupanje čak tri četvrtine stepena. Za ton  $c^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 27.50 Hz, za drugi harmonik je 70.00 Hz, za treći harmonik je 88.50 Hz, za četvrti harmonik je 108.00 Hz, za peti harmonik je 123.50 Hz, za šesti harmonik je 189.00 Hz, za sedmi harmonik je 203.50 Hz. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena, osim za drugi harmonik. Za ton  $d^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 41.34 Hz, za drugi harmonik je 78.68 Hz, za treći harmonik je 114.02 Hz, za četvrti harmonik je 164.36 Hz, za peti harmonik je 163.70 Hz, za šesti harmonik je 243.04 Hz, za sedmi harmonik je 186.38 Hz. Sva odstupanja su oko četvrtine stepena. Za ton  $e^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 33.49 Hz, za drugi harmonik je 47.98 Hz, za treći harmonik je 89.47 Hz, za četvrti harmonik je 106.96 Hz, za peti harmonik je 149.45 Hz, za šesti harmonik je 156.94 Hz, za sedmi harmonik je 248.43 Hz, za osmi harmonik je 133.92 Hz, za deveti harmonik je 173.41 Hz. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena, a za drugi, osmi i deveti harmonik odstupanja su manja i od osmine stepena. Za ton  $f^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 52.09 Hz, za drugi harmonik je 96.18 Hz, za treći harmonik je 84.27 Hz, za četvrti harmonik je 151.36 Hz, za peti harmonik je 239.45 Hz, za šesti harmonik je 302.54 Hz, za sedmi harmonik je 237.63 Hz, za osmi harmonik je 270.72 Hz, za deveti harmonik je 447.81 Hz. Sva odstupanja su u okviru četvrtine stepena, osim za treći i osmi harmonik gde su u okviru osmine stepena. Za ton  $g^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 35.02 Hz, za drugi harmonik je 92.04 Hz, za treći harmonik je 117.10 Hz, za četvrti harmonik je 108.08 Hz, za peti harmonik je 117.10 Hz, za šesti harmonik je 157.12 Hz, za sedmi harmonik je 209.14 Hz. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena, a za peti, šesti i sedmi harmonik su manja i od osmine stepena. Za ton  $a^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 30.00 Hz, za drugi harmonik je 85.00 Hz, za treći harmonik je 101.00 Hz, za četvrti harmonik je 151.00 Hz, za peti harmonik je 210.00 Hz, za šesti harmonik je 271.00 Hz, za sedmi harmonik je 229.00 Hz. Sva odstupanja su manja od četvrtine stepena. Za ton  $h^3$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 15.47 Hz, za drugi harmonik je 37.94 Hz, za treći harmonik je 107.41 Hz, za četvrti harmonik je 91.88 Hz, za peti harmonik je 92.35 Hz, za šesti harmonik je 21.82 Hz, za sedmi harmonik je 57.20 Hz. Odstupanja su na nivou šesnaestine stepena za prvi i drugi harmonik, na nivou osmine stepena za treći, četvrti i peti harmonik, na nivou šezdesetčetvrtine stepena za šesti

harmonik i na nivou tridesetdvojine stepena za sedmi harmonik. Za ton  $c^4$  odstupanje izmerene frekvencije od idealne za prvi harmonik je 30.00 Hz, za drugi harmonik je 49.00 Hz, za treći harmonik je 71.00 Hz, za četvrti harmonik je 76.00 Hz, za peti harmonik je 84.00 Hz, za šesti harmonik je 166.00 Hz. Odstupanja su na nivou osmine stepena za prvi, drugi, treći i šesti harmonik, a na nivou šesnaestine stepena za četvrti i peti harmonik.

U tabeli 6.2.3.3.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bukovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

Tabela 6.2.3.3.1: Osnovni rezultati merenja za frulu napravljenu od bukve, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	528.00	1.009	4.75	-53
2	2 : 1	1059.00	2.023	12.50	-74.2
3	3 : 1	1588.00	3.034	18.25	-85.9
4	4 : 1	2133.00	4.078	40.00	-81.9
5	5 : 1	2648.00	5.080	31.75	-77.3
6	6 : 1	3184.00	6.085	44.50	-85
7	7 : 1	3689.00	7.050	28.25	-94.3
8	8 : 1	4235.00	8.093	49.00	-96.9
9	9 : 1	4774.00	9.123	64.75	-91.7
10	10 : 1	5283.00	10.98	50.50	-88.6

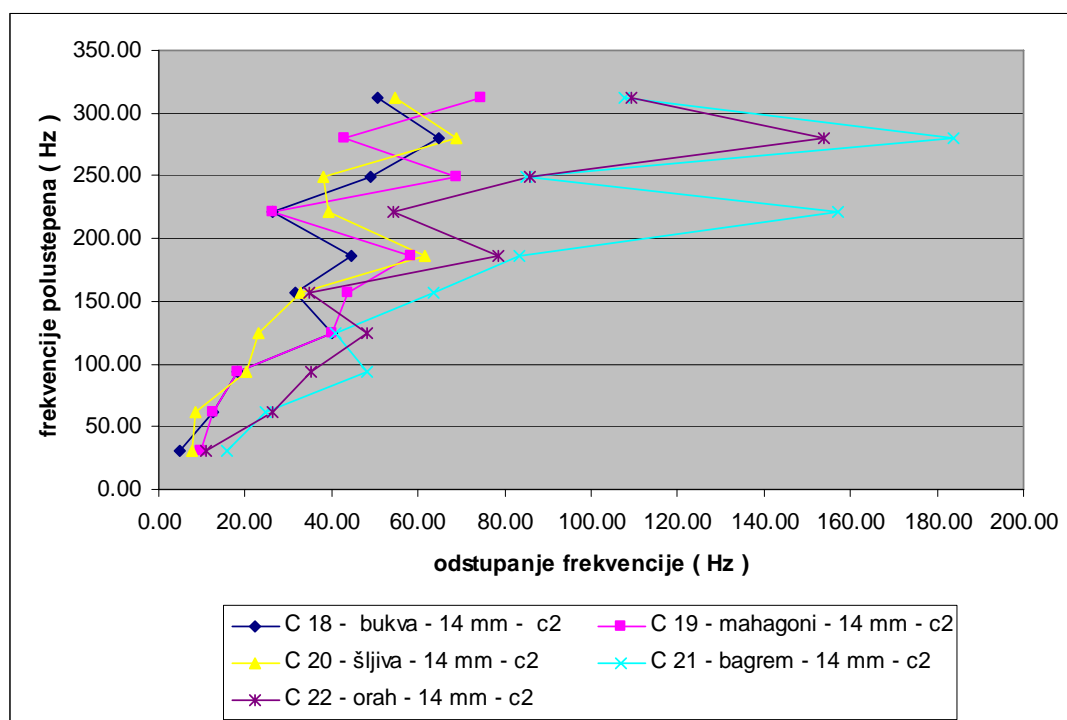
U tabeli 6.2.3.3.2 predstavljeni su: idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , navedeno je koji su to konkretno intervali alikvotnog niza i koji su to konkretni tonovi, a navedeno je i kolika je frekvencija polustepena za dati ton.

Na slici 6.2.3.3.1 prikazano je odstupanje frekvencije od idealne za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$ , za svih pet frula iz prve grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u odnosu na frekvencije polustepena u osnovnom registru jednoderne C frule, a da je u višem registru ta zavisnost nepravilna. Mogla bi se svesti na linearnu uz ozbiljne aproksimacije.

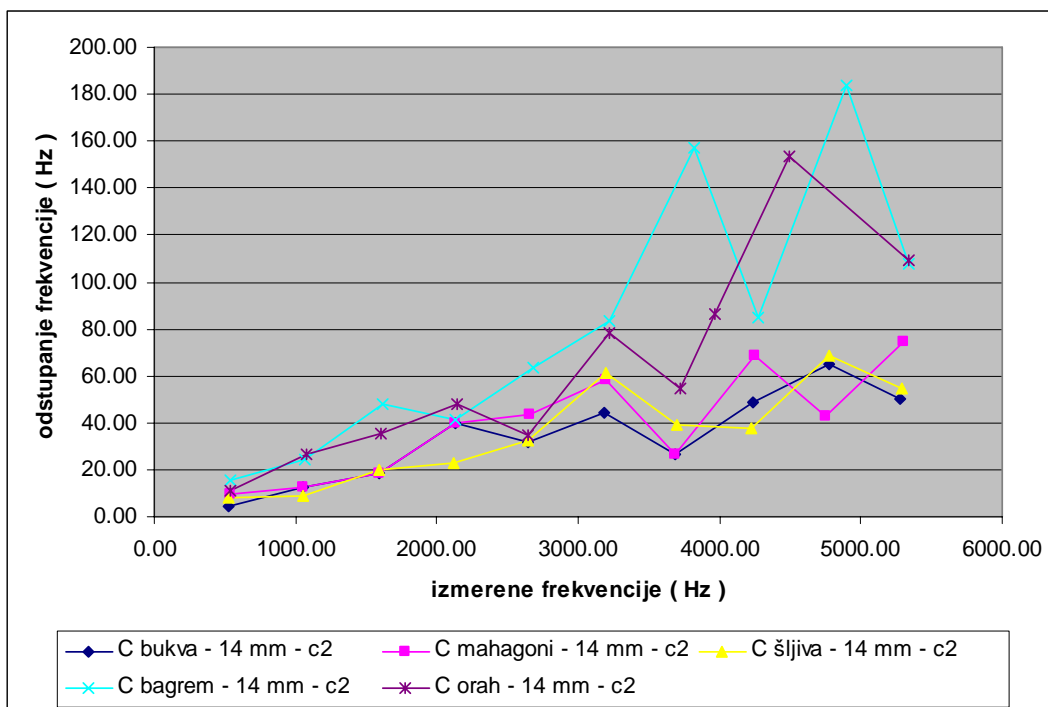
Na slici 6.2.3.3.2 prikazano je: odstupanje izmerene frekvencije od idealne u zavisnosti od izmerene frekvencije za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$  za svih pet frula iz prve grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u celom opsegu jednoderne C frule, s tim što je odstupanje u gornjem registru nešto veće.

Tabela 6.2.3.3.2: Osnovni rezultati merenja za frulu napravljenu od bukve, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm

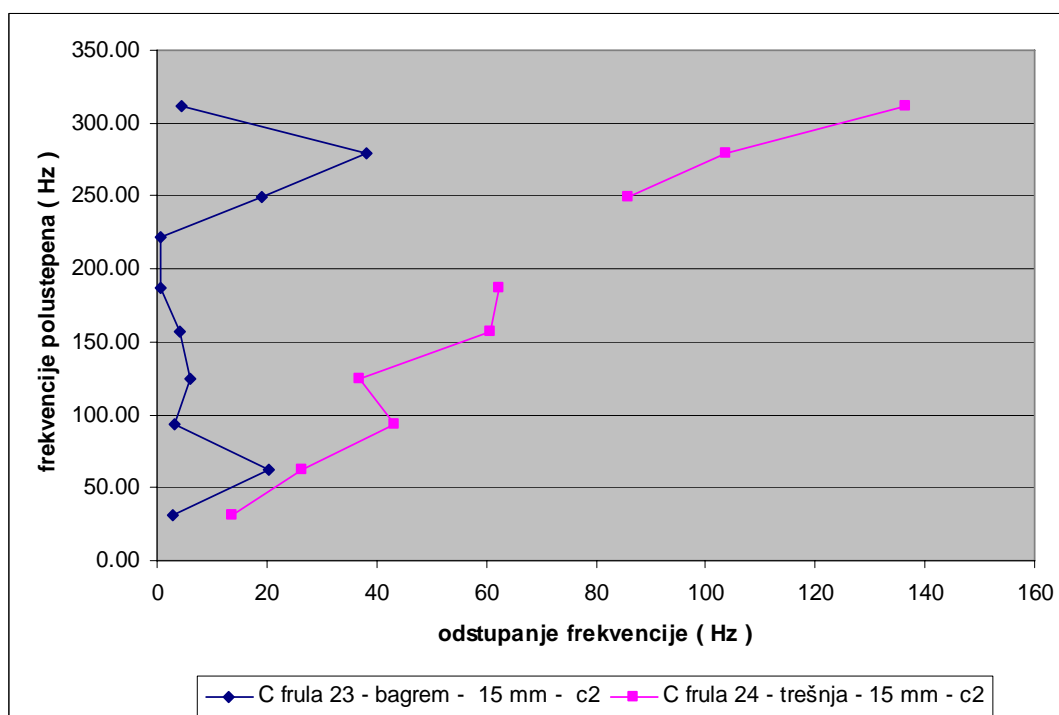
<b>Frula 18 bukva <math>\Phi = 14</math></b>				<b>Neumann U 87</b>	
Broj harmonika	Idealne frekvencija harmonika [Hz]	Izmerene frekvencije harmonika [Hz]	Intervali alikvotnog niza	Ekvivalentan ton	Frekvencija polustepena u odgovarajućoj oktavi
1	523.25	528	1	C2	31.12
2	1026.5	1059	8	C3	62.23
3	1569.75	1588	8+c.5	G3	93.24
4	2093	2133	8+...+c.4	C4	124.46
5	2616.25	2648	8+...+v.3	E4	156.81
6	3139.5	3184	8+...+m.3	G4	186.48
7	3662.75	3689	8+...+m.3	B4	221.76
8	4186	4235	8+...+v.2	C5	248.91
9	4709.25	4774	8+...+v.2	D5	279.39
10	5232.5	5283	8+...+v.2	E5	311.70



Slika 6.2.3.3.1: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, za različite vrste drveta ( $\Phi = 14$  mm)



Slika 6.2.3.3.2: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, u zavisnosti od izmerene frekvencije, za različite vrste drveta ( $\Phi = 14$  mm)



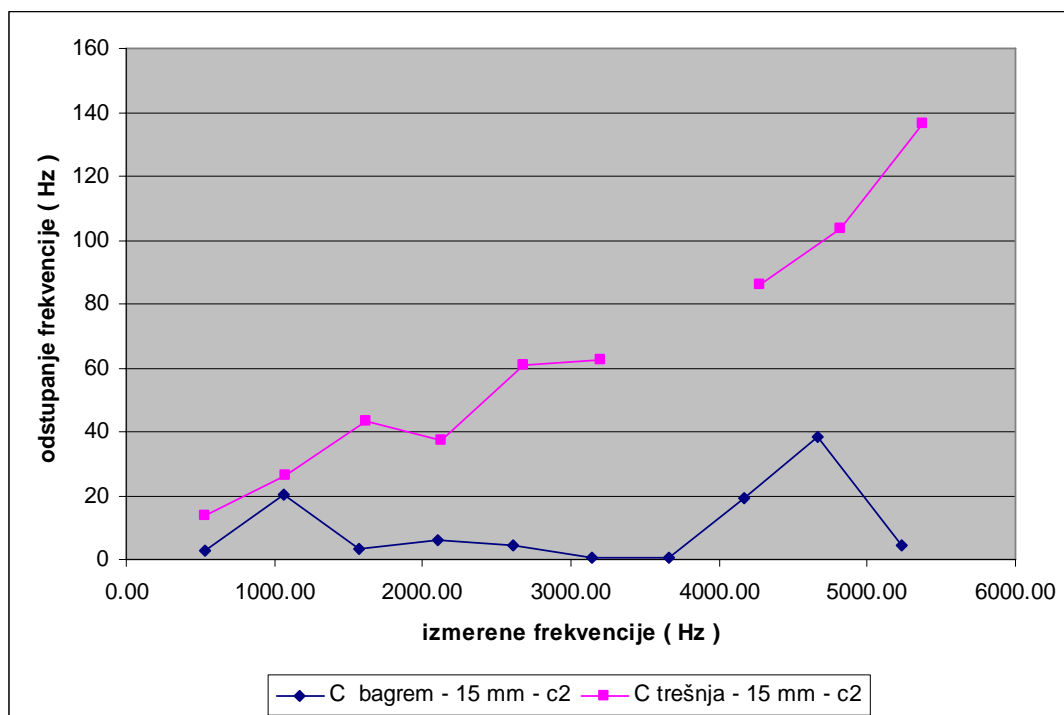
Slika 6.2.3.3.3: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, za različite vrste drveta ( $\Phi = 15$  mm)



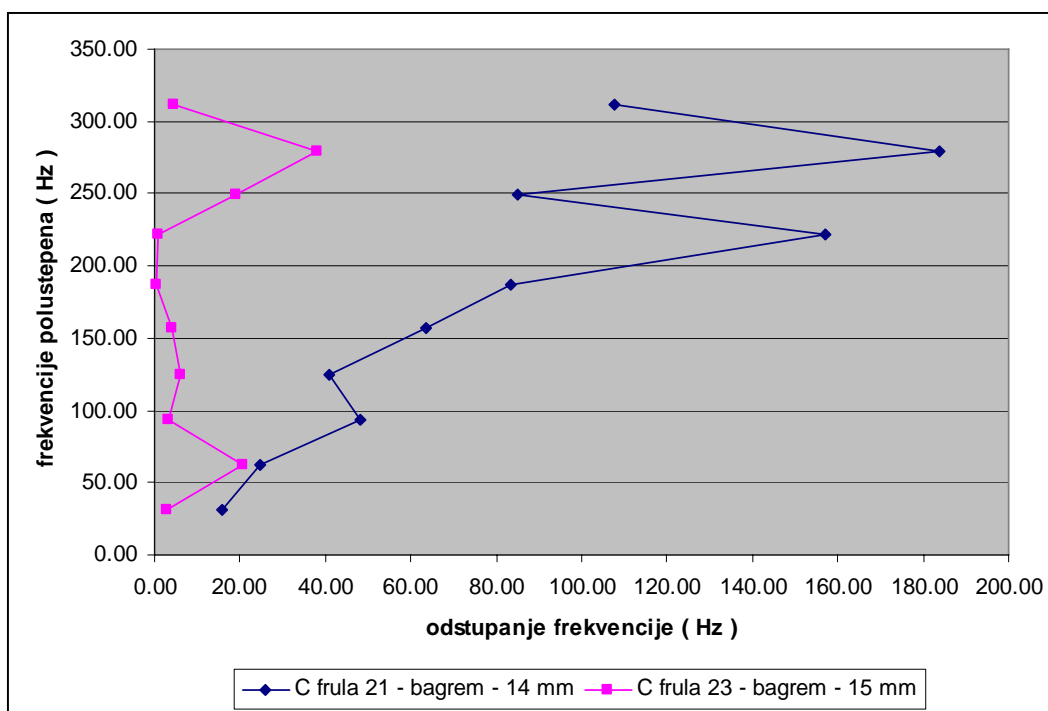
Na slici 6.2.3.3.3 prikazano je odstupanje izmerene frekvencije od idealne za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$  za obe frule iz druge grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u odnosu na frekvencije polustepena u celom opsegu za frulu 24 napravljenu od trešnjinog drveta (sedmi harmonik je izostao). Odstupanje izmerene frekvencije od idealne praktično ne postoji za frulu 23 napravljenu od bagremovog drveta, izuzev za drugi, osmi i deveti harmonik.

Na slici 6.2.3.3.4 prikazano je odstupanje izmerene frekvencije od idealne u zavisnosti od izmerene frekvencije za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$  za obe frule iz druge grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u celom opsegu za frulu 24 napravljenu od trešnjinog drveta (sedmi harmonik je izostao). Odstupanje izmerene frekvencije praktično ne postoji za frulu 23 napravljenu od bagremovog drveta, izuzev za drugi, osmi i deveti harmonik.

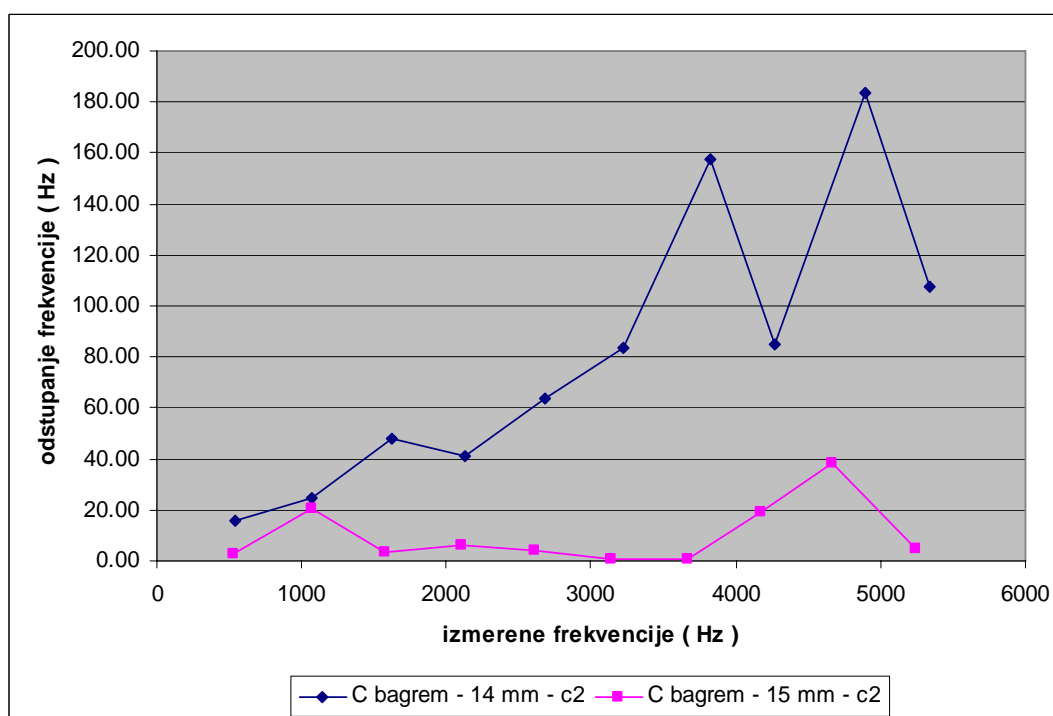
Na slici 6.2.3.3.5 prikazano je odstupanje izmerene frekvencije od idealne za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$  za obe frule iz treće grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u odnosu na frekvencije polustepena u osnovnom registru frule 21 napravljene od bagremovog drveta unutrašnjeg prečnika 14 mm, a da je u višem registru ta zavisnost nepravilna. Odstupanje izmerene frekvencije od idealne je zanemarljivo za frulu 23 napravljenu od bagremovog drveta unutrašnjeg prečnika 15 mm, izuzev za drugi, osmi i deveti harmonik.



Slika 6.2.3.3.4: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, u zavisnosti od izmerene frekvencije, za različite vrste drveta ( $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



Slika 6.2.3.3.5: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, za različite unutrašnje prečnike frula



Slika 6.2.3.3.6: Odstupanje izmerene frekvencije od idealne, u zavisnosti od izmerene frekvencije, za različite unutrašnje prečnike

Na slici 6.2.3.3.6 prikazano je odstupanje izmerene frekvencije od idealne u zavisnosti od izmerene frekvencije za pojedine harmonike odsviranog tona  $c^2$  za obe frule iz treće grupe. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u osnovnom registru frule 21 napravljene od bagremovog drveta unutrašnjeg prečnika 14 mm, a da je u višem registru ta zavisnost nepravilna. Odstupanje izmerene frekvencije od idealne za frulu 23 napravljenu od bagremovog drveta unutrašnjeg prečnika 15 mm praktično ne postoji, izuzev za drugi, osmi i deveti harmonik.

Analizom rezultata merenja može se izvesti zaključak da: kod frule 18 za ton  $h^2$  drugi harmonik nije oktava već nona (nije  $h^3$  već  $c^3$ ). Kod frule 20 za ton  $f^2$  treći harmonik nije čista već prekomerna kvinta (nije  $c^4$  već  $cis^4$ ), sedmi harmonik nije mala već velika terca (nije  $e^5$  već  $e^5$ ), osmi harmonik nije velika već prekomerna sekunda (nije  $f^5$  već  $fis^5$ ), a za ton  $g^2$  četvrti harmonik nije čista već prekomerna kvarta (nije  $g^4$  već  $gis^4$ ). Kod frule 19 tonovi  $f^2$ ,  $g^2$  i  $h^2$  nisu dobro naštimovani, ali nema poremećaja kod intervala alikvotnog niza. Frule 21 i 22 nisu dobro naštimovane u celom opsegu, ali nema poremećaja u intervalima alikvotnog niza. Frule sa unutrašnjim prečnikom cevi  $\Phi = 15$  mm imaju bolje karakteristike : odstupanje frekvencije harmonika od idealne manje je nego kod frula sa unutrašnjim prečnikom  $\Phi = 14$  mm . One su jako dobro naštimovane i kod njih nema poremećaja u intervalima alikvotnog niza [22'].

Dinamički opseg tonova odsviranih na jednodelnim frulama je ujednačen kod svih proučenih frula i tokom uobičajenog načina sviranja iznosi oko 28 dB.

## 6.3 ANALIZA FREKVENCIJSKOG SPEKTRA DVODELNE C FRULE

Tokom 2005. godine u saradnji sa Ministarstvom prosvete i Centrom za ranu muziku „Renesans“ iniciran je Projekat za uvođenje muzičkog instrumenta frula u plan i program predmeta Muzičko vaspitanje u osnovnim školama. Osmišljeno je da to bude C frula jer je najjednostavnija za učenje i sviranje. Zato su frule sa kojima su merenja urađena u C tonalitetu. S druge strane, neophodno je da se deci obezbede što kvalitetnije frule koje neće mnogo koštati. Zbog toga su uzete u razmatranje frule napravljene od različitih vrsta drveta. Pošto zvuk frule zavisi od konstrukcije i dimenzija same frule, oformljene su i grupe u zavisnosti od unutrašnjeg prečnika. same cevi frule. Analiza frekvencijskog spektra frula izvršena je sa aspekta proučavanja frekvencije pojedinih harmonika svakog tona, upoređivanjem izmerene frekvencije pojedinih harmonika sa idealnom frekvencijom pojedinih harmonika i upoređivanjem međusobnih nivoa pojedinih harmonika. Radi analize frekvencijskog spektra izvršeno je merenje navedenih parametara zvuka frula koje je izradio i na njima odsvirao istu definisanu sekvencu graditelj frula i izvođač na fruli Milorad Marić.

### 6.3.1 METODOLOGIJA MERENJA

Frulaš g. Marić je odsvirao tonove C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  na svakoj od 17 proučavanih frula ujednačenim nivoom. Tonovi su bili ujednačenog trajanja, oko 2 sekunde svaki.

Formirane su 3 grupe frula: prvu grupu čini 8 frula izrađenih od različitih vrsta drveta ( bagrem 1, bagrem 2, bagrem 3, šimšir 1, tisa, šljiva 1, bagrem 4, abonos) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 13$  mm), drugu grupu čini 9 frula izrađenih od različitih vrsta drveta ( mahagoni, abonos – periferija, šljiva 2, bagrem 5, orah, bagrem 6, bagrem 7, šimšir 2, dren ) sa istim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  mm), treću grupu čine 4 puta po dve frule napravljene od iste vrste drveta ( bagrem, šimšir, šljiva, abonos ) sa različitim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 13$  mm i  $\Phi = 14$  mm).

Za snimanje je izabrana sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno.

### 6.3.2 POSTAVKA MERENJA

Snimanje je urađeno u tonskom studiju VISER u Beogradu u kontrolisanim uslovima ( vreme reverberacije oko 0,4 s). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente (mikrofon je postavljen na

dvadesetak cm ispred i iznad samog instrumenta). Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 9.0 i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 9.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

### 6.3.3 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest tonova za frule iz prve grupe, petnaest tonova za frule iz druge grupe i petnaest tonova za frule iz treće grupe. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

U tabeli 6.3.3.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm (frula 1, bagrem 1). Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije.

Tabela 6.3.3.1: Osnovni rezultati merenja za frulu napravljenu od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm

1	bagrem 1	$\Phi = 13$ mm	Neumann	merenje sa	$c^2 = 523.25$
			U 87	prirod. p.	Hz
harmonik	idealno odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f_1/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	524	1.001	0.75	- 51.5
2	2:1	1048	1,001	1.5	- 51.8
3	3:1	1576	1.003	6,25	- 76.2
4	4:1	2096	1.001	3	- 81.0
5	5:1	2612	0 998	- 4.25	- 87.7
6	6:1	3140	1.0001	0.5	- 88.6
7	7:1	3654	0.997	- 8.75	- 96.0
8	8:1	4175	0.997	- 11.0	- 110.8
9	9:1	4703	0.998	- 6.25	- 102.6
10	10:1	5240	1.001	7.5	- 102.2

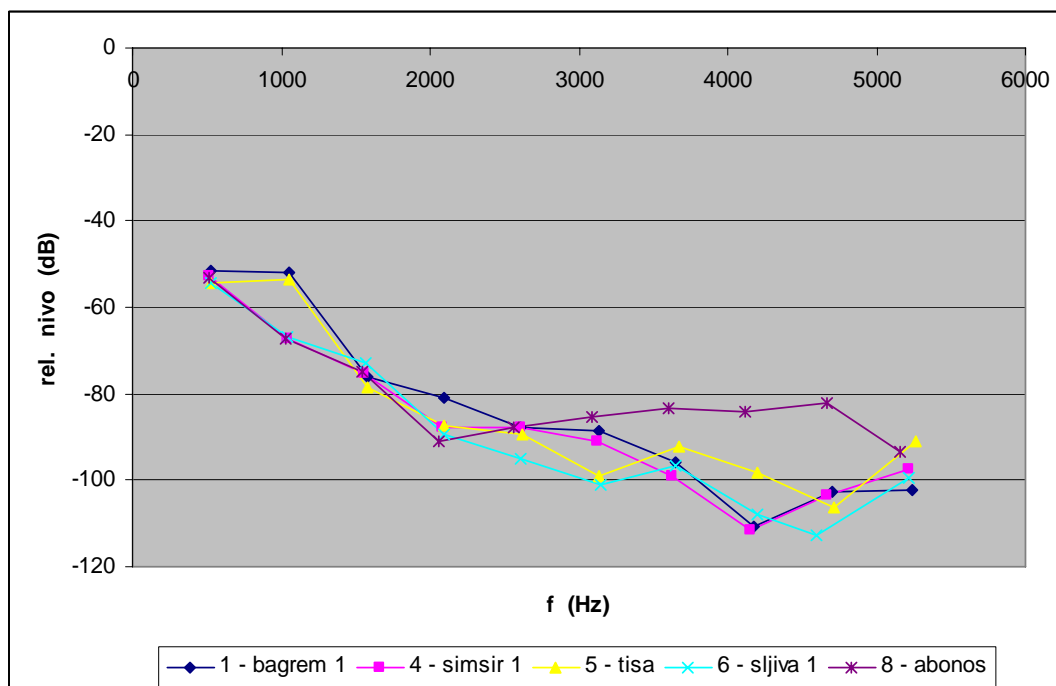
Na slici 6.3.3.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz prve grupe. Može se uočiti da je slabljenje harmonika najmanje za tonove odsvirane na fruli od abonosovog drveta.

Na slici 6.3.3.2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz druge grupe. Može se uočiti da je slabljenje harmonika najmanje za tonove odsvirane na fruli od abonosovog drveta.

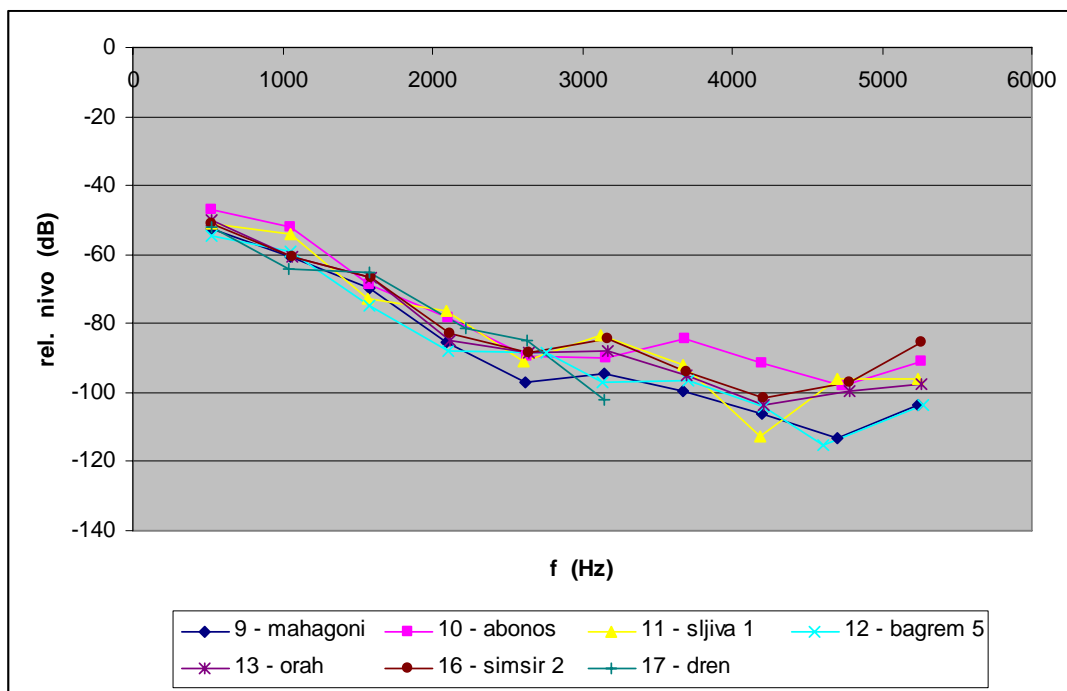
Na slici 6.3.3.3 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz treće grupe izrađene od bagremovog drveta (frula 1 – bagrem 1, frula 12 – bagrem 5). Može se uočiti da je slabljenje harmonika približno jednako za obe frule.

Na slici 6.3.3.4 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz treće grupe izrađene od drveta šimšira (frula 4 – šimšir 1, frula 16 – šimšir 2). Može se uočiti da je slabljenje harmonika manje za tonove odsvirane na fruli od drveta šimšira unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm nego  $\Phi = 13$  mm.

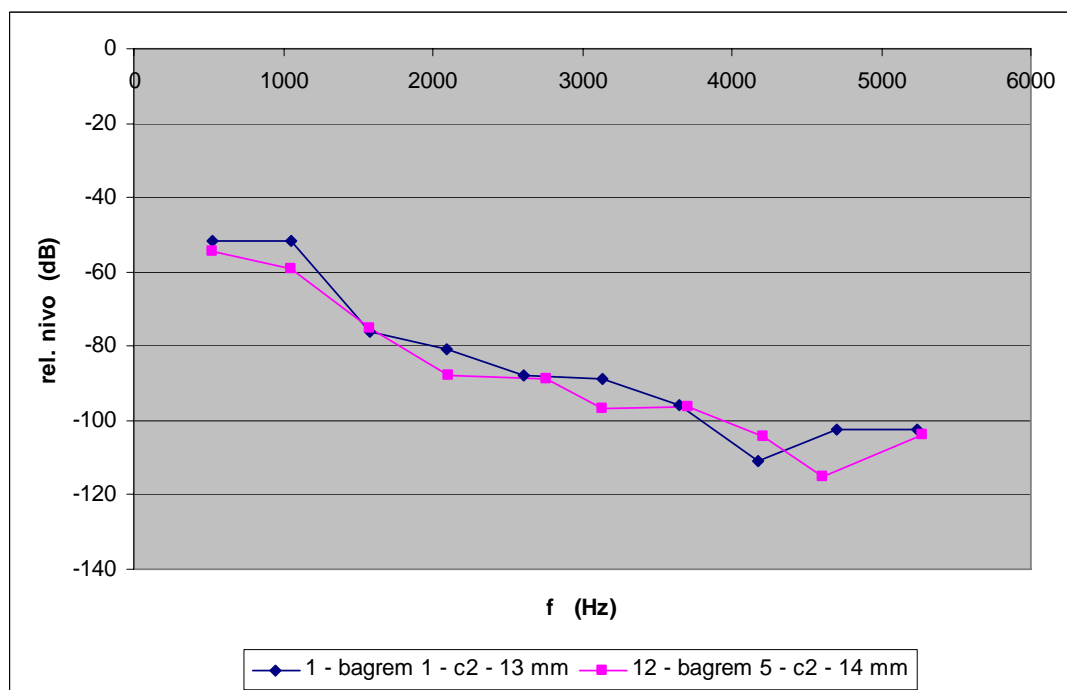
Na slici 6.3.3.5 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz treće grupe izrađene od drveta šljive (frula 6 – šljiva 1, frula 11 – šljiva 2). Može se uočiti da je slabljenje harmonika manje za tonove odsvirane na fruli od drveta šljive unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm nego  $\Phi = 13$  mm.



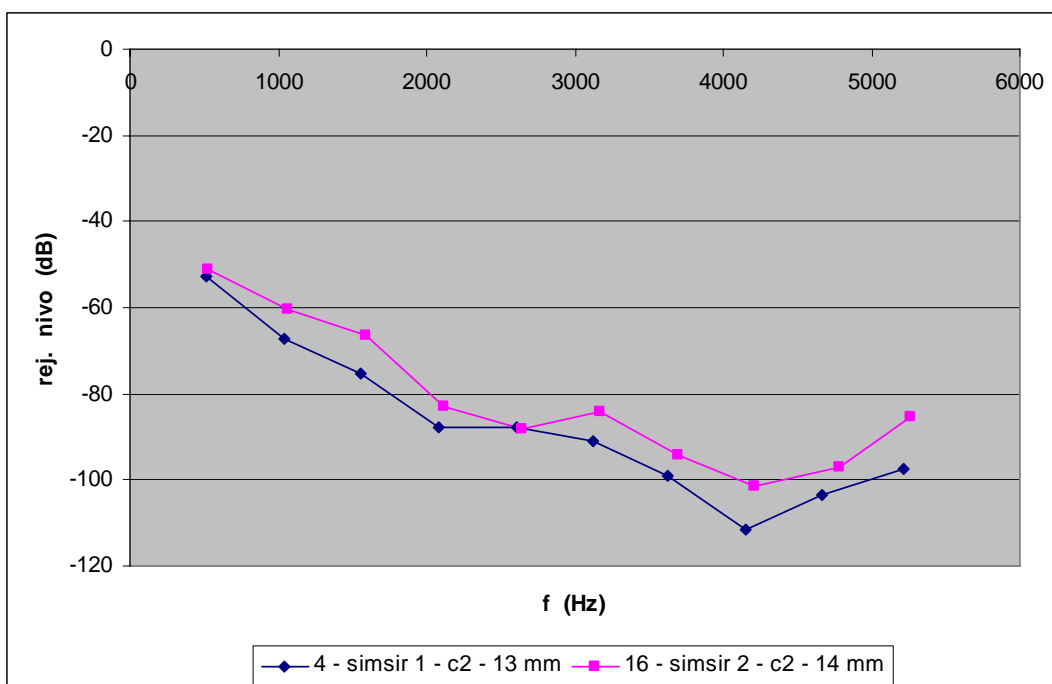
Slika 6.3.3.1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite vrste drveta ( $\Phi = 13$  mm)



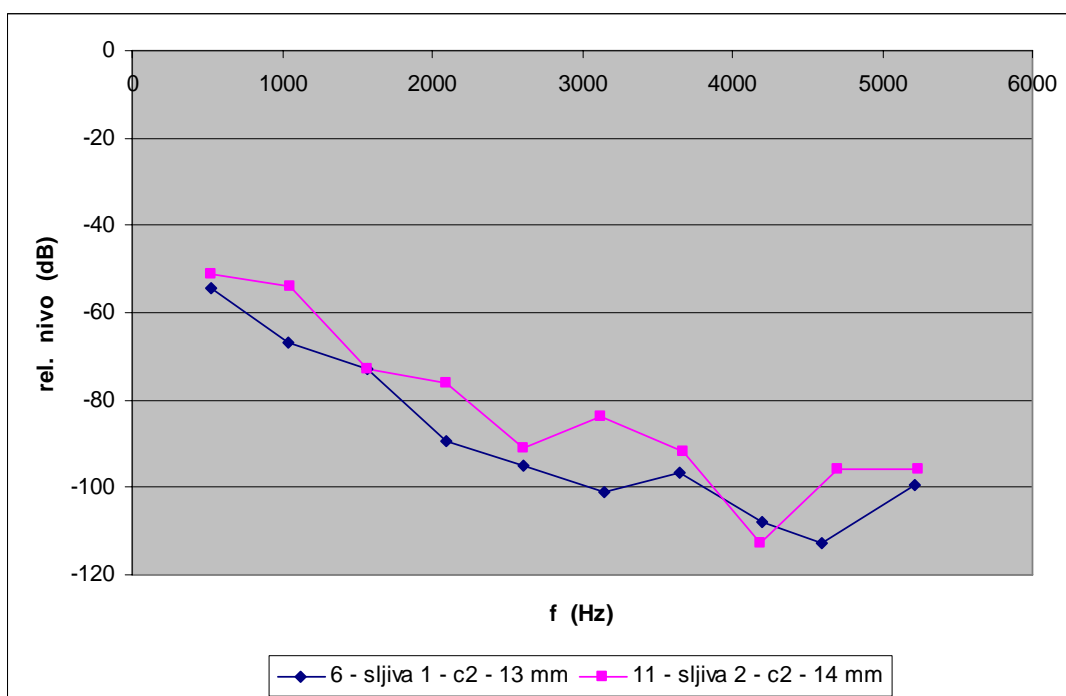
Slika 6.3.3.2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite vrste drveta ( $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



Slika 6.3.3.3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite prečnike cevi (bagrem,  $\Phi = 13 \text{ mm}$  i  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

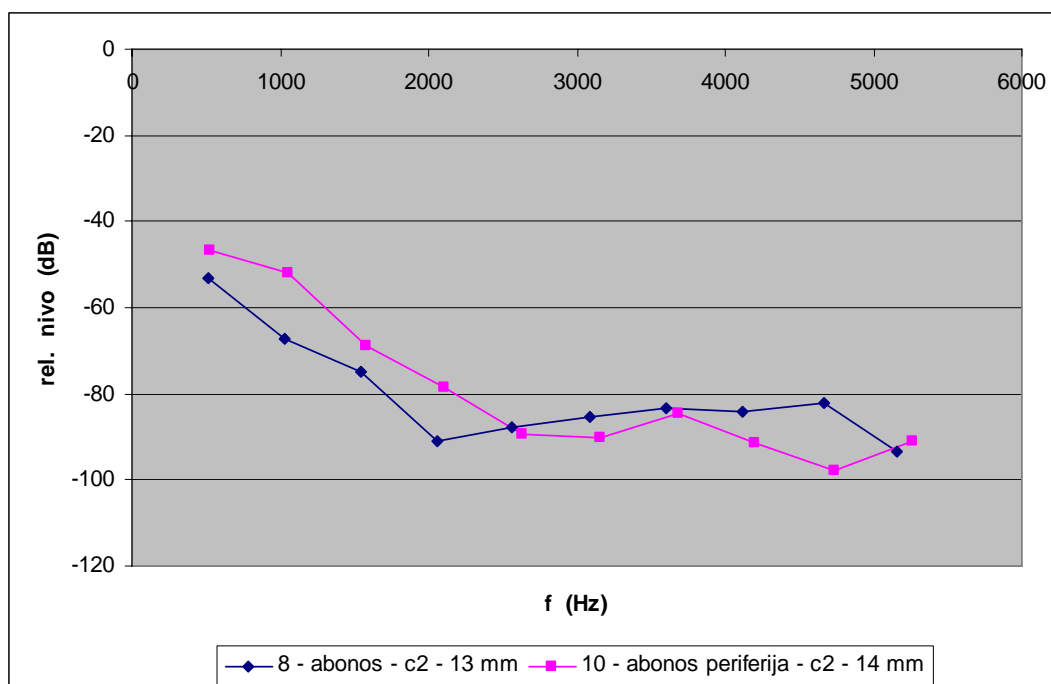


Slika 6.3.3.4: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite prečnike cevi (šimsir,  $\Phi = 13$  mm i  $\Phi = 14$  mm)



Slika 6.3.3.5: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite prečnike cevi (sljiva,  $\Phi = 13$  mm i  $\Phi = 14$  mm)





Slika 6.3.3.6: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za različite prečnike cevi (abonos,  $\Phi = 13$  mm i  $\Phi = 14$  mm)

Na slici 6.3.3.6 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova za frule iz treće grupe izrađene od abonosovog drveta (frula 8 – abonos, frula 10 – abonos periferija). Može se uočiti da je slabljenje nižih harmonika manje za tonove odsvirane na fruli od abonosovog drveta unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, a slabljenje viših harmonika je manje za tonove odsvirane na fruli od abonosovog drveta unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm.

#### 6.3.4 SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške). Kod svih testiranih frula postoje određena odstupanja u štimu.

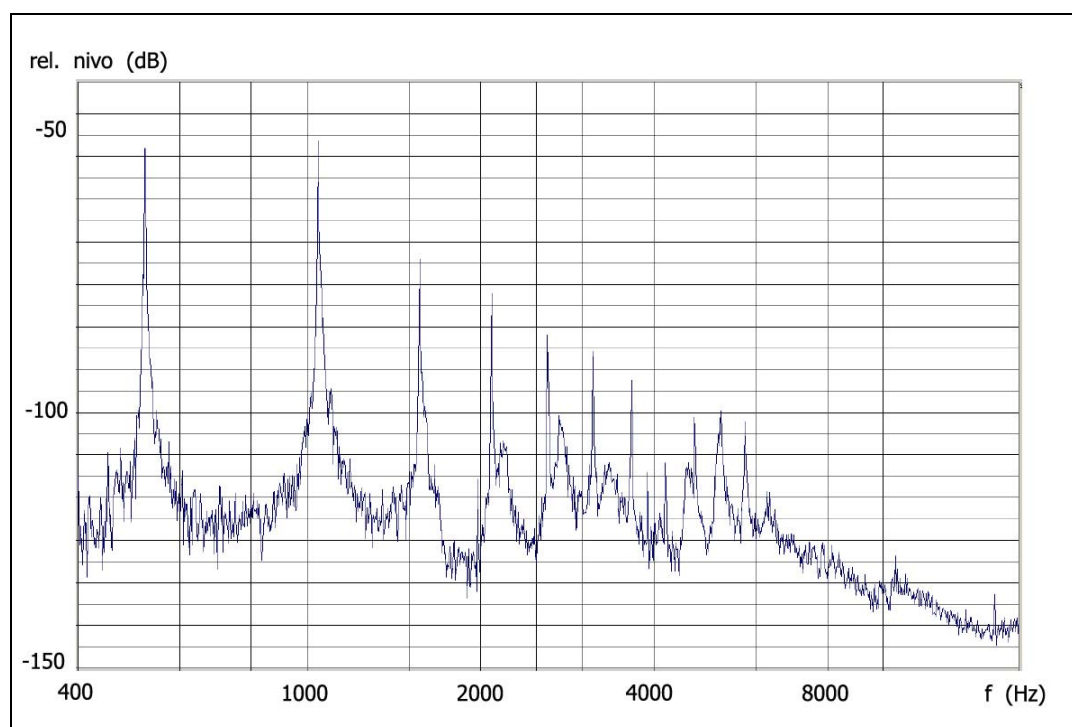
U tabeli 6.3.4.1 prikazan je frekvencijski opseg za 1. grupu frula. Postoji odstupanje od idealnog štima ( 1 - 10 Hz za tonove druge oktave i od 51 - 117 Hz za tonove treće oktave).

Proračun frekvencije viših harmonika urađen je za svih 15 tonova celog opsega ( $c^2 - c^4$ ) za sve frule 1., 2. i 3. grupe i upoređen je sa izmerenim vrednostima.

Na slici 6.3.4.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 1, izrađenoj od bagremovog drveta (bagrem 1), unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 13$  mm.

Tabela 6.3.4.1: Frekvencijski opseg 1. grupe frula

frekvencijski opseg	
1. grupa frula	$\Phi = 13 \text{ mm}$
bagrem 1	524 – 2193 Hz
bagrem 2	530 – 2176 Hz
bagrem 3	524 – 2168 Hz
šimšir 1	520 – 2209 Hz
tisa	526 – 2201 Hz
šljiva 1	522 – 2160 Hz
bagrem 4	522 – 2144 Hz
abonos	514 – 2176 Hz



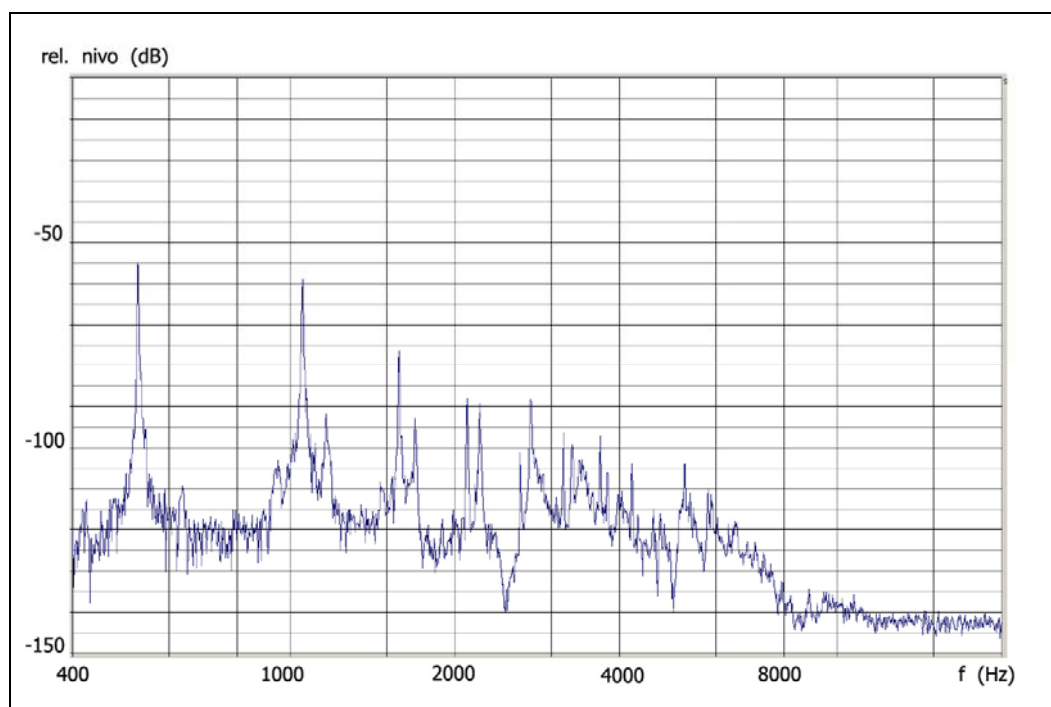
Slika 6.3.4.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )

U tabeli 6.3.4.2 prikazan je frekvencijski opseg za 2. grupu frula. Takođe postoji odstupanje od idealnog štima.

Tabela 6.3.4.2: Frekvencijski opseg 2. grupe frula

frekvencijski opseg		
2. grupa frula	$\Phi = 14 \text{ mm}$	
mahagoni	526 – 2168	Hz
abonos periferija	528 – 2152	Hz
šljiva 2	526 – 2144	Hz
bagrem 5	530 – 2168	Hz
orah	528 – 2168	Hz
bagrem 6	526 – 2193	Hz
bagrem 7	528 – 2193	Hz
šimšir 2	530 – 2168	Hz
dren	526 – 2185	Hz

Na slici 6.3.4.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 12, izrađenoj od bagremovog drveta (bagrem 5), unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14 \text{ mm}$ .



Slika 6.3.4.2: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

U tabelama 6.3.4.3, 6.3.4.4, 6.3.4.5 i 6.3.4.6 prikazan je frekvencijski opseg za 3. grupu frula. Takođe postoji odstupanje od idealnog štima.

Tabela 6.3.4.3: Frekvencijski opseg 3. grupe frula (bagrem 1 – 12)

frekvencijski opseg		
3. grupa frula	bagrem (1, 12)	
$\Phi = 13 \text{ mm}$	524 – 2193	Hz
$\Phi = 14 \text{ mm}$	530 – 2168	Hz

Tabela 6.3.4.4: Frekvencijski opseg 3. grupe frula (šimšir 4 – 16)

frekvencijski opseg		
3. grupa frula	šimšir (4, 16)	
$\Phi = 13 \text{ mm}$	520 – 2209	Hz
$\Phi = 14 \text{ mm}$	530 – 2168	Hz

Tabela 6.3.4.5: Frekvencijski opseg 3. grupe frula (šljiva 6 – 11)

frekvencijski opseg		
3. grupa frula	šljiva (6, 11)	
$\Phi = 13 \text{ mm}$	522 – 2160	Hz
$\Phi = 14 \text{ mm}$	526 – 2144	Hz

Tabela 6.3.4.6: Frekvencijski opseg 3. grupe frula (abonos 8 – 10)

frekvencijski opseg		
3. grupa frula	abonos (centar,periferija)	
$\Phi = 13 \text{ mm}$	514 – 2176	Hz
$\Phi = 14 \text{ mm}$	528 – 2152	Hz

Analizom rezultata merenja može se izvesti zaključak da frekvencijski spektri proučenih frula imaju veliki broj harmonika (abonos ima najviše). Boja tona ovih frula je zbog toga znatno prijatnija za uho slušaoca od boje tona jednodelne frule. Pogodna okolnost kod dvodelnih frula je i činjenica da se zbog konstrukcije njihova intonacija može i naknadno podešavati (precizno štimovanje instrumenta). Frekvencijski spektri dvodelnih frula imaju prilično veliki sopstveni šum .

Kod sve tri analizirane grupe frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi za tonove srednjeg i visokog dela frekvencijskog opsega [5']. Za tonove niskog dela opsega to nije slučaj. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu.

Dinamički opseg tonova odsviranih na dvodelnim frulama nije ujednačen kod svih proučenih frula. Prilikom uobičajenog načina sviranja menja se od oko 25 dB do oko 36 dB..

## 6.4 ANALIZA FREKVENCIJSKOG SPEKTRA GLAVE DVODELNE C FRULE

### 6.4.1 METODOLOGIJA MERENJA

Glava je najvažniji deo svakog drvenoduvačkog instrumenta. 'Ako je dobro i precizno izrađena glava, onda i ceo instrument dobro zvuči'. Prethodnu rečenicu ćete čuti od svakog velikog poznavaoaca muzičkih instrumenata. Odatle se javila potreba da se ispita glava frule.

Kod jednodelne frule glava je sastavni deo instrumenta i proučavanje glave podrazumeva proučavanje cele frule. Kod dvodelne frule glava je nezavistan deo instrumenta i može se nezavisno proučavati. U poglavlju o fruli smo istakli značaj glave kao nezavisnog dela u procesu dodatnog štimovanja frule. Ovde će biti prikazana analiza frekvencijskog spektra tonova koji se mogu odsvirati na glavi frule, bez upotrebe cevi.

Za snimanje je korišćena dvodelna C dur frula, napravljena od drenovine, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm. Izabrana je sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$ , odsviranih ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Svaki od tonova analiziran je posebno. Zatim su na glavi frule odsvirani tonovi koji su se mogli dobiti. Ispostavilo se da su to tonovi  $g^3$  i  $g^4$ , što predstavlja 3. i 6. harmonik osnovnog tona  $c^2$  ove frule. Drugim rečima: postoji osnovni ton glave frule i, preduvavanjem dobijen, njegov drugi harmonik.

### 6.4.2 POSTAVKA MERENJA

Snimanje je urađeno u tonskom studiju VISER u Beogradu u kontrolisanim uslovima ( vreme reverberacije oko 0,4 s). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente (mikrofon je postavljen na dvadesetak cm ispred i iznad samog instrumenta). Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 9.0 i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 9.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

### 6.4.3 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu petnaest odsviranih tonova na celoj dvodelnoj fruli i dva odsvirana tona na glavi frule. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona.

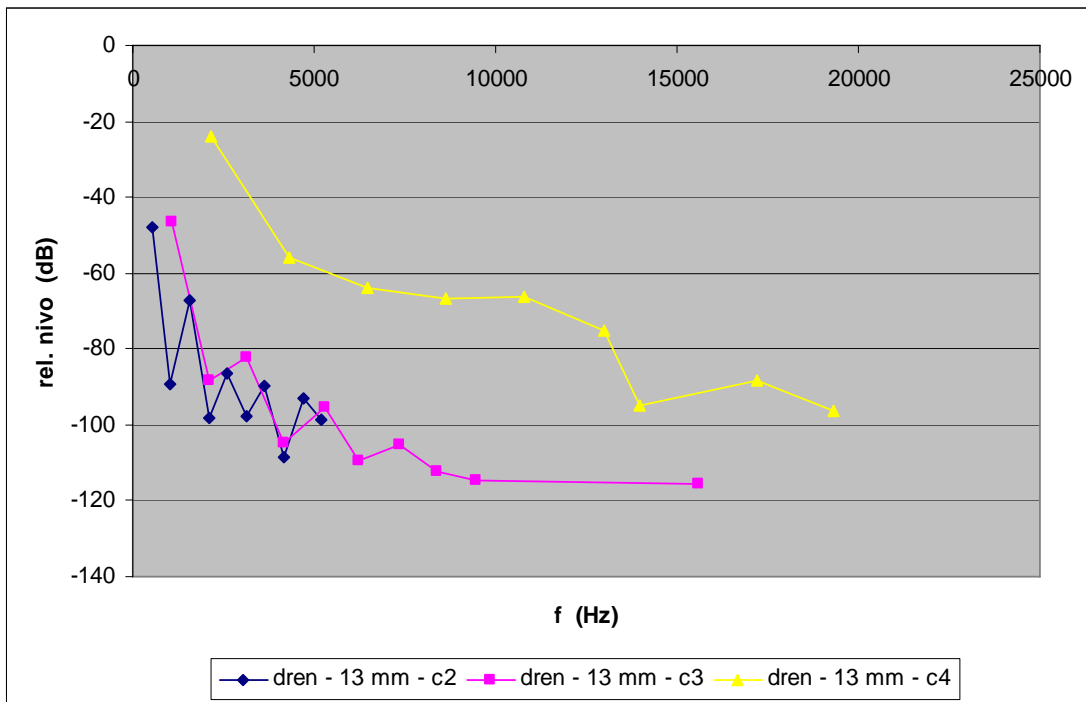
U tabeli 6.4.3.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od drenovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije.

Tabela 6.4.3.1: Osnovni rezultati merenja za frulu napravljenu od drena, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 13$  mm

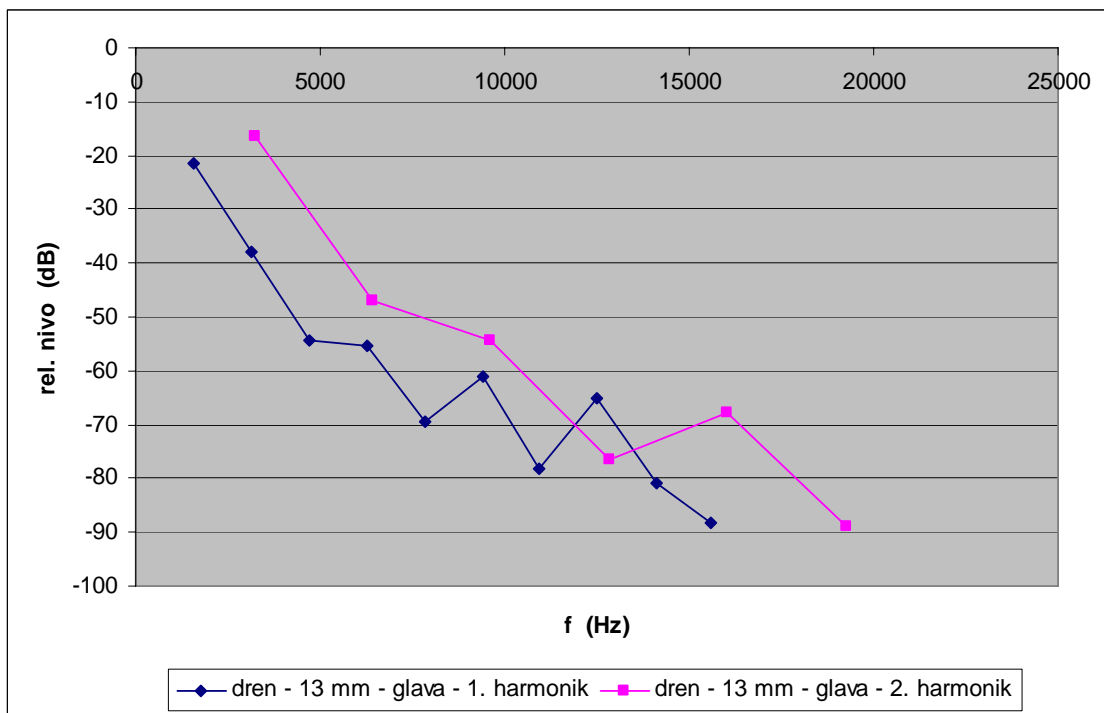
dren		$\Phi = 13$ mm	Neumann U 87	merenje sa $c^2 = 523.25$ prir. pobud. Hz	
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	522	0.997	1.25	-48
2	2:1	1042	1.991	-4.5	-89.3
3	3:1	1564	2.989	-5.75	-67.4
4	4:1	2088	3.990	-5	-98.2
5	5:1	2616	3088	-0.25	-86.6
6	6:1	3132	5.985	-7.5	-97.6
7	7:1	3640	6.956	-22.75	-89.8
8	8:1	4182	7.992	-4	-108.7
9	9:1	4698	8.978	-11.25	-92.8
10	10:1	5219	9.974	-13.5	-98.7

Na slici 6.4.3.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika odsviranih tonova na celoj dvodelnoj fruli. Može se uočiti da je slabljenje harmonika najmanje za ton najviše frekvencije.

Na slici 6.4.3.2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika prvog i drugog odsviranog tona na glavi frule. Ispostavilo se da je frekvencija prvog tona  $f_1 = 1567.98$  Hz, što veoma blisko odgovara tonu  $g^3$ . Treći harmonik C frule bi idealno trebalo da iznosi  $f_3 = 1569.75$  Hz. Postoji određeno odstupanje frekvencije, ali ne dovoljno veliko da bi ljudsko uho to registrovalo (frekvencijska razlika od nepuna 2 Hz se može čuti u subkontra, kontra oktavi, ali u trećoj oktavi ne). Frekvencija drugog odsviranog tona, dobijenog preduvajanjem za oktavu, iznosi  $f_2 = 3135.96$  Hz, što veoma blisko odgovara tonu  $g^4$ . Šesti harmonik C frule bi idealno trebalo da iznosi  $f_6 = 3139.5$  Hz. I ovde postoji određeno odstupanje frekvencije, ali ne dovoljno veliko da bi ljudsko uho to registrovalo. Može se uočiti da je slabljenje harmonika manje za ton više frekvencije.



Slika 6.4.3..1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za tonove  $c^2$ ,  $c^3$  i  $c^4$  (dren,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 6.4.3..2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za tonove  $g^3$  i  $g^4$  (dren - glava,  $\Phi = 13$  mm)

Dinamički opseg tonova odsviranih na glavi dvodelne frule iznosi oko 5 dB.



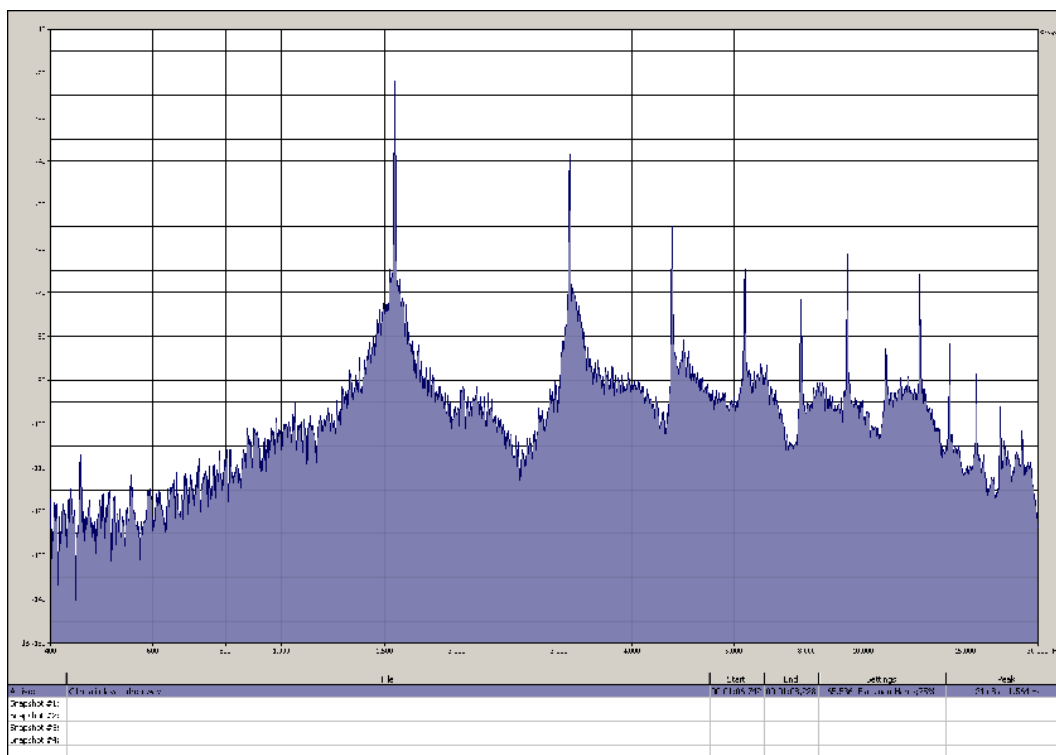
#### 6.4.4 SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimo van instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške). Interesantno je da je broj harmonika za tonove odsvirane samo na glavi dvodelne frule veliki. Zato su ovde prikazani frekvencijski spektri oba odsvirana tona.

Na slici 6.4.4.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na glavi frule izrađene od drenovog drveta, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 13$  mm.

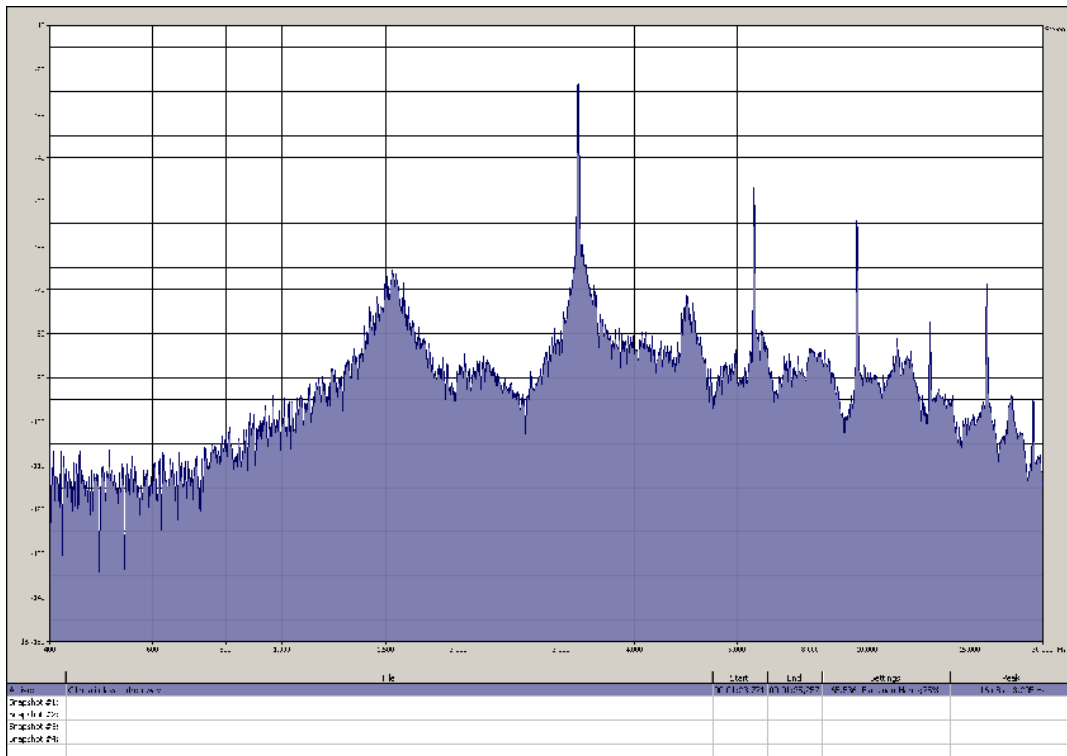
Na slici 6.4.4.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $g^4$ , odsviranog na glavi frule izrađene od drenovog drveta, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 13$  mm.

Na slici 6.4.4.3 prikazan je frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na celoj dvodelnoj fruli izrađenoj od drenovog drveta, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 13$  mm.

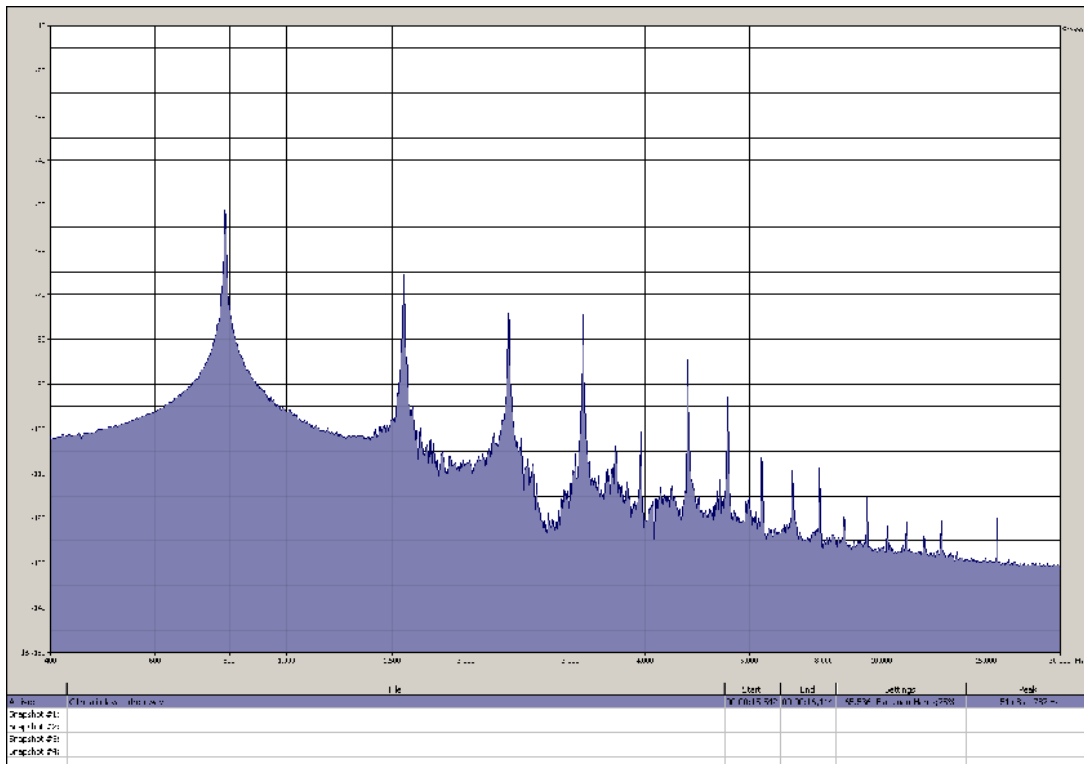


Slika 6.4.4..1: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na glavi frule (dren,  $\Phi = 13$  mm)

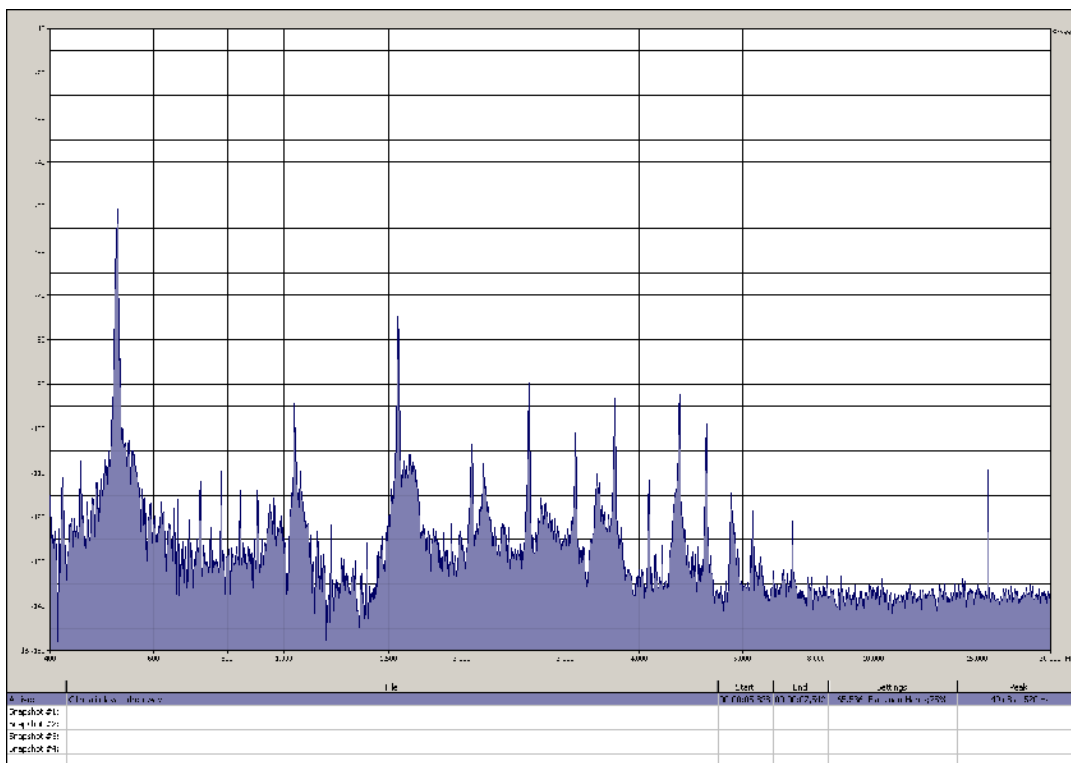
Sa slika se može uočiti da je broj harmonika za ton  $g^2$  skoro isti kao i za ton  $g^3$ , što u potpunosti dokazuje tvrdnju da je glava nuzičkog instrumenta najviše odgovorna za boju tona koji će se na instrumentu proizvesti. Ton  $g^4$  ima manji broj harmonika po samoj prirodi frekvencijskog spektra i njegovog ograničenja sa gornje strane. Inače je broj harmonika u okviru tog opsega dovoljno veliki da bi se mogao izvesti isti zaključak kao i za ton  $g^3$ .



Slika 6.4.4..2: Frekvencijski spektar tona  $g^4$ , odsviranog na glavi frule (dren,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 6.4.4..3: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na caloj fruli (dren,  $\Phi = 13$  mm)



*Slika 6.4.4..4: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na celoj fruli (dren,  $\Phi = 13$  mm)*

Na slici 6.4.4.4 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na celoj dvodelnoj fruli izrađenoj od drenovog drveta, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 13$  mm.

## 6.5 UTICAJ PRIGUŠIVAČA NA FREKVENCIJSKI SPEKTAR JEDNODELNE C FRULE

Muzički instrument frula, po svojoj konstrukciji, spada u drvene duvačke instrumente koji imaju cev otvorenu na oba kraja. Vazduh slobodno struji u cevi, nije ograničen ni sa jedne strane. Razlog tome je što frula ima vazdušni jezičak, a ne jezičak od trske (poput klarineta, npr.), ili usneni jezičak (poput trube, npr.). Kada se posmatra frekvencijski spektar tonova odsviranih na fruli, može se uočiti da su u njemu zastupljeni svi harmonici.

Kod muzičkih instrumenata kod kojih je cev zatvorena na jednom kraju nisu zastupljeni svi harmonici u frekvencijskom spektru, već samo neparni. Panova frula je tipičan predstavnik tih instrumenata. Cevi od kojih je Panova frula napravljena su potpuno, drvenim dancem, zatvorene na donjem kraju. Duvački instrumenti sa trskom i limeni duvački instrumenti takođe imaju cev zatvorenu sa jedne strane jer i trščani i usneni jezičak sprečavaju da vazduh slobodno struji kroz cev. One čine deo povratne sprege uduvavanja vazduha u cev instrumenta. Frekvencijski spektar ovih instrumenata bi, zbog toga, imao samo neparne harmonike i, kao takav bio dosta siromašan (preciznije: boja zvuka bi bila siromašna). Zato su u konstrukciji pridodati konusni oblik cevi, manjeg ili većeg stepena, i zvonu, manjih ili većih dimenzija. Oni obogaćuju zvuk dodajući mu i parne harmonike.

U ovom merenju pokušali smo da istražimo kako se ponaša frekvencijski spektar frule ako se, dodavanjem različitih prigušivača na izlazni kraj cevi, menja izlazna impedansa i time, u većoj ili manjoj meri, cev napravi zatvorena na tom kraju. To podseća na Panovu frulu kojoj bi moglo da se menja dno od različitih materijala. Prigušivači se koriste kod limenih duvačkih instrumenata i, uglavnom, suzbijaju određene harmonike u frekvencijskom spektru. Želeli smo da utvrdimo da li će to i sa frulom biti slučaj, ili će spektar imati prigušene parne harmonike.

### 6.5.1 METODOLOGIJA MERENJA

Izabrana je sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  i odsvirana na jednodelnoj C fruli izrađenoj od bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm, ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde, bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica). Svaki od tonova analiziran je posebno. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona.

## 6.5.2 POSTAVKA MERENJA

Merenje je realizovano u tonskom studiju Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu koji se koristi za mnoga snimanja kao i za edukaciju studenata. Snimanje je urađeno u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4 s, temperatura oko 25 °C, vlaga mala, ambijentalna buka oko 35 dB). Studijski prostor je akustički obrađena prostorija (kosi zid, akustički obrađeni pod, zidovi i tavanica). Frulaš je bio lociran u centar, okružen sa 5 akustičkih paravana dimenzija 2 m x 1 m x 0.25 m, koji su dodatno akustički obradili studio smanjujući neželjene refleksije. Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski Neumann U 87. Postavka mikrofona je urađena tako da je osa mikrofona postavljena pod uglom od 30° u odnosu na osu frule (30 – tak cm ispred i 30 – tak cm iznad izlaza cevi), kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Na taj način je membrana mikrofona prikupila zvuk i sa donjeg kraja cevi frule i zvuk koji se emituje iz rupica frule.

Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

## 6.5.3 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu po petnaest tonova odsviranih na jednodeloj C fruli bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica).

Za svaki ton napravljena je tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

U tabeli 6.5.3.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta., unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14 \text{ mm}$ , bez upotrebe prigušivača. Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije.

U tabeli 6.5.3.2 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog

drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm kada je upotrebljen prigušivač 1 (gusto tkano pamučno platno).

Tabela 6.5.3.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od bagrema ( $\Phi = 14$  mm), bez upotrebe prigušivača

bez prigušivača	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	merenje sa priir. pobud.	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	540	1.032	16.75	-53.1
2	2:1	1082	2.029	35.5	-70.6
3	3:1	1624	3.103	54.25	-69
4	4:1	2160	4.128	67	-77.1
5	5:1	2716	5.190	99.75	-77.9
6	6:1	3240	6.192	100.5	-87.6
7	7:1	3779	7.222	116.25	-90.1
8	8:1	4342	8.298	156	-96.5
9	9:1	4860	9.288	150.75	-93.6
10	10:1	5398	10.316	165.5	-92.2

Tabela 6.5.3.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od bagrema ( $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1

prigušivač 1	bagrem	$\Phi = 14$ mm	Neumann U 87	merenje sa priir. pobud.	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	512	1	11.25	-86.3
2	2:1	1023	1.955	23.5	-87.9
3	3:1	1541	2.945	28.75	-77.7
4	4:1	2049	3.915	44	-90.1
5	5:1	2626	5.018	9.75	-84.1
6	6:1	3389	6.476	249.5	-100.3
7	7:1	3938	7.526	275.25	-99.2
8	8:1	4458	8.519	272	-120
9	9:1	5103	9.752	393.75	-106
10	10:1				

Tabela 6.5.3.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od bagrema ( $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2

prigušivač bagrem		$\Phi = 14$ mm	Neumann	merenje sa $c^2 = 523.25$ Hz	
2			U 87	prir. pobud.	
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	525	1.003	1.75	-70.9
2	2:1	1111	2.123	64.5	-79.3
3	3:1	1642	3.138	72.25	-69.3
4	4:1	2160	4.128	67	-90.6
5	5:1	2757	5.268	140.75	-83.3
6	6:1	3301	6.308	161.5	-81.7
7	7:1	3737	7.141	74.25	-99.4
8	8:1	4120	7.873	-66	-105.4
9	9:1				
10	10:1	5454	10.423	221.5	-102.2

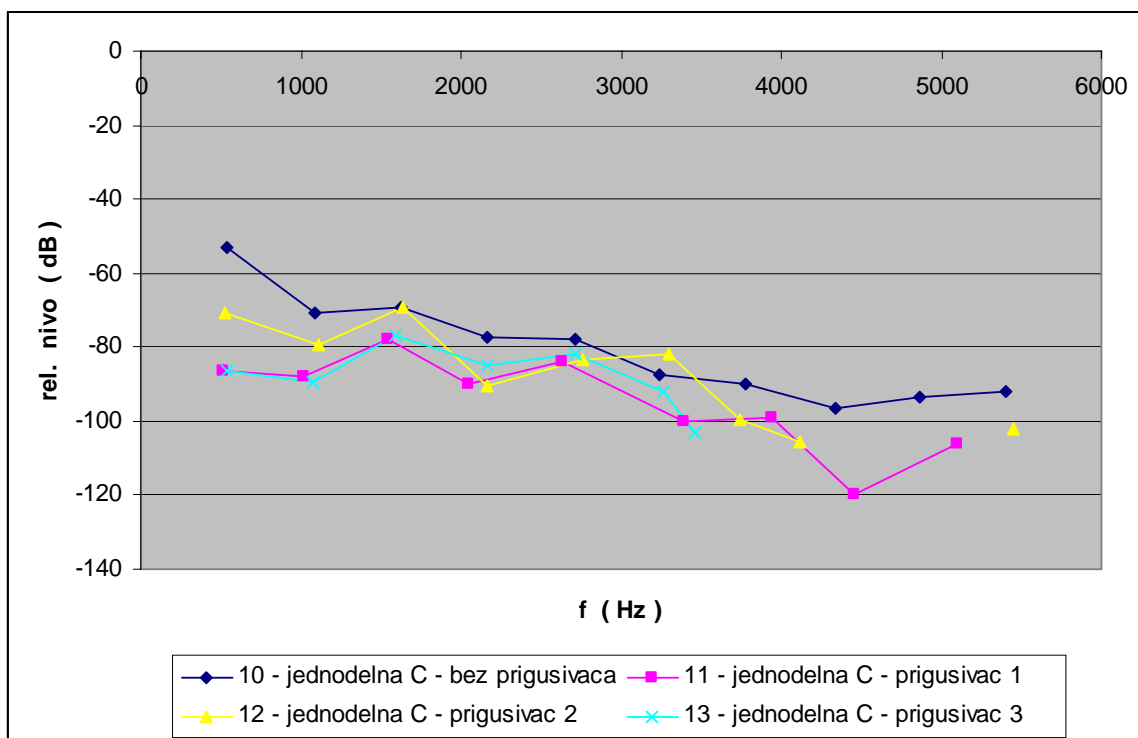
Tabela 6.5.3.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od bagrema ( $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3

prigušivač bagrem		$\Phi = 14$ mm	Neumann	merenje sa $c^2 = 523.25$ Hz	
3			U 87	prir. pobud.	
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	542	1.035	18.75	-86.3
2	2:1	1078	2.056	31.5	-89.3
3	3:1	1594	3.046	24.25	-76.6
4	4:1	2160	4.128	67	-84.7
5	5:1	2716	5.190	99.75	-81.7
6	6:1	3265	6.239	125.5	-92.2
7	7:1	3467	6.623	-195.75	-103
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

U tabeli 6.5.3.3 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm kada je upotrebljen prigušivač 2 (laneno platno).

U tabeli 6.5.3.4 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od bagremovog drveta, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm kada je upotrebljen prigušivač 3 (troslojna papirna paramica).

Na slici 6.5.3.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj fruli bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica). Može se uočiti da prigušivači utiču na smanjenje nivoa svih harmonika u frekvencijskom spektru, naročito na osnovni harmonik.

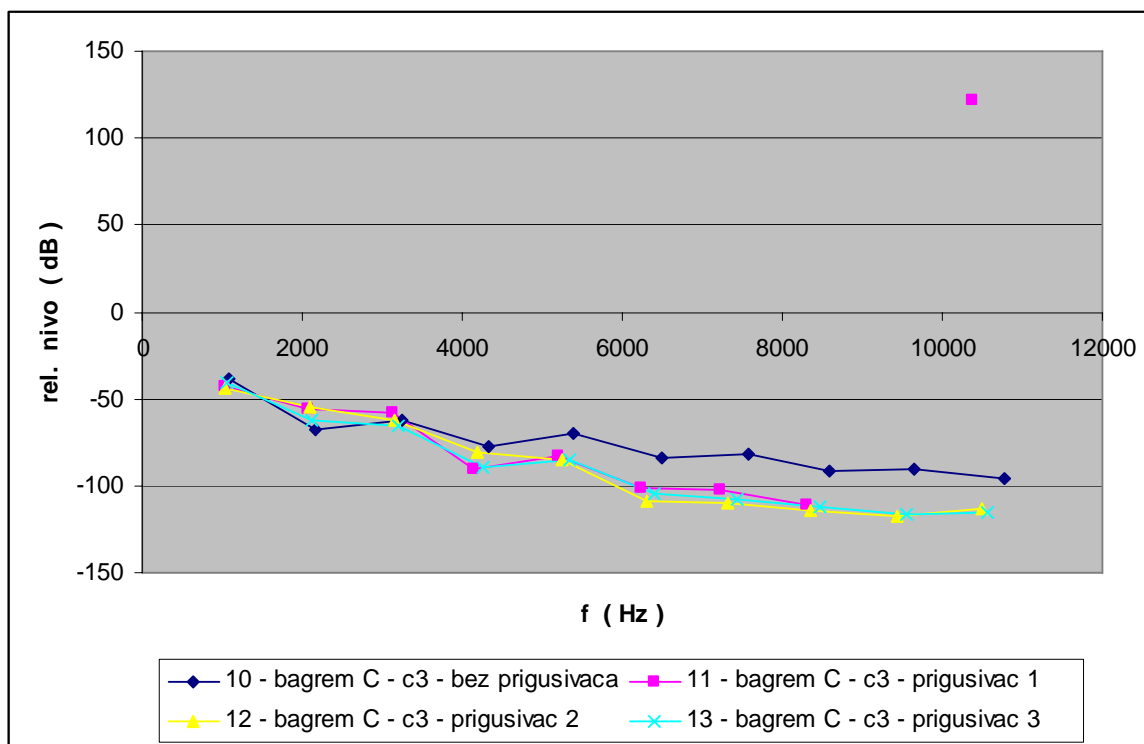


Slika 6.5.3.1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^2$ , odsviran na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigušivača, sa prigušivačem 1, 2 i 3

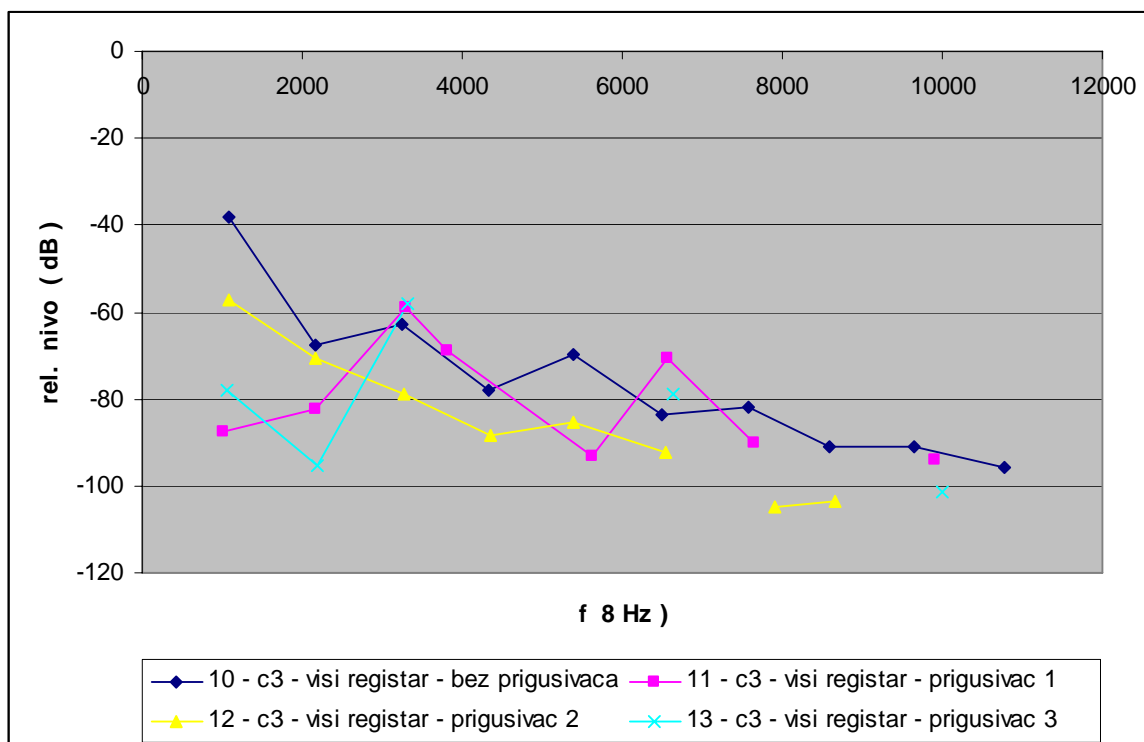
Na slici 6.5.3.2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika tona  $c^3$ , odsviranog na jednodelnoj fruli bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica). Može se uočiti da prigušivači utiču na



smanjenje nivoa viših harmonika u frekvencijskom spektru. Na osnovni harmonik najmanje utiču. To je zato što je ton  $c^3$  odsviran kao poslednji u donjem registru.



Slika 6.5.3..2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^3$ , odsviran u nižem registru na jednodeloj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigusivača, sa prigusivačem 1, 2 i 3



Slika 6.5.3..3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^3$ , odsviran u višem registru na jednodeloj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigusivača, sa prigusivačem 1, 2 i 3

Na slici 6.5.3.3 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika tona  $c^3$ , odsviranog na jednodelnoj fruli bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica). Ton  $c^3$  odsviran je u višem registru. Prigušivači najviše utiču na smanjenje nivoa osnovnog harmonika u frekvencijskom spektru. Najmanje prigušenje uzrokuje prigušivač 2 (laneno platno) jer je laneno platno najređe tkano od svih upotrebljenih prigušivača.

#### 6.5.4 SPEKTRALNI SADRŽAJ

Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške).

U tabeli 6.5.4.1 prikazan je frekvencijski opseg za tonove odsvirane na jednodelnoj fruli bez prigušivača, sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno), prigušivačem 2 (laneno platno) i prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica). U sva četiri slučaja postoji odstupanje od idealnog štima.

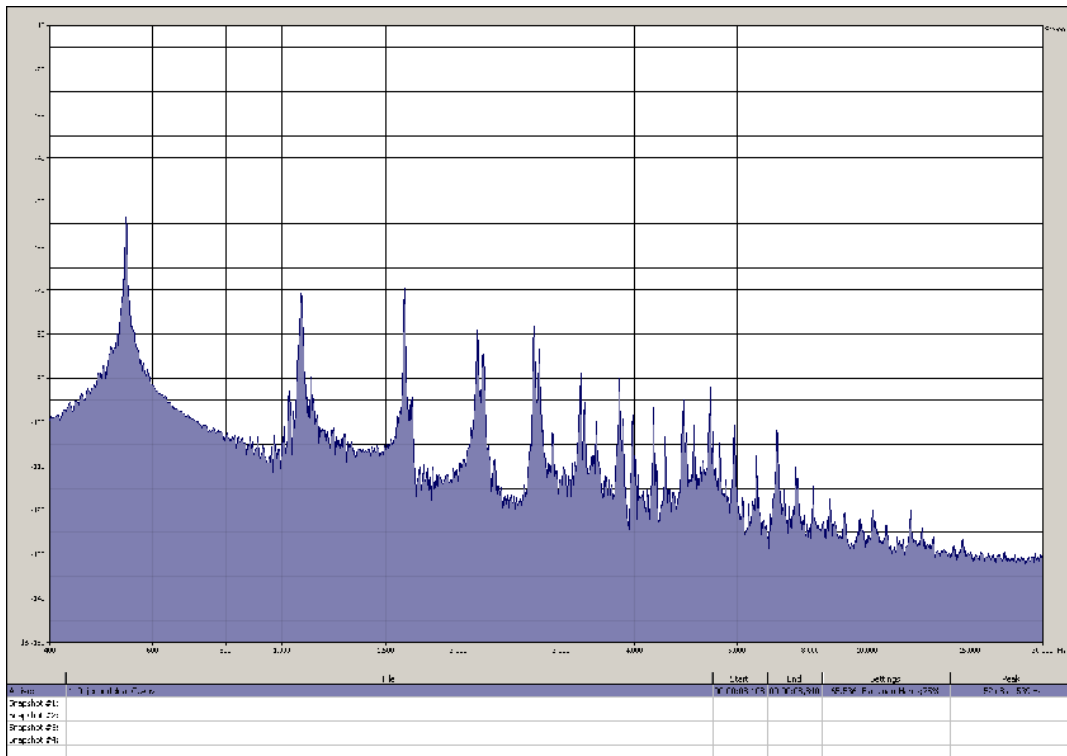
Tabela 6.5.4.1: Frekvencijski opseg 1. grupe frula

frekvencijski opseg		
prigušivač	bagrem	$\Phi = 14$ mm
0	540 – 2104	Hz
1 – pamučno platno	512 – 2065	Hz
2 – laneno platno	525 – 2096	Hz
3 – papirna maramica	542 – 2112	Hz

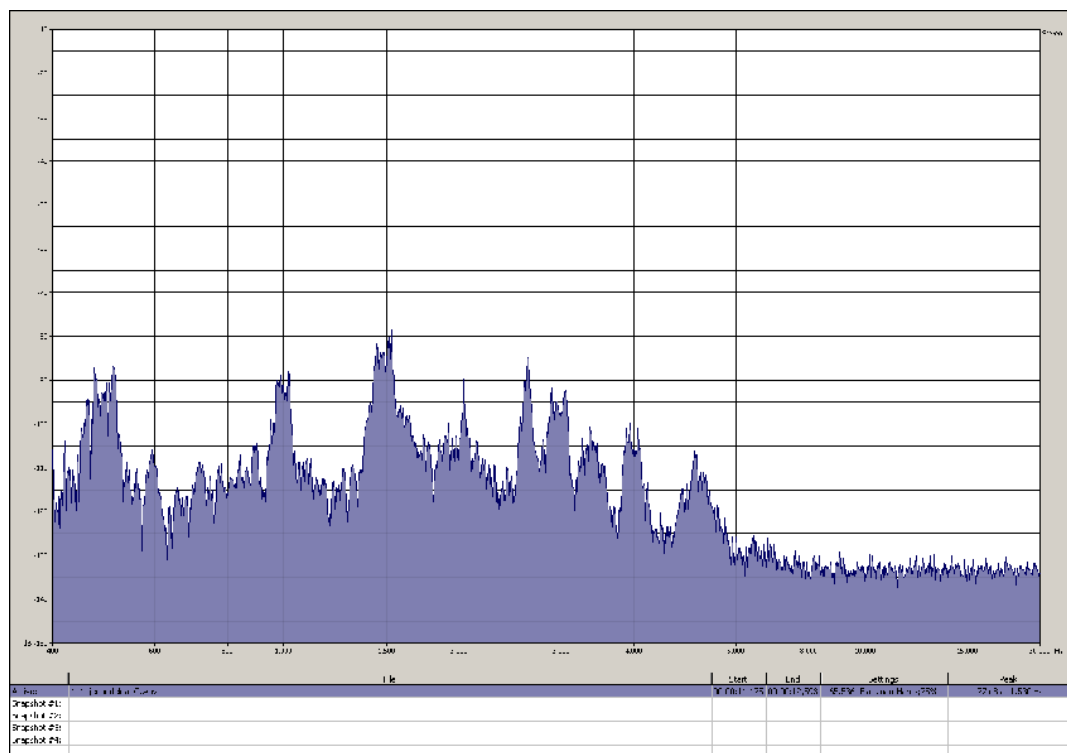
Na slici 6.5.4.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigušivača. Svi harmonici su ravnomerno raspoređeni, a treći harmonik ima veći intenzitet od drugog za 1.6 dB.

Na slici 6.5.4.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno).

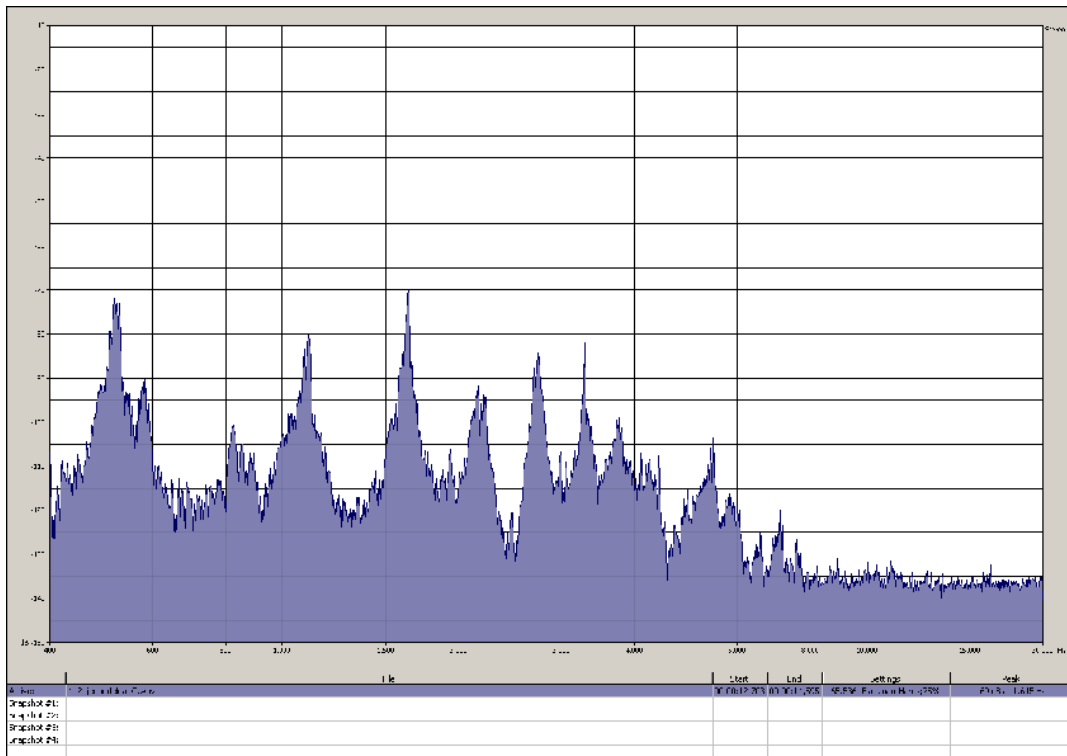
Sa slike se može videti da prigušivač deluje na sve harmonike frekvencijskog spektra. Harmonici imaju veće slabljenje prilikom upotrebe prigušivača nego kada se prigušivač ne koristi. Takođe, harmonici nisu izoštrjeni u piku kao kada se prigušivač ne koristi.



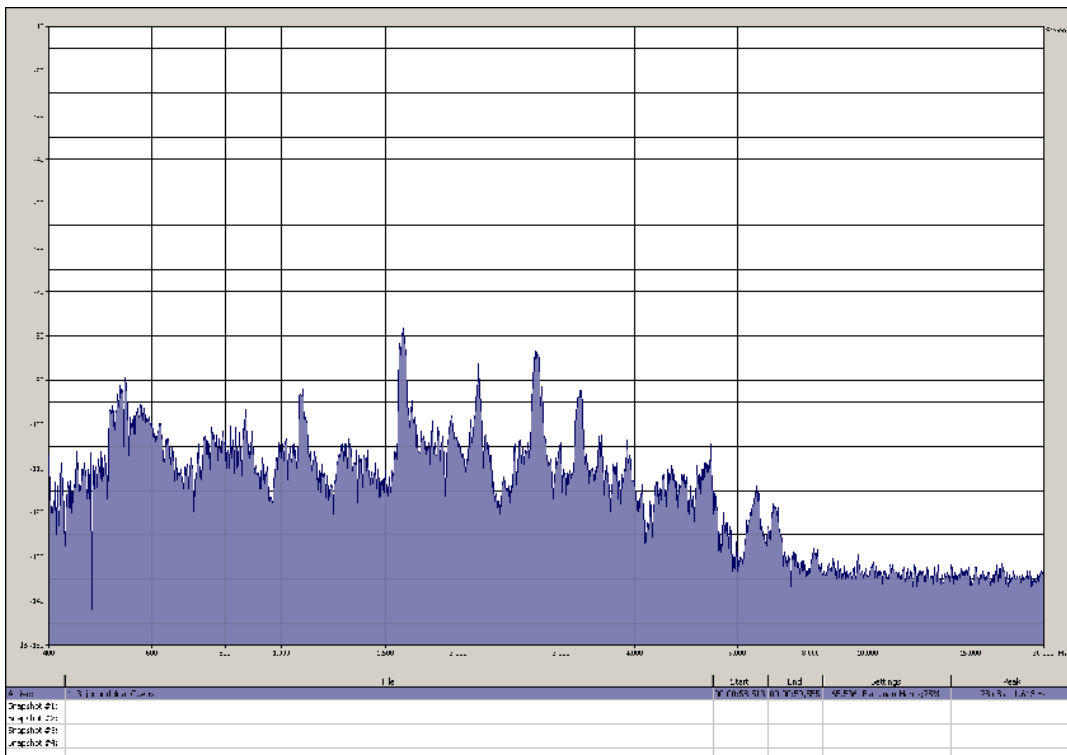
Slika 6.5.4.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigušivača



Slika 6.5.4.2: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1



*Slika 6.5.4.3: Frekvencijski spekter tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2*



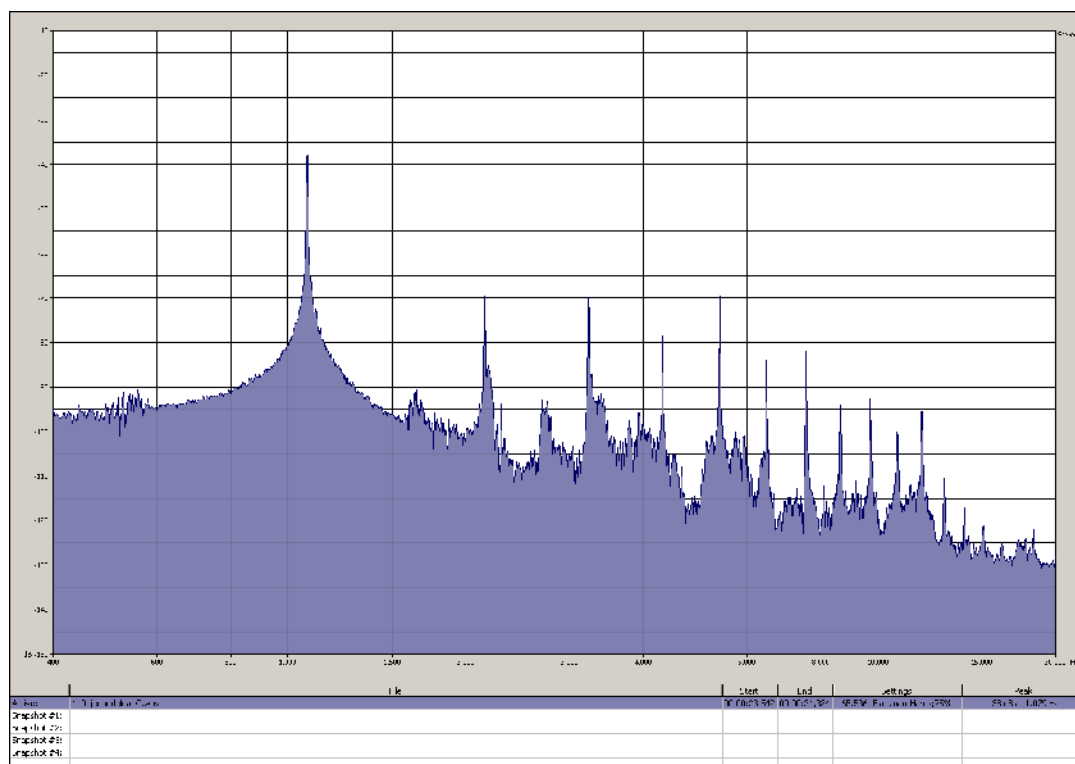
*Slika 6.5.4.4: Frekvencijski spekter tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3*

Na slici 6.5.4.3 prikazan je frekventijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2 (laneno platno). Na slici 6.5.4.4 prikazan je frekventijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica).

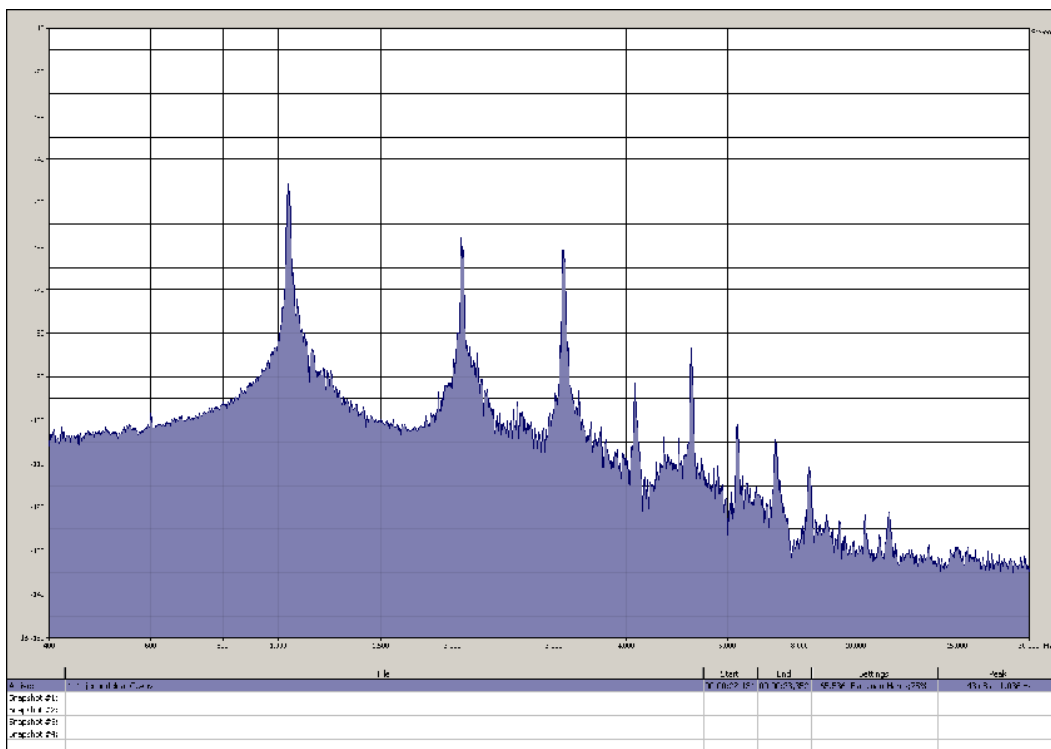
Sa slika 6.5.4.2, 6.5.4.3 i 6.5.4.4 vidi se da je najveće slabljenje harmonika prilikom upotrebe prigušivača 3 (troslojna papirna maramica). To se može objasniti činjenicom da je tkanje kod papirne maramice najveće gustine, iako na prvi pogled deluje najtanji i najmekši materijal od svih upotrebljenih. Sa druge strane, najmanje prigušenje harmonika nastaje prilikom upotrebe prigušivača 2 (laneno platno) jer je tkanje tog prigušivača najmanje gustine. Na slici 6.5.4.5 prikazan je frekventijski spektar tona  $c^3$  odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigušivača. Svi harmonici su ravnomerno raspoređeni, a treći harmonik ima veći intenzitet od drugog za 4.8 dB.

Na slici 6.5.4.6 prikazan je frekventijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno).

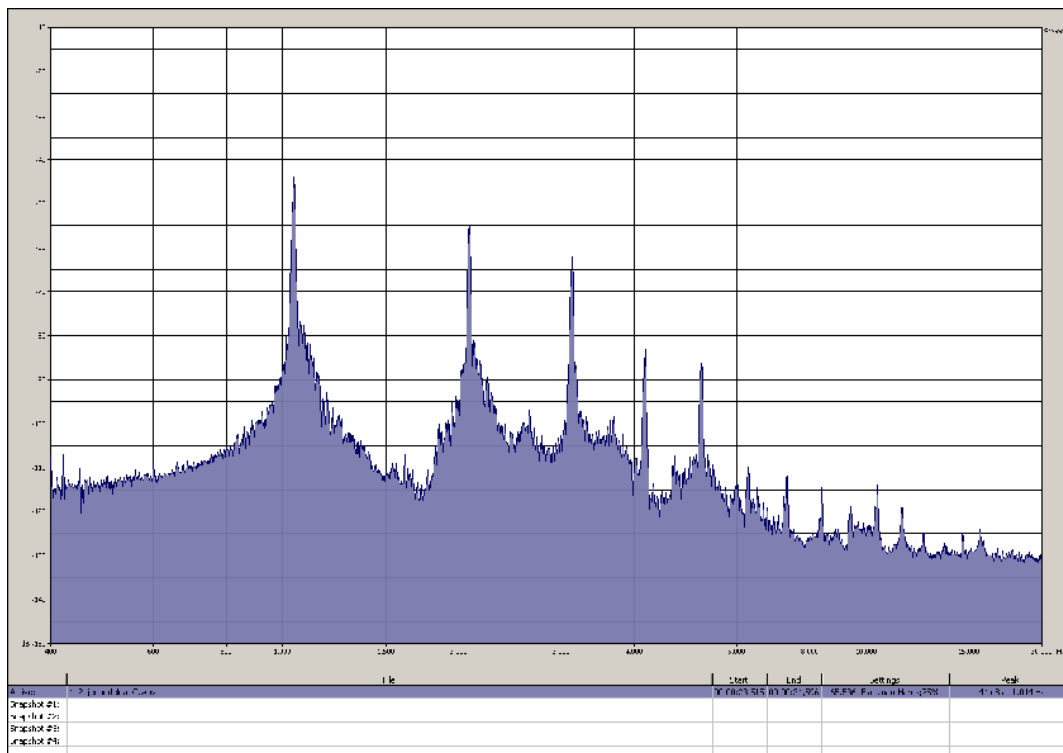
Sa slike se može videti da prigušivač intenzivnije deluje na više harmonike u frekventijskom spektru.



Slika 6.5.4.5: Frekventijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), bez prigušivača



Slika 6.5.4.6: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1

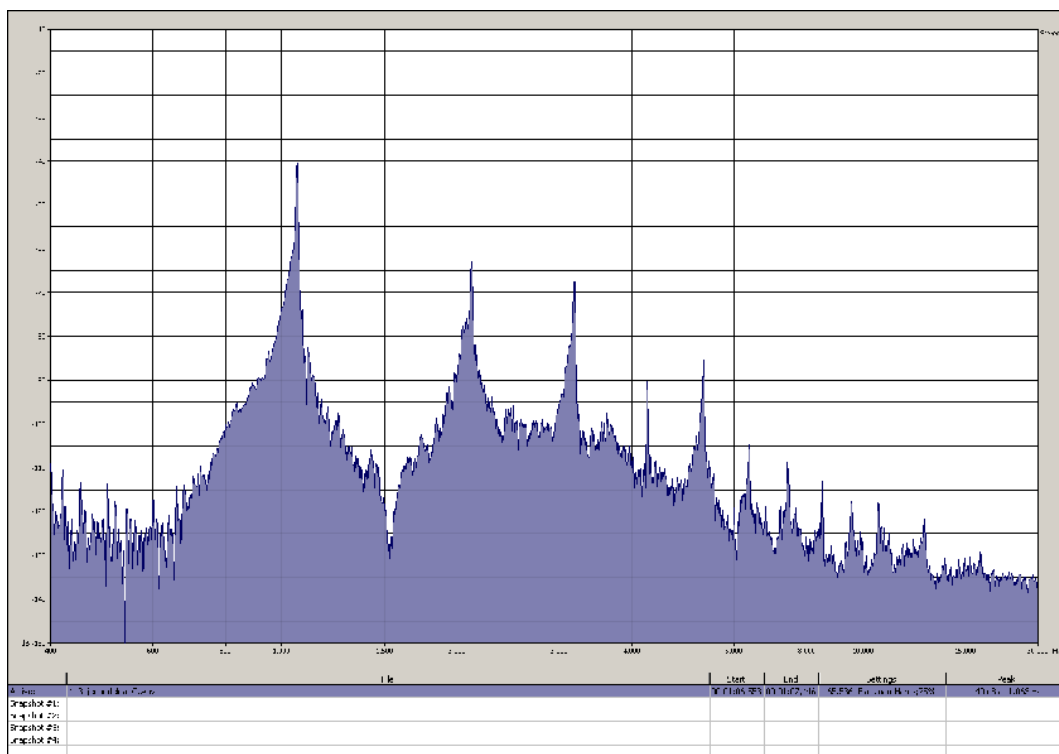


Slika 6.5.4.7: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2

Na slici 6.5.4.7 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2 (laneno platno).

Na slici 6.5.4.8 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica).

Sa slika 6.5.4.6, 6.5.4.7 i 6.5.4.8 vidi se da najveće prigušenje nastaje upotrebom prigušivača 3 (troslojna papirna maramica).

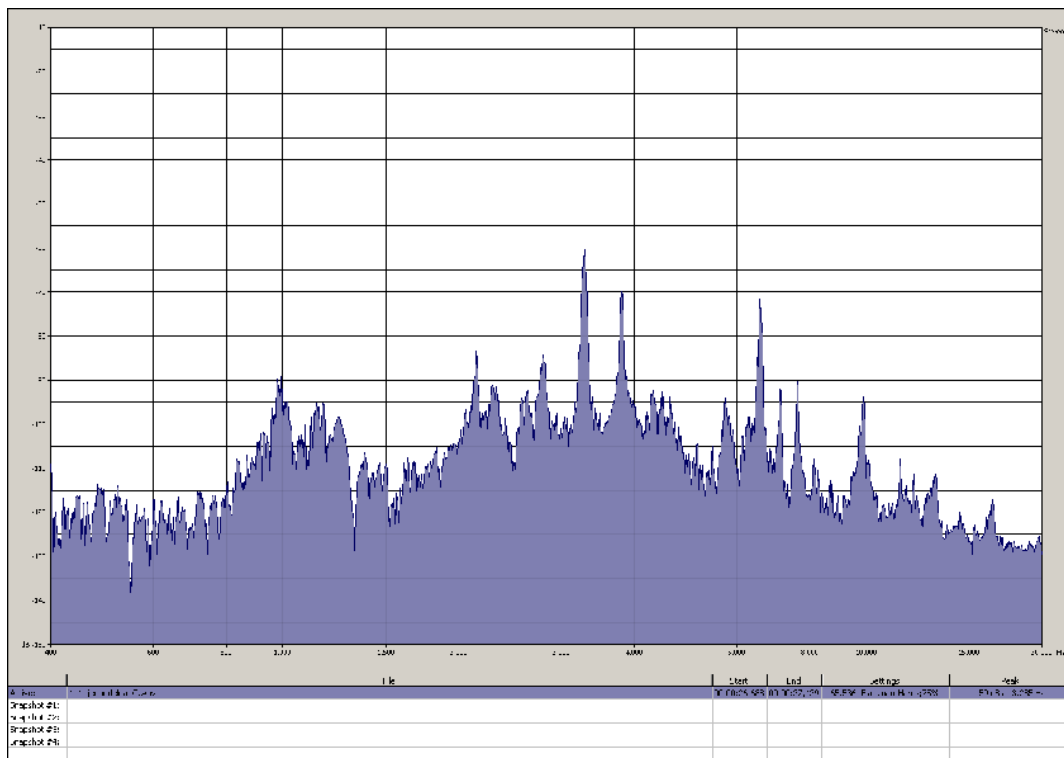


Slika 6.5.4.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u niskom registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3

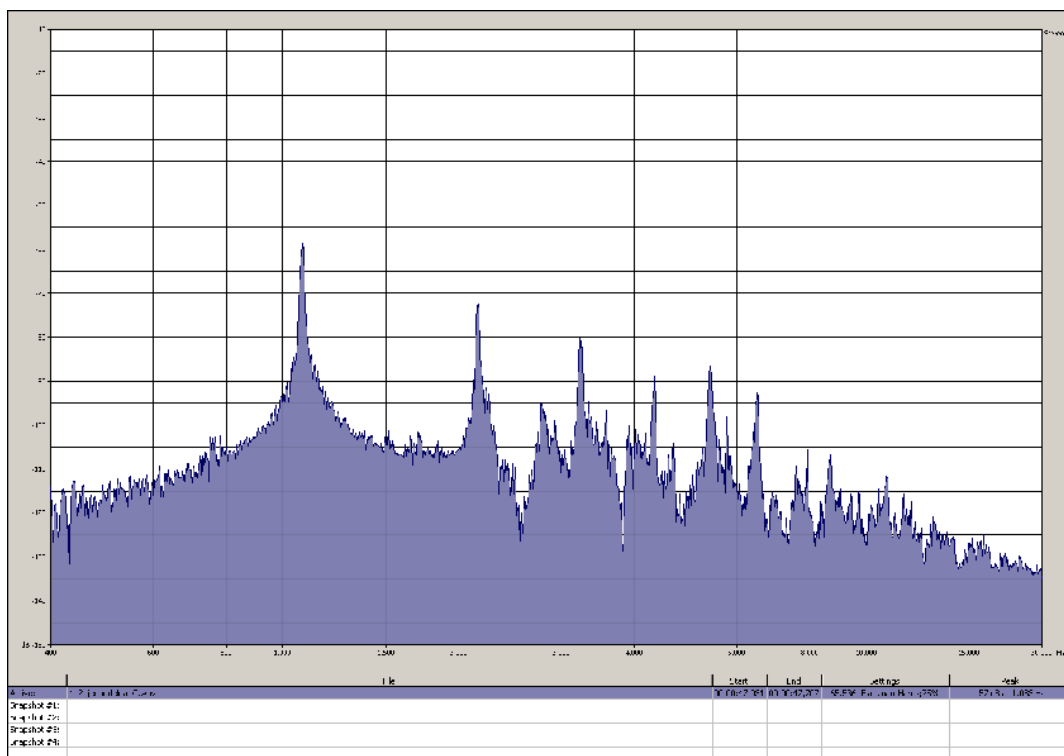
Na slici 6.5.4.9 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1 (gusto tkano pamučno platno).

Na slici 6.5.4.10 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2 (laneno platno).

Na slici 6.5.4.11 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3 (troslojna papirna maramica).

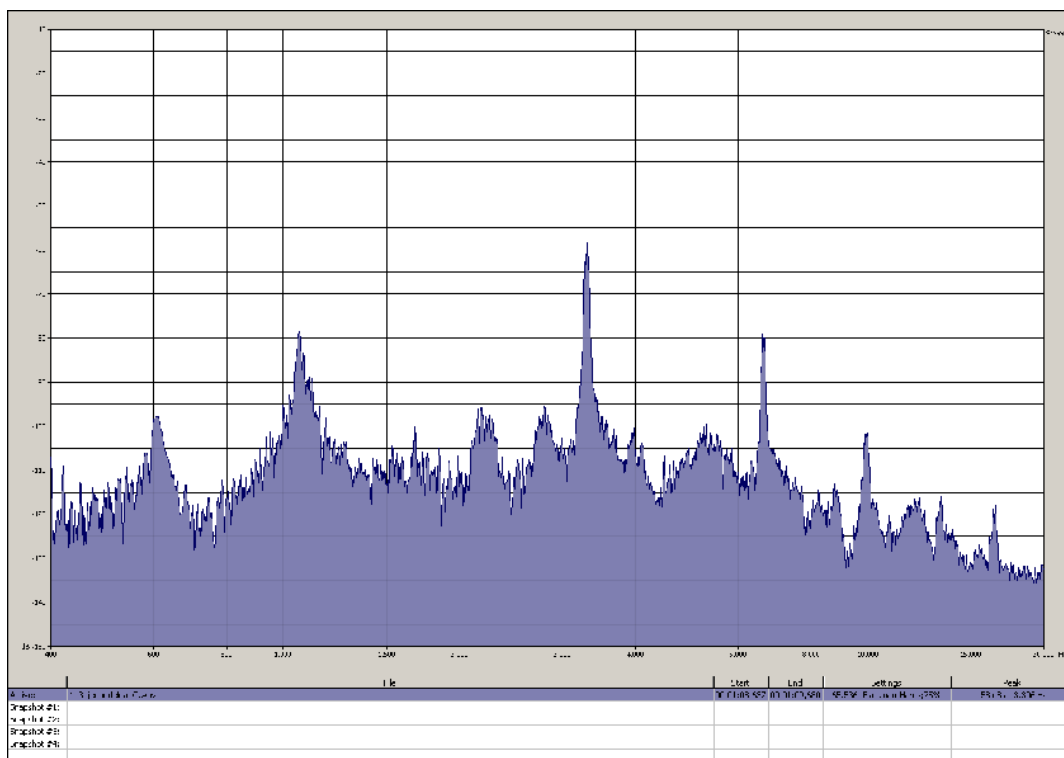


Slika 6.5.4.9: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 1



Slika 6.5.4.10: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 2





*Slika 6.5.4.11: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u višem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm), sa prigušivačem 3*

Sa slika 6.5.4.9, 6.5.4.10 i 6.5.4.11 vidi se da najveće prigušenje nastaje upotrebom prigušivača 3 (troslojna papirna maramica). U frekvencijskom spektru tona  $c^3$  odsviranog u višem registru na fruli upotrebom prigušivača 3 primećuje se izraženo slabljenje pojedinih harmonika (spektar počinje da podseća na spektar Panove frule).

## 6.6 ANALIZA FREKVENCIJSKOG SPEKTRA KARAKTERISTIČNIH FRULA BORE DUGIĆA

Kada se u Srbiji kaže 'frula' i oni koji slušaju narodnu muziku i oni koji ne, odmah pomisle na Boru Dugića. Bora je, jednostavno rečeno, sinonim za frulu. Bog mu je podario izrazito veliki talenat širokog spektra i to se zaista može čuti kada slušate Boru kako svira. Međutim, Bora Dugić nije samo talentovan za muziciranje na fruli. Rođen kao izuzetno inteligentan čovek, Bora ima sposobnost da sagleda i proceni sve aspekte sa kojih treba prići nekoj materiji kojom se čovek u životu bavi. Odavno je počeo da sam proizvodi frule na kojima svira, da sam bira i građu za njih, sam konstruiše alate kojima ih pravi, sam smišlja nove tehnološke postupke u izradi frule i, istovremeno, usavršava one postojeće. Bora Dugić je, zaista, potpuno jedinstvena ličnost i možemo ga smatrati valikim ambasadorom frule i kod nas i u svetu.

Kada se uzme u obzir činjenica ga Bora sam pravi svoje frule, a da tako dobro zvuči kada on na njima svira, čovek ne može, a da se ne zapita postoji li nešto specifično u izradi njegovih instrumenata što se može otkriti analizom frekvencijskog spektra. Ovo istraživanje je zasnovano na toj ideji.

### 6.6.1 METODOLOGIJA MERENJA

Tokom prvog merenja snimljeno je 10 dvodelnih frula različitog tonaliteta, izrađenih od različitih materijala (ne samo različitih vrsta drveta, nego i od mesinga i plastike), različitih unutrašnjih prečnika cevi.

Prva snimljena frula (frula 1 BD) izrađena je od crnog bagrema, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 23.5$  mm, intonirana je u C tonalitetu. To je duga frula i osnovni ton je  $c^1$ .

Druga snimljena frula (frula 2 BD) izrađena je od drveta šljive, presvučenog crnim celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 21$  mm, intonirana je u D tonalitetu. To je duga frula i osnovni ton je  $d^1$ .

Treća snimljena frula (frula 3 BD) izrađena je od crnog duda, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 16$  mm, intonirana je u G tonalitetu. To je duga frula i osnovni ton je  $g^1$ .

Četvrta snimljena frula (frula 4 BD) izrađena je od drveta šljive, presvučenog crnim celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12.5$  mm, intonirana je u A tonalitetu. Osnovni ton je  $a^1$ .

Peta snimljena frula (frula 5 BD) izrađena je od drveta šljive, presvučenog crnim celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm, intonirana je u C tonalitetu. Osnovni ton je  $c^2$ . To je jedna od Borinih najstarijih i najomiljenijih frula. Svira na njoj 37 godina i zove je 'Zlatna frula' (delom zato što ima zlatan zvuk, a delom zato što ima ugrađena dva prstena od čistog zlata).

Šesta snimljena frula (frula 6 BD) ima glavu izrađenu od drena, gornji čep od bagrema, cev od mesinga, presvučena je belim celuloidom. Unutrašnji prečnik cevi je  $\Phi = 12$  mm, intonirana je u C tonalitetu. Osnovni ton je  $c^2$ . Ova frula ima potpuno cilindričnu cev i spolja i iznutra, a glava frule ima flažolet oblik. Bora je specijalno osmislio dizajn ove frule za svoj nastup u Sidnejskoj operi i zato je frula bele boje.

Sedma snimljena frula (frula 7 BD) ima glavu izrađenu od plastike, cev od prohroma, presvučena je crnim celuloidom. Unutrašnji prečnik cevi je  $\Phi = 9$  mm, intonirana je u Es tonalitetu. Osnovni ton je  $es^2$ . Ova frula ima lepu boju tonova u visokom registru.

Osma snimljena frula (frula 8 BD) izrađena je od šimšira, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 10$  mm, intonirana je u D tonalitetu. Osnovni ton je  $d^2$ . Ova frula ima potpuno cilindričnu cev i spolja i iznutra, a glava frule ima flažolet oblik.

Deveta snimljena frula (frula 9 BD) izrađena je od drveta šljive, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm, intonirana je u D tonalitetu. Osnovni ton je  $d^2$ . Posebna karakteristika ove frule je da ima dodatnu rupicu na donjem kraju cevi i zahvaljujući tome ima pedalni ton  $cis^2$ .

Deseta snimljena frula (frula 10 BD) izrađena je od drena, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 10$  mm, intonirana je u G tonalitetu. Osnovni ton je  $g^2$ . Bora za ovu frulu kaže da je 'napravljena od izuzetno lepog parčeta drveta, pa je zato i sama frula izuzetna'. Pošto je frula izuzetno kratka i jedva se poređaju prsti po njoj prilikom sviranja, nazvali smo je 'Malečka'.

Za snimanje je izabrana sekvenca od 15 tonova C – dur lestvice od  $c^2$  do  $c^4$  odsviranih na svakoj fruli ujednačenim nivoom zvuka i ujednačenim trajanjem od 2 sekunde. Pošto je Bora Dugić karakterističan i po tome što može da svira i u trećem registru frule, snimljeni su i tonovi preduvani za duodecimu. Svaki od tonova analiziran je posebno.

## 6.6.2 POSTAVKA MERENJA

Merenje je realizovano u tonskom studiju kod Bore Dugića u Kragujevcu. Snimanje je urađeno u kontrolisanim uslovima (vreme reverberacije oko 0,3 s, temperatura oko 22 °C, vlaga mala, ambijentalna buka oko 30 dB). Studijski prostor je akustički obrađena prostorija (akustički obrađeni pod, zidovi i tavanica). Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofonski AKG C 414. Postavka mikrofona je urađena tako da je osa mikrofona postavljena pod uglom od 30° u odnosu na osu frule (30 – tak cm ispred i 30 – tak cm iznad izlaza cevi), kao što je uobičajeno za drvene duvačke instrumente. Na taj način je membrana mikrofona prikupila zvuk i sa donjeg kraja cevi frule i zvuk koji se emituje iz rupica frule.

Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo 4. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera.

Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom Pulsar 2 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

### 6.6.3 REZULTATI MERENJA

Analiza rezultata merenja obuhvata analizu svih tonova snimljenih frula. Ovde je izneta uporedna analiza dve frule u C tonalitetu, frule 5 BD i 6 BD. Za svaki ton je napravljena tabela sa izmerenim podacima i frekvencijski spektar tog tona, ali su zbog ograničenja prostora ovde prikazani samo izabrane tabele i grafici.

U tabeli 6.6.3.1 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^2$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^2$  frule napravljene od drveta šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD). Dve kolone su obojene jer su u njima brojne vrednosti upotrebljene za pravljenje grafika zavisnosti nivoa slabljenja harmonika od frekvencije.

Tabela 6.6.3.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm

5 BD	šljiva	$\Phi = 14.5$ mm	AKG C 414	merenje sa prir. pobud.	$c^2 = 523.25$ Hz
harmonik	idealan odnos frekvencija $f/f_0$	Izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	520	0.993	-3.25	-39.1
2	2:1	1035	1.978	-11.5	-42.6
3	3:1	1558	2.977	-11.75	-56.3
4	4:1	2073	3.961	-20	-61.5
5	5:1	2596	4.961	-20.25	-70.9
6	6:1	3109	5.941	-30.5	-90.1
7	7:1	3613	6.904	-49.75	-88.2
8	8:1	4135	7.902	-51	-87.1
9	9:1	4681	8.946	-28.25	-81.4
10	10:1	5180	9.899	-52.5	-86

U tabeli 6.6.3.2 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^3$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^3$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^3$  i

izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^3$  frule napravljene od drveta šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD).

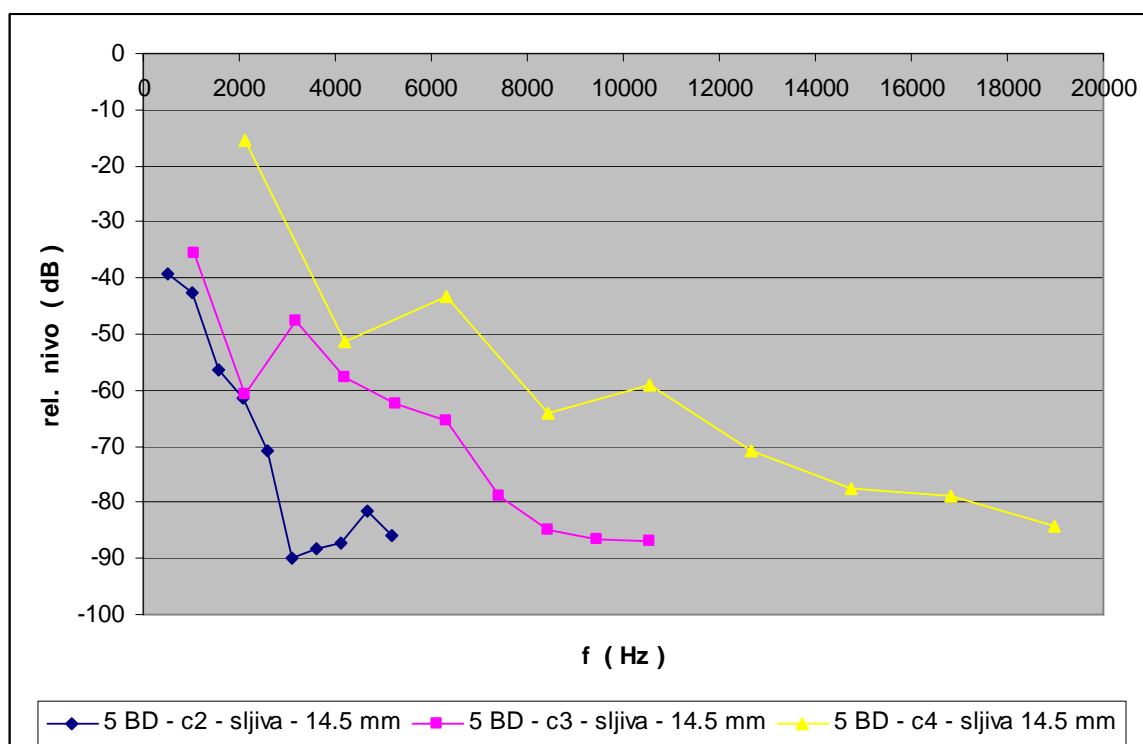
Tabela 6.6.3.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran fruli napravljenoj od šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm

5 BD	šljiva	$\Phi = 14.5$ mm	AKG C 414	merenje sa prir. pobud.	$c^3 = 1046.5$ Hz
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	1054	1.007	7.5	-35.5
2	2:1	2112	2.018	19	-60.7
3	3:1	3168	3.027	28.5	-47.7
4	4:1	4214	4.026	28	-57.7
5	5:1	5258	5.024	25.5	-62.3
6	6:1	6320	6.039	41	-65.5
7	7:1	7399	7.070	73.5	-78.7
8	8:1	8437	8.062	65	-84.9
9	9:1	9443	9.023	24.5	-86.6
10	10:1	10568	10.098	103	-86.8

Tabela 6.6.3.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran fruli napravljenoj od šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm

5 BD	šljiva	$\Phi = 14.5$ mm	AKG C 414	merenje sa prir. pobud.	$c^4 = 2093$ Hz
harmonik	idealni odnos frekvencija $f/f_0$	izmerena frekvencija $f_1$ [Hz]	izmereni odnos frekvencija $f/f_0$	odstupanje $\Delta f$ [Hz]	izmereni rel. nivo [dB]
1	1:1	2112	1.009	19	-15.6
2	2:1	4214	2.013	18	-51.2
3	3:1	6320	3.019	41	-43.4
4	4:1	8437	4.031	65	-64.2
5	5:1	10568	5.049	103	-59
6	6:1	12653	6.045	95	-70.9
7	7:1	14758	7.051	107	-77.4
8	8:1	16829	8.040	85	-79
9	9:1	18976	9.066	139	-84.1
10	10:1				

U tabeli 6.6.3.3 predstavljeni su: izmerene frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^4$ , odnos izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^4$ , odstupanje izmerene i idealne frekvencije pojedinih harmonika tona  $c^4$  i izmereni nivo pojedinih harmonika tona  $c^4$  frule napravljene od drveta šljive, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD). Na slici 6.6.3.1 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika za tonove  $c^2$ ,  $c^3$  i  $c^4$ , odsviranih na fruli napravljenoj od drveta šljive, presvučenog celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD).

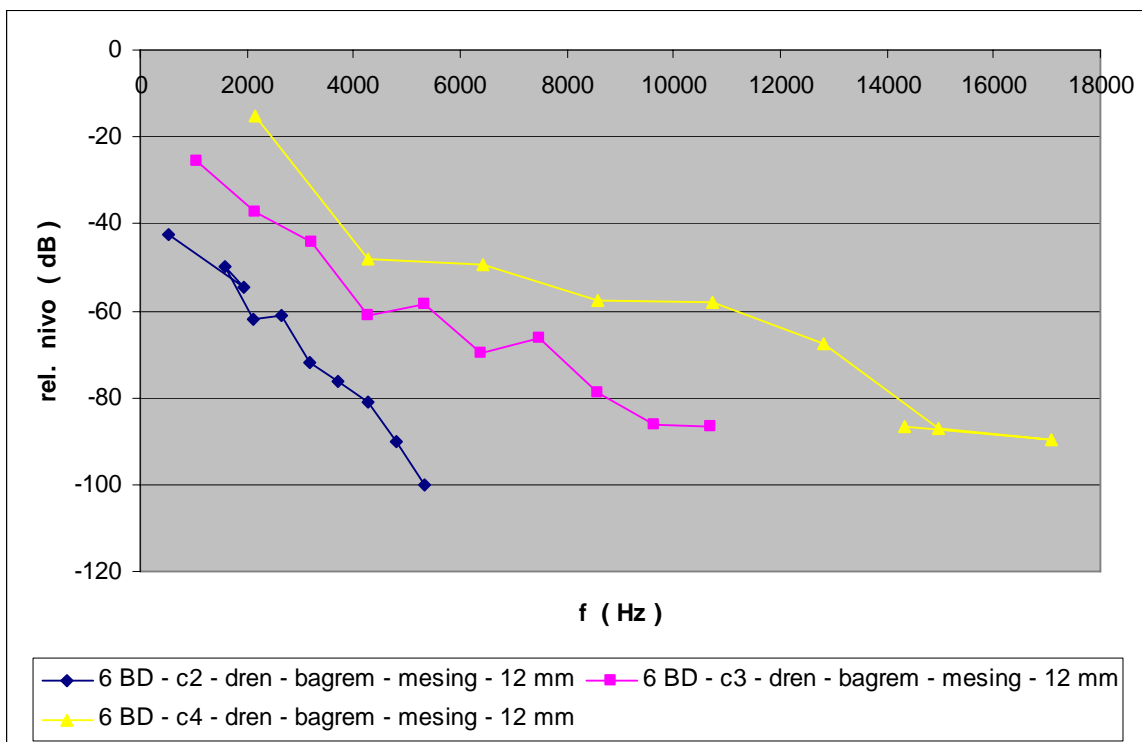


Slika 6.6.3.1: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^2$ ,  $c^3$  i  $c^4$ , odsviran na dvodelnoj C fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 14.5$  mm)

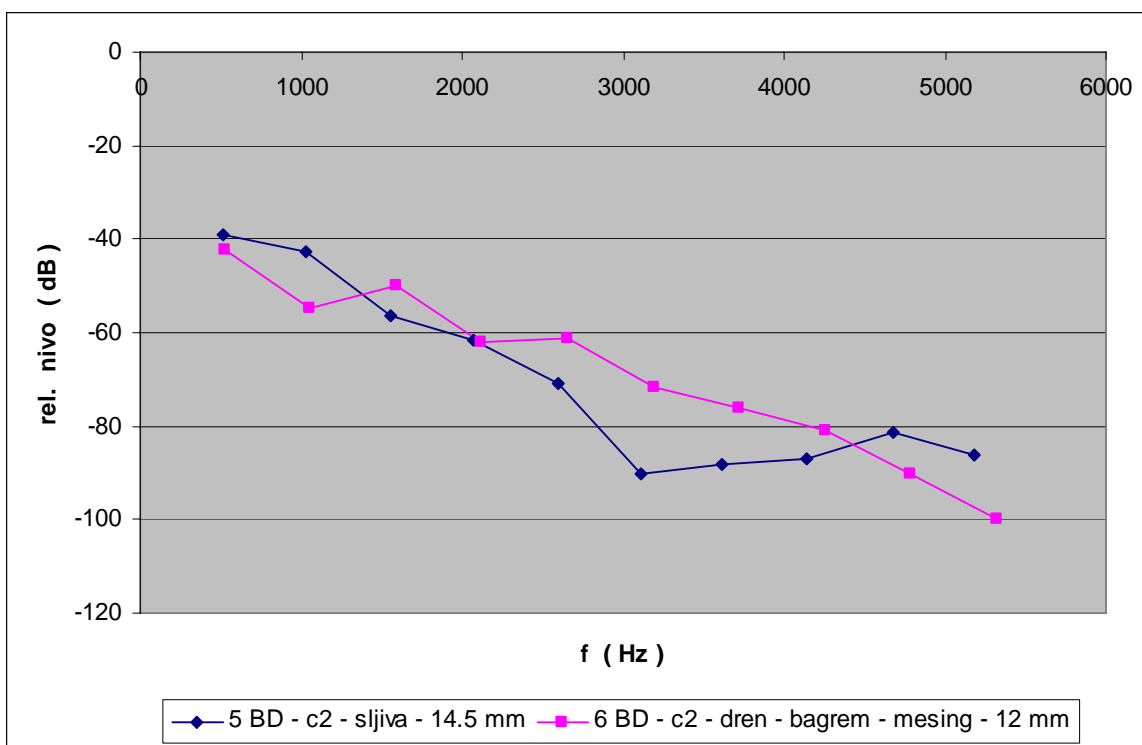
Na slici 6.6.3.2 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika za tonove  $c^2$ ,  $c^3$  i  $c^4$ , odsviranih na fruli napravljenoj od drena, bagrema i mesinga, presvučene celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD).

Na slici 6.6.3.3 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika za ton  $c^2$ , odsviran na fruli napravljenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD) i na fruli od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD).

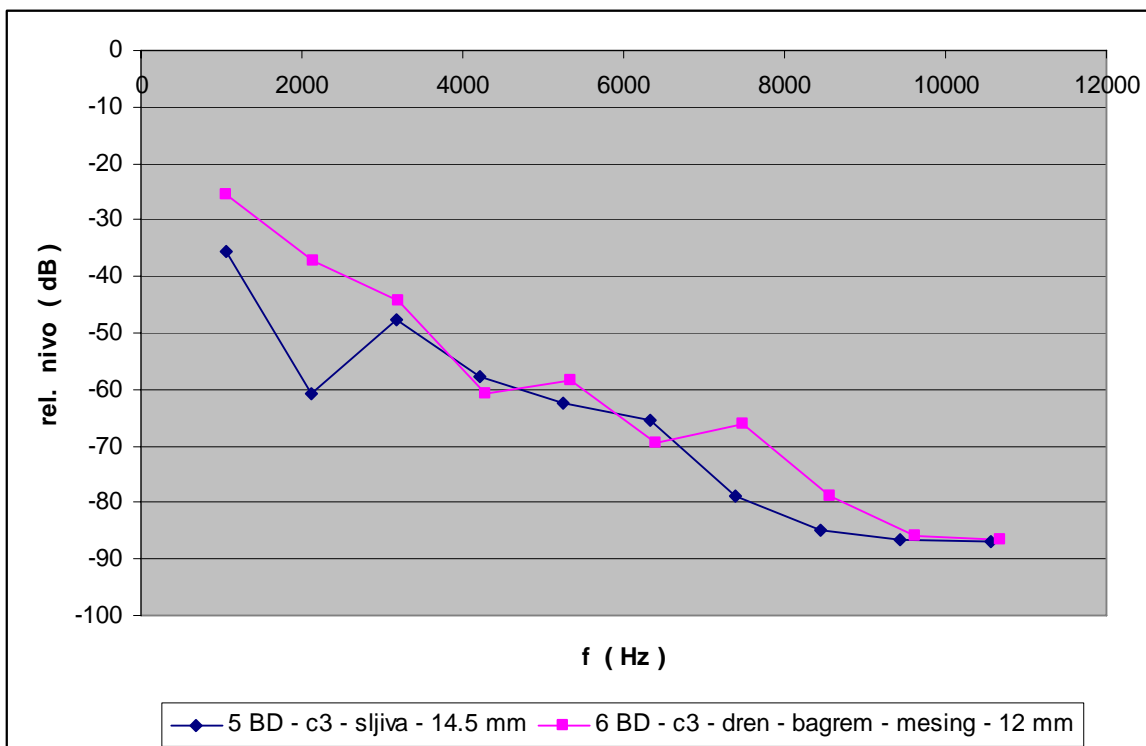
Na slici 6.6.3.4 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika za ton  $c^3$ , odsviran na fruli napravljenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD) i na fruli od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD).



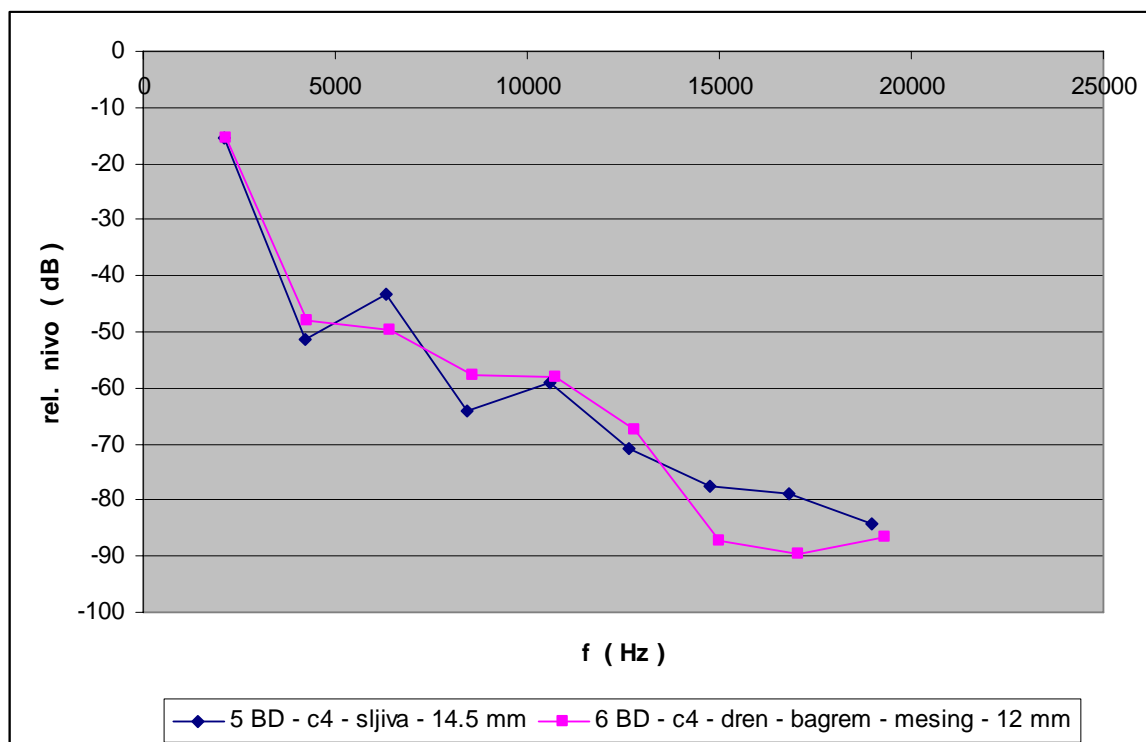
Slika 6.6.3.2: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^2$ ,  $c^3$  i  $c^4$ , odsviran na dvodelnoj C fruli 6 BD (dren – bagrem – mesing, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 6.6.3.3: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^2$ , odsviran na dvodelnoj C fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 14.5$  mm) i dvodelnoj C fruli 6 BD (dren – bagrem – mesing, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 6.6.3.4: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^3$ , odsviran na dvodelnoj C fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 14.5$  mm) i dvodelnoj C fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 6.6.3.5: Zavisnost nivoa slabljenja harmonika za ton  $c^4$ , odsviran na dvodelnoj C fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 14.5$  mm) i dvodelnoj C fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,,  $\Phi = 12$  mm)



Na slici 6.6.3.5 prikazano je slabljenje pojedinih harmonika za ton  $c^4$ , odsviran na fruli napravljenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14.5$  mm (frula 5 BD) i na fruli od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD).

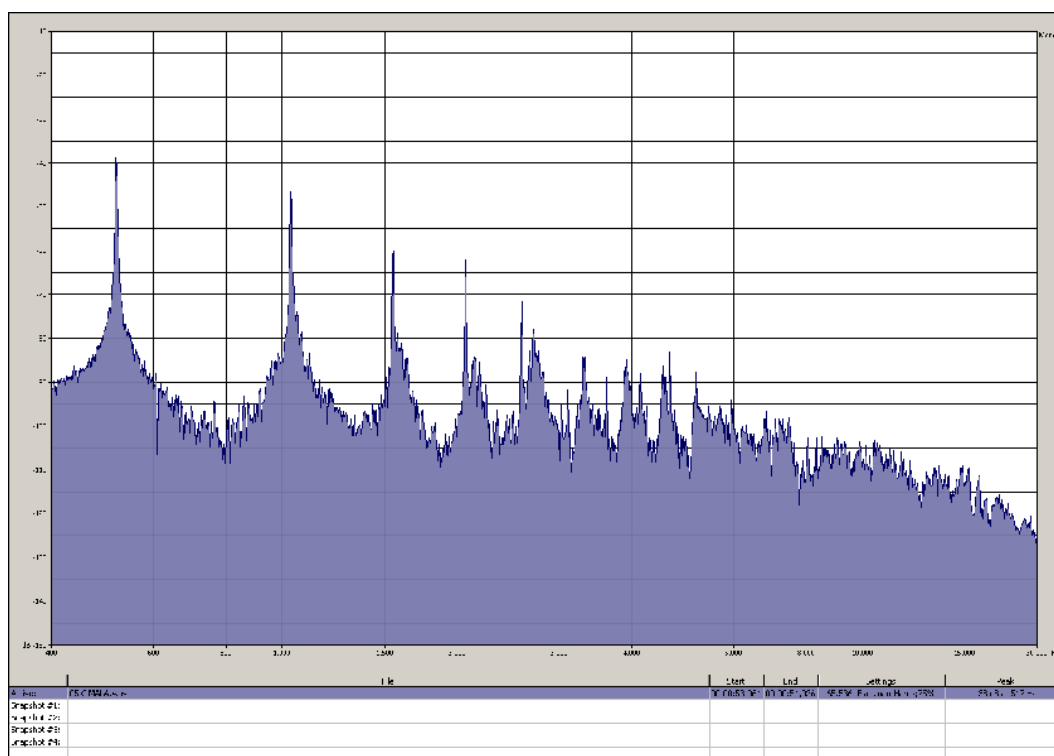
Sa slika 6.6.3.3, 6.6.3.4, 6.6.3.5 se može zaključiti da frula 6 BD ima mnogo linearniju zavisnost nivoa harmonika od frule 5 BD, u svim delovima frekvencijskog spektra.

#### 6.6.4 SPEKTRALNI SADRŽAJ

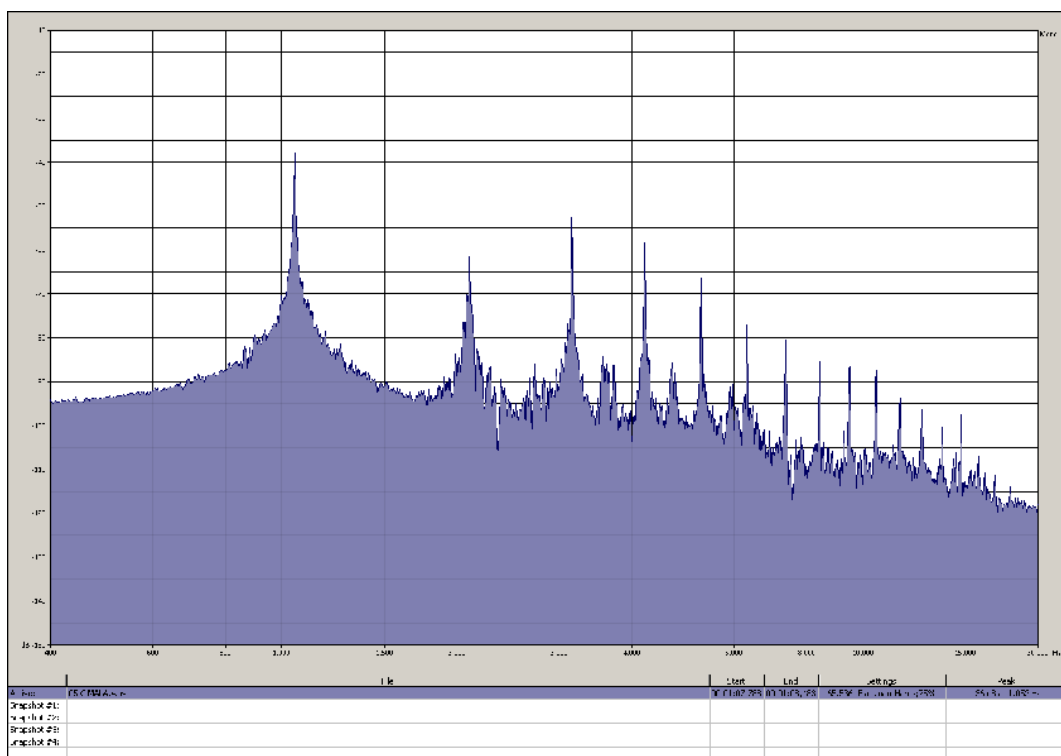
Opseg osnovnih frekvencija tonova zadate sekvence prostire se od 523.25 Hz do 2093 Hz za idealno naštimovan instrument (prema frekvenciji zvučne viljuške). Kod svih testiranih frula postoje određena odstupanja u štimu.

Na slici 6.6.4.1 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm. U niskom registru 3. harmonik nema veći nivo od 2. harmonika.

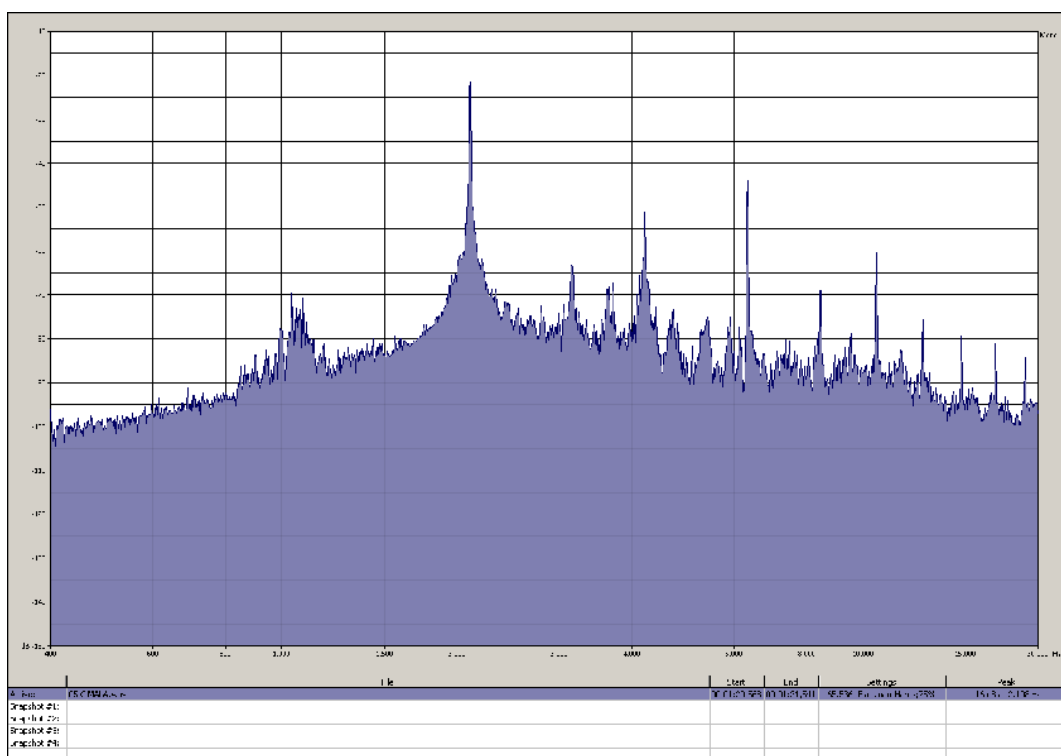
Na slici 6.6.4.2 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm. U srednjem registru 3. harmonik ima veći nivo od 2.



Slika 6.6.4.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



Slika 6.6.4.2: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)



Slika 6.6.4.3: Frekvencijski spekter tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)

Na slici 6.6.4.3 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^4$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm. U visokom registru 3. harmonik ima veći nivo od 2.

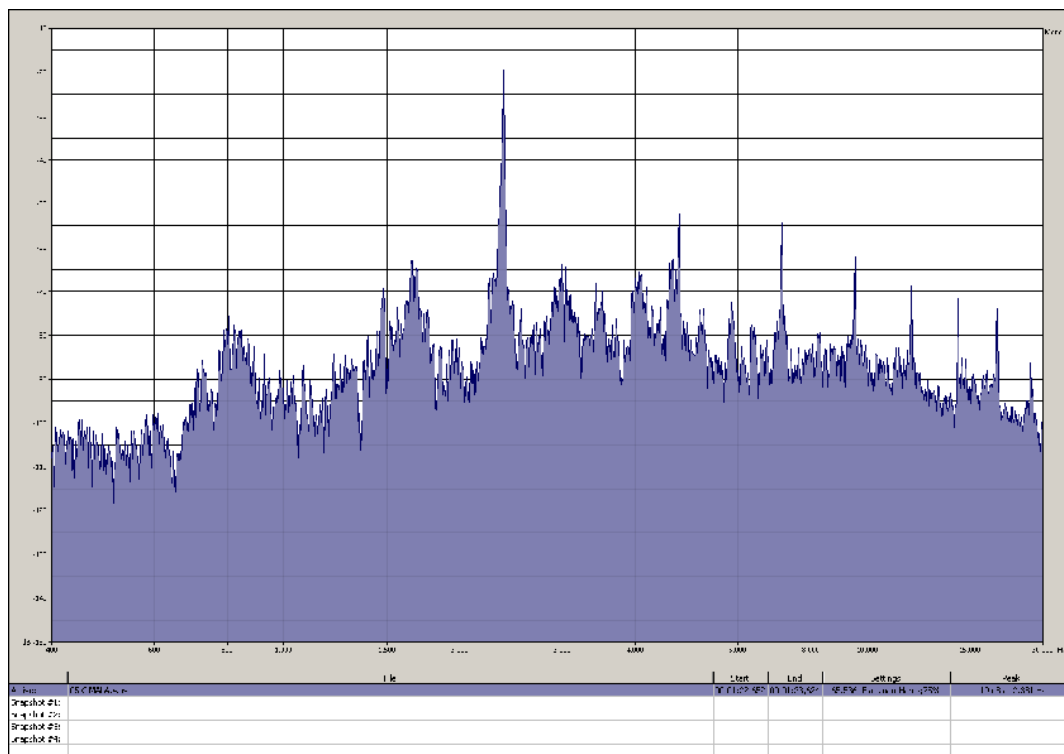
Na slici 6.6.4.4 prikazan je frekvencijski spektar tona  $d^4$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm.

Na slici 6.6.4.5 prikazan je frekvencijski spektar tona  $e^4$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm.

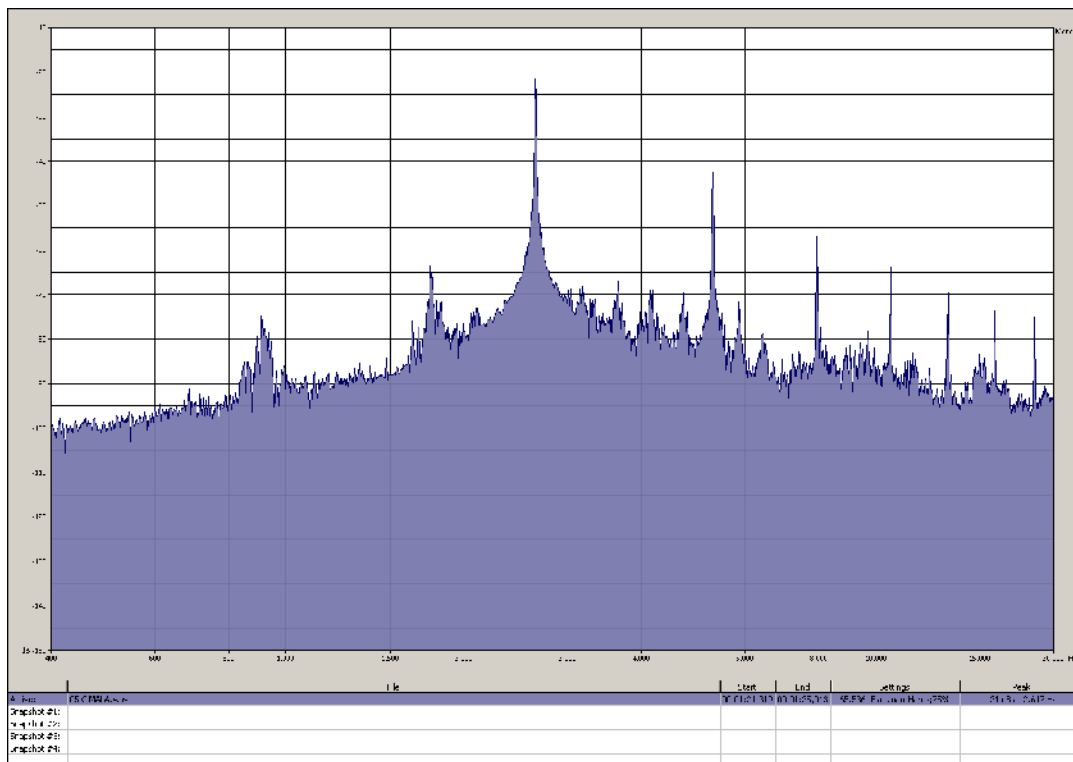
Na slici 6.6.4.6 prikazan je frekvencijski spektar tona  $f^4$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm.

Na slici 6.6.4.7 prikazan je frekvencijski spektar tona  $g^4$  odsviranog na fruli 5 BD, izrađenoj od drveta šljive, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika cevi  $\Phi = 14.5$  mm.

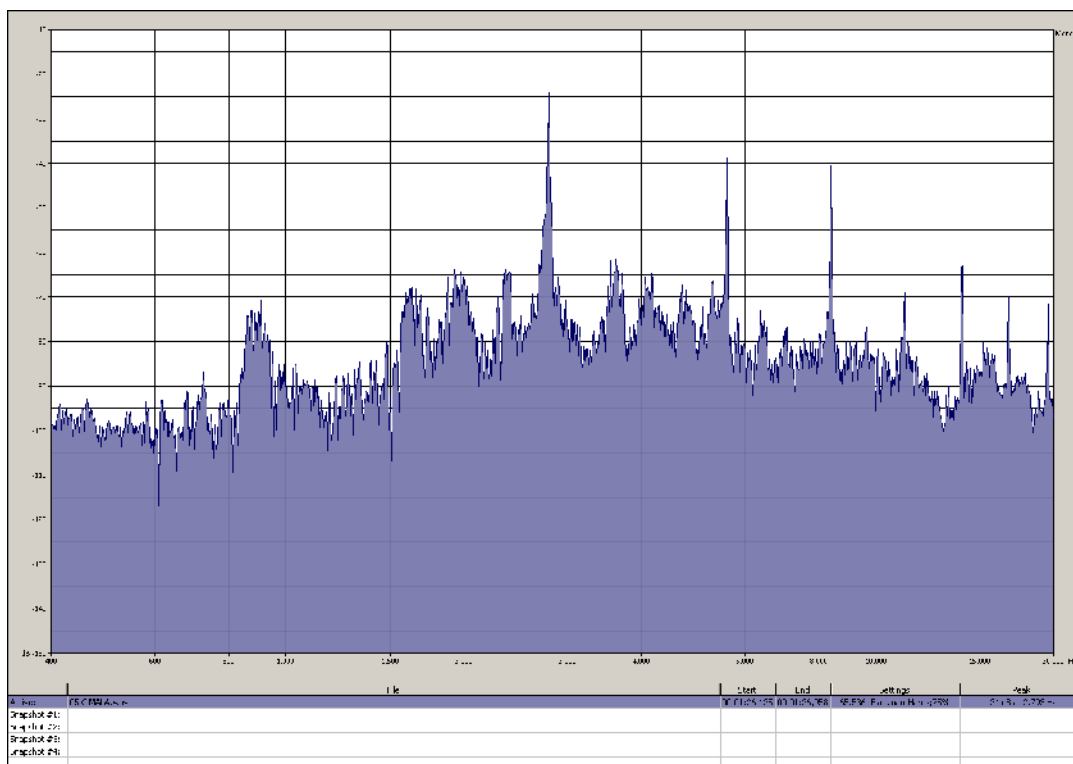
Za sve tonove treće oktave (preduvane za duodecimu) na ovoj fruli karakteristično je da 3. harmonik nema veći nivo od 2.



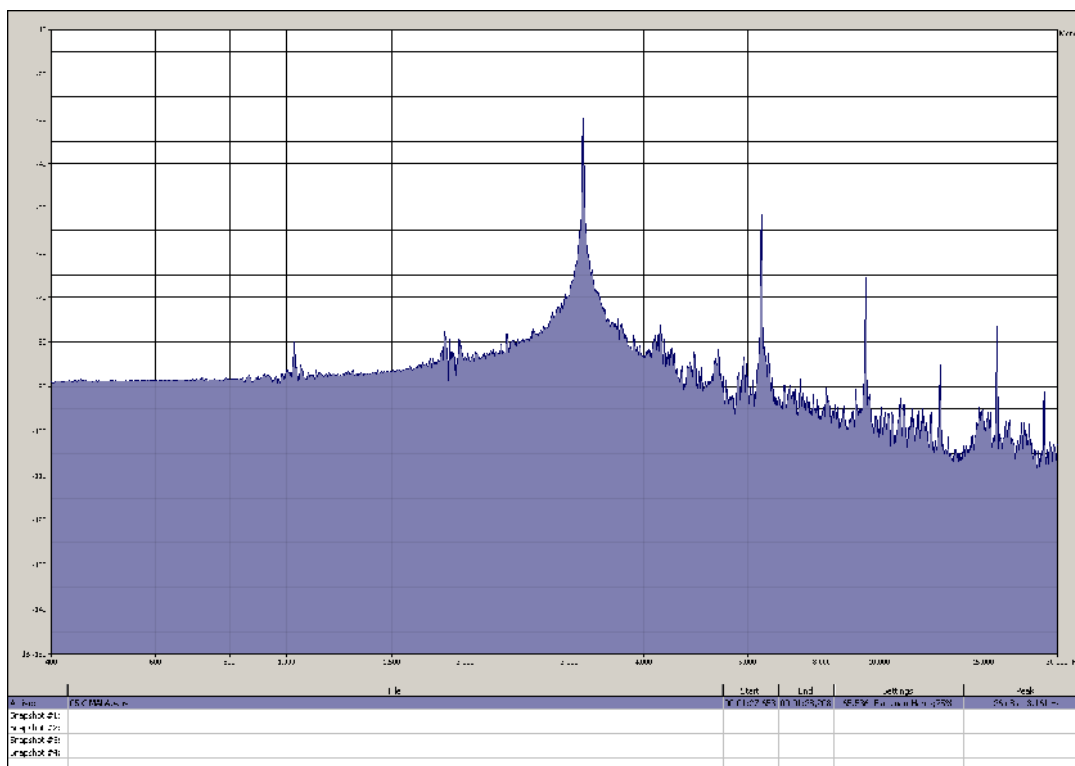
Slika 6.6.4.4: Frekvencijski spektar tona  $d^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



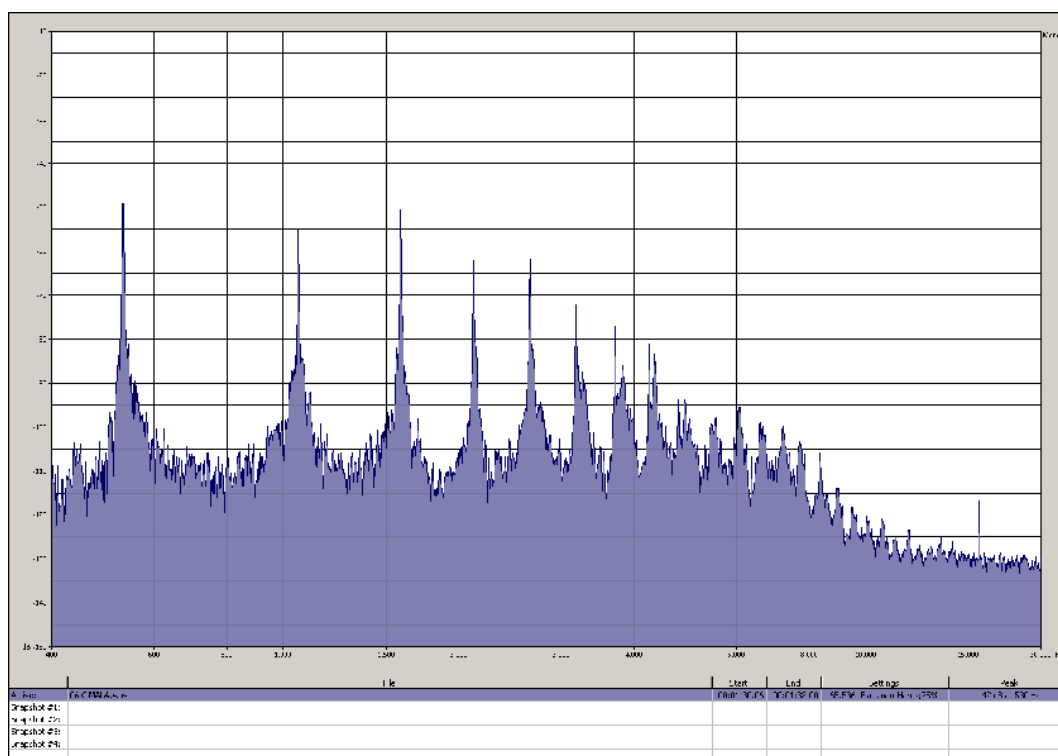
Slika 6.6.4.5: Frekvencijski spektar tona  $e^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\phi = 14.5$  mm)



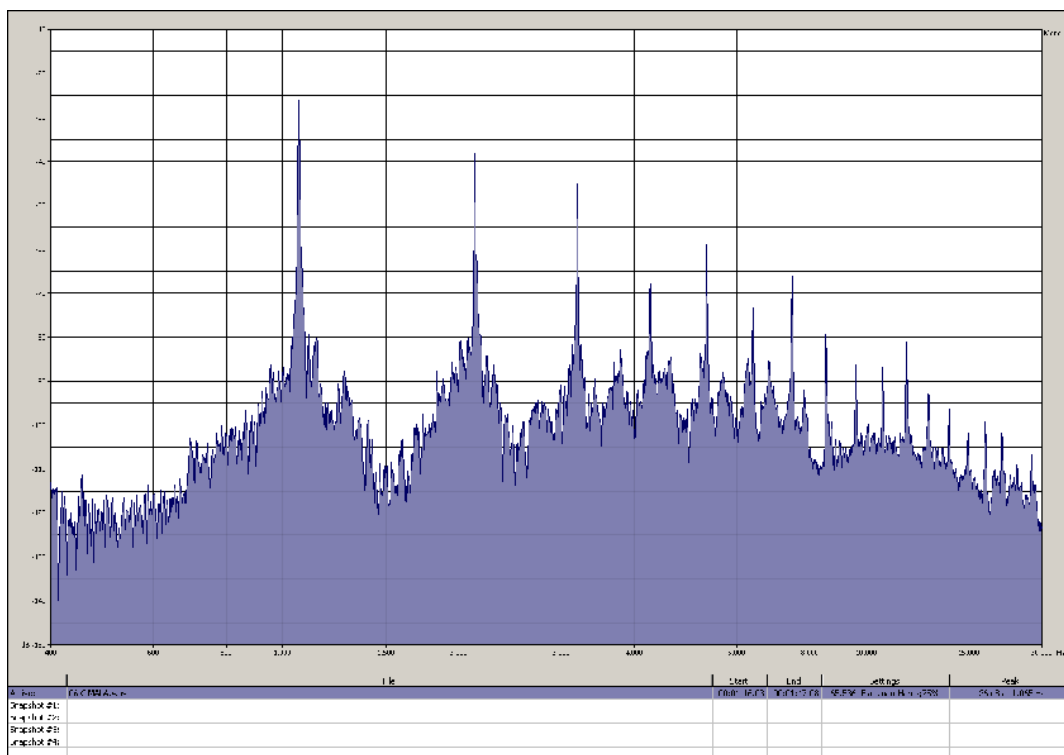
Slika 6.6.4.6: Frekvencijski spektar tona  $f^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\phi = 14.5$  mm)



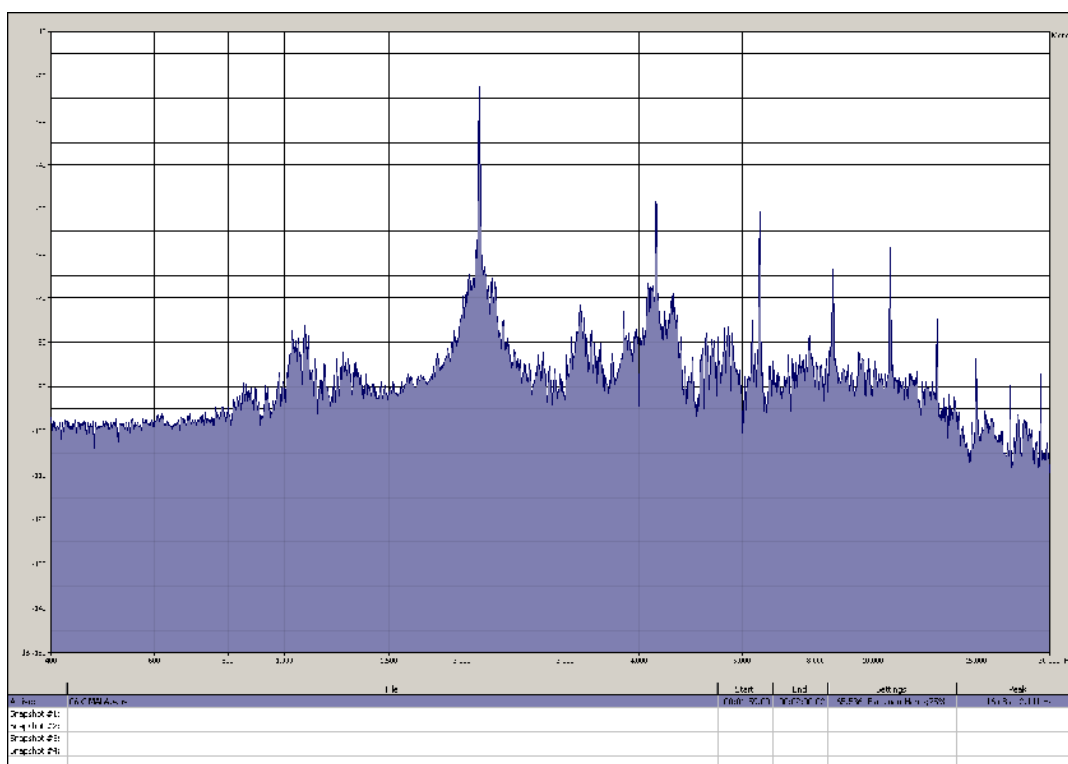
Slika 6.6.4.7: Frekvencijski spekter tona  $g^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



Slika 6.6.4.8: Frekvencijski spekter tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem – mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 6.6.4.9: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 6.6.4.10: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

Na slici 6.6.4.8 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^2$  odsviranog na fruli 6 BD, izrađenoj od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD). U niskom registru 3. harmonik ima veći nivo od 2.

Na slici 6.6.4.9 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^3$  odsviranog na fruli 6 BD, izrađenoj od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD). U srednjem registru kod ove frule 3. harmonik nema veći nivo od 2.

Na slici 6.6.4.10 prikazan je frekvencijski spektar tona  $c^4$  odsviranog na fruli 6 BD, izrađenoj od drena, bagrema i mesinga, presvučenoj celuloidom, unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 12$  mm (frula 6 BD). U visokom registru kod ove frule 3. harmonik ima veći nivo od 2.

## 7. DISKUSIJA

### (UPOREDNA ANALIZA MERENJA URAĐENIH NA FRULI SA MERENJIMA URAĐENIM NA DRUGIM DUVAČKIM INSTRUMENTIMA, OPISANIM U LITERATURI)

Na samom početku izrade ovog rada, kada sam osmišljavala kako i sa kojih sve aspekata bi trebalo proučiti frulu, šta je to sve značajno istražiti, a šta izmeriti za jedan takav muzički instrument, neophodno je bilo istražiti već postojeću literaturu. Detaljan pregled literature pokazao je da o muzičkim instrumentima, generalno posmatrano, postoji mnogo napisanih knjiga i naučnih radova i sa aspekta muzike i sa aspekta muzičke akustike. Međutim, kada je frula u pitanju, to nije slučaj. Postoje publikovani članci o fruli koji taj instrument posmatraju i proučavaju sa etnomuzikološkog stanovišta i, kao takvi su od velikog značaja. Naučne članke koji o fruli govore sa aspekta akustičkih istraživanja i merenja akustičkih performansi nije bilo moguće pronaći. Zato je ovo istraživanje moralo da krene od samog početka. Polako sam proučila deo postojeće literature o muzičkim instrumentima uopšte, nezavisno od načina generisanja zvuka na njima (nezavisno od klasifikacije instrumenta), a zatim, mnogo detaljnije, publikovanu literaturu o drvenim duvačkim instrumentima, grupi muzičkih instrumenata kojima frula pripada. To istraživanje je dragoceno da bi se korektno osmislila metodologija istraživanja samog instrumenta, metodologija merenja koja su kasnije urađena na fruli i da bi se na korektan način svi dobijeni rezultati merenja protumačili i sistematizovali.

Među knjigama i udžbenicima koji govore o muzičkim instrumentima postoje primerci čiji se sadržaj odnosi na opis izgleda samih instrumenata, opis delova muzičkih instrumenata, istorijat i spisak najpoznatije literature koja je komponovana za te instrumente ( D. Despić). Drugi tip knjiga koji je proučen su knjige koje govore o muzičkoj akustici, odnosno načinu dobijanja zvuka na muzičkim instrumentima i karakteristikama samog zvuka različitih muzičkih instrumenata, objašnjeno zakonima fizike. Tu se nalaze sva opšta znanja iz ove materije koja su od neprocenjivog značaja za razumevanje teorije muzičke akustike [6], [7], [26], [46], [55], [72].

Baza literature se značajno širi kada se počne sa proučavanjem objavljenih naučnih radova. Može se uočiti da postoje instrumenti koji su, ili više proučavani, ili je jednostavno više radova publikovano o njima, ili su poznatiji, pa se zato o njima piše. Generalan zaključak je da su instrumenti koji se koriste u današnjem simfonijskom orkestru najviše proanalizirani, a da je mnogo drugačiji slučaj sa folklornim instrumentima.

Kod muzičkih instrumenata koji pripadaju različitim grupama proučavaju se različiti parametri. Za violinu ima najviše proučenog i objavljenog materijala. Izmereno je sve u vezi sa rezoniranjem tela violine i kad je violina sklopljena, ali i dok je još u delovima (Inta R., Smith J., Wolfe J., *Measurement of the*



*effect on violins of ageing and playing*). Proučeni su svi efekti dobijanja različitog zvuka prevlačenjem gudaalom po žici (Bavu E., Smith J., Wolfe J., *Torsional waves in a bowed string*). Urađena su merenja u vremenskom i frekvencijskom domenu. Pošto stare violine velikih majstora gradnje neopisivo privlače ljubitelje dobrog zvuka i, pre svega, poznavaoce zvuka, urađeno je i lasersko ispitivanje najboljih primeraka starih italijanskih violina (Bissinger G., Oliver D, *3-D Laser vibrometry on legendary old Italian violins*). Za grupu duvačkih instrumenata postoji mnogo objavljenih radova iz kojih se stečena saznanja ne mogu direktno primeniti na merenja na fruli jer je način dobijanja tona drugačiji. Postoji, međutim, nekolicina radova koja je meni tokom proučavanja bila dragocena po nekoliko osnova. U jednom od njih proučene su vibracije zida limenih duvačkih instrumenata tako što je vazduh u jednom merenju uduvavao čovek (prirodna pobuda), a u drugom merenju veštačka usta (veštačka pobuda) [126']. Tako smo osmislili merenja na fruli sa veštačkom i prirodnom pobudom. Merenja nisu ista i rezultati se ne bi mogli uporediti, ali je metodologija urađena na isti način.

Značajni su radovi koji opisuju merenja na folklornom duvačkom instrumentu diđeriduu. Opisan je detaljno instrument, vrste materijala i način dobijanja instrumenta, način dobijanja zvuka. Urađena su merenja impedanse vokalnog trakta tokom sviranja, merenje frekvencijskog spektra, napravljen je providni model koji dočarava prostiranje vazduha u instrumentu, pokazani su položaji usta tokom stvaranja zvuka, data je električna šema koja predstavlja ceo sistem za uduvavanje vazduha (pluća svirača, vokalni trakt), električna šema samog instrumenta. Iz svega ovoga izrodio se čitav niz merenja urađenih na fruli.

Za grupu duvačkih instrumenata sa trskom postoji mnogo objavljenih radova u kojima su izneti rezultati merenja urađenih na orguljama. Proučen je način dobijanja tona i način na koji rezonator utiče na boju tona u odnosu na ton koji se dobije samo treperenjem metalne trske (Miklos A., Angster J., Pitsch S., Rossing T., *Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe* ). Iz ovoga se stvorila ideja da se osmisli merenje sa cilindričnom i četvrtastom cevi (frula sa kružnim i frula sa kvadratnim poprečnim presekom).

Za grupu drvenih duvačkih instrumenata sa dvostrukim trščanim jezičkom, objavljeno je nekoliko radova u kojima su izneti rezultati merenja urađenih na fagotu. Izmerena je akustička impedansa, frekvencijski spektar i urađena je psihoakustička analiza (Hill T., Sharp D., *Acoustical and psychoacoustical investigations of the effect of crook bore profile on the playability of bassoons* ). Rezultati merenja se ne mogu uporediti direktno, ali je analiza urađena na isti način kao što smo i mi uradili za frulu.

Za grupu drvenih duvačkih instrumenata sa jednostrukim jezičkom postoje zanimljivi radovi o merenjima urađenim na klarinetu. Najkorisniji od njih za potrebe izvođenja merenja sa frulom je izneo komparativnu analizu

frekvencijskog spektra klarineta i flaute. Iz tih rezultata se vidi da su rezultati koje smo mi dobili u našim merenjima frekvencijskog spektra frule slični i da imaju zajedničke karakteristične pojedinosti (Dickens P., France R., Smith J., Wolfe J., *Clarinet acoustics: introducing a compendium of impedance and sound spectra* ).

Za grupu drvenih duvačkih instrumenata sa vazдушnim jezičkom najviše sam proučila objavljene članke o flauti jer frula pripada grupi vertikalnih flauta. Kod flaute je najznačajniji deo za dobijanje tona usnik pa je otuda najviše merenja i urađeno na njemu. Opisano je određivanje akustičke impedanse na usniku pomoću spektrometra [133']. Objašnjen je uticaj običnog i unakrst prstoreda na frekvenciju dobijenog tona na flauti [134']. Proučena je ulazna impedansa za usnik i frekvencijski spektar za pojedine tonove, kod barokne, klasične i savremene flaute. Zanimljivo je da se veličina rupica na flauti menjala jer manje rupice daju nisku frekvenciju odsecanja tona (oko 1500 Hz za baroknu flautu), a to utiče na boju tona. Rupice današnje flaute su veće, frekvencija odsecanja je viša (oko 2000 Hz), a ton je svetliji i jasniji [6]. Za flautu je urađeno merenje ulazne impedanse podešavanjem dužine cevi i raspoređivanjem mernih mikrofona na različite pozicije (van Walstijn M., Campbell M., Kemp J., Sharp D., *Wideband measurement of the acoustic impedance of tubular objects* ). Izmeren je ofset na usniku flaute [18']. Urađeno je merenje zavisnosti relativnog nivoa zvuka od pritiska uduvanog vazduha, izraženog u Pa, za različite tonove i različite pritiske uduvavanja vazduha u cev [31']. Urađena je analiza harmonika tona flaute, izražena preko zavisnosti relativnog nivoa zvuka od ofseta [18'].

Mnogo je pažnje posvećeno upoređivanju karakteristika klasične i savremene flaute. Odatle se i stvorila potreba da se uporede karakteristike različitih vrsta frule, što je u ovom radu i urađeno. Naravno, frula i flauta nisu identični instrumenti pa se zato i dobijeni merni rezultati ne mogu direkto uporediti, ali postoje neke značajne sličnosti u dobijenim rezultatima merenja. Prva je da je i kod frule, kao kod flaute, u frekvencijskom spektru često 3. harmonik većeg intenziteta od 2. harmonika. To potiče od načina cepanja vazduha na ulazu u usnik (ofset). Druga je da relativni nivo osnovnog harmonika tonova raste sa povećanjem frekvencije.

## ZAKLJUČAK

Polazna ideja za izradu ovog rada bila je da se muzički instrument frula prouči sa aspekta muzičke akustike, sa užim osvrtom na analizu frekvencijskog spektra., da bi se moglo pristupiti izradi frula za đake osnovnih škola. Sva merenja koja su izložena u ovom radu bave se proučavanjem frekvencijskog spektra jednodelnih i dvodelnih frula. Za potrebe svih urađenih merenja snimljeno je ukupno 68 frula. Od toga je 21 frula jednodelna i 47 frula dvodelne. Treba imati u vidu da je za dobre polazne uslove merenja važno da frule budu standardizovane. Sa aspekta proizvođača frula to znači da treba da sve frule koje obrađujemo tokom istog merenja budu napravljene na isti način, odnosno da budu izrađene iz ruku istog graditelja. Nije lako pronaći mnogo graditelja kvalitetnih frula, a još je teže pronaći graditelja kvalitetnih frula koji ima na raspolaganju veliki broj frula standardizovanih prema dimenzijama i tonalitetu, a koje je raspoložen da vam ustupi za potrebe merenja. Ja sam imala veliku sreću da upoznam g. Milorada Marića koji je svoj dosadašnji život posvetio svojoj ljubavi prema fruli i koji je bio raspoložen da mi bezuslovno pomogne da uspešno obavim merenja.

Sva merenja i analiza rezultata merenja frekvencijskog spektra urađena su u istim kontrolisanim studijskim uslovima (vreme reverberacije oko 0,4 s), u tonskom studiju Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu. Ovaj studio jeste projektovan za školske potrebe, ali treba naglasiti da je urađena kompletna akustička obrada prostorija studija i da je oprema prilagođena samom studiju, tako da su rezultati dobijeni merenjima zadovoljavajućeg kvaliteta.

Merenja su osmišljena tako da je za snimanje frula napravljena postavka sa 3 stereo para kvalitetnih studijskih mikrofona različitih proizvođača, da bi se mogli uporediti dobijeni rezultati. Korišćen je kondenzatorski studijski mikrofoni Neumann U 87, AKG C 414 i AKG C 451. Postavka svakog od ovih mikrofona je urađena tako da je mikrofoni tokom jednog snimanja prihvatao zvuk kao što je uobičajeno za snimanje drvenih duvačkih instrumenata, tokom drugog snimanja prihvatao zvuk koji izlazi direktno iz donjeg otvora cevi frule, a tokom trećeg snimanja zvuk koji izlazi iz rupica za prste. Sve te postavke su korisne za upoređivanje rezultata merenja. Snimanje je obavljeno pomoću softverskog paketa Nuendo. Analiza talasnih oblika je urađena pomoću softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Analiza frekvencijskog spektra je urađena korišćenjem softverskog paketa Sound Forge 8.0 i Easera. Zvučni zapisi su za potrebe dalje obrade konvertovani audio karticom M – AUDIO DELTA 1010 i snimljeni u WAV formatu ( 44.1 KHz, 24 bita ) na PC računaru.

Analiza rezultata merenja urađenih sa prirodnom pobudom na jednodelnim frulama pokazala je da frekvencijski spektri proučenih frula imaju veliki sopstveni šum, javlja se intenzivni šum (skoro kao dodatni harmonik) na oko

0.5 i 1.5 frekvencije osnovnog harmonika u gornjem registru (preduvanoj oktavi). Kod svih jednodelnih frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi harmonik u celom tonskom opsegu. To je osobina spektra karakteristična za flautu. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu.

Slabljenje harmonika u zavisnosti od frekvencije za frule sa manjim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  mm) najmanje je kod frule izrađene od mahagonija, a najveće kod frule izrađene od bukve, za niske frekvencije, kod frule izrađene od oraha, za srednje frekvencije i kod frule izrađene od šljive, za visoke frekvencije. Najujednačenije slabljenje ima frula napravljena od bagremovog drveta.

Slabljenje harmonika u zavisnosti od frekvencije za frule sa većim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 15$  mm) najmanje je kod frule izrađene od trešnje, za niske frekvencije, i kod frule izrađene od bagrema, za visoke frekvencije. Slabljenje harmonika je najveće kod frule izrađene od bagrema, za niske frekvencije, i kod frule izrađene od trešnje, za visoke frekvencije.

Može se primetiti da frule sa većim unutrašnjim prečnikom cevi ( $\Phi = 15$  mm) imaju bolje karakteristike: odstupanje frekvencije harmonika od idealne manje je nego kod frula sa manjim unutrašnjim prečnikom ( $\Phi = 14$  mm), frekvencijski odnos harmonika mnogo je bliži idealnom nego kod jednodelnih frula unutrašnjeg prečnika  $\Phi = 14$  mm.

Ako se radi analiza frekvencijskog spektra jednodelnih frula sa aspekta promene intervala alikvotnog niza, može se uočiti da postoji odstupanje frekvencije od idealne za pojedine harmonike odsviranih tonova, za sve snimljene frule. Može se uočiti da odstupanje ima linearnu zavisnost u odnosu na frekvencije polustepena u osnovnom registru jednodelne frule, a da je u višem registru ta zavisnost nepravilna. Mogla bi se svesti na linearnu uz ozbiljne aproksimacije.

Analiza rezultata merenja urađenih sa veštačkom pobudom na jednodelnim frulama pokazala je da su mnoge spektralne karakteristike ovih frula iste bez obzira na način uduvavanja vazduha u cev (treći harmonik je i kod merenja sa prirodnom i kod merenja sa veštačkom pobudom često jači od drugog). Kod merenja sa prirodnom pobudom su nivoi pojedinih harmonika ujednačeniji. Kod merenja sa prirodnom pobudom je ujednačeniji pritisak uduvavanja vazduha u cev pa je i nivo zvuka pojedinih tonova ujednačeniji nego kod merenja sa veštačkom pobudom. Može se uočiti da zavisnost nivoa harmonika od frekvencije ima mnogo više linearan oblik prilikom merenja sa veštačkom pobudom nego prilikom merenja sa prirodnom pobudom. To je posledica nesavršenosti regulacije pritiska u aparaturi za veštačku pobudu. Daljom analizom rezultata ovih merenja može se izvesti zaključak da: frule imaju manji broj harmonika prilikom merenja sa veštačkom pobudom, da svaki ton ima mnogo nestabilniju frekvenciju

osnovnog harmonika kod merenja sa veštačkom pobudom nego kod merenja sa prirodnom pobudom, da nije toliko čest slučaj neravnomerna raspodela harmonika po intenzitetu kod merenja sa veštačkom pobudom kao kod merenja sa prirodnom pobudom, da na samom početku tonovi imaju odgovarajuću frekvenciju, a kako vreme trajanja tona odmiče, frekvencija tona raste ( treba izvršiti bolju regulaciju pritiska). Nivo slabljenja harmonika je približniji idealnom za niske učestanosti kod merenja sa veštačkom, a za visoke učestanosti kod merenja sa prirodnom pobudom.

Merenja na dvodelnim frulama uradili smo sa dva različita aspekta. Posebno je urađeno merenje na dvodelnim frulama, a posebno na glavi dvodelne frule. Analiza rezultata merenja urađenih sa prirodnom pobudom na dvodelnim frulama manjeg unutrašnjeg prečnika ( $\Phi = 13$  mm), pokazala je da je slabljenje harmonika u zavisnosti od frekvencije najmanje za tonove odsvirane na fruli od bagrema, za niske frekvencije, i na fruli od abonosa, za visoke frekvencije. Slabljenje harmonika je najveće za frulu izrađenu od šljive, na svim frekvencijama, a na visokim frekvencijama i za frulu izrađenu od šimšira.

Analiza rezultata merenja urađenih sa prirodnom pobudom na dvodelnim frulama većeg unutrašnjeg prečnika ( $\Phi = 14$  mm), pokazala je da je slabljenje harmonika u zavisnosti od frekvencije najmanje za tonove odsvirane na fruli od abonosa, za ceo frekvencijski opseg, a najveće za frulu izrađenu od mahagonija, takođe na svim frekvencijama.

Slabljenje harmonika je manje kod frula sa većim unutrašnjim prečnikom za frule izrađene od šimšira i šljive. Kod frule izrađene od abonosa slabljenje je manje za niske frekvencije kod frule većeg unutrašnjeg prečnika ( $\Phi = 14$  mm), a za visoke frekvencije slabljenje je manje kod frule manjeg unutrašnjeg prečnika ( $\Phi = 13$  mm). I kod dvodelnih frula, kao i kod jednodelnih, slabljenje harmonika u zavisnosti od frekvencije je najujednačenije kod frula izrađenih od bagrema. Čak i sa promenom unutrašnjeg prečnika same cevi, slabljenje ostaje ujednačeno.

Kod svih analiziranih dvodelnih frula uočeno je da je treći harmonik dominantan u odnosu na drugi za tonove srednjeg i visokog dela frekvencijskog opsega. Za tonove niskog dela opsega to nije slučaj. Uočeno je takođe da intenzitet osnovnog harmonika raste sa porastom frekvencije tonova u tonskom opsegu.

Analiza rezultata merenja urađenih na glavi dvodelne frule pokazala je da je na glavi moguće odsvirati dva čista tona (3. i 6. harmonik osnovnog tona frule) i da je slabljenje harmonika manje za ton više frekvencije. Broj harmonika za osnovni ton odsviran samo na glavi frule je približno isti kao i broj harmonika za odgovarajući ton odsviran na celoj fruli. To u potpunosti dokazuje tvrdnju da je glava nuzičkog instrumenta najviše odgovorna za boju tona koji će se na instrumentu proizvesti.

Generalni zaključak ovog rada je da frekvencijski spektri proučenih dvodelnih frula imaju veliki broj harmonika (abonos ima najviše). Boja tona ovih frula je zbog toga znatno prijatnija za uho slušaoca od boje tona jednodelne frule. Pogodna okolnost kod dvodelnih frula je i činjenica da se, zbog konstrukcije, njihova intonacija može i naknadno podešavati (precizno štimovanje instrumenta).

Pošto je pokazano da je glava frule mnogo značajniji deo instrumenta od cevi, ispostavlja se da će, prilikom izrade frula za đake osnovnih škola, cenu frule smanjiti izbor jeftinijeg materijala za izradu same cevi frule. Cev može biti izrađena i od plastičnog materijala, ako se ispostavi da je to najjeftinije. I dalje se mora voditi računa o poziciji rupica na cevi, da bi se frula što preciznije intonirala (naštimovala).

Materijal za izradu glave frule biće takođe izabran u skladu sa finansijskim mogućnostima. Kada bismo ga birali prema tehničkim karakteristikama i analiziranim rezultatima merenja, to bi svakako bio abonos. Zanimljiva je činjenica da je abonos materijal od kojeg se prave i klarinet, oboa i engleski rog, što su takođe drveni duvački instrumenti, ali se ne pravi i flauta. To nas navodi na zaključak da se željena konačna boja tona muzičkog instrumenta ne bira prema idealnim tehničkim karakteristikama, već ipak prema ličnom stavu slušalaca i muzičkih poznavalaca.

Ako za izradu glave frule biramo vrstu drveta koja raste na našem podneblju, onda je bagremovo drvo najprikkladnije. Ima najujednačenije spektralne karakteristike od svih analiziranih vrsta drveta, raste široko rasprostranjeno i može da zadovolji pred njega postavljene zahteve da izrađena frula dobro, čisto i jasno zvuči, i da deca lako dođu do nje.

## LITERATURA:

### KNJIGE [00]:

- [1] Ahiezer A.I., Bersesteckii V.B., *Quantum Electrodynamics*, Wiley, New York (1965)
- [2] Ando Y., *Concert Hall Acoustics* (Springer-Verlag, Berlin and New York, 1985).
- [3] Askill J. : *Physics of Musical Sounds* – D. Van Nostrand Company, inc., New York, 1979.
- [4] Backus J. : *The Acoustical Foundations of Music* – W. W. Norton and Company, inc., New York, 1969.
- [5] Ballow G. : *Handbook for Sound Engineers: The New Audio Cyclopedia* – Howard W. Sams Company, 1987.
- [6] Benade A. : *Foundamentals of Musical Acoustics* – Oxford University Press, New York, 1976.
- [7] Beranek L. : *Acoustics* – Massachusetts, 1954.
- [8] Beranek L., *Music, Acoustics, and Architecture* (Wiley, New York, 1962).
- [9] Beranek L., *Noise and Vibration Control*, (McGraw-Hill, New York, 1971).
- [10] Beranek L., *Noise Reduction*, (McGraw-Hill, New York, 1960).
- [11] Berg R., Stork D. : *The Physics of Sound* – Prentice Hall, inc., NJ, 1982.
- [12] Bersesteckii V.B., Lifshits E.M. , Pitaevskij L.P., *Pergamon*, Oxford (1982)
- [13] Bradbury L.J.S., *The Use of Fibrous Materials in Loudspeaker Enclosures*, (Apr 1976)
- [14] *Cinema Source Technical Bulletins* – Cinema Source USA, 2001.
- [15] Cremer L. and Heckl M. , *Koeperschall* (Springer-Verlag, Berlin, 1967).
- [16] Cremer L. and Mueller H.A. , *Principals and Applications of Room Acoustics. Vols.1 & 2*, translated by T. J. Schultz (Applied Science, London and New York, 1982).
- [17] Crocker M.J., *Noise and Vibration Control Engineering*, (Purdue U., Lafayette, Indiana, 1972).

- [18] Cunniff P.E., *Environmental Noise Pollution* (Wiley, New York, 1977).
- [19] Dimitrijević Lj. : Škola za blok-flautu – Nota, Knjaževac, 2005.
- [20] Dimitrijević Lj. : *Škola za frulu* – Nota, Knjaževac, 2006.
- [21] Dowling A.P. and Ffowcs-Williams J.E. , *Sound and Sources of Sound* (Wiley, New York, 1983).
- [22] Egan M.D., *Concepts in Architectural Acoustics* (McGraw-Hill, New York, 1972).
- [23] Erwin J.D. and Graf E.R., *Industrial Noise and Vibration Control* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979).
- [24] Everest A. : *Master Handbook of Acoustics* – The Mc Graw–Hill Companies, USA, 2001.
- [25] Fischer F.A., *Fundamentals of Electroacoustics* (Interscience, London, 1955).
- [26] Fletcher N., Rossing T. : *The Physics of Musical Instruments* – Springer-Verlag, New York, 1998.
- [27] Gayford M.L., *Electroacoustics—Microphones, Earphones and Loudspeakers* (American Elsevier, New York, 1971).
- [28] Giancoli D.C.: *Physics for scientists and engineers* – 3rd edition, Prentice Hall, pp 426-427 (2000)
- [29] Gibson G., Johnston I. : *New Themes and Audiences for the Physics of Music* – Physics Today, January 2002.
- [30] Hammes M. : *A Dozen Musical Instruments* – Ronin Arts, 2004.
- [31] Hamerick, D. Henderson, and R. Salve, *New Perspective on Noise Induced Hearing Loss* (Raven, New York, 1982).
- [32] Harris C.M., *Handbook of Noise Control*, 2nd Ed., (McGraw-Hill, New York, 1979).
- [33] Harris C.M. and Crede C. E., *Shock and Vibration Handbook*, 2nd Ed., (McGraw-Hill, New York, 1976).
- [34] Heckl M. and Mueller H.A., *Taschenbuch der Technischen Akustik* (Springer-Verlag, Berlin, 1975).
- [35] Henderson D., Hamerick R.P. , Dosaniyh D.S., and Mills J.H. , *Effects of Noise on Hearing* (Raven, New York, 1976).
- [36] Heuter T.F. and Bolt R.H. , *Sonics* (Wiley, New York, 1955).
- [37] Hill D. : *Musical Acoustics* – Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, 2002.



- [38] Hopkin B. : *Musical Instruments Design* – See Sharp Press, Tucson, AZ, 1996.
- [39] Hopkin B. : *Making Simple Musical Instruments* – Lark Books, Asheville, NC, 1995.
- [40] Hunt F.V., *Electroacoustics* (Wiley, New York, 1954).
- [41] Hutchins C. : *The Physics of Music : Readings from Scientific American* – W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1978.
- [42] Johnston I. : *Measured Tones : The Interplay of Physics and Musics* – Institute of Physics Publishing, London, 1989.
- [43] Jones D.S., *Acoustic and Electromagnetic Waves* (University of Dundee, U.K., 1985).
- [44] Kinsler L.E. , Frey A.R., Coppens A.B., and Sanders J.B., *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Ed. (Wiley, New York, 1982).
- [45] Klipsch P.W., *Corner Loudspeaker Placement*, (Jul 1959)
- [46] Kurtović. H. : *Osnovi tehničke akustike* – Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- [47] Kuttruff R., *Room Acoustics*, 2nd Ed. (Update, New York, 1981). N. A. Grundy *et al.*, *Practical Building Acoustics* (Halsted, Wiley, New York, 1976).
- [48] Lapp D. : *The Physics of Music and Musical Instruments* – Wright Center for Innovative Science Education, Medford, Massachusetts
- [49] Lord H., Gatley W.S. and Evensen H.A., *Noise Control for Engineers* (McGraw-Hill, New York, 1980).
- [50] Magrab E.B., *Environmental Noise Control* (Wiley, New York, 1975).
- [51] Mankovsky V.S., *Acoustics of Studios and Auditoria*, edited by C. Gilford (Hastings House, New York, 1971).
- [52] Marič M., Menđen. R. : *Frula 1–škola za početnike* – Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2006.
- [53] Merhaut J., *Theory of Electroacoustics* (McGraw-Hill, New York, 1980).
- [54] Merhaut J., *Theory of Electroacoustics* (McGraw-Hill International, New York, 1981).
- [55] Meyer J. : *Acoustics and the Performance of Music* – Frankfurt, 1978.
- [56] Meyer E. and Neumann E., *Physical and Applied Acoustics* (Academic Press, New York, 1972).

- [57] Mobley R. K. : *Vibration Fundamentals* – Butterworth-Heinemann, 1999.
- [58] Moravesik M. : *Musical Sound : An Introduction to the Physics of Music* – Paragon House Publishers, New York, 1987.
- [59] Neuwirth E. : *Musical Temperaments* – Springer-Verlag, London, 1997.
- [60] Novak J.F., *Performance of Enclosures for Low-Resonance, High-Compliance Loudspeakers*, (Jan 1959)
- [61] Olson H. : *Music, Physics and Engineering* – New York, 1952.
- [62] Olson, *Acoustical Engineering* (van Nostrand, New York, 1957).
- [63] Olson H.F., *Dynamical Analogies*, 2nd Ed. (van Nostrand, New York, 1958).
- [64] Parkin P.H. and Humphreys H.R., *Acoustics, Noise and Buildings* (Praeger, New York, 1959).
- [65] Petruszewicz S.A., and Longmore D.K. *Noise and Vibration Control for Industrialists*, (American Elsevier, New York, 1974).
- [66] Pravica P., Drinčić D. : *Elektroakustika* – VETŠ, Beograd, 2006.
- [67] Pierce J.R., *Almost All About Waves* (MIT Press, Cambridge, MA, 1974).
- [68] Peterson A.P.G., *Handbook of Noise Measurement* (GenRad, Concord, MA, 1974).
- [69] Plach D.J., *Design Factors in Horn-Type Speakers*, (Oct 1953).
- [70] Reichert W., *Grundlagen der Technischen Akustik* (Akademische Verlags Gesellschaft Geest und Portig K.-G., Leipzig, 1968).
- [71] Reynolds D., *Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control* (Allyn and Bacon, Boston, MA, 1981).
- [72] Rossing T. : *The Science of Sound* – Addison–Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1989.
- [73] Rossing T. : *Acoustics of Tuned Handbells*
- [74] Rossing T. : *Chladni Law for Vibrating Plates*
- [75] Rossing T. : *Tuned Handbells, Church Bells and Carillon Bells*
- [76] Rossing T. : *Acoustics of Bells*
- [77] Rossing T. : *Acoustics of Eastern and Western Bells*
- [78] Skudrzyk E., *Foundations of Acoustics* (Springer-Verlag, Vienna, 1971).

- [79] Small R.H. *Vented-Box Loudspeaker Systems*, Parts I through IV, (Jun-Oct 1973)
- [80] Small R.H., *Closed-Box Loudspeaker Systems*, Parts I and II (Dec and Jan/Feb 1973)
- [81] Small R.H., *Phase and Delay Distortion in Multiple-Driver Loudspeaker Systems*, (Jan 1971)
- [82] Stephens R.W.B. and Bate A.E., *Acoustics and Vibrational Physics* (Edward Arnold, London, 1966).
- [83] Sundberg J. : *The Science of Musical Sounds* – Academic Press, inc., 1991.
- [84] Tappan P.W., *Loudspeaker Enclosure Walls*, (Jul 1962)
- [85] Taylor C. : *Exploring Music : The Science and Technology of Tones and Tunes* – Institute of Physics Publishing inc., Philadelphia, 1992.
- [86] Temkin S., *Elements of Acoustics* (Wiley, New York, 1982).
- [87] Thiele A.N., *Loudspeakers in Vented Boxes*, Parts I and II (May and Jun 1971)
- [88] Thompson W.T., *Theory of Vibration with Applications* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1973).
- [89] Villchur E.M., *Problems of Bass Reproduction in Loudspeakers*, (Jul 1957).
- [90] Waring D. : *Making Wood Folk Instruments* – Sterling Publishing Co., inc., New York, 1990.
- [91] White H., White D. : *Physics and Music : The Science of Musical Sound* – Saunders College/holt, Rinehart and Winsion, Philadelphia, 1980.
- [92] White R.G. and Walker J.G., *Noise and Vibration* (Wiley, New York, 1982).
- [93] Williams S., Jr., Leyman E. , Karp S.A., and Wilson P.T., *Environmental Pollution and Mental Health* (Information Resources, Washington, D.C., 1973).
- [94] Wilson M. : *Acoustical Design for Architects*
- [95] Yost W. : *Fundamentals of Hearing* – Academic Press, San Diego, 2000.
- [96] Zwicker E. and Zollner M. , *Elektroakustik, Hochschultext* (Springer- Verlag, Berlin, New York, 1984)

## NAUČNI RADOVI [00'] :

- [1] Andreas Miklos, Judit Angster, Stephan Pitch, Thomas Rossing : *Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe* – J. Acoust. Soc. Am. 119 (5), May 2006.
- [2] Angster J., Paal G., Garen W., Miklos A. : *The effect of Wall Vibrations on the Timbre of organ Pipes* – Proceedings of the 16th. Int. Congress on Acoustics and 135th JASA Meeting, Seattle, Vol. 3, pp 753-754, 1998.
- [3] Backus J.: *Imput impedance curves for the reed instrumenrs* - J. Acoust. Soc. Am. 56, 1266-1279 (1974)
- [4] Backus J.: *Small – vibration Theory of the clarinet* - J. Acoust. Soc. Am. 35, 305-313 (1963)
- [5] Benade A.H.: *Relation of air – column resonances to sound spectra produced by wind instruments* - J. Acoust. Soc. Am. 40, 247-249 (1966)
- [6] Benson J.B., "Synthesis of High-Pass Filtered Loudspeaker Systems," AWATech. Rev. 15, 115-128 (1974); also 15, 143-148 (1974) and 16, 1-11 (1975).
- [7] Beranek L.L., "Some Remarks on Electro-Mechano-Acoustical Circuits," J. Acoust. Soc. Am. 77, 1309-1313 (1985).
- [8] Beranek L.L., "Preferred Noise Criteria," J. Acoust. Soc. Am. 50, 1223-1228 (1971); See also 28, 833-852 (1956).
- [9] Berglund B., Berglund U. , and Lindvall T., "Scaling Loudness, Noisiness and Annoyance of Aircraft and Community Noise," J. Acoust. Soc. Am. 57,930-934 (1975); also 60, 1119-1125 (1976).
- [10] Bodlund K., "Sound Power in Reverberation Chambers at Low Frequencies," J. Sound Vib. 55, 563-590 (1977).
- [11] Bodlund K., "Diffusion in Reverberation Chambers," J. Sound Vib. 50, 253-283 (1977).
- [12] Botros A., Smith J., Wolfe J.: *The virtual Boehm flute – a web service that predicrs multiphonics, microtones and alternative fingerings* – Acoustics Australia 30, 61-65 (2002)
- [13] Botros A., Smith J., Wolfe J.: *The virtual flute: An advanced finhering guide generated via machine intelligence* – J. New Music Research 35, 183-196 (2006)
- [14] Broadhurst A.D., "Loudspeaker Enclosure to Simulate an Infinite Baffle," Acustica 39, 316-322 (1978).

- [15] Broner N. and Leventhall H.G., "Modified PNdB for Assessment of Low Frequency Noise," J. Sound Vib. 73, 271-277 (1980); also 84, 443-48 (1982).
- [16] Clark S. : *Rewiew Article : The Politics of the Uraline in Schenker's 'Der Tonwille' and 'Der freie Satz'* – Journal of the Royal Musical Association 132, No. 1, 141 – 164
- [17] Collins J.L. and Ellis G.E., "Electrokinetic, Acoustic Pressure Transducer," J. Acoust. Soc. Am. 36, 1808-1860 (1964).
- [18] Coltman J. : *Jet offset, harmonic content and warble in the flute* - J. Acoust. Soc. Am. 120 (4), October 2006.
- [19] Coltman J. W. : *Effect of Material on Flute Tone Quality* - J. Acoust. Soc. Am. 49 (2), pp 520-523, 1971.
- [20] Coltman J.W. : *Time domain simulation of the flute* - J. Acoust. Soc. Am. 92, 69-73 (1992)
- [21] Coltman J.W. : *Jet behavior in the flute* - J. Acoust. Soc. Am. 92 74-83 ( 1992)
- [22] Coltman J.W. : *Mode stretching and harmonic generation in the flute* - J. Acoust. Soc. Am. 88, 2070-2073 (1990)
- [23] Coltman J.W. : *Jet drive mechanism in edge tones and organ pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 60, 725-733 (1976)
- [24] Coltman J.W. : *Sounding mechanism of the flute and organ pipe* - J. Acoust. Soc. Am. 44, 983-992 (1968)
- [25] Dalmont J.P.: *Acoustic impedance measurement, part 1: a review* – J.Sound Vib. 243, 427-449 (2001)
- [26] de Araujo M.A.N. and Yousri Gerges S.N. , "Sound Power From Sources Near Reverberation Chamber Boundaries," J. Sound Vib. 91, 471-477 (1983).
- [27] Dickens P., Smith J., Wolfe J.: *Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution* - J. Acoust. Soc. Am. 121, 1471-1481 (2007)
- [28] Egoff D.P., "Mathematical Modeling of a Probe-Tube Microphone," J.Acoust. Soc. Am. 61, 200-205 (1977).
- [29] Elder S.A.: *On the mechanism of sound production in organ pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 54, 1554-1564 (1973)

- [30] Flanagan J.L. and Kubli R. A., "Conference Microphone with Adjustable Directivity," J. Acoust. Soc. Am. 77, 1946-1949 (1985).
- [31] Fletcher N.H., Lorna Douglas: *Harmonic generation in organ pipes, recorders and flutes* - J. Acoust. Soc. Am. 68 (3), September 1980.
- [32] Fletcher N.H. : *Mode locking in nonlinearly excited inharmonic musical oscillators* - J. Acoust. Soc. Am. 64, 1566-1569 (1978)
- [33] Fletcher N.H. : *Non – linear interaction in organ pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 56, 645-652 (1974)
- [34] Fletcher N.H. : *Jet - drive mechanism in organ pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 60, 481-483 (1976)
- [35] Fletcher N.H.: *Sound production by organ flue pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 60, 926-936 (1976)
- [36] Fletcher N.H. : *Transients in the speech of organ flue pipes – a theoretical study* – Acustica 34, 224-233 (1976)
- [37] Fletcher N.H. : *Air flow and sound generation in musical wind instruments* – Ann. Rev. Fluid Mech. 11, 123-146 ( 1979)
- [38] Fletcher N.H., Thwaites S. : *Wave propagation on an acoustically perturbed jet* – Acustica 42, 323-334 (1979)
- [39] Fletcher N.H. : *Acoustical correlates of flute performance technique* - J. Acoust. Soc. Am. 57, 233-237 (1977)
- [40] Fraim F.W., Murphy P.V. , and Ferran R.J. , "Electrets in Miniature Microphones," J. Acoust. Soc. Am. 1601-1608 (1973).
- [41] Gabrielson A., U. Rosenberg, and H. Sjogren, "Judgements of Perceived Sound Quality of Sound-Reproducing Systems," J. Acoust. Soc. Am. 55, 854-861 (1974).
- [42] Gluck R. : *Sounds of a Community : Cultural Identity and Interactive Art* – Leonardo Music Journal, 2005., Vol. 15, pp. 37 – 43
- [43] Gomperts M.C., "Sound Radiation from Baffled, Thin, Rectangular Plates," Acustica 37, 93-102 (1977).
- [44] Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M., *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, New York, London. (1965)
- [45] Greene D.C., "Vibration and Sound Radiation of Damped and Undamped Flat Plates," J. Acoust. Soc. Am. 33, 1315-1320 (1961).
- [46] Greiner R.A. and Sims T.M. , Jr., "Loudspeaker Distortion Reduction," J. Audio Eng. Soc. 32, 956-963 (1984).
- [47] Han N., Qin X. : *A study of Sound Intensity Control for Active Noise Barriers* – Applied Acoustics 68 (2007) 1297 – 1306

- [48] Harris C.M., "Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature," J. Acoust. Soc. Am. 40, 148-159 (1966).
- [49] Harris G.R., "Transient field of a Baffled Planar Piston Having an Arbitrary Vibration Amplitude Distribution," J. Acoust. Soc. Am. 70, 186—204 (1981).
- [50] Hawkes R.J. and Douglas H. , "Subjective Acoustic Experience in Concert Auditoria," Acustica 24, 235-250 (1971).
- [51] Hayashi C., Kondo S. , and Kodama H. , "Psychological Assessment of Aircraft Noise Index," J. Acoust. Soc. Am. 63, 815-822 (1978). F. J. Langdon and I. B. Buller, "Road Traffic Noise and Disturbance to Sleep," J. Sound Vib. 50, 13-28 (1977).
- [52] Heckl, "Abstrahlung von ebenen Schallquellen," Acustica 37, 155-166 (1977).
- [53] Hirschberg, R.W.A. Van de Laar, Marrou-Maurihres J.P. , A.P.J. Wijnands, Schumacher J.T.: *Ab initio calculations of the oscillation of a clarinet* – Acustica, 48, 71-85 ( 1981)
- [54] Hoover D., Cottfingham J. :*Pipe Impedance and Sound Spectrum Measurements of the Kaen and the Sheng* - The Journal of the Acoustical Society of America, May 1., 2001 – Vol. 109, Iss. 5, p. 2343
- [55] Hruska G.R., Magrab E. B. and Penzes W. B., "Environmental Effects on Microphones of Various Constructions," J. Acoust. Soc. Am. 61, 206-210 (1977); also 62, 1315 (1977).
- [56] Ingard U. and Lamb G.L. , "Effect of a Reflecting Plane on the Power Output of Sound Sources," J. Acoust. Soc. Am. 29, 743-744 (1957)
- [57] Jacobsen O., "Some Aspects of the Self and Mutual Radiation Impedance Concept with Respect to Loudspeakers," J. Audio Eng. Soc. 24, 82-92 (1976).
- [58] Jagodzinski Z., "Adequacy of Equivalent Circuits for neozomagnetic Transducers," Acustica 21, 283-287 (1969); see also, "Comments" by R. S. Woollett and Y. Yumamoto, 23, 351-355 (1970) and "Replies," 23, 355-361 (1970) and 24, 175 (1971).
- [59] Jenkins M.A. and Pahl J., "Measurement of Freeway Noise and Community Response," J. Acoust. Soc. Am. 58, 1222-1231 (1975).
- [60] Jones M.H., "Reverberation Enforcement—an Electro-Acoustical System," Acustica 27, 357-363 (1972).

- [61] Jovičić S., Sarić Z., Turajlić S. : *Application of the Maximum Signal to Interference Ratio Criterion to the Adaptive Microphone Array – Acoustics Research Letters Online* (2005) 232 – 237
- [62] Kim J. S. : *Free Vibration of Laminated and Sandwich Plates Using Enhanced Plate Theories – Journal of Sound and Vibration* 308 ( 2007) 268 – 286
- [63] M. Kleiner, "Audience Induced Background Noise Level in Auditoria," *Acustica* 46, 82-88 (1980).
- [64] Kleinman D.A. and Nelson D.F. , "The Photophone—An Optical Telephone Receiver," *J. Acoust. Soc. Am.* 59, 1482-1494 (1976); 60,240-250 (1976).
- [65] Klipsch P.W., "A Low Frequency Horn of Small Dimensions," *J. Audio Eng. Soc.* 27, 141-148 (1979).
- [66] Krichagin V. J. , "Health Effects of Noise Exposure," *J. Sound Vib.* 59, 65-71 (1978).
- [67] Kundert W.B., "Comments on Hruska *et al.* Paper," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 1647 (1977).
- [68] Kuttruff H. and Juso M.J. , "Messungen des Nachhallverlaufes in mehreren Räumen, ausgeführt nach dem Verfahren der integrierten Impulsantwort," *Acustica* 21, 1-9 (1969).
- [69] Lauchle G.C., "Radiation of Sound From a Small Loudspeaker Located in a Circular Baffle," *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 543-549 (1975).
- [70] Leach W.M., Jr. "Active Equalization of Closed-Box Loudspeaker Systems," *J. Audio Eng. Soc.* 29, 405-07 (1981).
- [71] Leach W.M., Jr., "Specification of Moving-Coil Drivers for Low-Frequency Horn-Loaded Loudspeakers," *J. Audio Eng. Soc.* 27, 950-959 (1979).
- [72] R. Lerch, "Electroacoustic Properties of Piezopolymer Microphones," *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1809-1814 (1981).
- [73] Lin G.P., "Acoustic Radiation from Point Excited Rib-Reinforced Plate," *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 72-83 (1977).
- [74] Lukas J.S. , "Noise and Sleep," *J. Acoust. Soc. Am.* 58, 1232-1242 (1975).
- [75] Lyon R.L., "On the Low Frequency Radiation Load of a Bass-Reflex Speaker," *J. Acoust. Soc. Am.* 29, 654 (1957).
- [76] Macdonald J.R., "Loudspeakers," *J. Electrochem Soc.* 124, 1022-1030 (1977).



- [77] Madsen H.S., "Optimization of a Ridge Backplate for Electret Microphones," J. Acoust. Soc. Am. 53, 1616-1619 (1973).
- [78] Mathew N. : *History under Erasure : Wellington's Sieg, The Congress of Viena and the Ruination of Beethoven's Heroic Style* – The Musical Quarterly, 2007., 89: 17 – 61
- [79] Merhaut J., "Contribution to the Theory of Electroacoustic Transducers Based on Electrostatic Principle," Acustica 19, 283-292 (1967/68).
- [80] Mikhlin S.G., Linear Integral Equations, Hindustan Publ. Comp., Delhi (1960)
- [81] Miles R.N., "Sound Field in Rectangular Enclosure With Diffusely Reflecting Boundaries," J. Sound Vib. 92, 203-226 (1984).
- [82] Miller J.D., "Effects of Noise on People," J. Acoust. Soc. Am. 56, 729-764 (1974).
- [83] Mongy M., "Acoustical Properties of Porous Materials," Acustica 28, 243-247(1973).
- [84] Moody I. : *Medieval Music by Christians, Jews and Arabs* – Early Music, 2007., Vol. XXXV, No. 3
- [85] Morita S., Kyouno N. , Yamabuchi T., Kagawa Y., and Sakai S., "Acoustic Radiation of a Horn Loudspeaker by the Finite Element Method," J. Audio Eng. Soc. 28, 482-489 (1980); see also, W. M. Leach, Jr., "Comments" and S. Morita, *et al.*, "Reply," 28, 900 (1980). Also see 30, 896-905 (1982)
- [86] Nelson D.F., Wecht K.W. , and Kleinman D.A., "Photophone Performance," J. Acoust. Soc. Am. 60, 251-255 (1976).
- [87] Nevanlinna R., Paatero V., Introduction to complex analysis, Adison Wesley Publ. Comp., Reading, Menlo Park , Don Mils (1969)
- [88] Nolle A.W. : *Some voicing adjustments of flue organ pipes* - J. Acoust. Soc. Am. 66, 1612-1626 ( 1979)
- [89] Nolle A.W. : *Flue organ pipes: Adjustments affecting steady waveform* - J. Acoust. Soc. Am. 73, 1821-1832 (1983)
- [90] Nolle A.W. : *Sinusoidal instability of a planar air jet : Propagation parameters and acoustics excitation* - J. Acoust. Soc. Am. 103 3690-3705 (1998)
- [91] Ohga J., Shirai S., Ochi O., Takagi T., Yoshikawa A. , Nagai H., and Mizushima Y., "Granule Microphone Using Selenium-Tellurium Alloy," J. Acoust. Soc. Am. 64, 988-994 (1978).

- [92] Parfitt G.G. and Gyang B.N. , "New Form of Condenser Microphone," *Acustica* 37, 125-126 (1977).
- [93] Parott A. : *Scholarly Support?* – Early Music, August 2007, 493 -494
- [94] Pritchard R.L., "Mutual Acoustic Impedance Between Radiators in an Infinite Rigid Plane," *J. Acoust. Soc. Am.* 32, 730-737 (1960).
- [95] Pyle R.W., Jr., "Effective Length of Horns," *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 1309-1317 (1975).
- [96] Pyle R. W. : *The Effect of Wall Materials on the Timbre of Brass Instruments* – Proceedings of the 16th. Int. Congress on Acoustics and 135th JASA Meeting, Seattle, Vol. 3, pp 751-752, 1998.
- [97] Ramirez R., Hazan A., Gomez E., Maestre E., Serra X. : *Discovering Expressive Transformation Rules from Saxophone Jazz Performances* – Journal of New Music Research, 2005., Vol. 34, No. 4, pp. 319 – 330
- [98] Reedyk C.W., "Noise Cancelling Electret Microphone for Light-Weight Head Telephone Sets," *J. Acoust. Soc. Am.* 53, 1609-1615 (1973).
- [99] Roche E. : *Rare Italian Instrumental Music* – Early Music, August 2007., 477 – 480
- [100] Rossing T., Sathof H. : *Modes of Vibration and Sound Radiation from Tuned Handbells* – *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (1980) 1600 – 1607
- [101] Rossing T., Perrin R., Sathof H., Peterson R. : *Vibrational Modes of a Tuned Handbell* – *J. Acoust. Soc. Am.* 76 (1984) 1263 – 1267
- [102] Rossing T. , Hampton D., Richardson B., Sathof H. : *Vibrational Modes of Chinese Two- tone Bells* – *J. Acoust. Soc. Am.* 83 (1988) 369 – 373
- [103] Sacerdote G.G., "A Recent Story of the Ceiling of the Scala Theatre of Milan," *Acustica* 22, 54-58 (1969/70).
- [104] Scavone G. : *Modeling Vocal-Tract Influence in Reed Wind Instruments* – Stockholm Music Acoustics Conference, Stockholm, Sweden, 2003.
- [105] Schumacher R.T. : *Self – sustained oscillators of organ flue pipes : An integral equation solution* – *Acustica* 39, 225-238 (1978)
- [106] Schultz T,J,, "Synthesis of Social Surveys on Noise Annoyance," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 377-405 (1978); also 65, 849 (1979).
- [107] Sessler G.M. and West J. E. , "Electret Microphones," a series of papers, *J. Acoust. Soc. Am.* 35, 1354-1357 (1963); 40, 1433-1440 (1966); 46, 1081-1086 (1969); and 58, 273-278 (1975).

- [108] Sharp D. B. : *Acoustic Pulse Reflectometry for the Measurements of Musical Wind Instruments* – PhD, University of Edinburgh, 1996.
- [109] Smirnov V.I., *Course of advanced mathematics*, Volume 2, Nauka, Moscow, (1974)
- [110] Stepanishen P.R., "Radiation Impedance of a Rectangular Piston," *J.Sound Vib.* 55, 275-288 (1977).
- [111] Thiessen G.J., "Disturbance of Sleep by Noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 216-222 (1978).
- [112] Thwaites S., Fletcher N.H.: *Wave propagation on turbulent jets* – Acustica
- [113] Toop D. : *Sound Body : The Ghost of a Program* – Leonardo Music Journal, 2005., Vol. 15, pp. 28 – 35
- [114] Tsingos N., Carlbom I., Elko G., Funkhokser T., Kubli R. : *Validation of Acoustics Simulations in the 'Bell Labs Box'* Bell Laboratories–Lucent Technologies, MH Acoustics, Prinseton University
- [115] Van der Pauw L.J., "The Trapping of Acoustic Energy by a Conical Membrane and its Implications for Loudspeaker Cones," *J. Acoust. Soc. Am.* 68, 1163-1168 (1980).
- [116] Vanweelden K., McGee I. : *The Influence of Music Style and Conductor Race on Perceptions of Ensemble and Conductor Performance* – International Journal of Music Education, 2007., Vol. 25(1), 7–19
- [117] Verge M., Fabre B., Hirschberg A., Winands P.J.: *Sound production in recorder – like instruments* - *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 2914-2925 (1997)
- [118] Vigran T.E. and Sorsdal S. , "Comparison of Methods for Measurement of Reverberation Time," *J.Sound Vib.* 48, 1-13 (1976).
- [119] Villchur E. and Killion M.C., "Probe-Tube Microphone Assembly," *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 238-240 (1975).
- [120] von Gierke H.E. and Nixon C.W., "Human Response to Sonic Boom," *J. Acoust. Soc. Am.* 51, 766-782 (1972).
- [121] Wallace C.E., "Radiation Resistance of a Rectangular Panel," *J. Acoust. Soc. Am.* 51, 946-952 (1970).
- [122] Wang J.S. and Crocker M.J., "Tubular Windscreen Design for Microphones for In-Duct Fan Sound Power Measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 568-575 (1974).

- [123] Waterhouse B.V., "Output of a Sound Source in a Reverberation Chamber and Other Reflecting Environments," J. Acoust. Soc. Am. 30, 4-13 (1958).
- [124] Webster J.C., "Speech Communications as Limited by Ambient Noise," J. Acoust. Soc. Am. 37, 692-699 (1965).
- [125] Whitehouse J.W., D. B. Sharp, N. D. Harrop : *An investigation into wall vibrations induced in wind instruments constructed from different metals* –
- [126] Whitehouse J.W., D. B. Sharp, T. J. W. Hill : *Wall vibrations in musical wind instruments* – Acoustics Bulletin July/ Aug 2003.
- [127] Whittall A. : *Shadows of Doubt* – The Musical Times, Winter 2006., 105-107
- [128] Whittall A. : *Matters Metaphysical* – The Musical Times, Winter 2006., 108-109
- [129] Whittall A. : *Faded Memories* – The Musical Times – Winter 2006., 110–112
- [130] Williams C.E., Pearsons K.S. , and Hecker M.H.L., "Speech Intelligibility in the Presence of Time-Varying Aircraft Noise," J. Acoust. Soc. Am. 50,426-434 (1971).
- [131] Wilson T.A. , Beavers G.S.: *Operating modes of the clarinet* - J. Acoust. Soc. Am. 56, 653-658 (1974)
- [132] Winters B. : *Catching Dreams : Editing Film Scores for Publication* – Journal of the Royal Musical Association 132, No. 1, 115 – 140
- [133] Wolfe J., Smith J., Tann J., Fletcher N.H. : *Acoustic Impedances of Classical and Modern Flutes* – Journal of Sound and Vibration, October 2000.
- [134] Wolfe J., Smith J., Tann J., Fletcher N.H. : *Acoustics of classical and modern flutes, a compendium of impedance spectra, sound spectra, sounds and fingerings* – JSV-Electronicpublicationat<http://www.harcourt-international.com/journals//jsw/index.htm> (2001)
- [135] Young R.W., "Single-Number Criteria for Room Noise," J. Acoust. Soc. Am. 36, 289-295 (1964).
- [136] Zahn R., "Analysis of the Acoustic Response of Circular Electret Condenser Microphones," J. Acoust. Soc. Am. 69, 1200-1203 (1981); also *Acustica* 57, 191-300 (1985).

[137] Zdzinski S., Ogawa M., Dell C., Yap C., Adderly C., Dingle R. : *Attitudes and Practices of Japanese and American Music Teachers towards Integrating Music with other Subjects* – International journal of Music Education, 2007., Vol. 25(1), 55–71

[138] Zuckerwar A.J., "Theoretical Response of a Condenser Microphone," J. Acoust. Soc. Am. 68, 1278-1285 (1978).

## **INTERNET PUBLIKACIJE [00"]:**

[1] Boyle J. : *There's Life Above 20 kHz-A Surey of Musical Instrument Spectra to 102,4 kHz*, [www.co.caltech.edu/musiclab](http://www.co.caltech.edu/musiclab),

[2] The University South Wales, Sidney, Australia : *Acoustic Concepts / Measurement Technique*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[3] The University South Wales, Sidney, Australia : *Flute Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[4] The University South Wales, Sidney, Australia : *Clarinet Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[5] The University South Wales, Sidney, Australia : *Saxophone Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[6] The University South Wales, Sidney, Australia : *Brass Instruments Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[7] The University South Wales, Sidney, Australia : *Violine Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[8] The University South Wales, Sidney, Australia : *Guitar Acoustics* [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html),

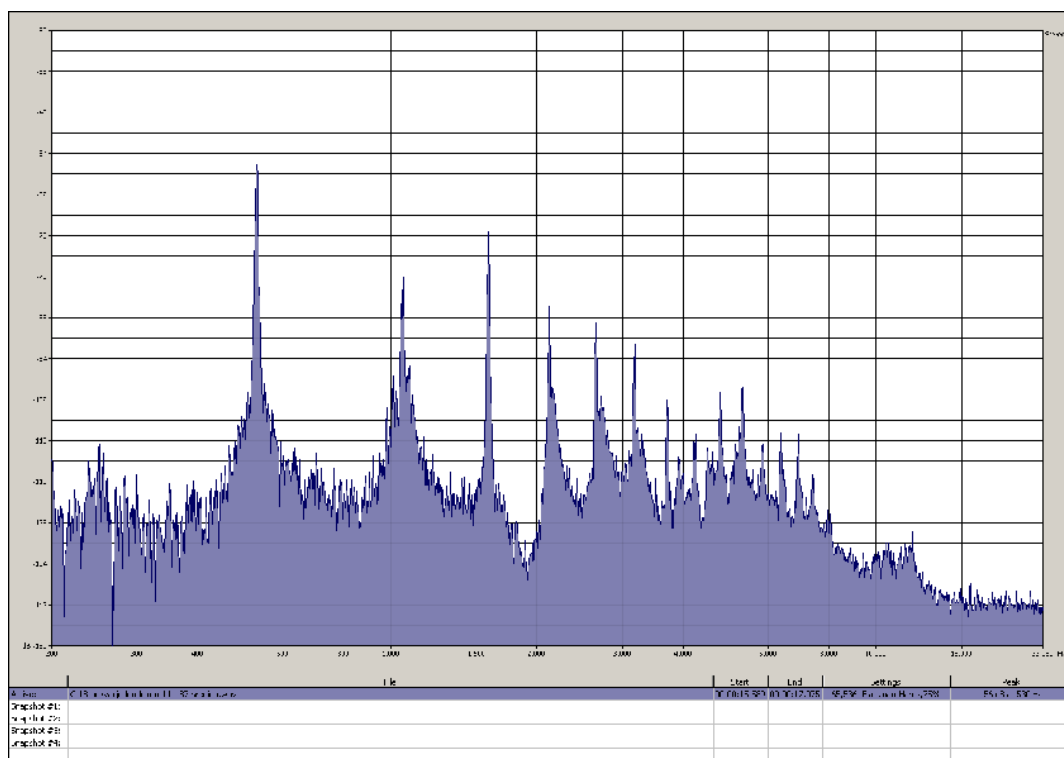
[9] The University South Wales, Sidney, Australia : *Didjeridy Acoustics*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

[10] The University South Wales, Sidney, Australia : *Acoustics of Bell Plates*, [www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html](http://www.phys.unsw.edu.au/jw/basics/html)

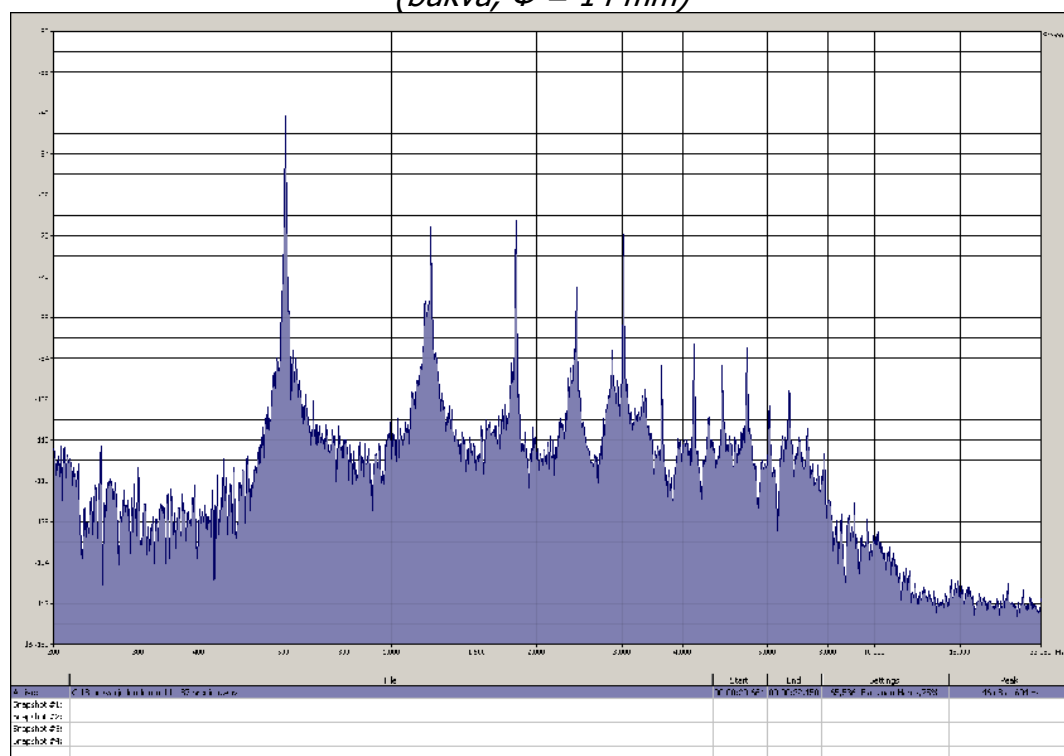
[11] Wilfield Kausel : *Computer Optimization of Brass Wind Instruments*, <http://iwr.mdw.ac.at/Forschung/pdf>

## PRILOZI

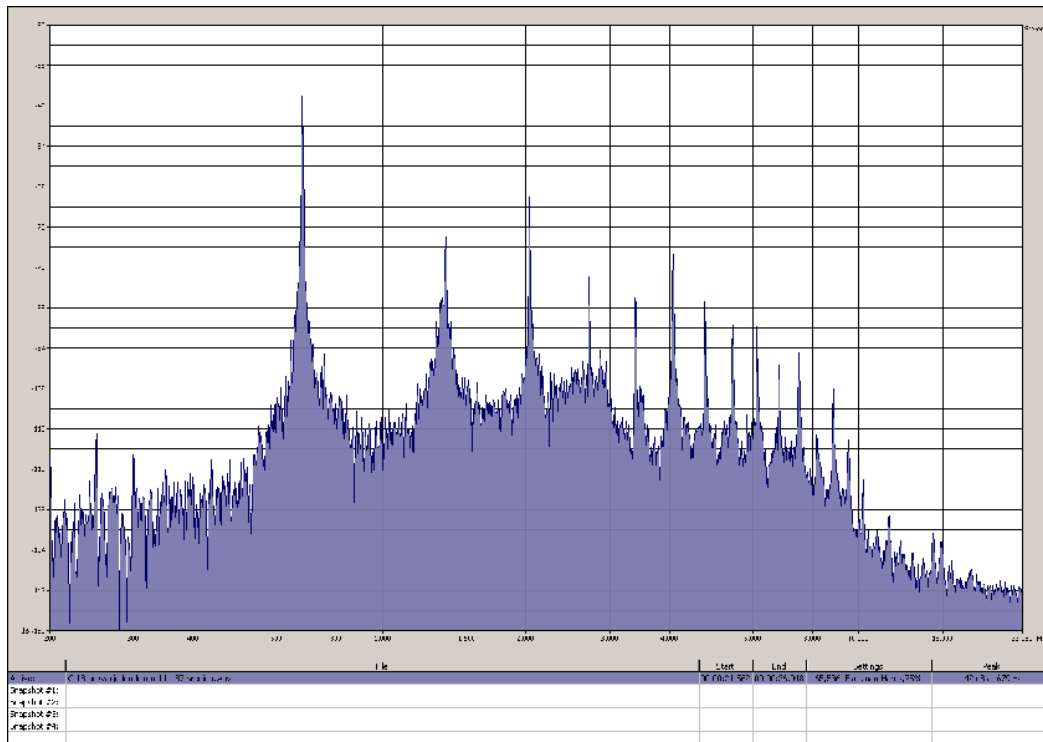
### DODATAK 1: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 18 (bukva, $\Phi = 14$ mm)



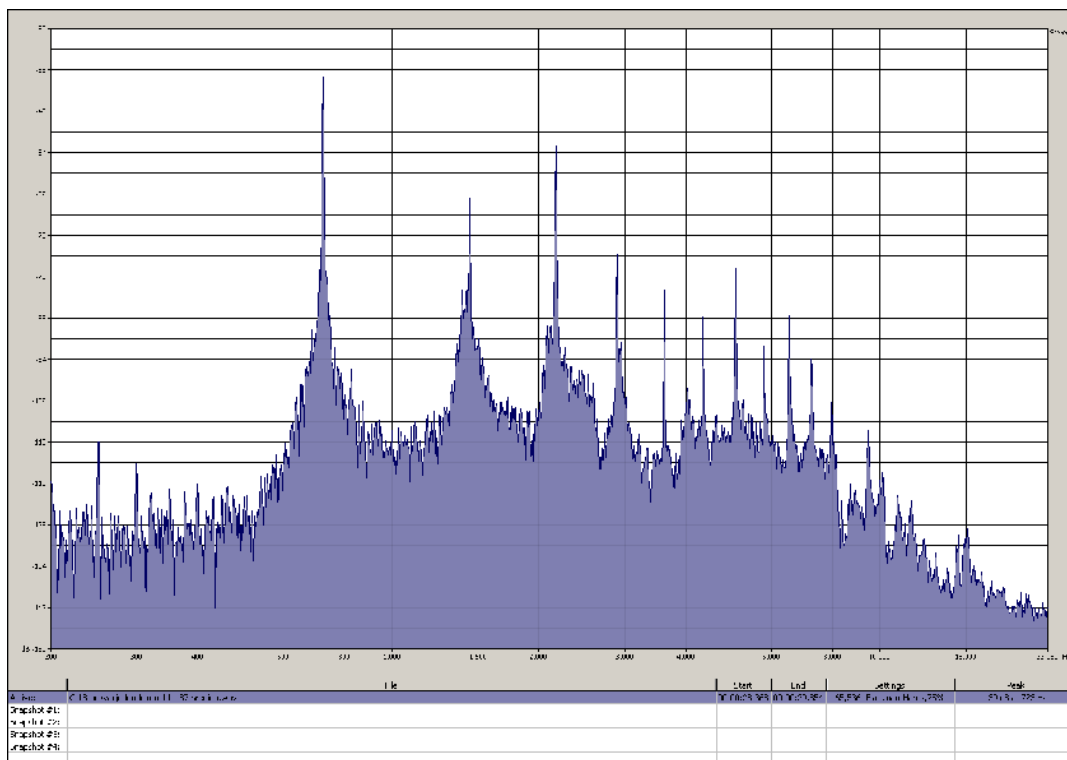
Slika 1.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 18  
(bukva,  $\Phi = 14$  mm)



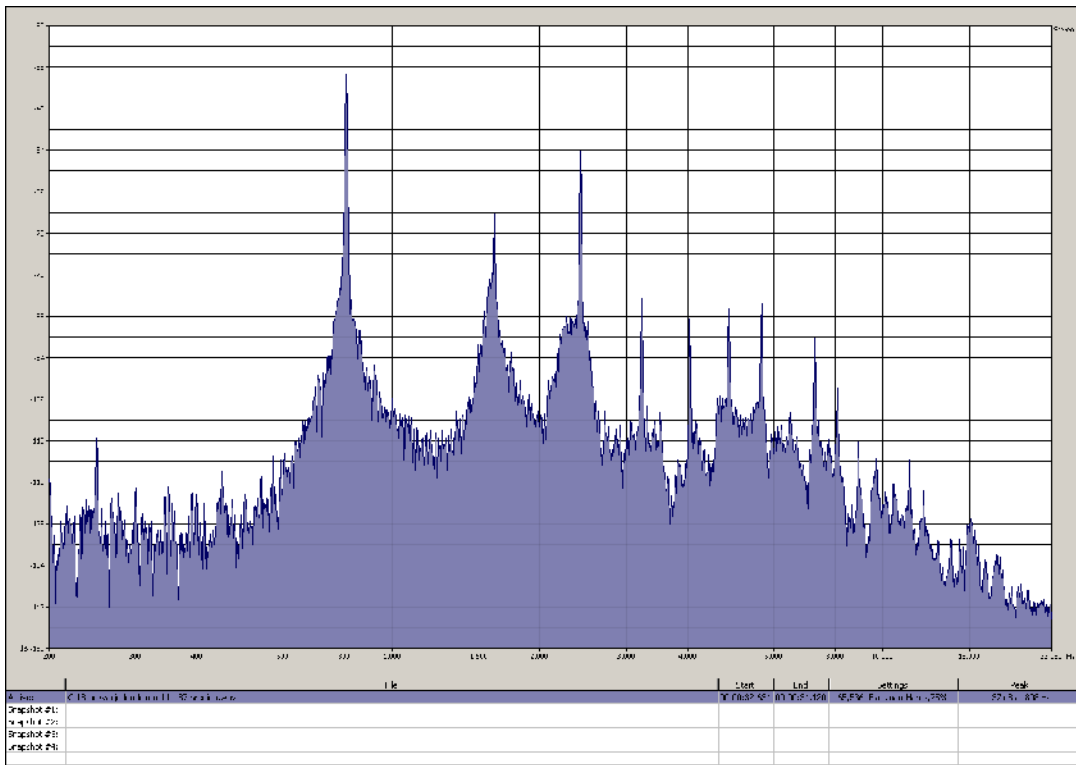
Slika 1.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 18  
(bukva,  $\Phi = 14$  mm)



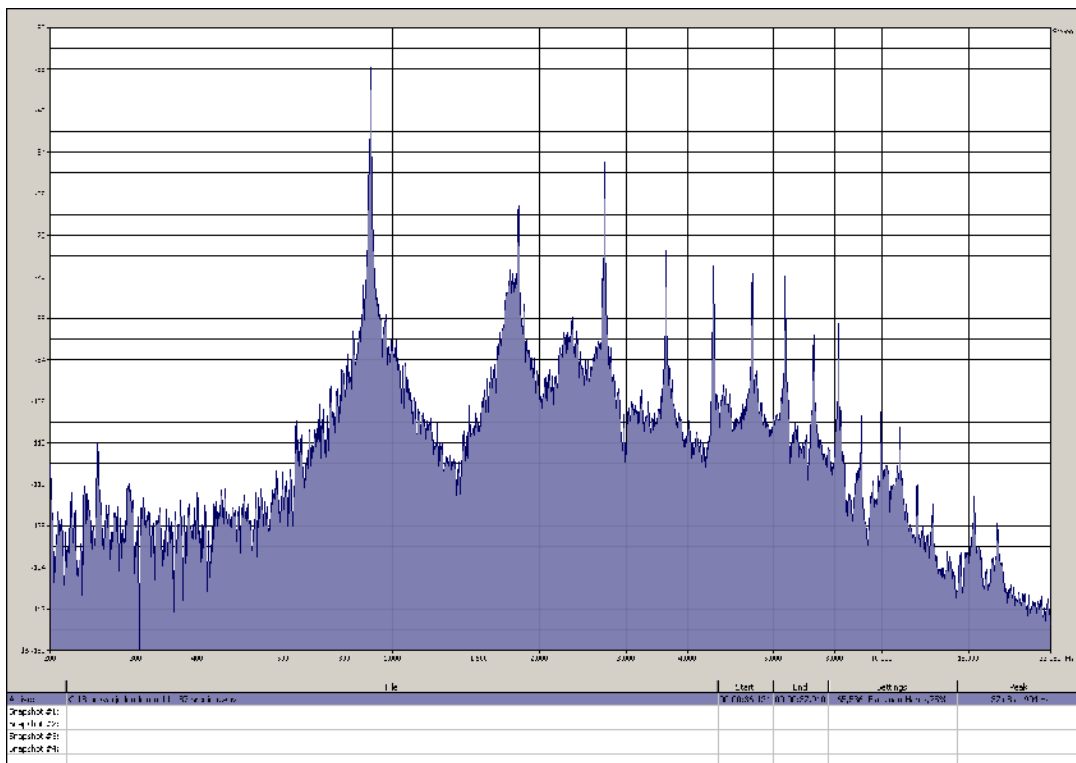
*Slika 1.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*



*Slika 1.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

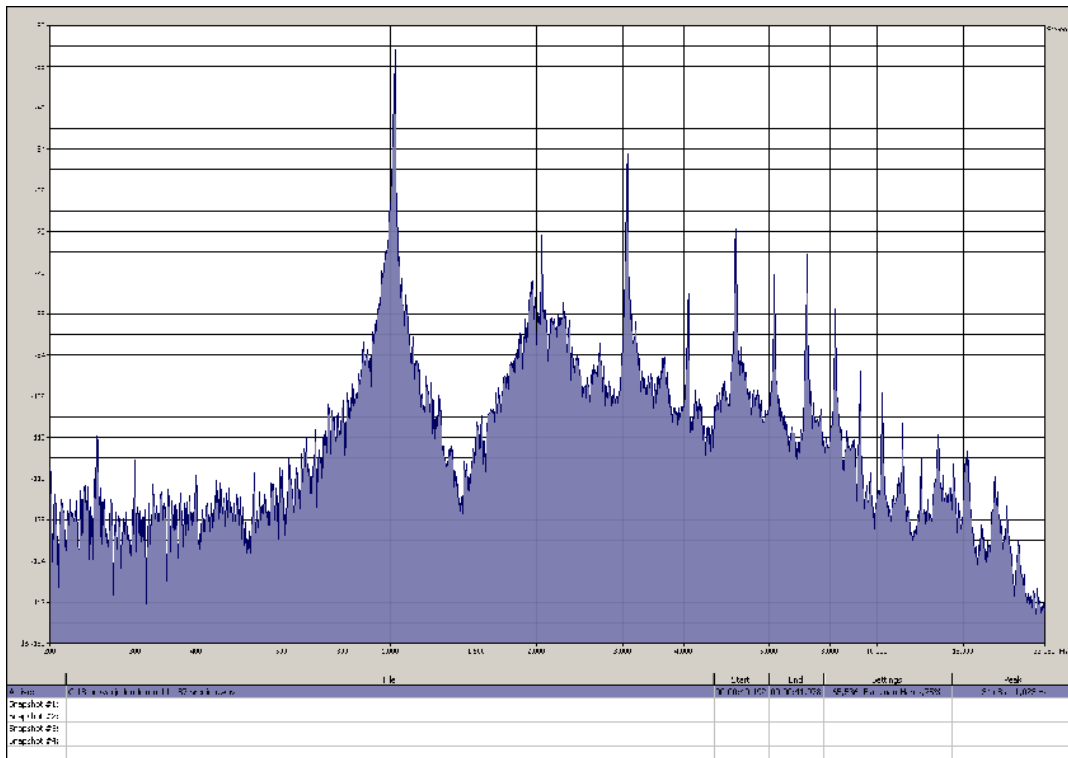


*Slika 1.5 Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

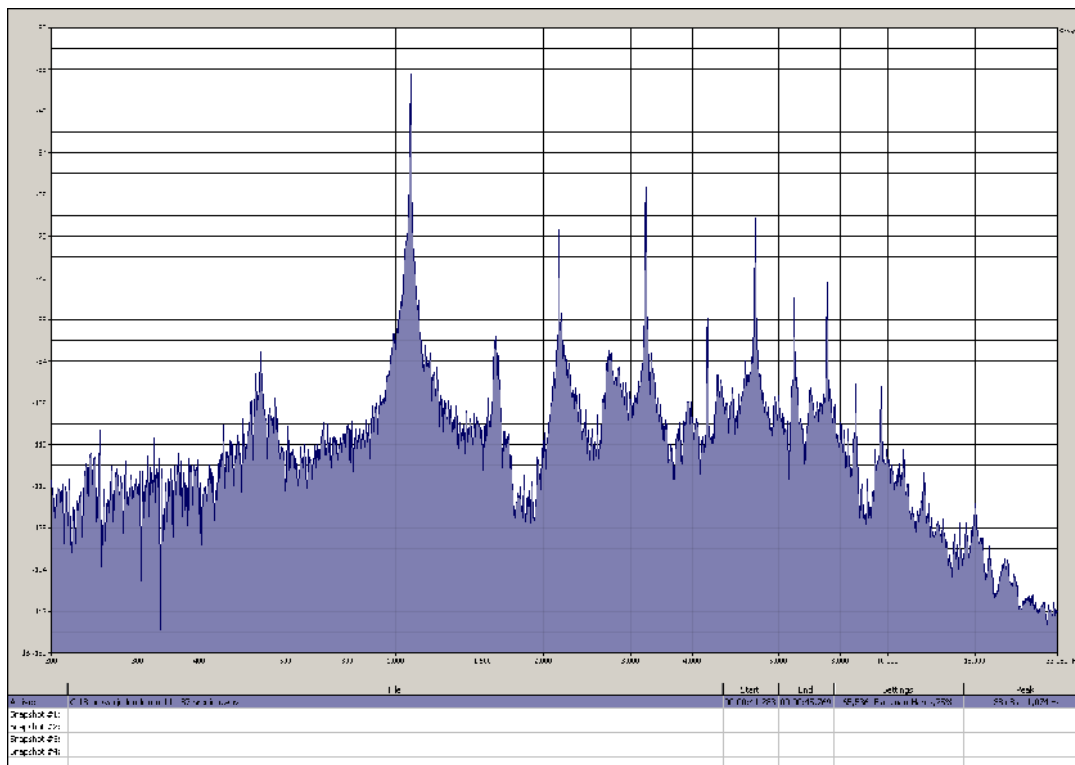


*Slika 1.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

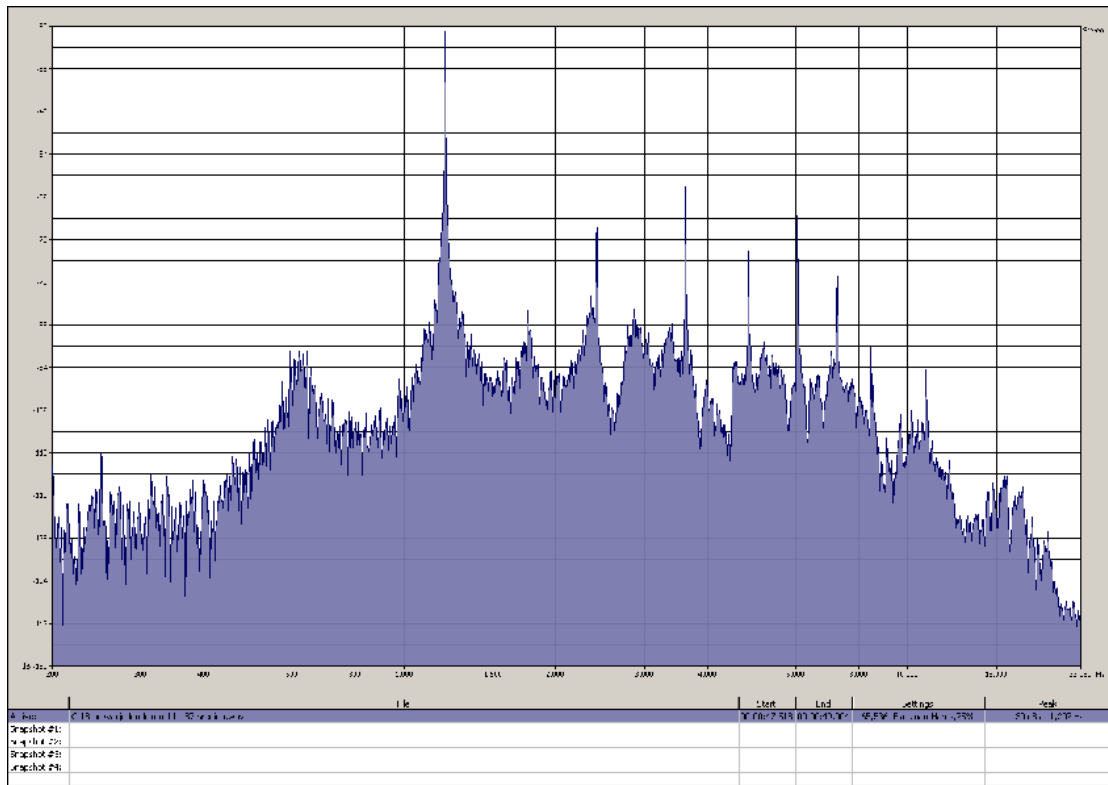




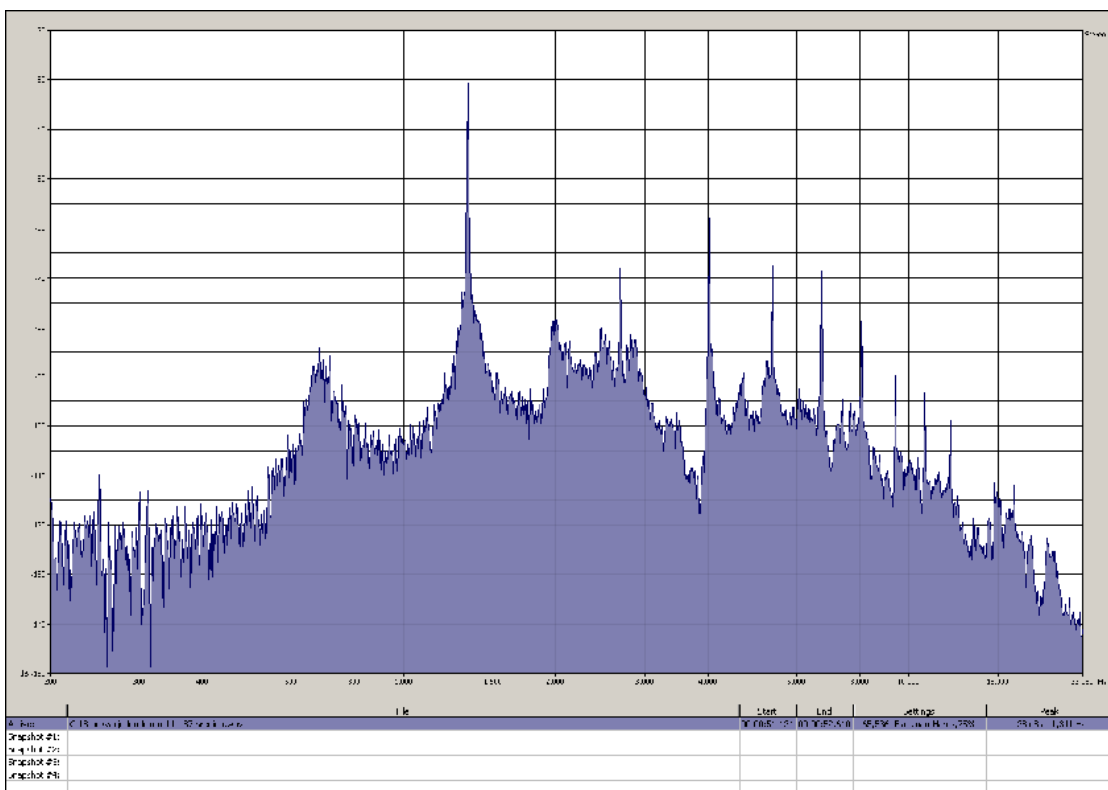
Slika 1.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



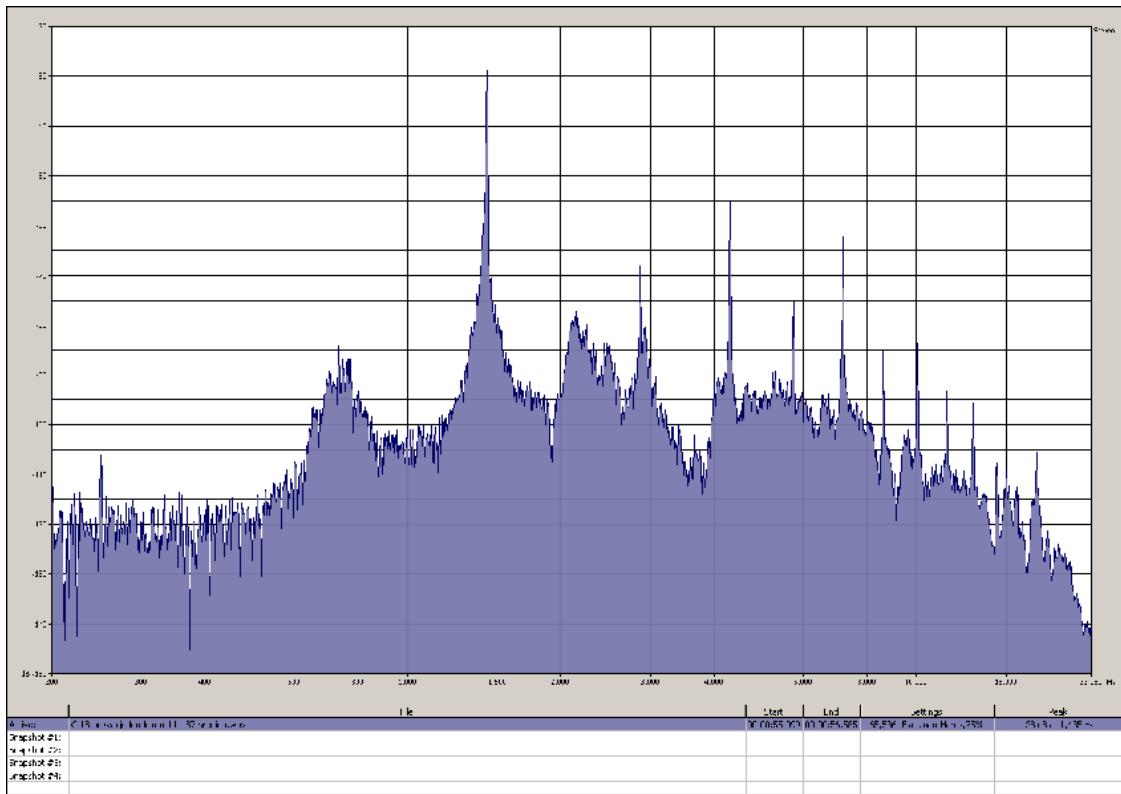
Slika 1.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



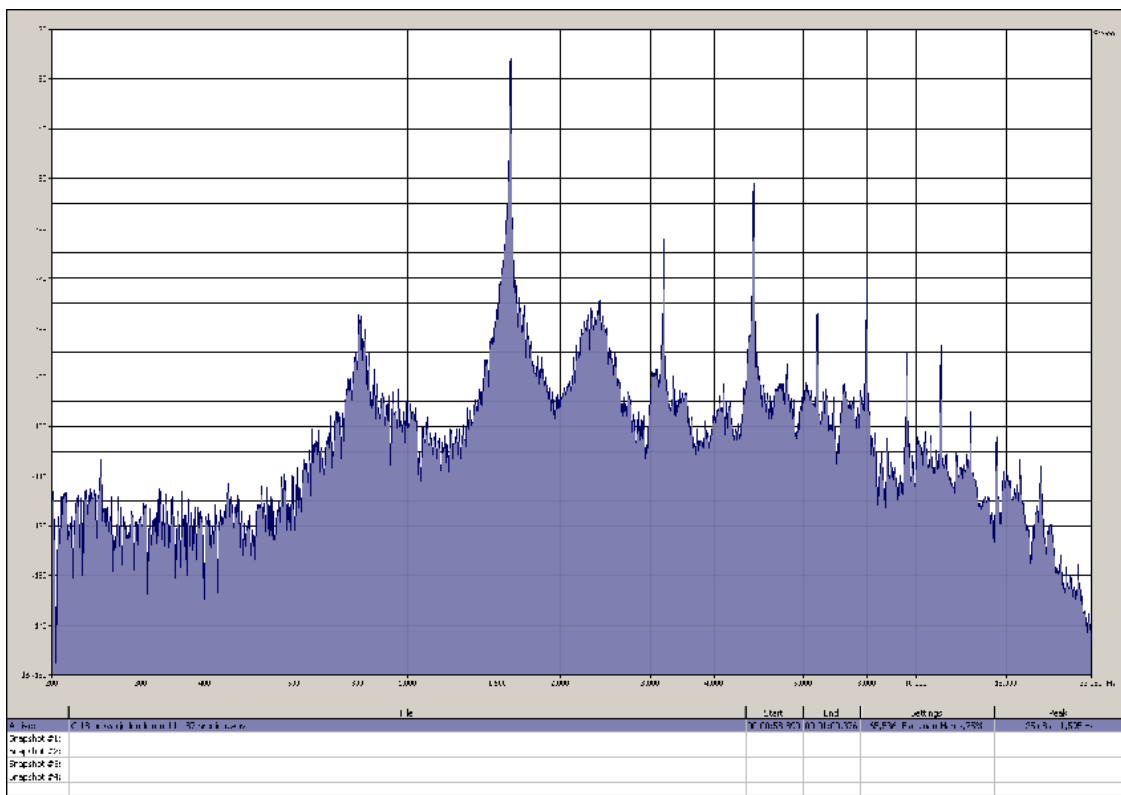
Slika 1.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



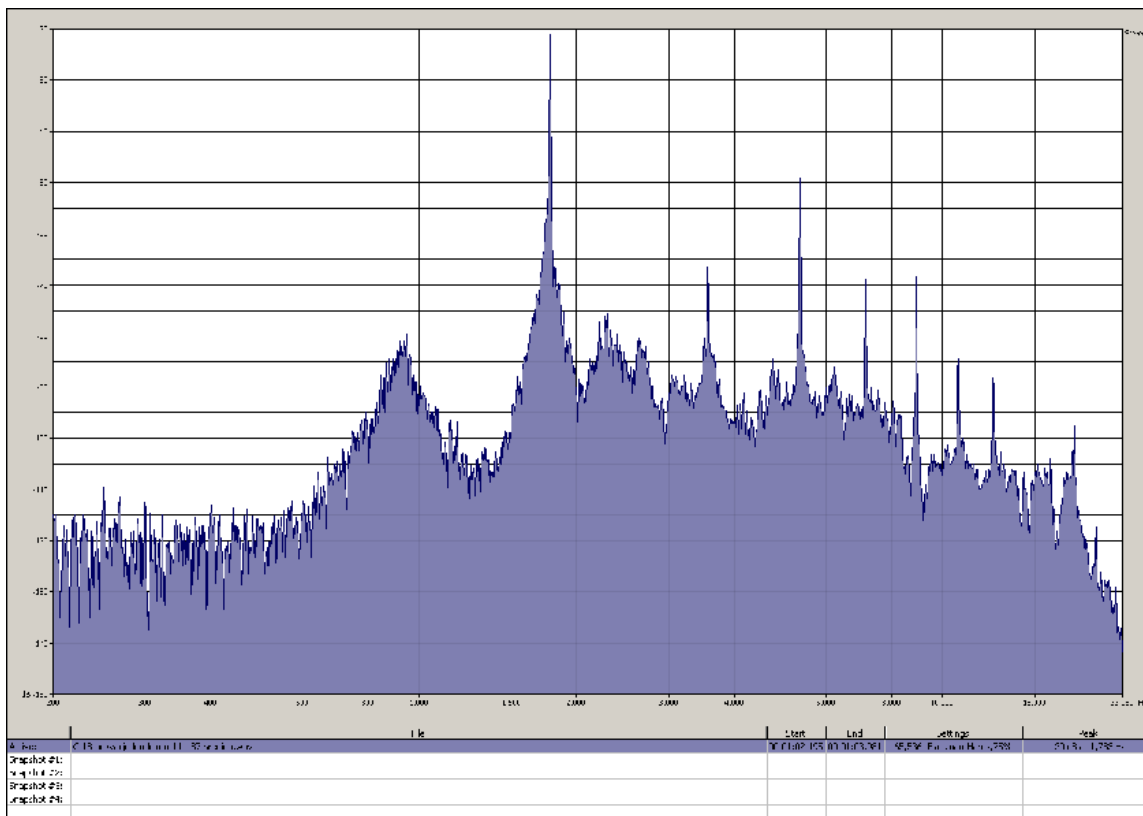
Slika 1.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



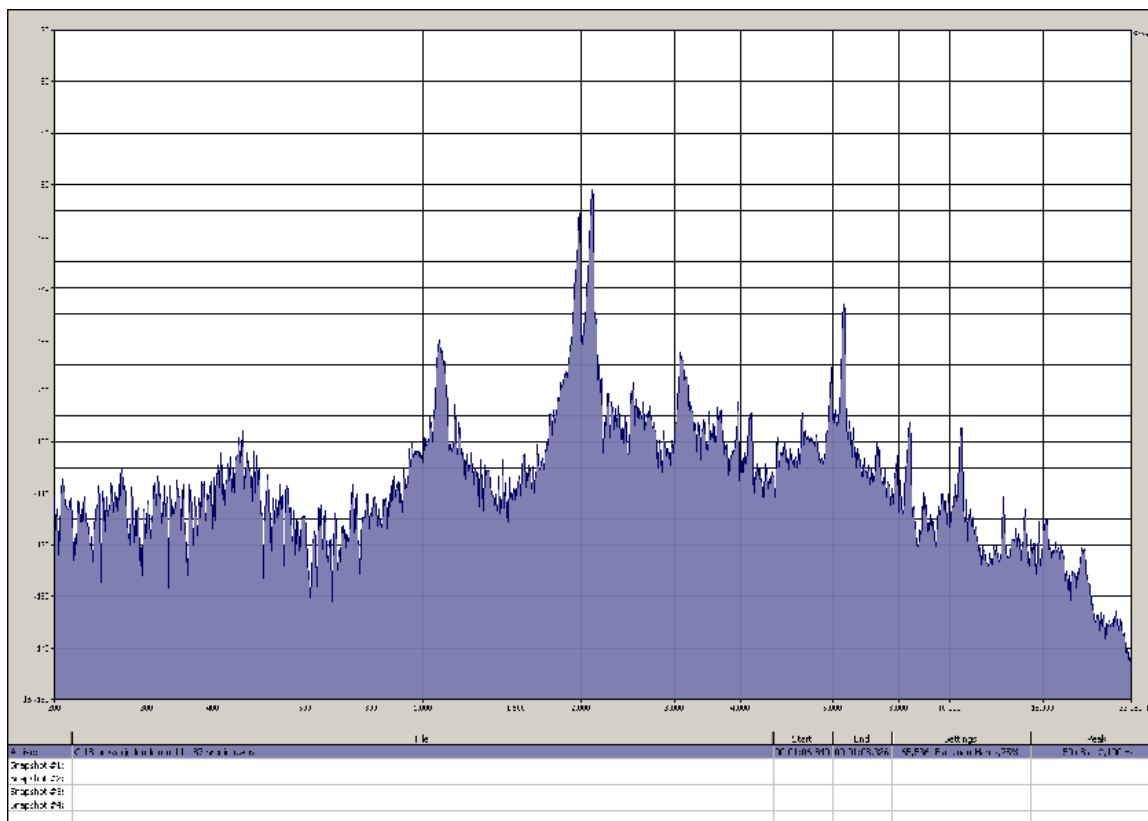
Slika 1.11: Frekvencijski spekter tona  $\hat{p}$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



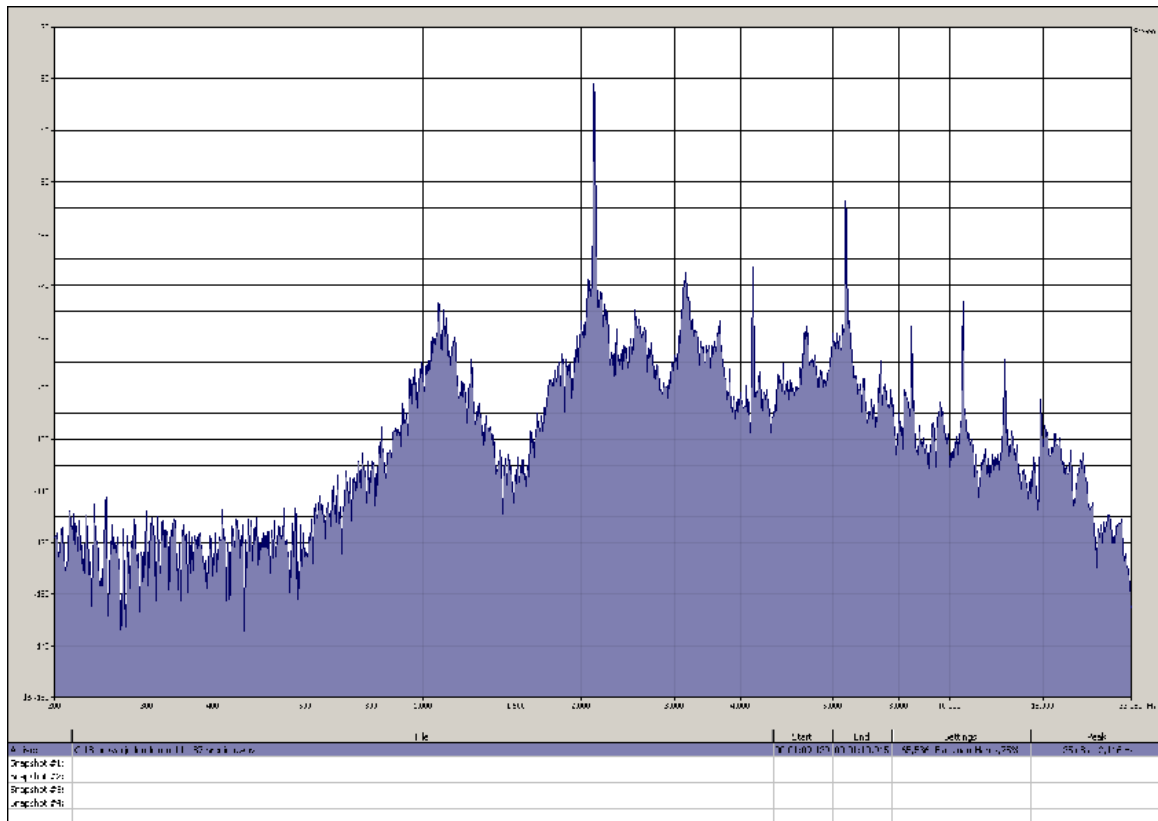
Slika 1.12: Frekvencijski spekter tona  $\hat{g}$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)



*Slika 1.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

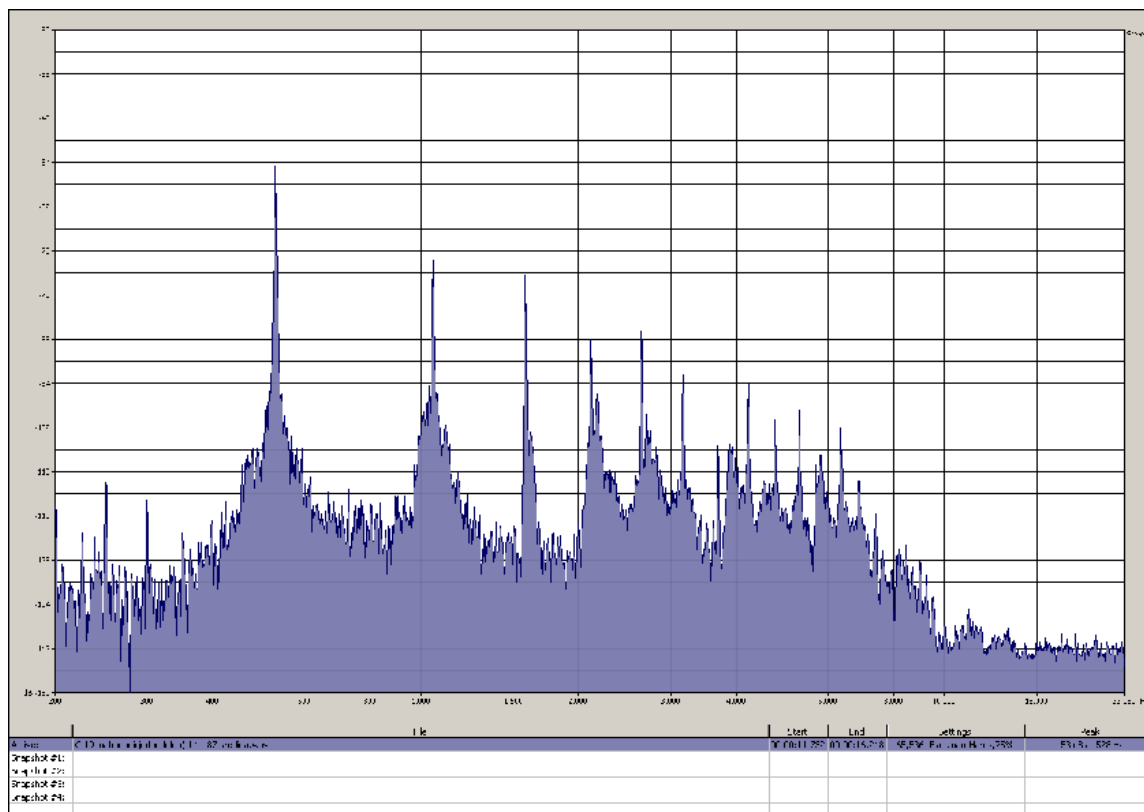


*Slika 1.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

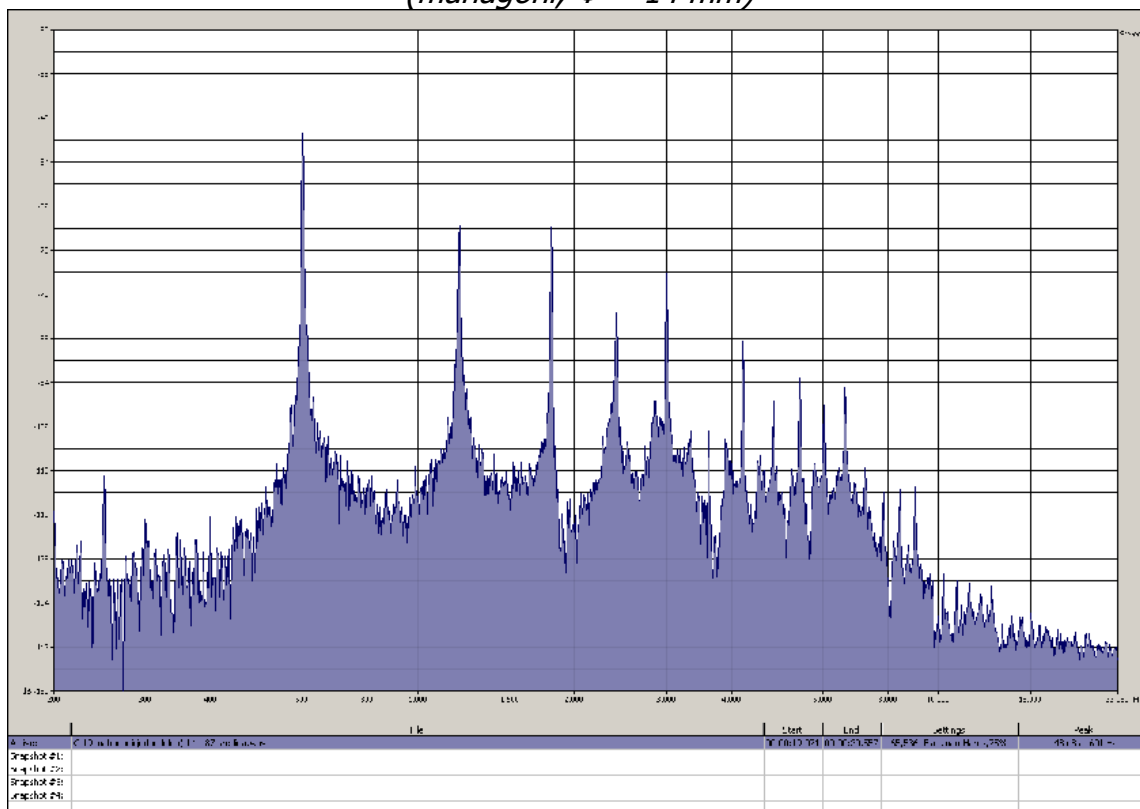


*Slika 1.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 18 (bukva,  $\Phi = 14$  mm)*

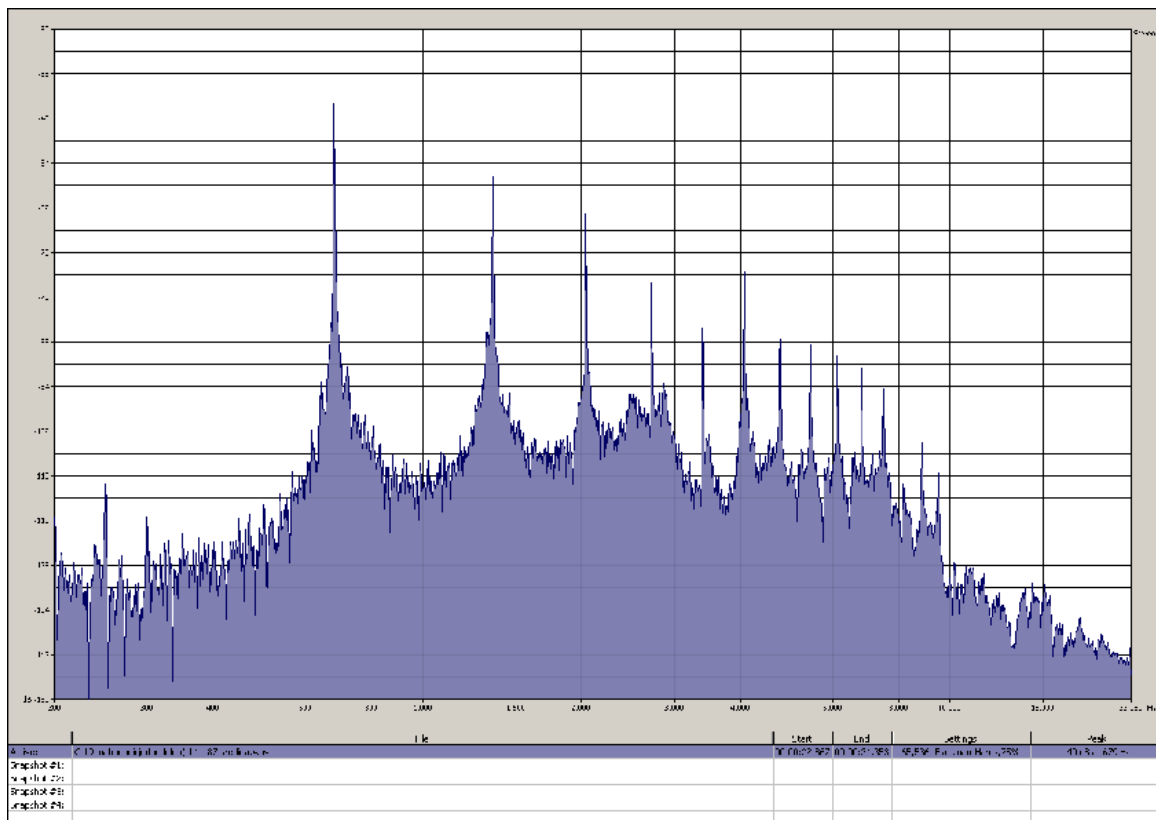
## DODATAK 2: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 19 (mahagoni, $\Phi = 14$ mm)



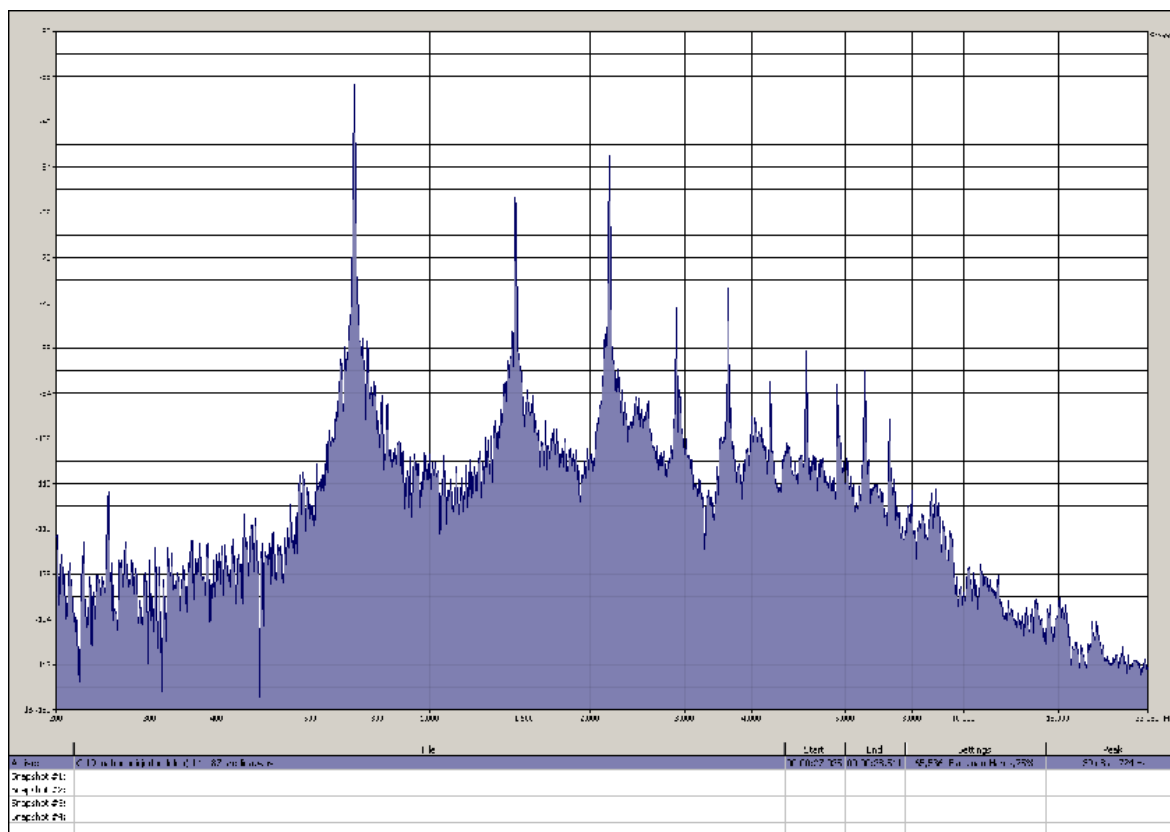
Slika 2.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



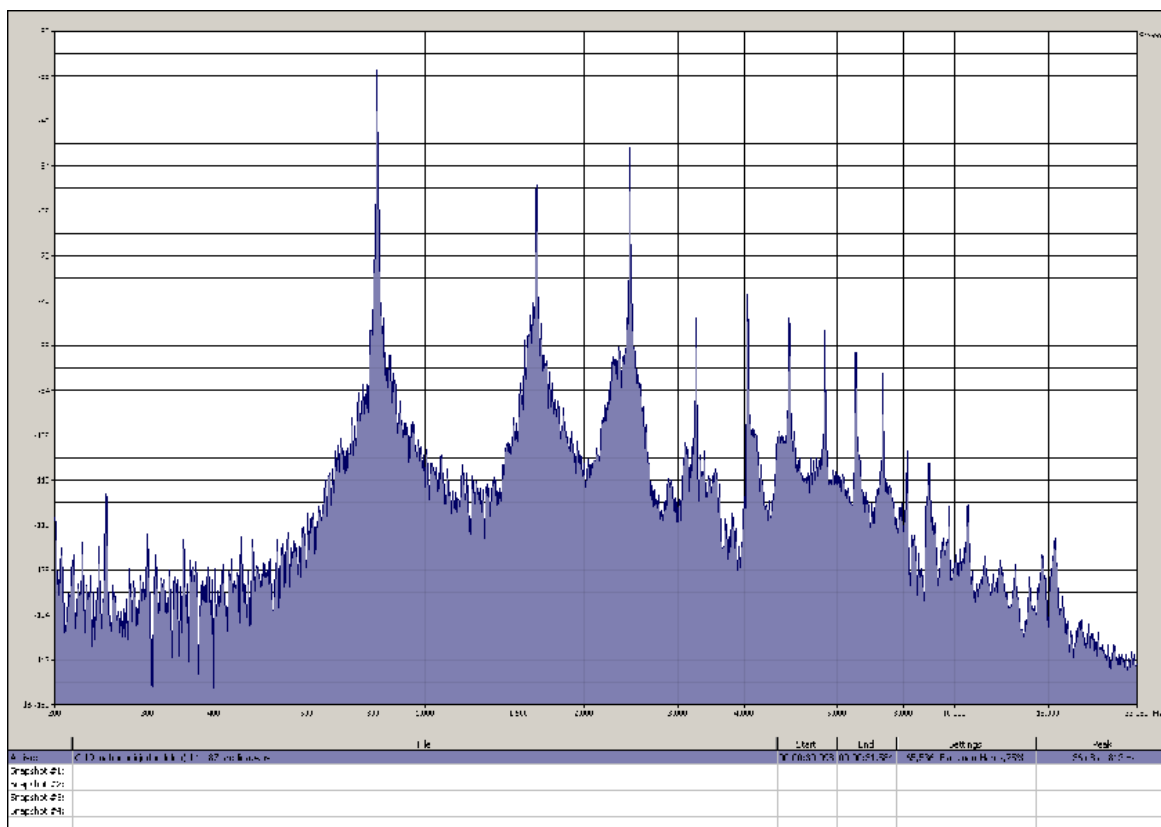
Slika 2.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



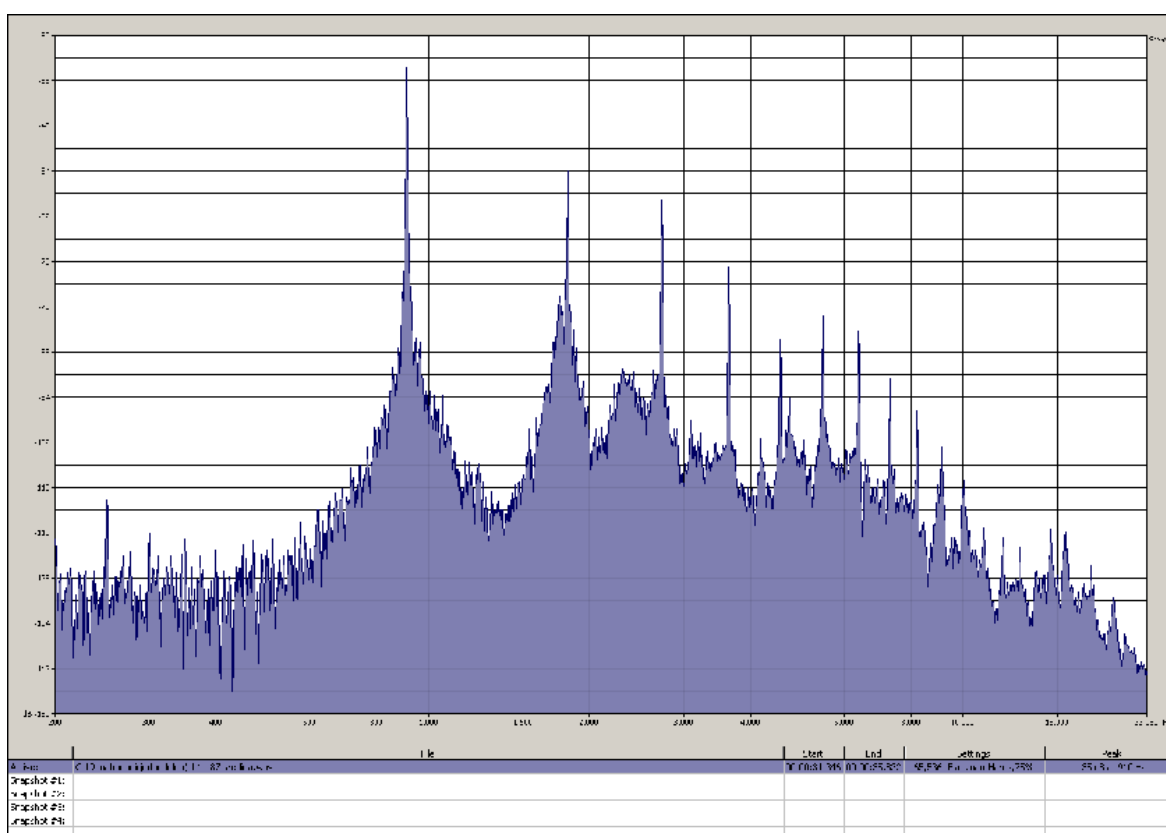
*Slika 2.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )*



*Slika 2.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )*

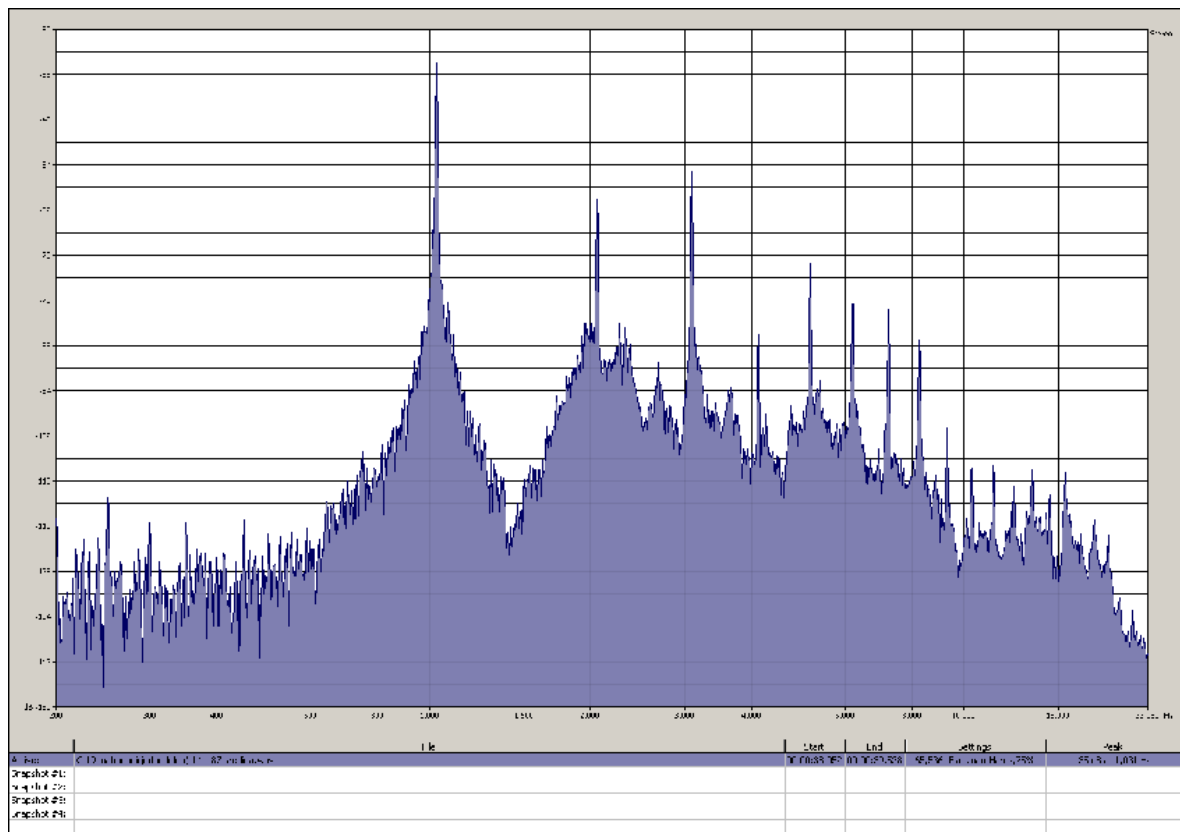


Slika 2.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

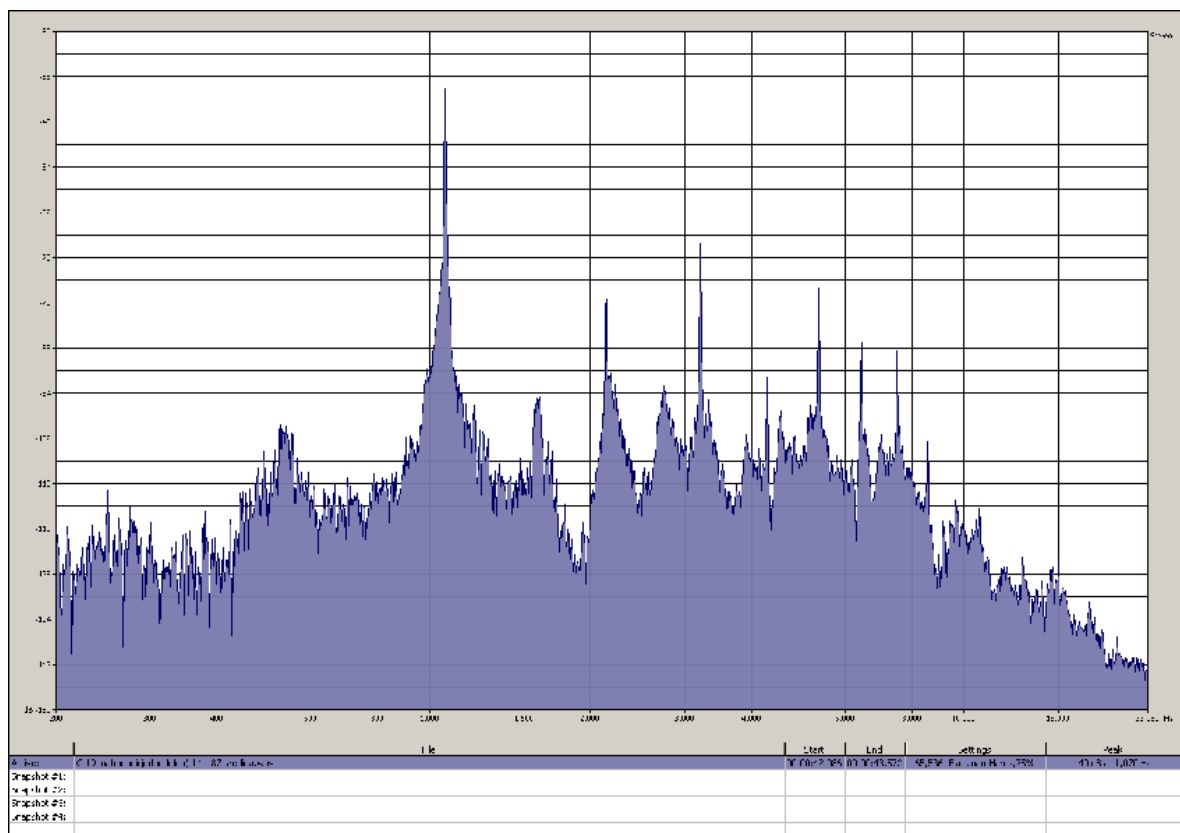


Slika 2.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

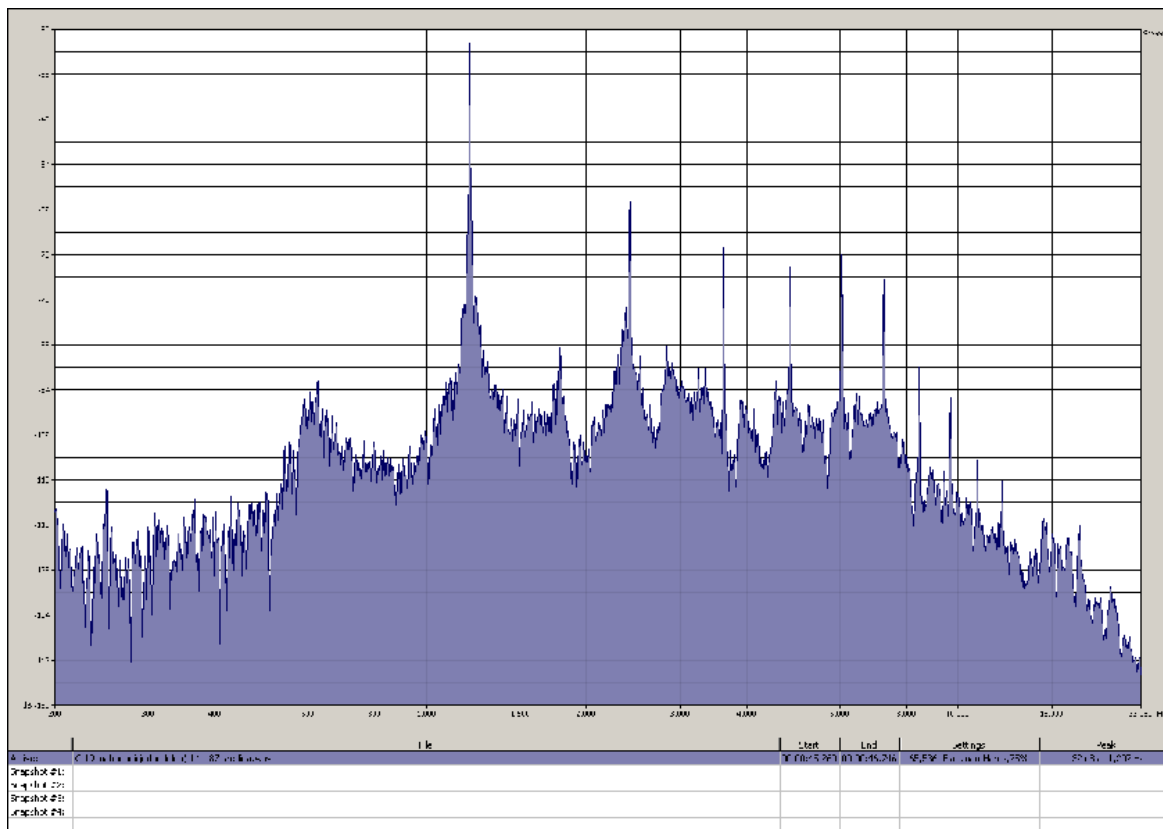




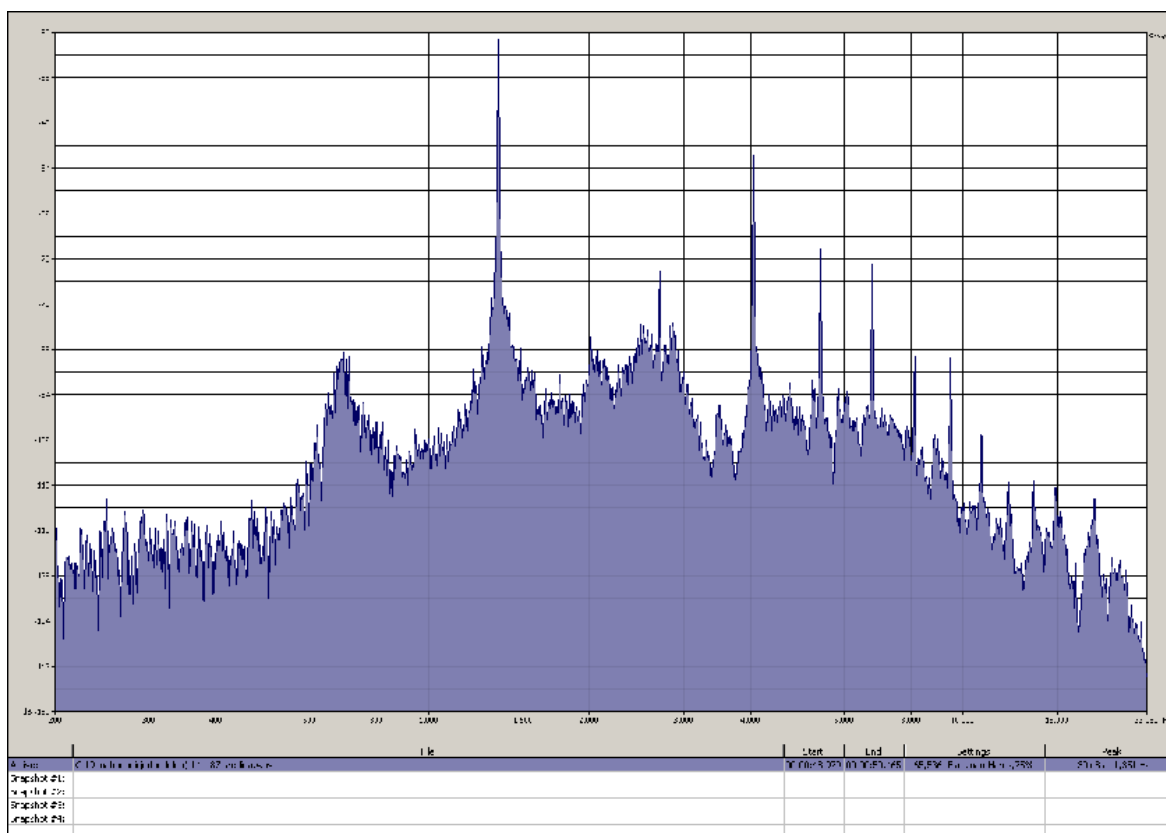
Slika 2.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



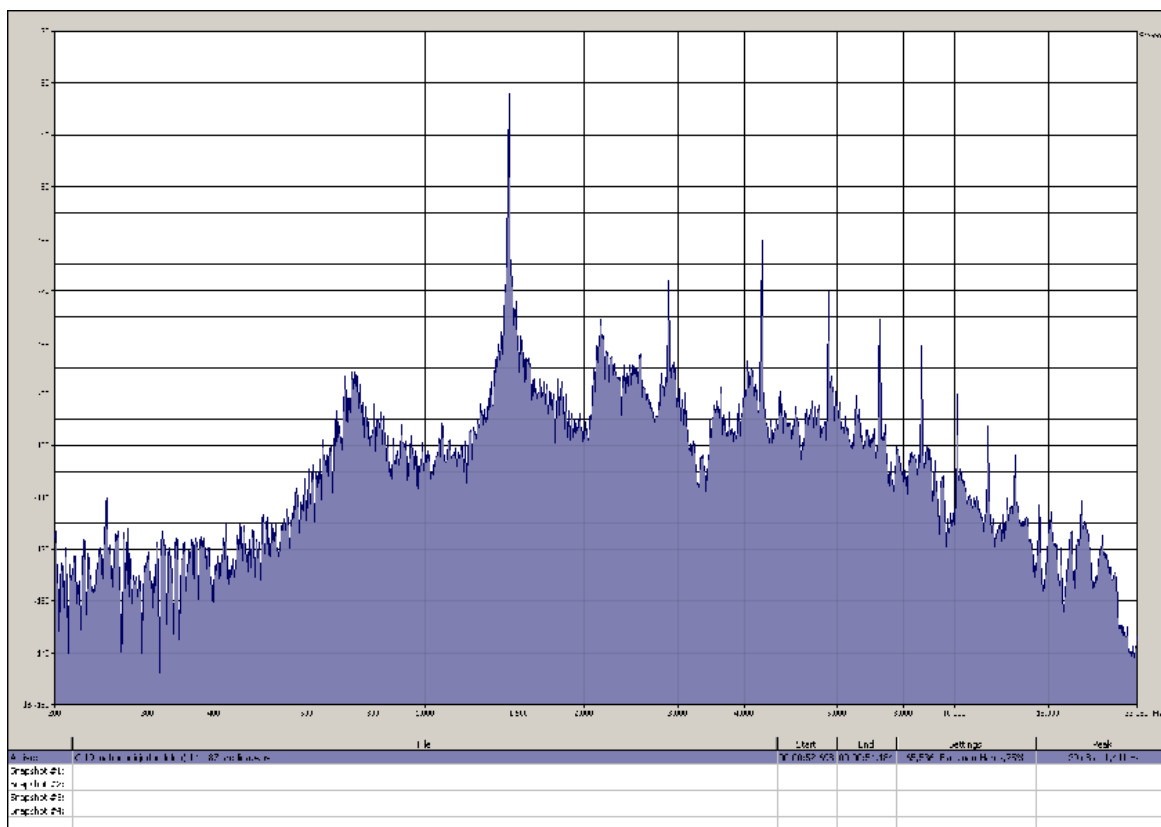
Slika 2.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



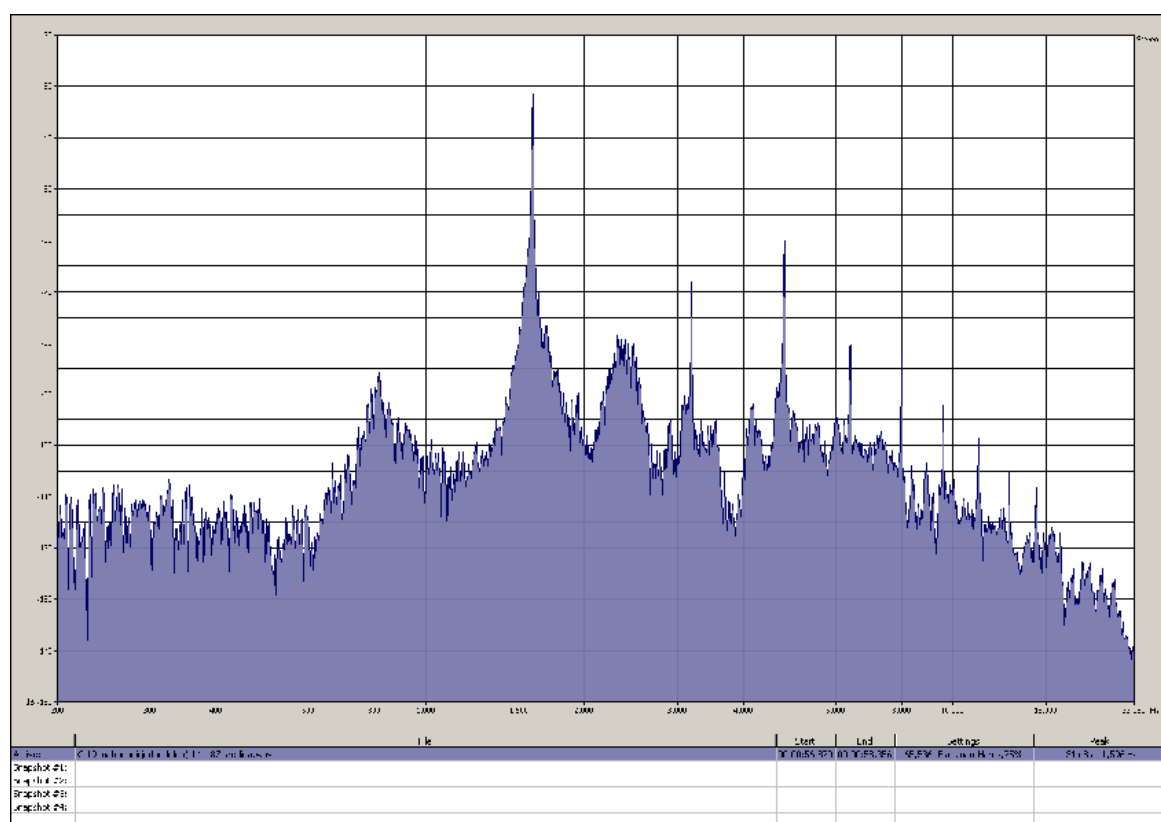
Slika 2.9: Frekvencijski spektar tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



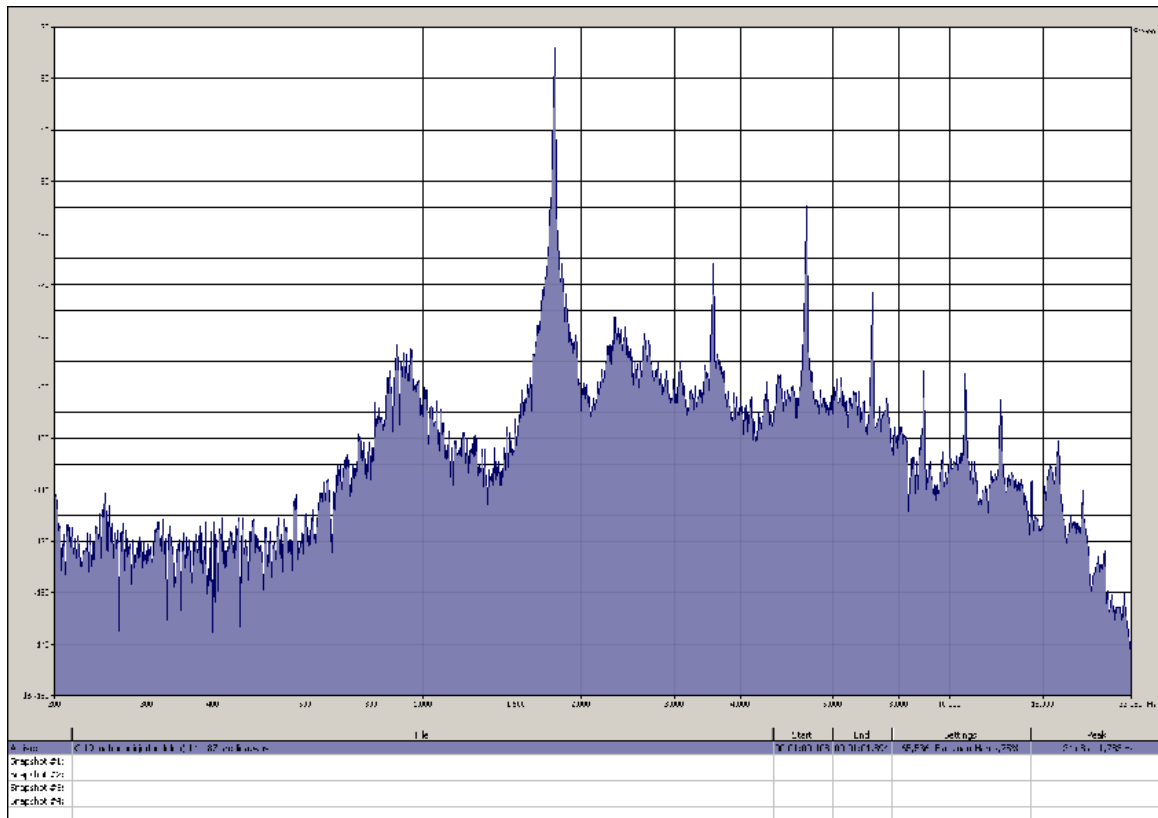
Slika 2.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



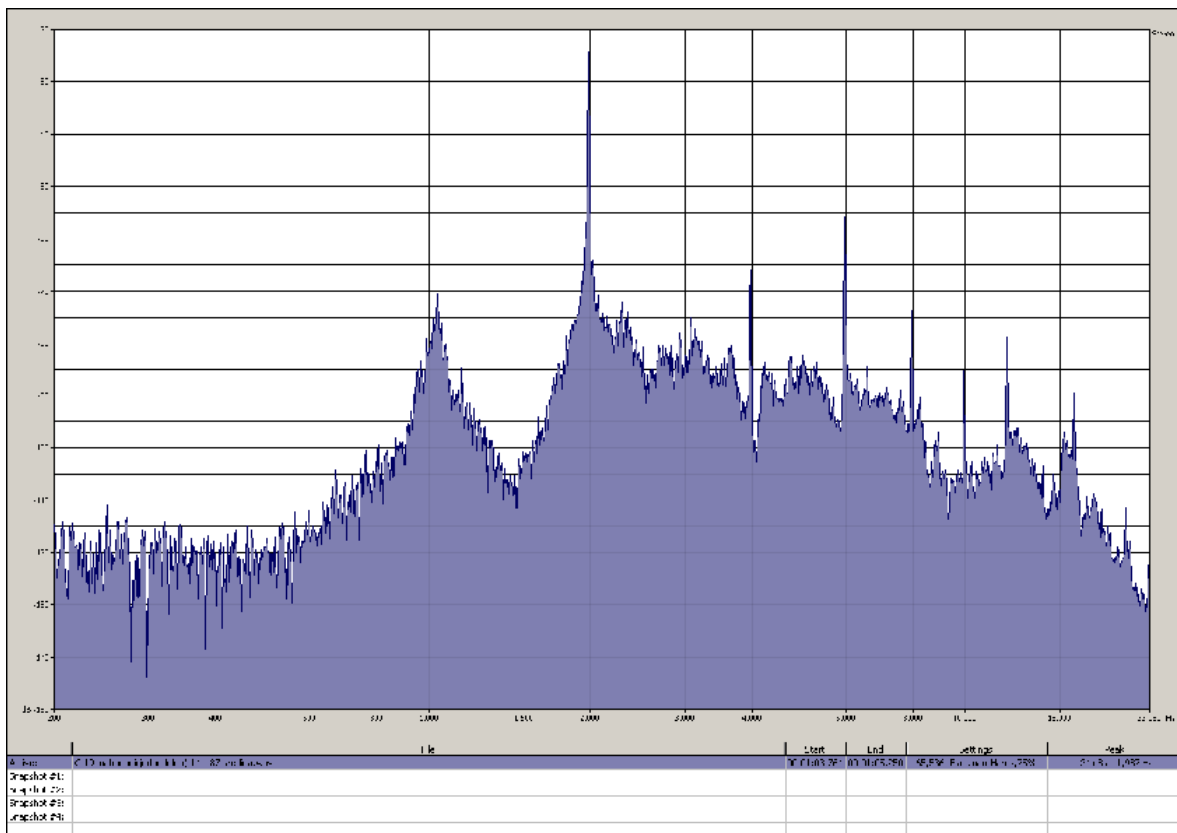
Slika 2.11: Frekvencijski spekter tona  $\bar{P}$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



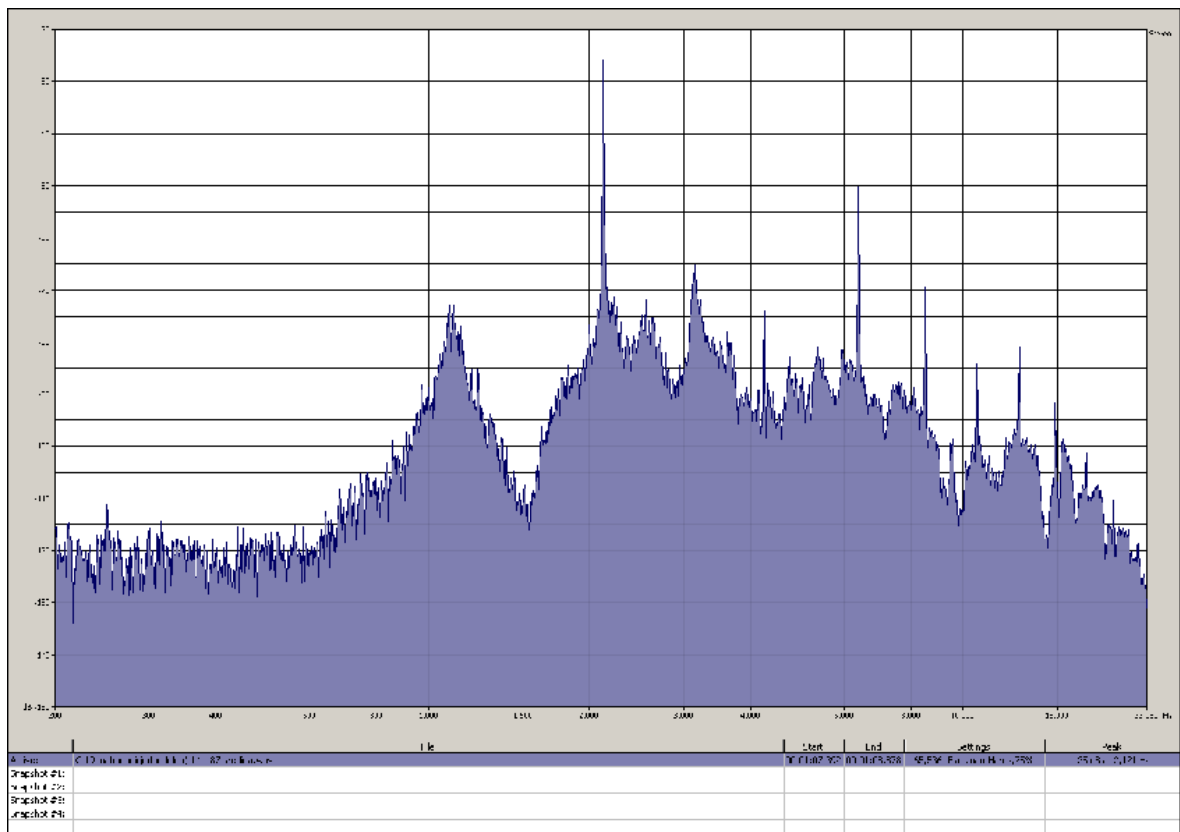
Slika 2.12: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 2.13: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

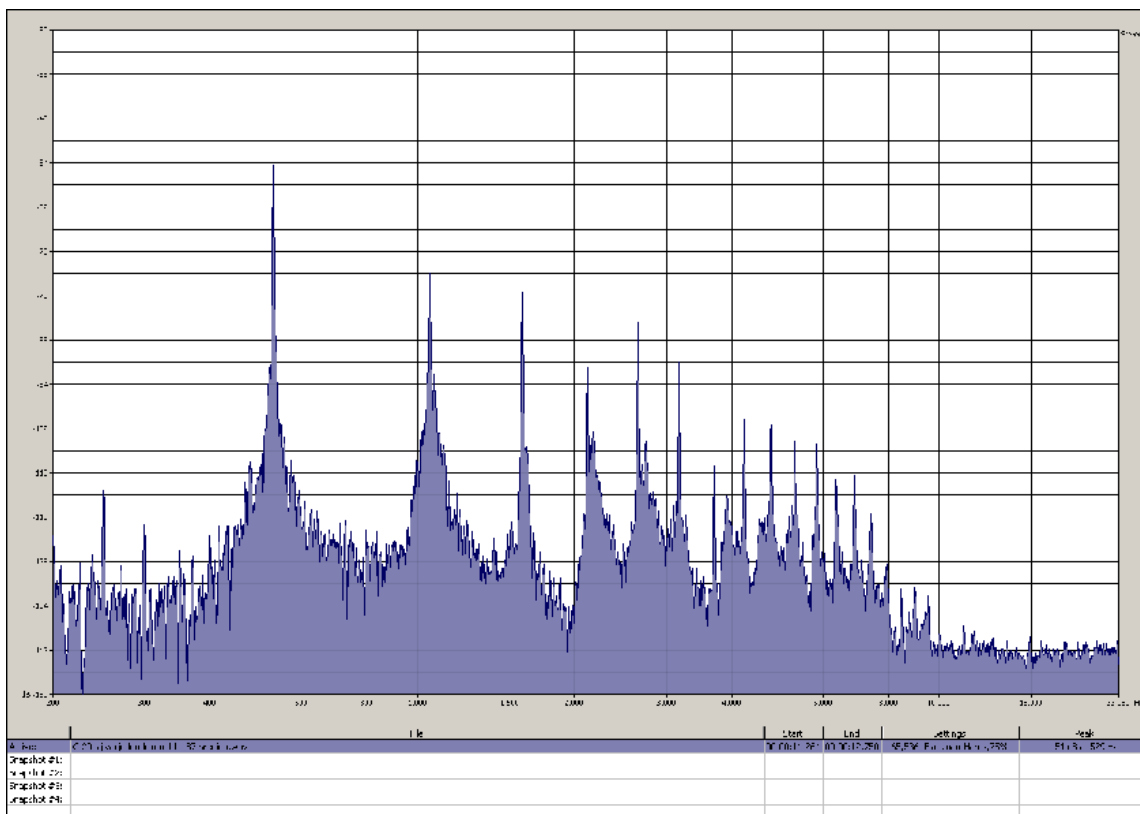


Slika 2.14: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

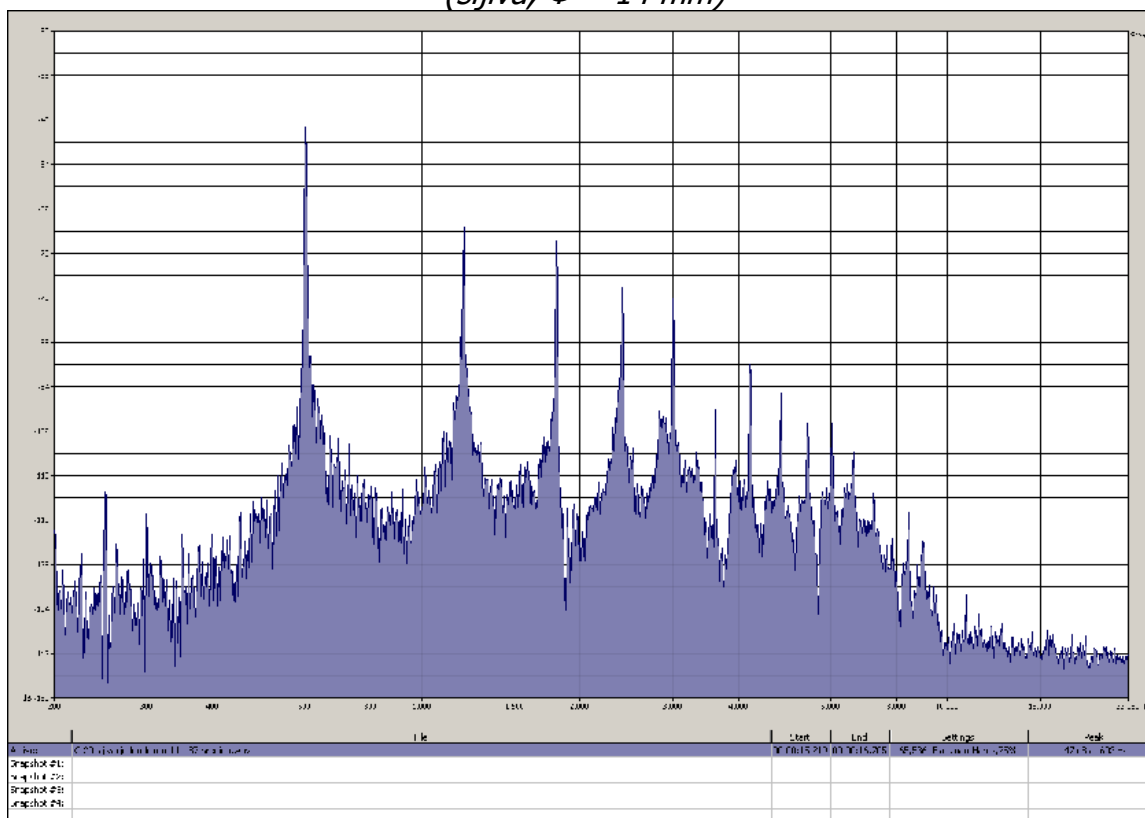


*Slika 2.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 19 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*

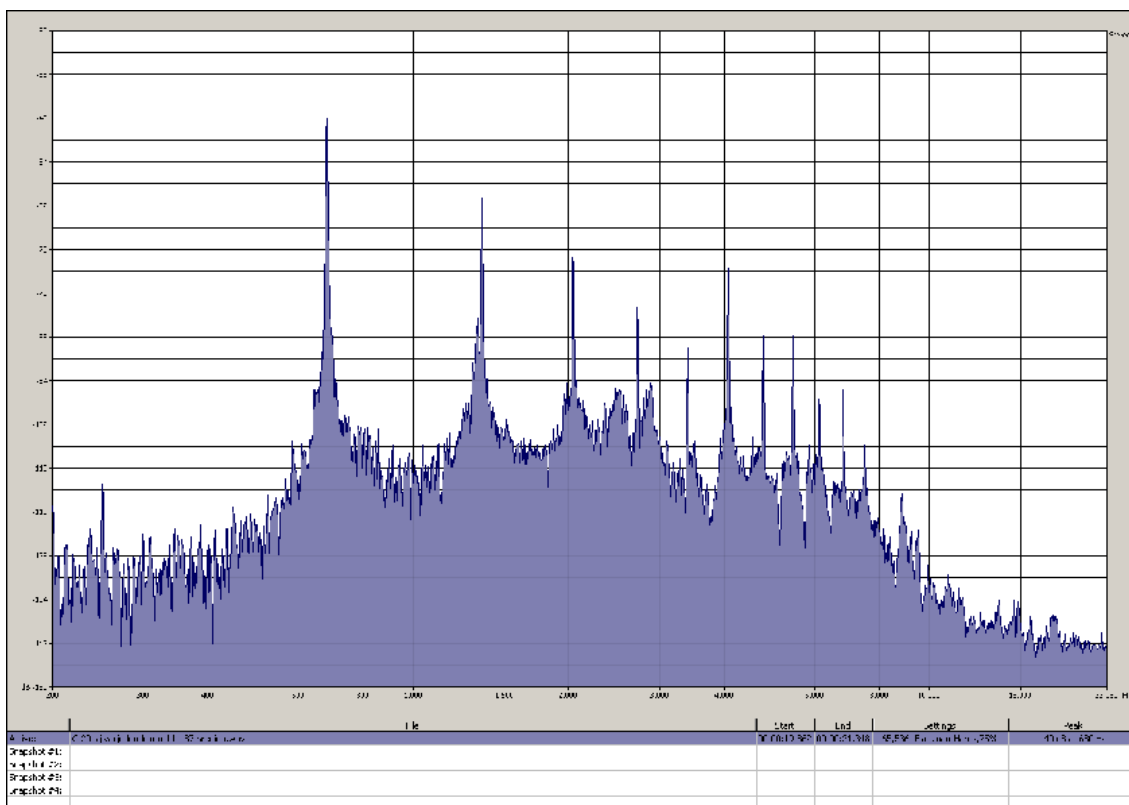
### DODATAK 3: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 20 (šljiva, $\Phi = 14$ mm)



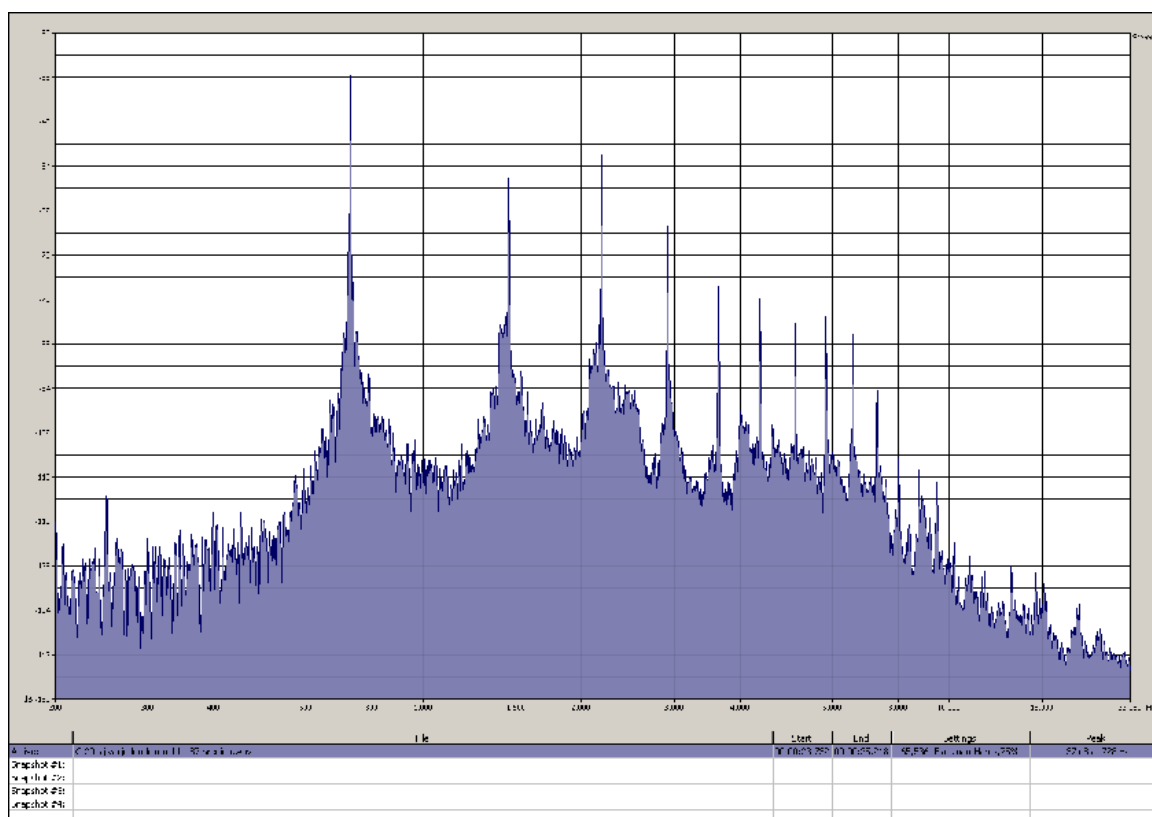
Slika 3.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 20  
(šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



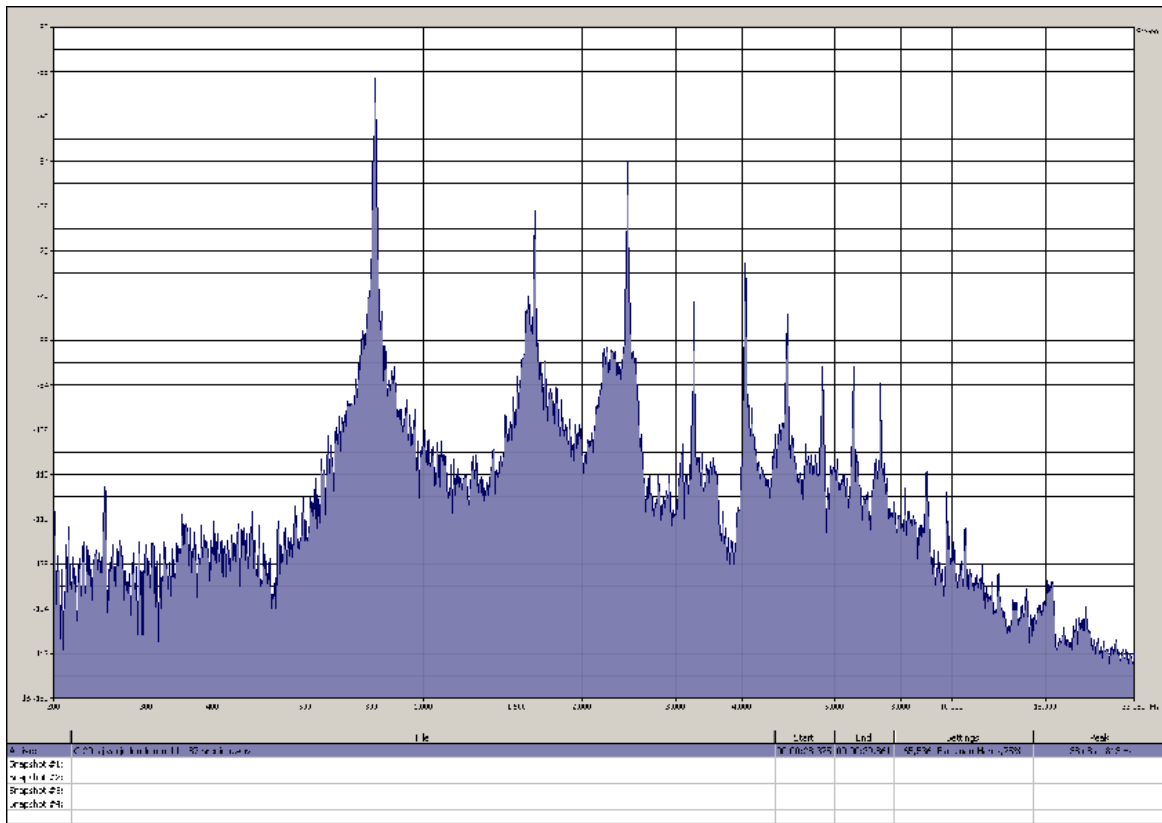
Slika 3.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 20  
(šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



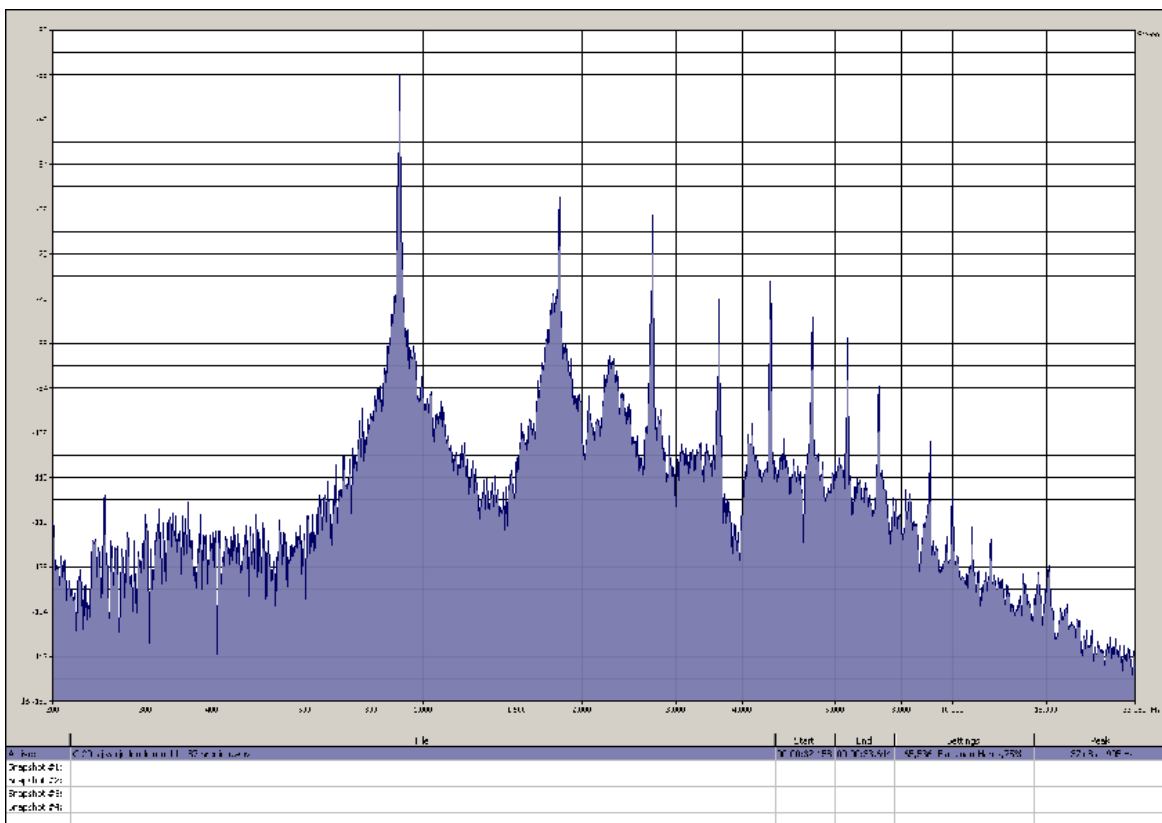
Slika 3.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 3.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

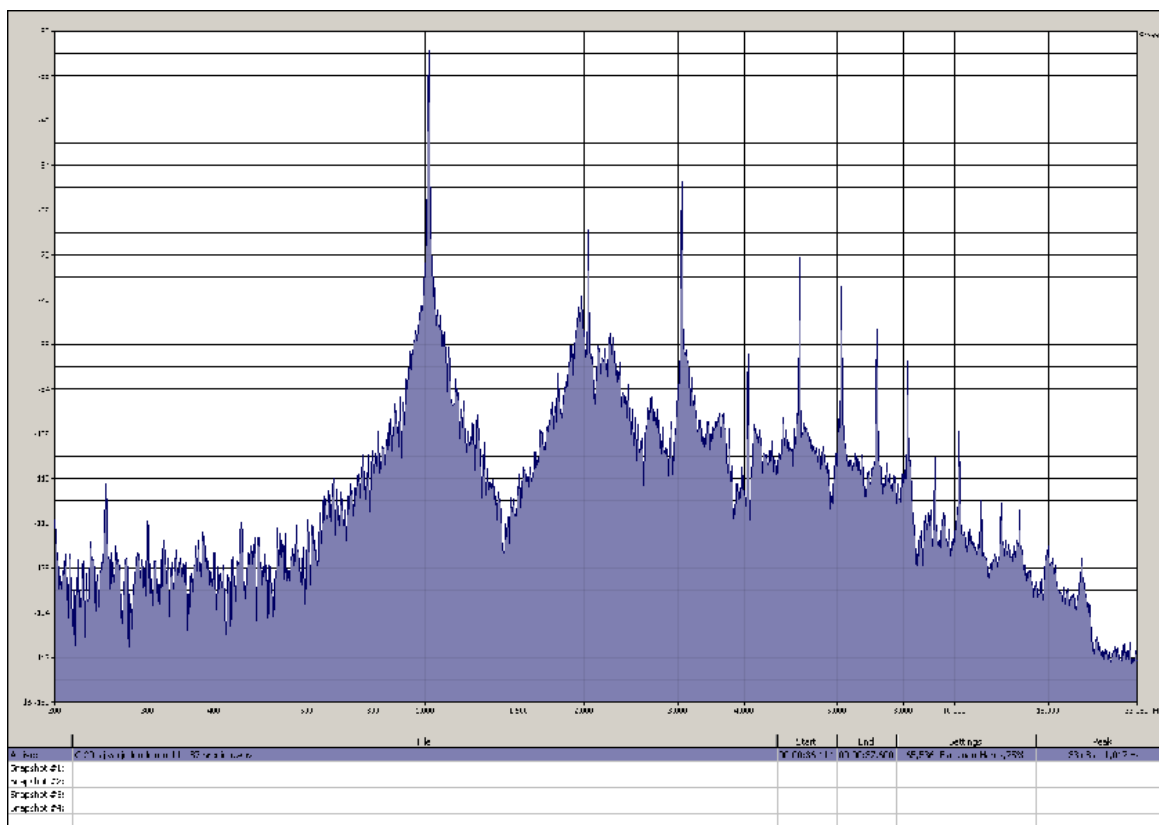


Slika 3.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

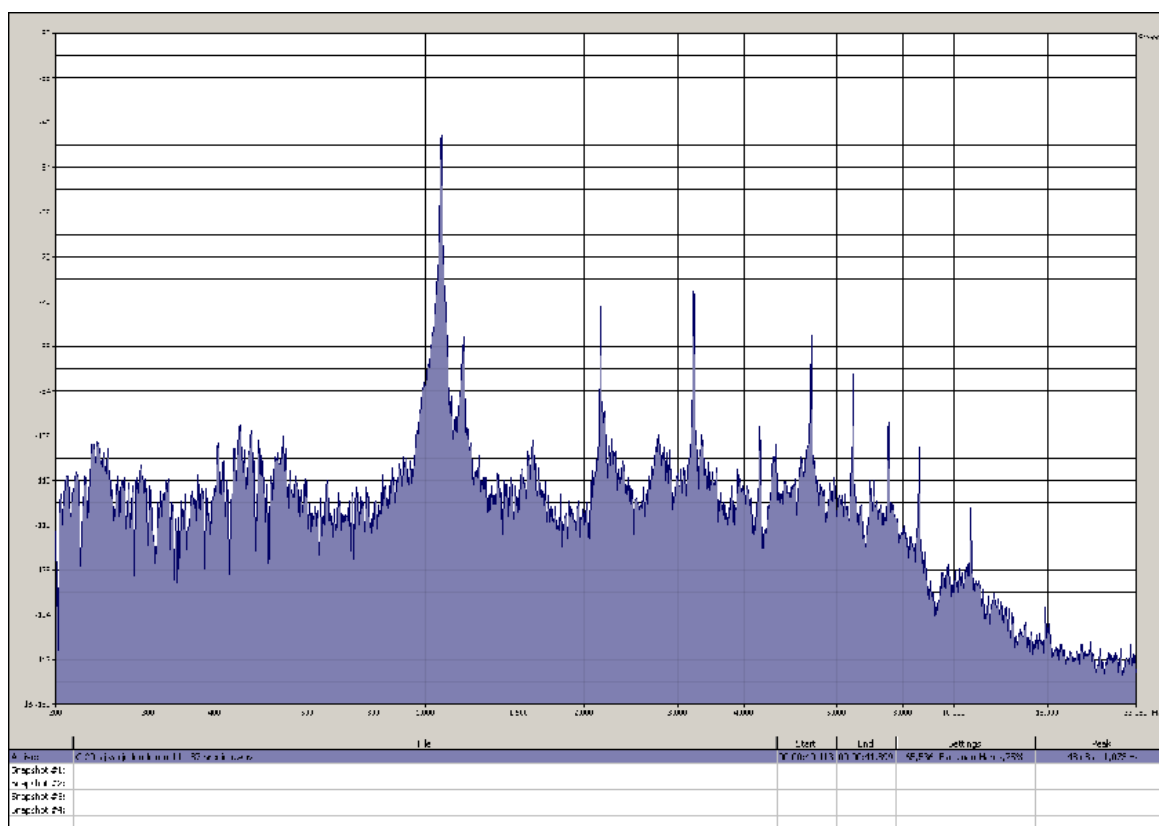


Slika 3.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

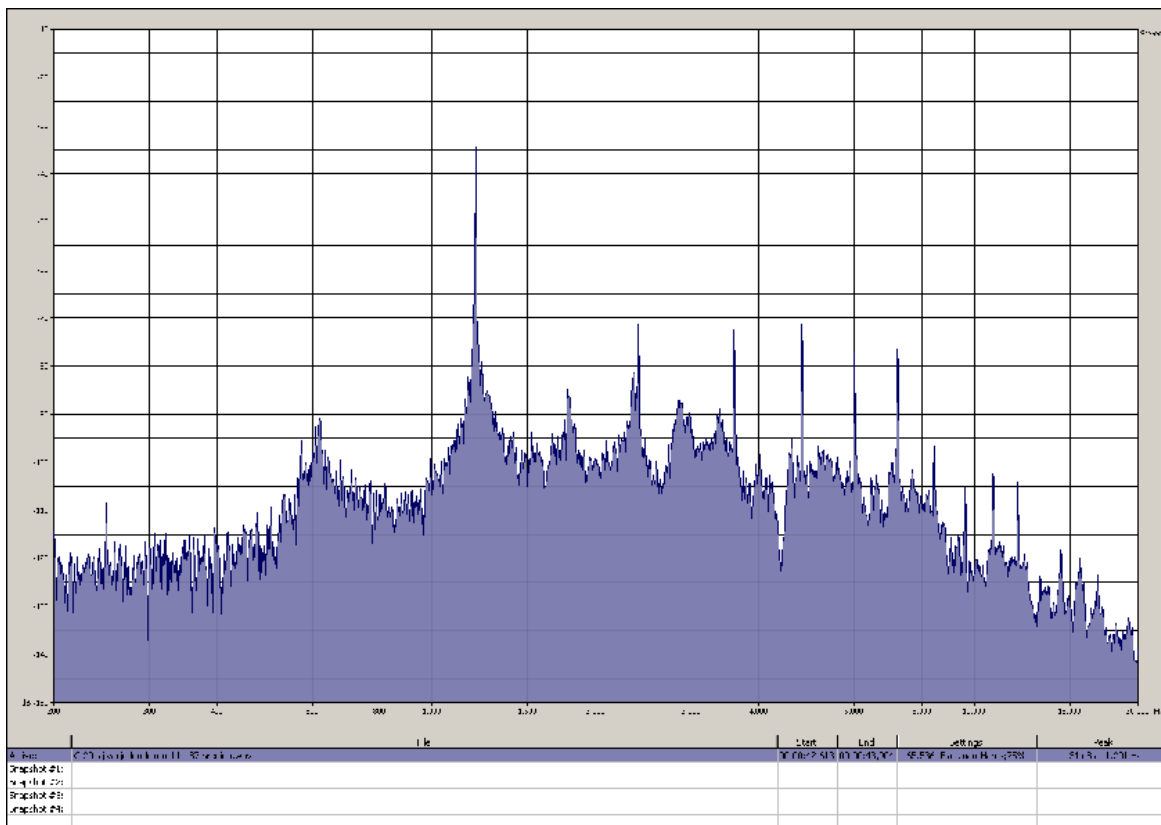




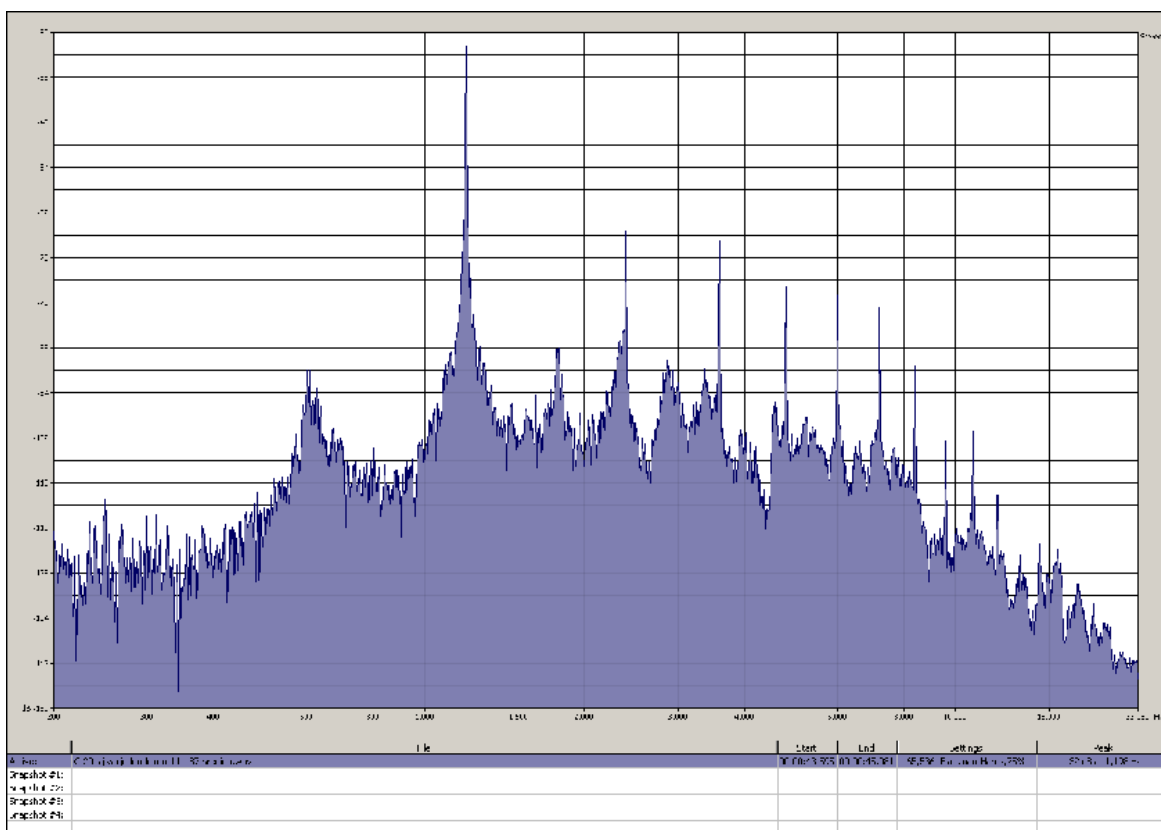
Slika 3.7: Frekvencijski spektar tona  $k^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



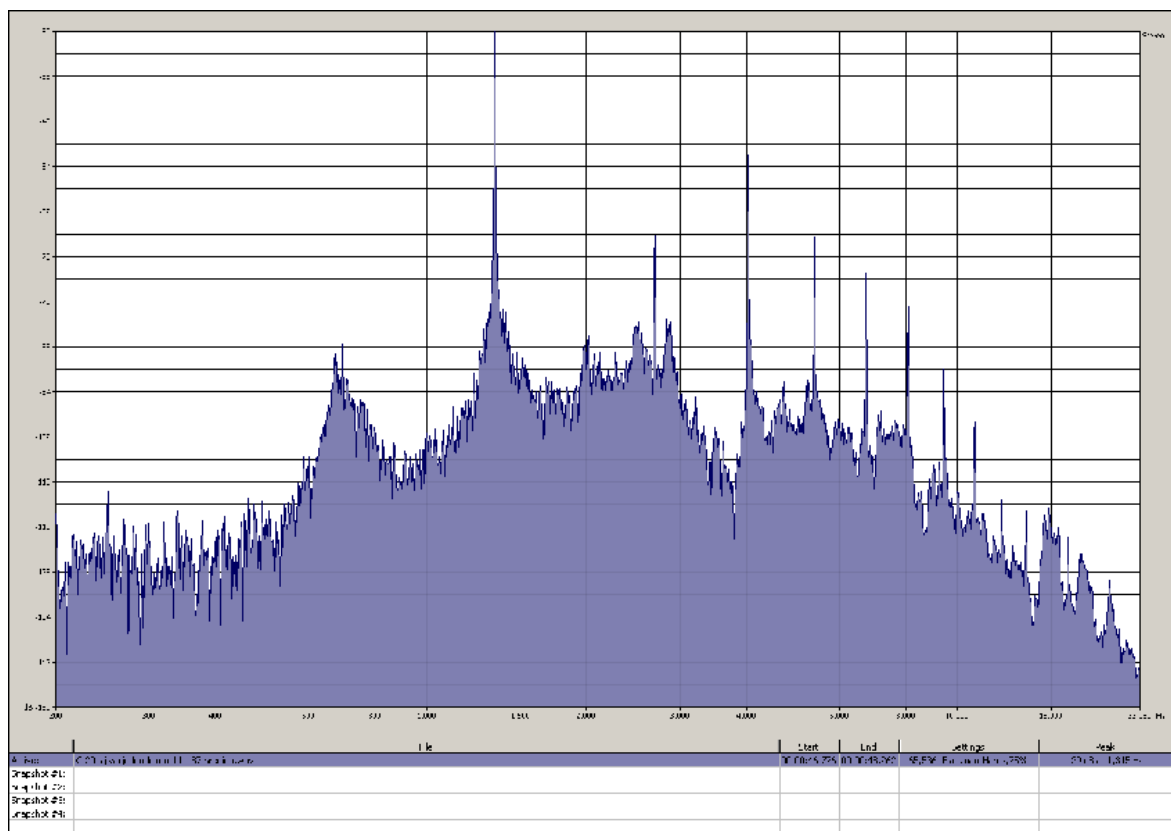
Slika 3.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



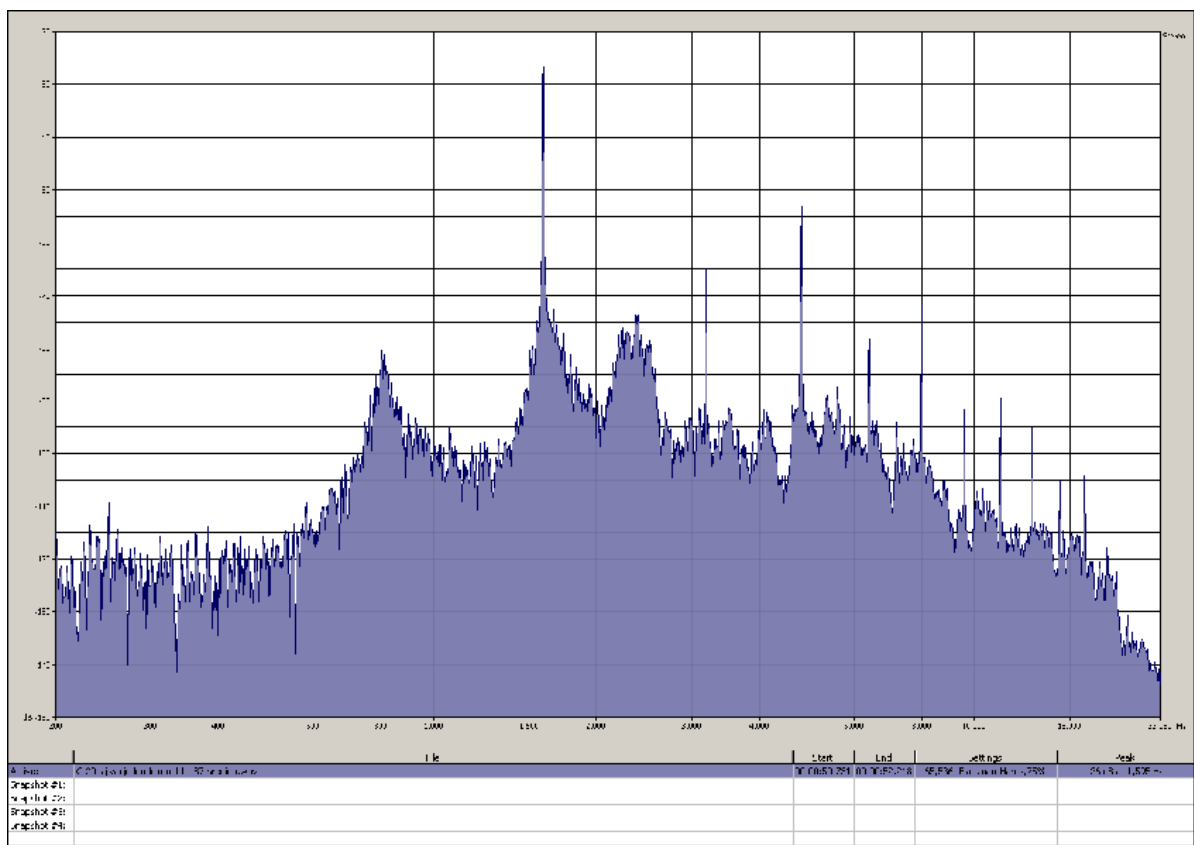
Slika 3.9: Frekvencijski spekter tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



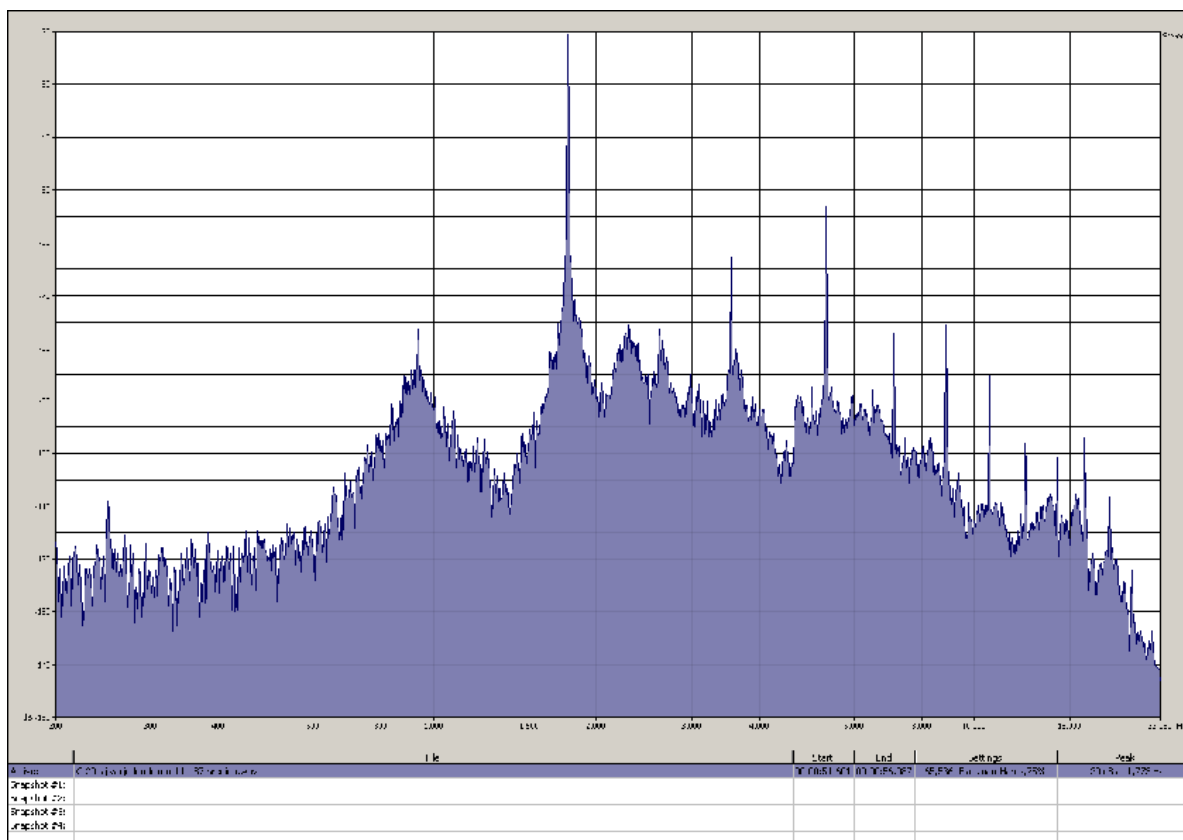
Slika 3.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)



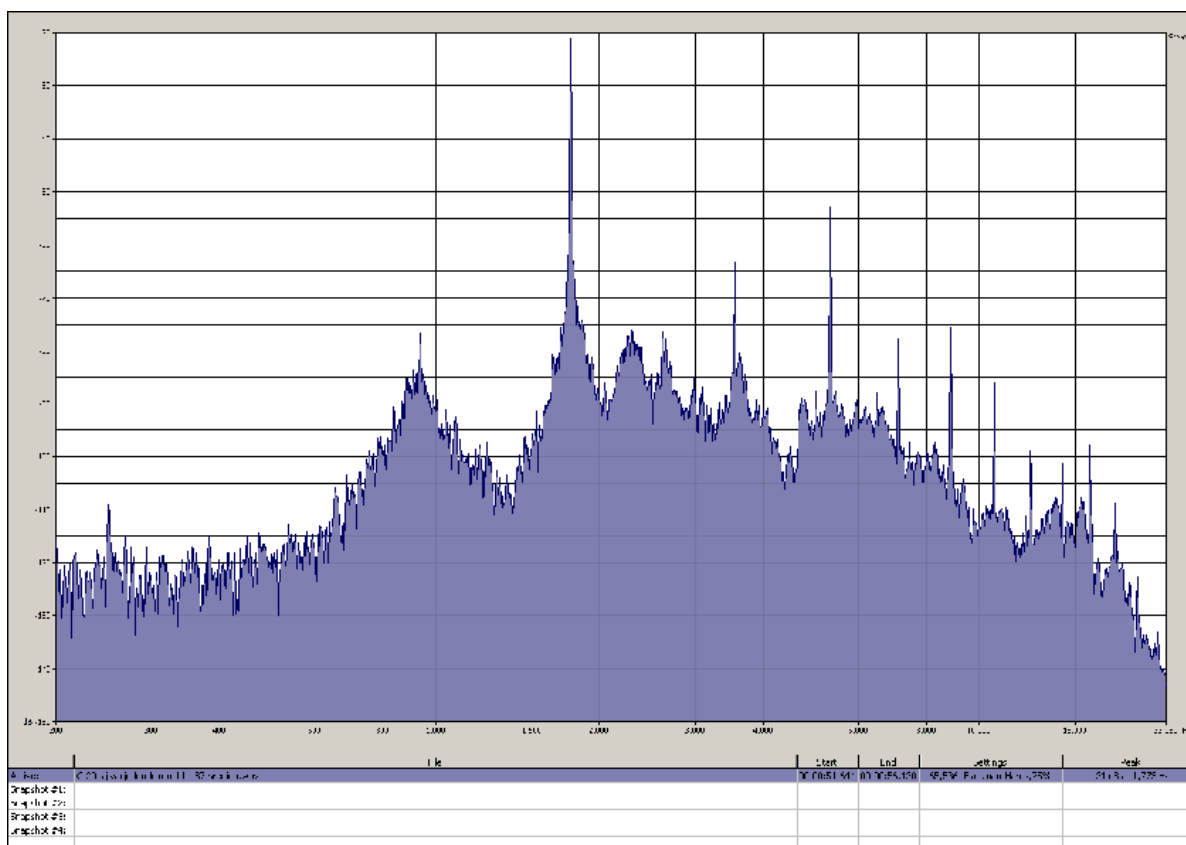
Slika 3.11: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



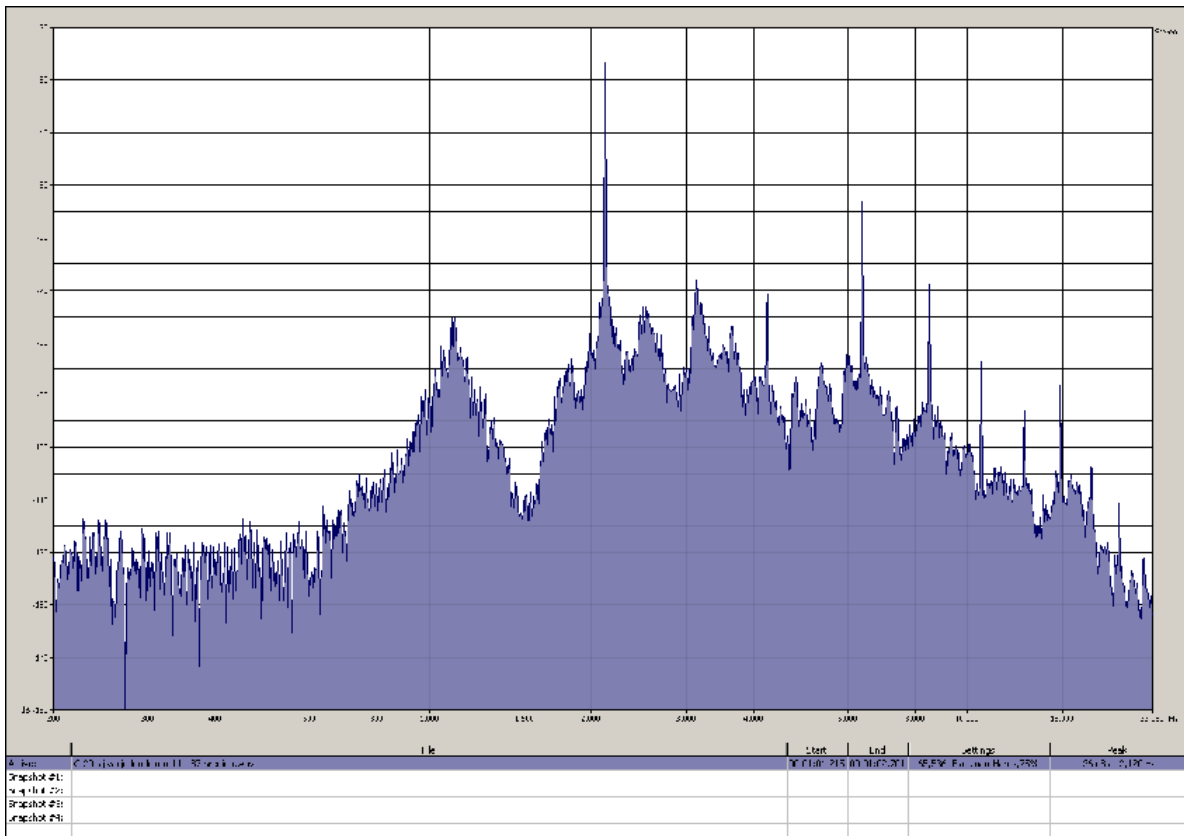
Slika 3.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



Slika 3.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

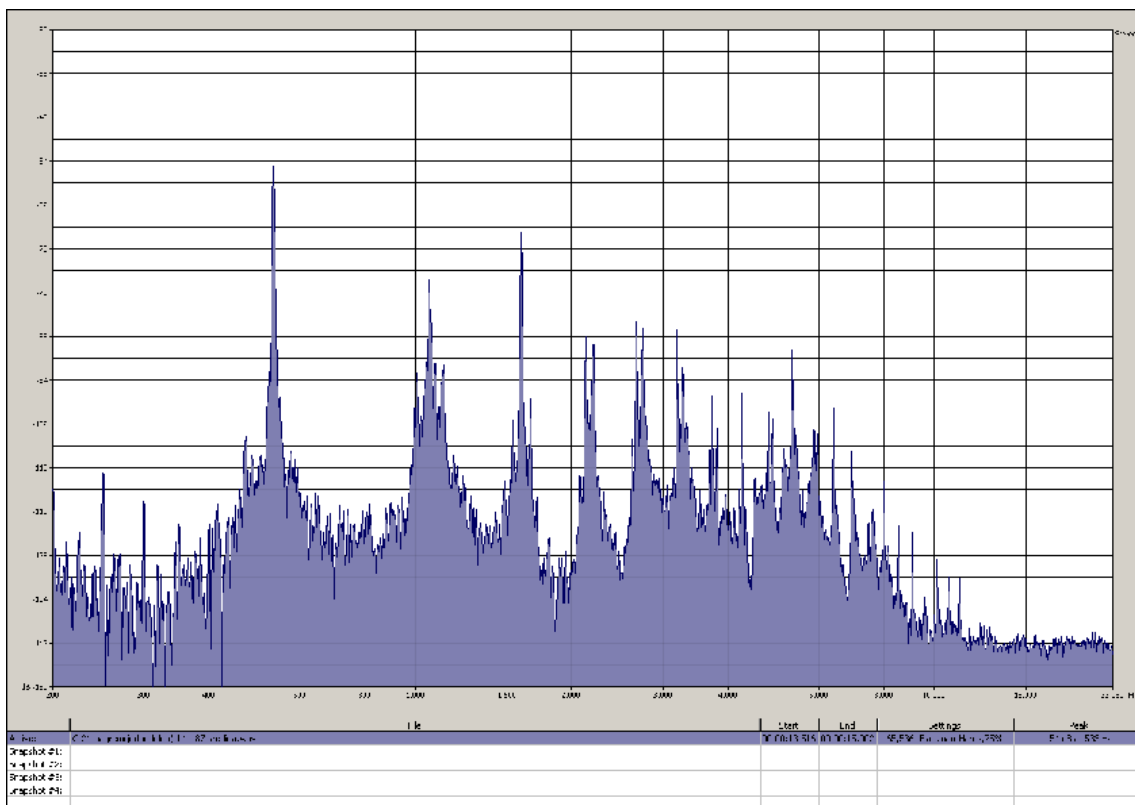


Slika 3.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

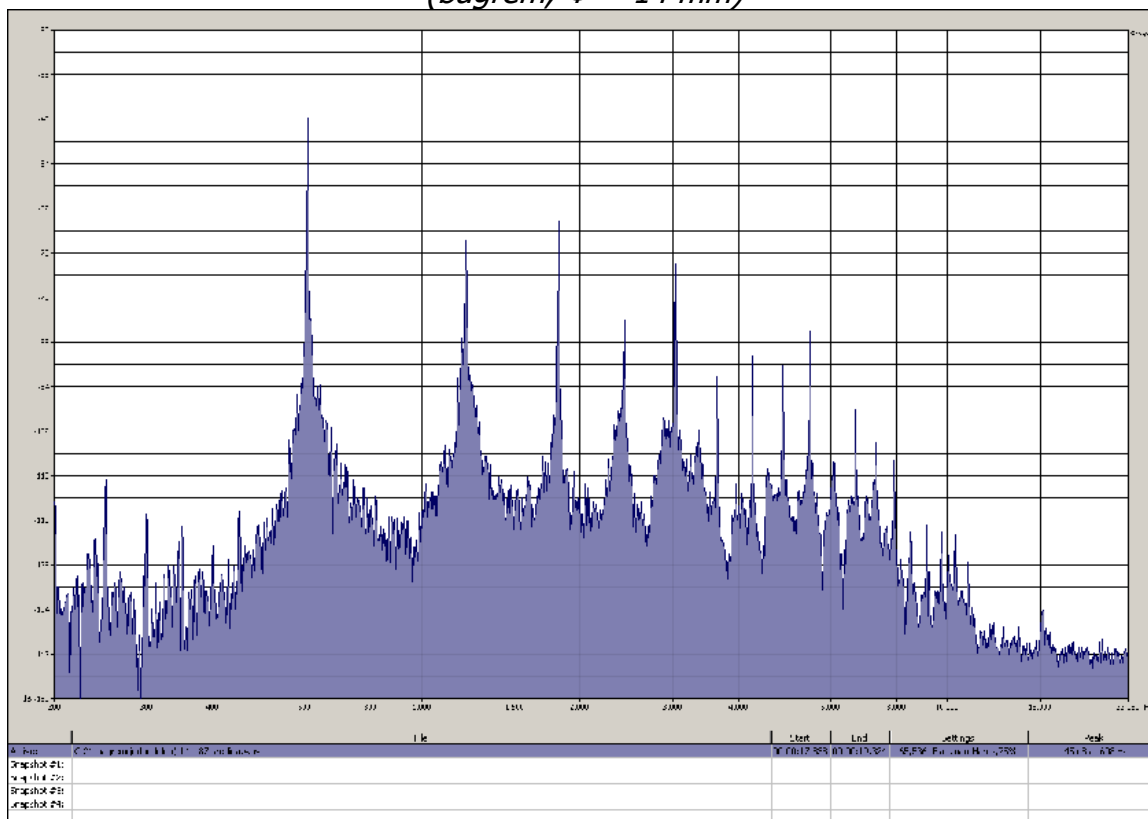


Slika 3.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 20 (šljiva,  $\Phi = 14$  mm)

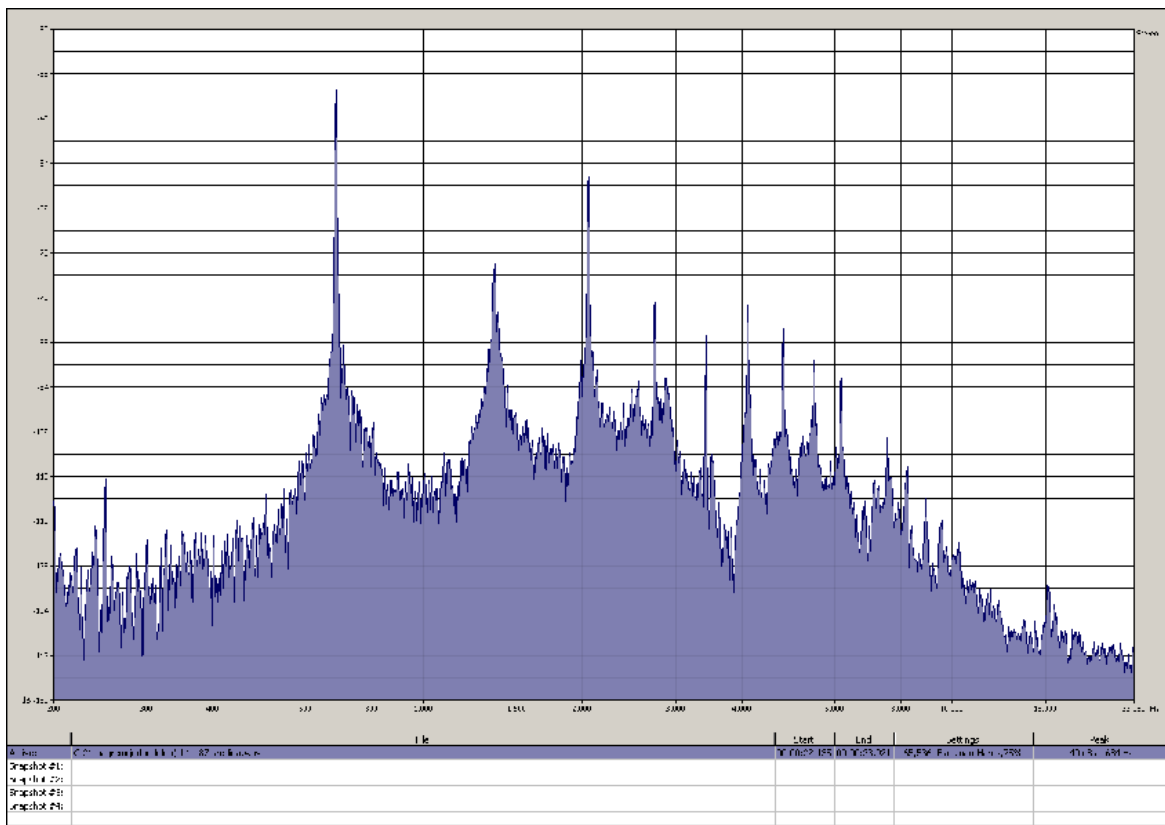
## DODATAK 4: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 21 (bagrem, $\Phi = 14$ mm)



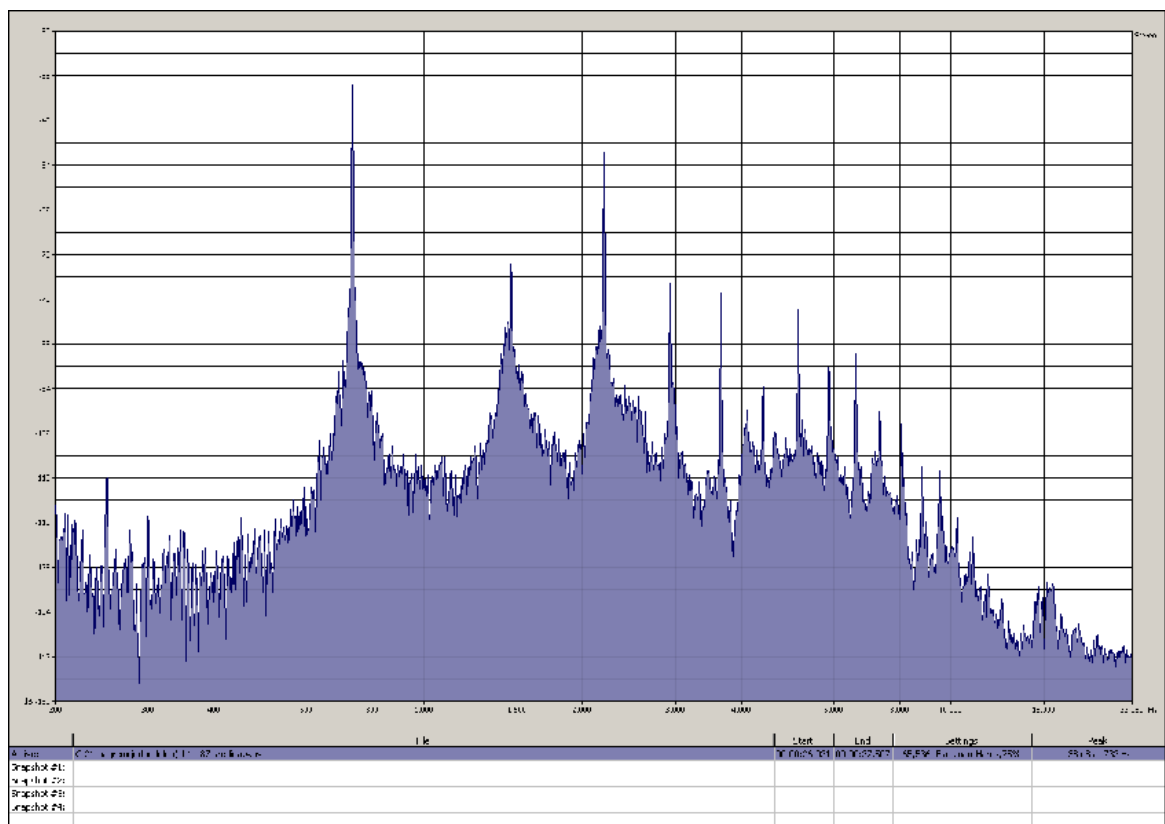
Slika 4.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



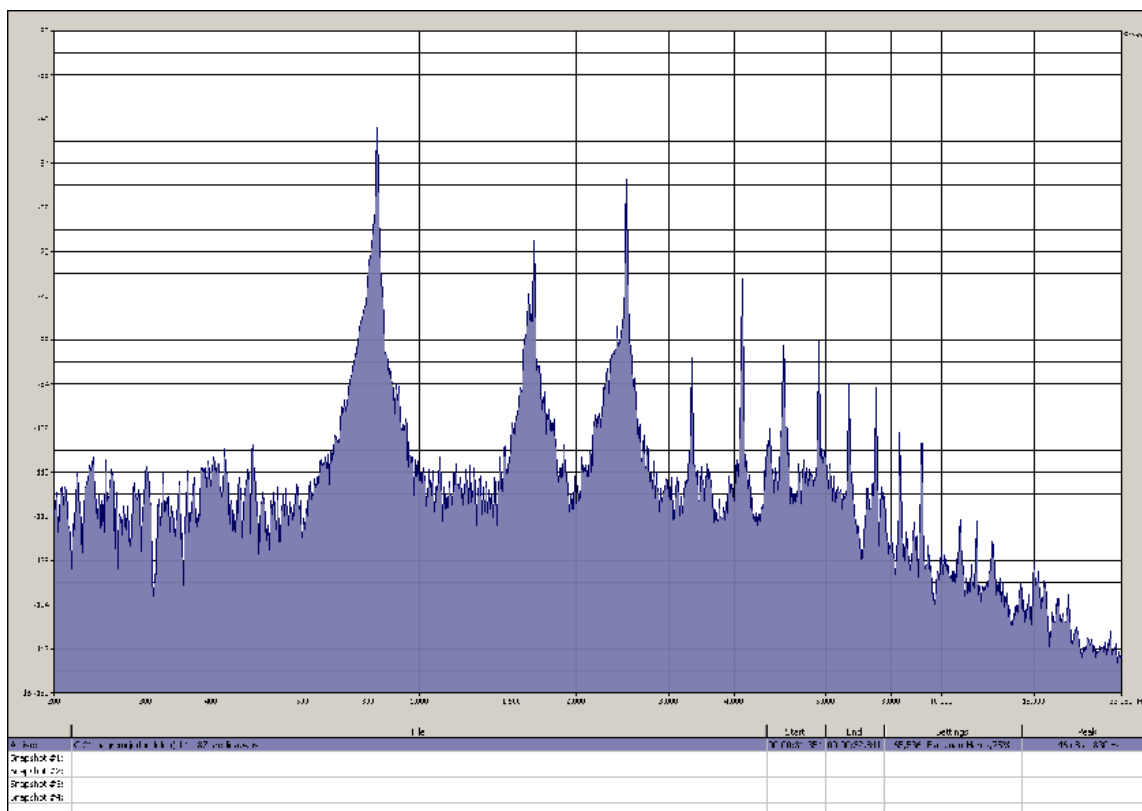
Slika 4.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



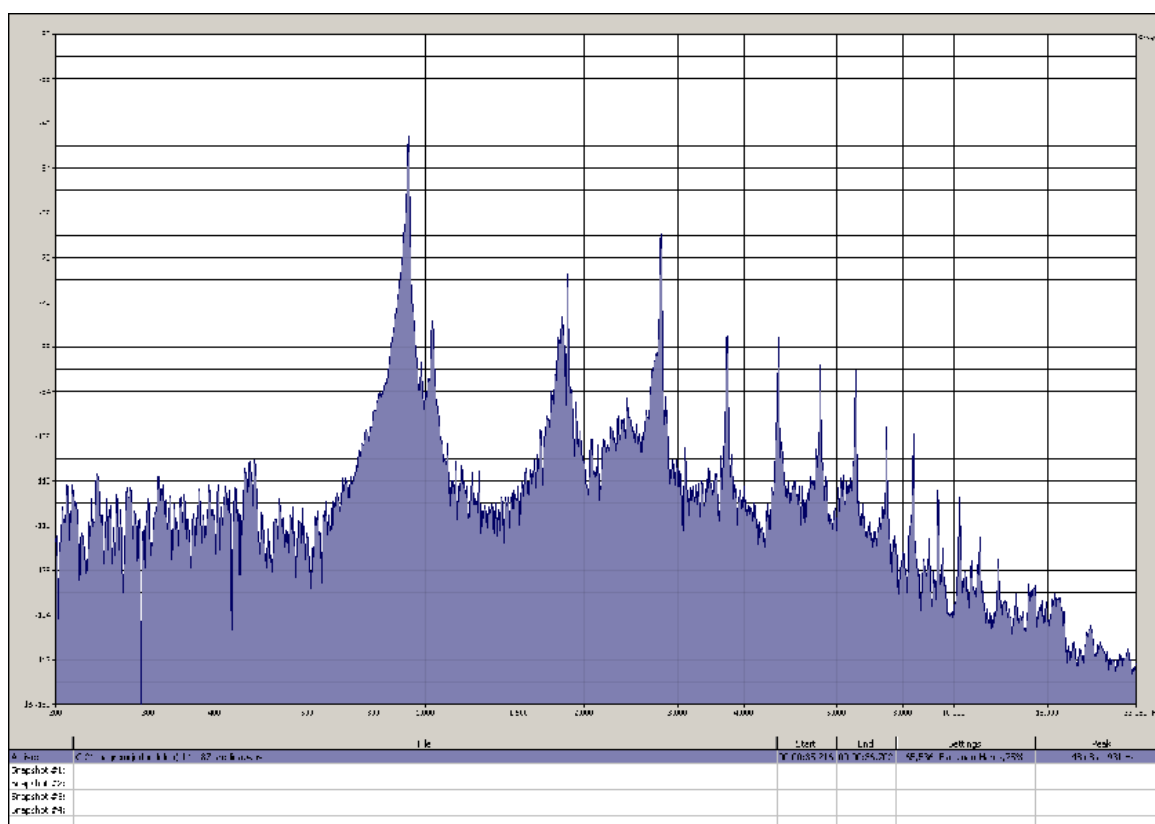
Slika 4.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



Slika 4.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

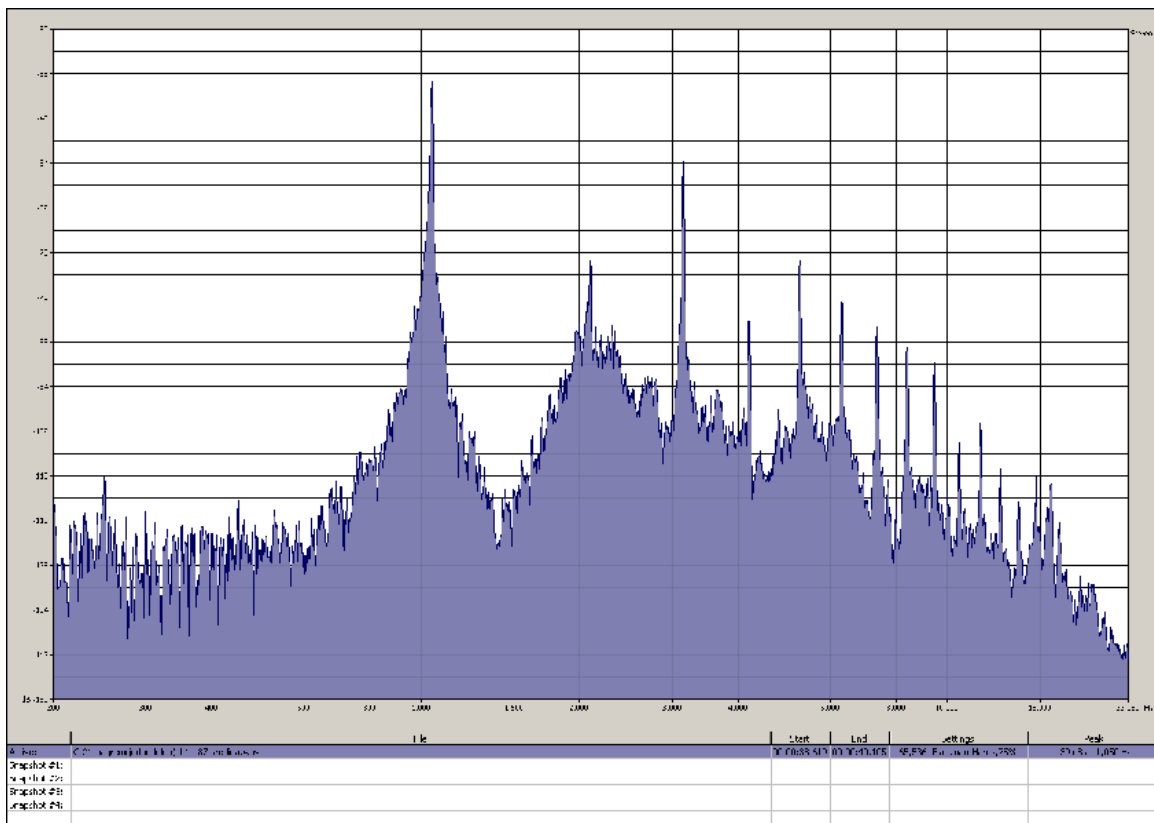


Slika 4.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

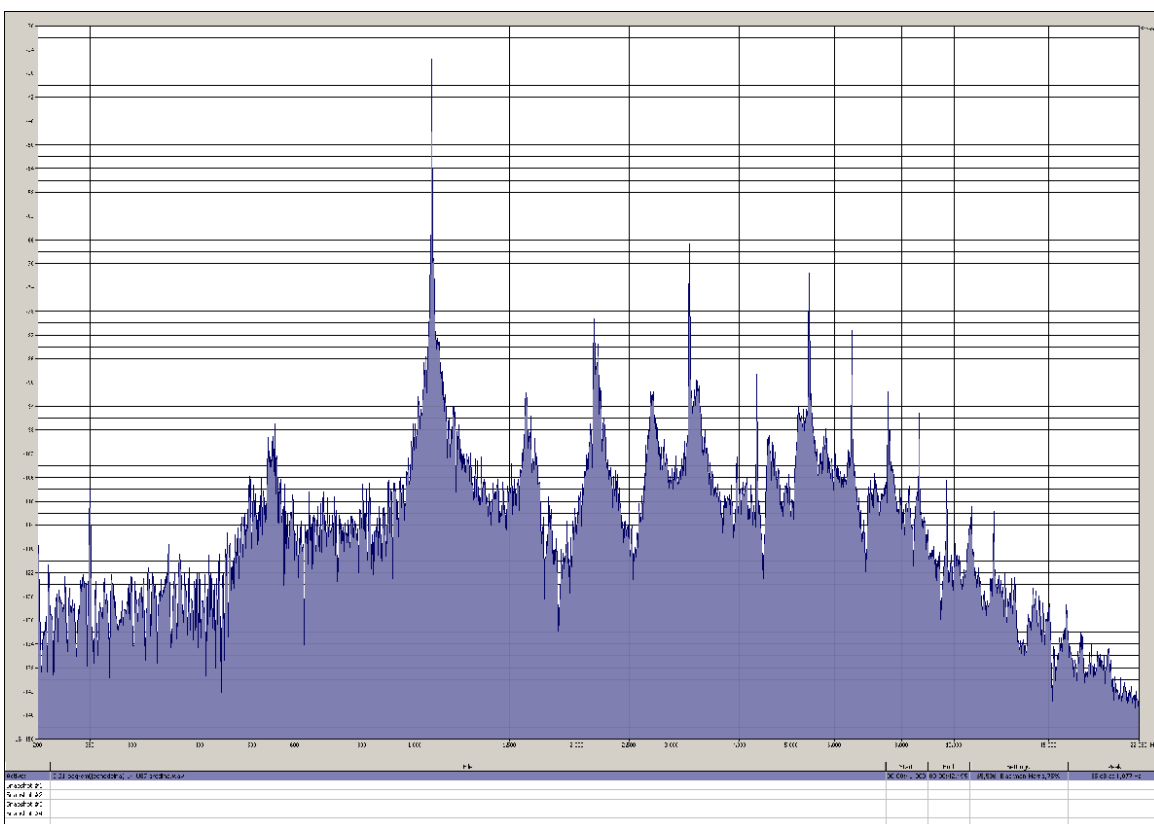


Slika 4.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

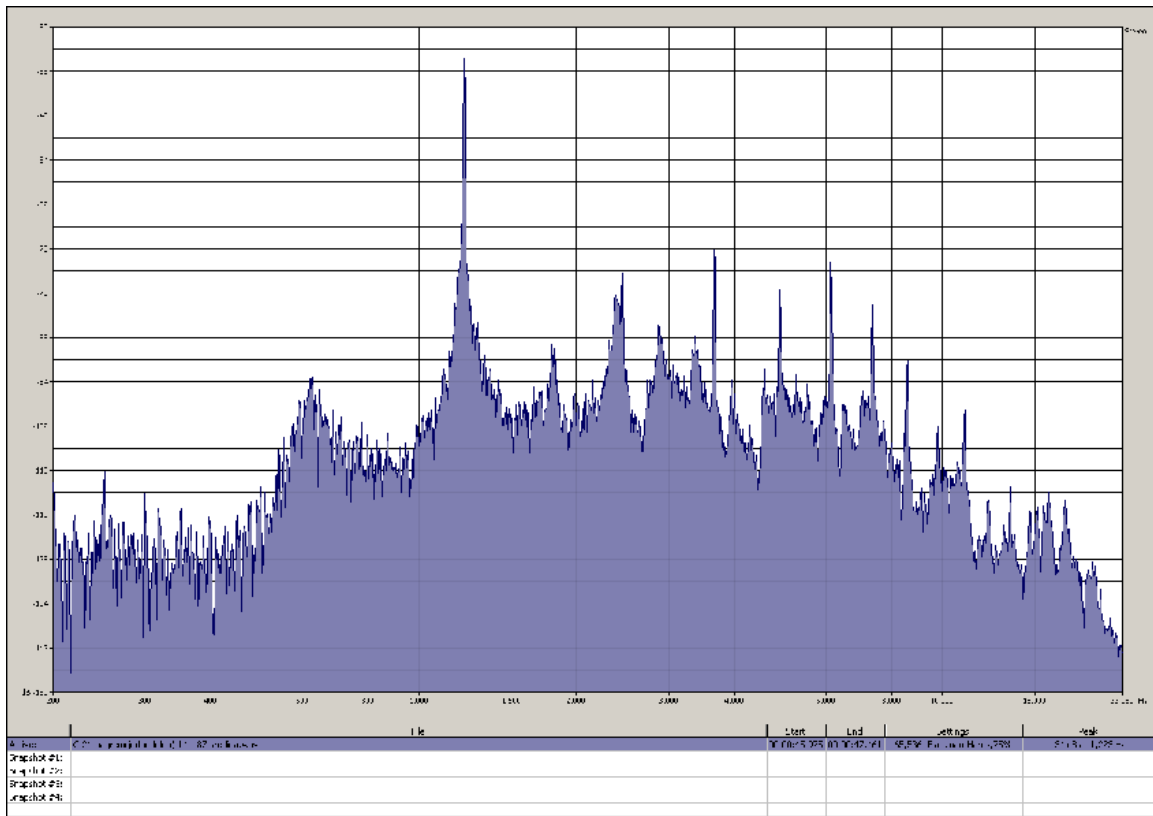




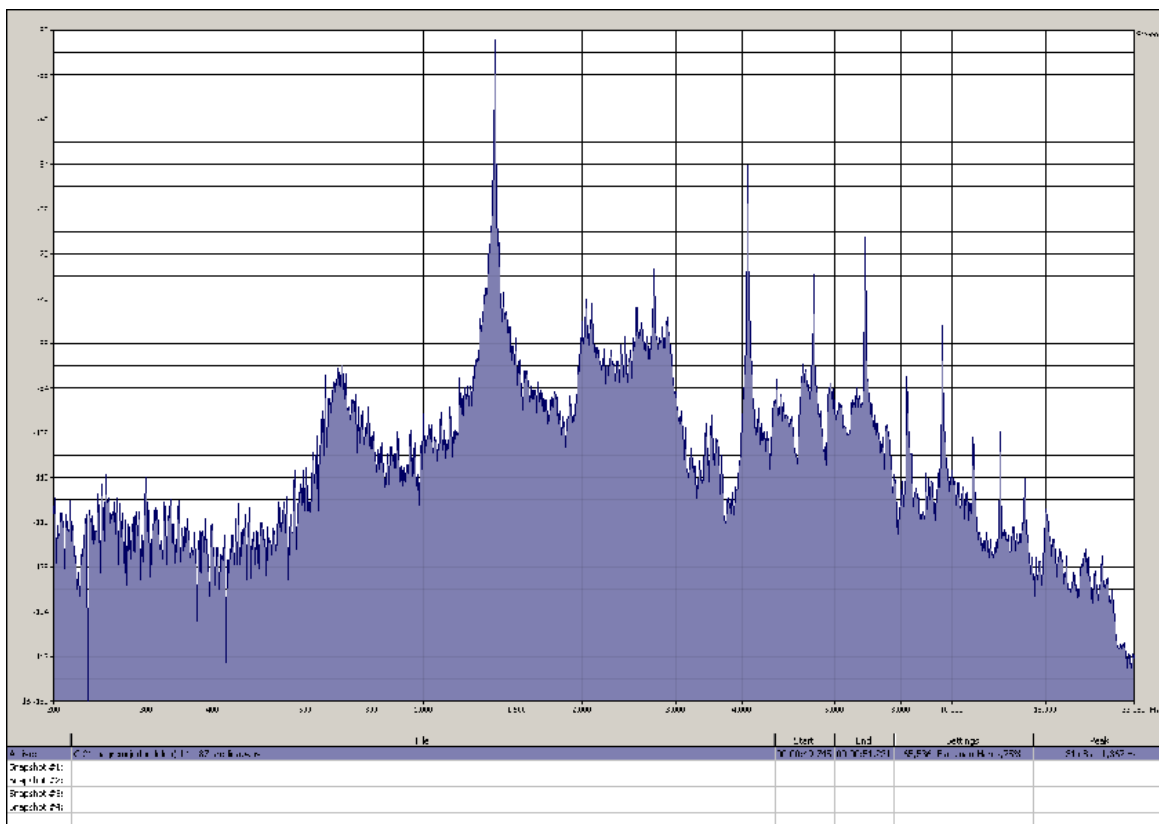
Slika 4.7: Frekvencijski spektar tona  $k^2$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



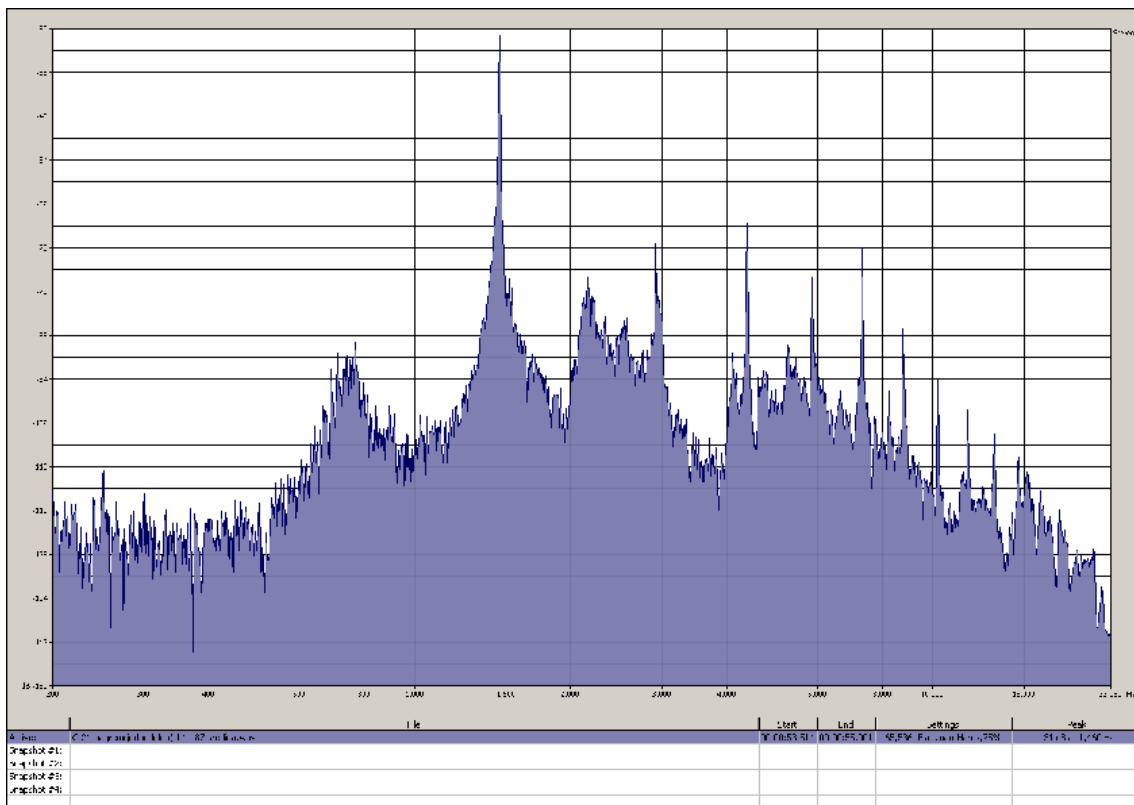
Slika 4.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



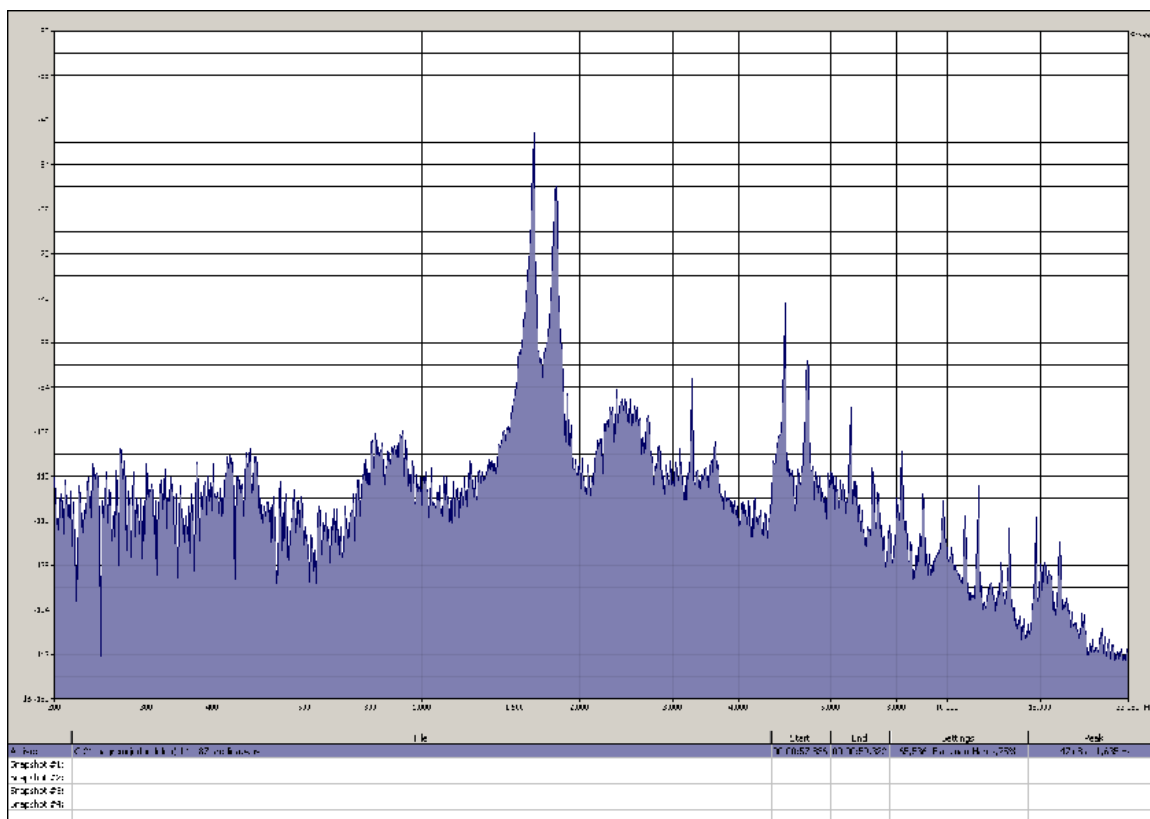
Slika 4.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



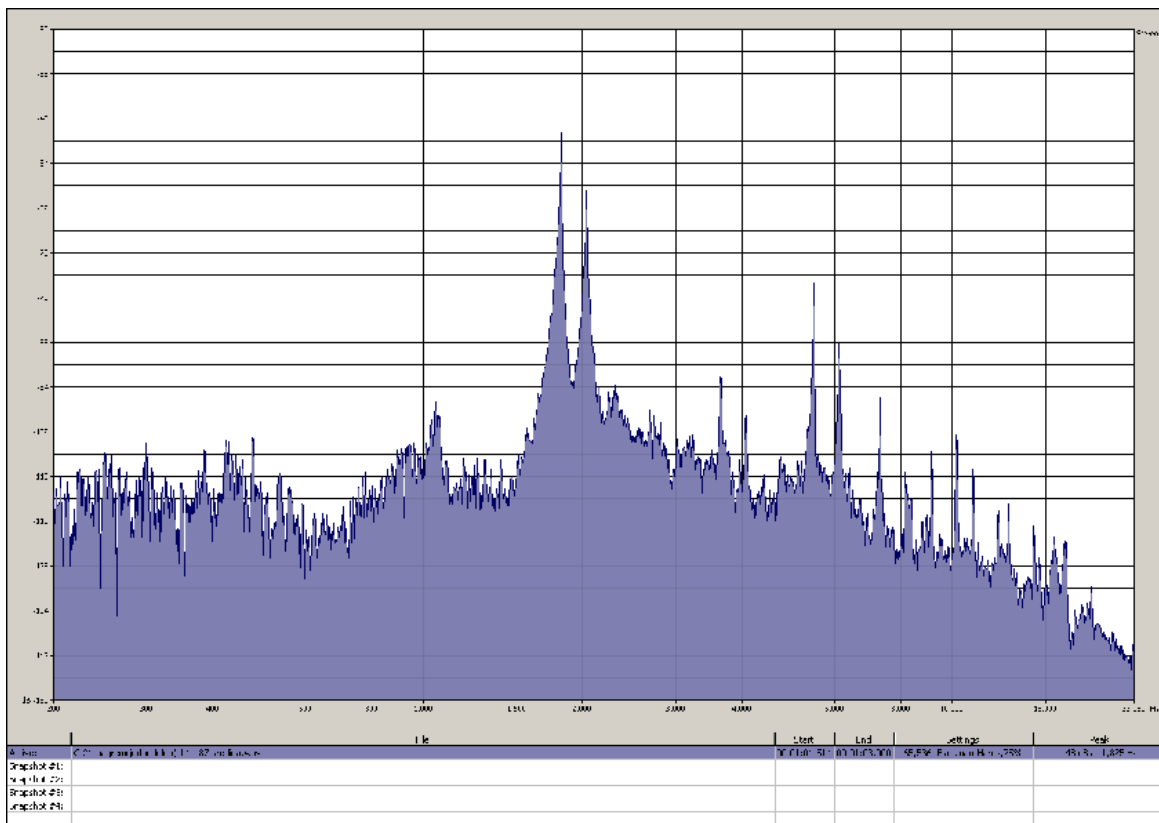
Slika 4.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



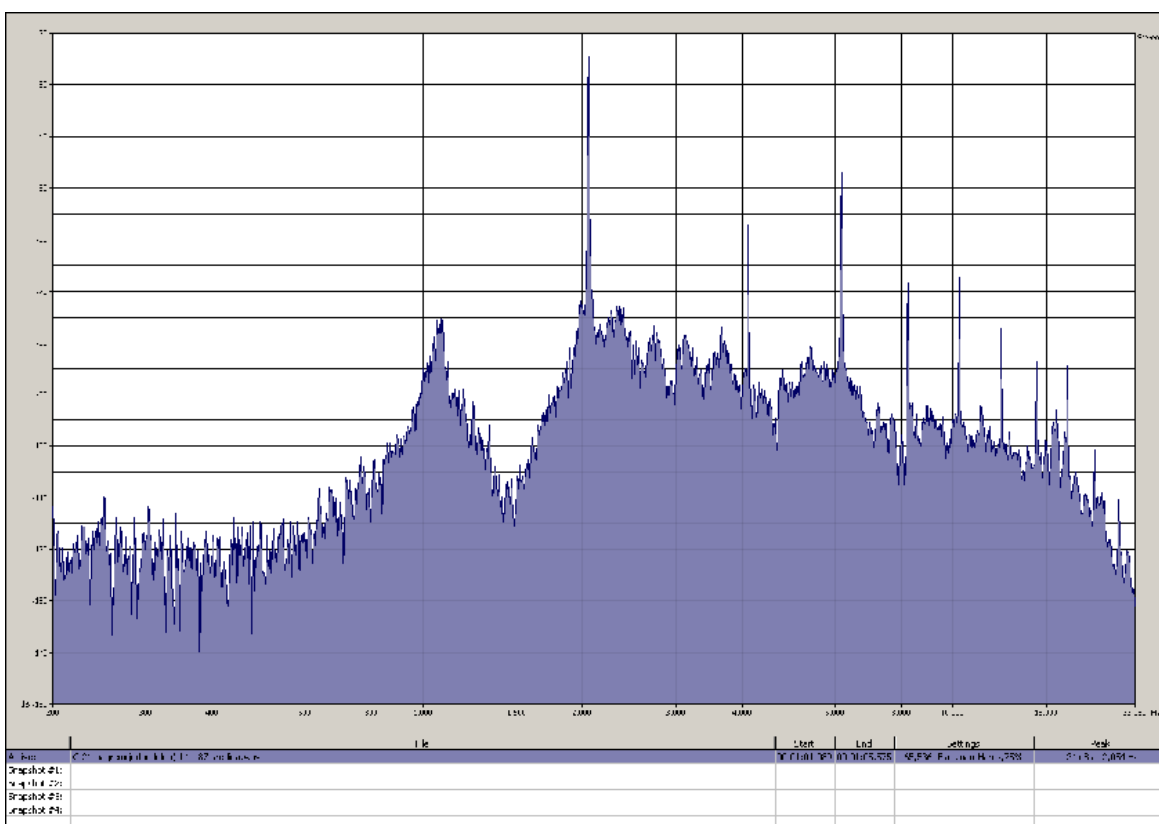
Slika 4.11: Frekvencijski spektar tona  $P^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



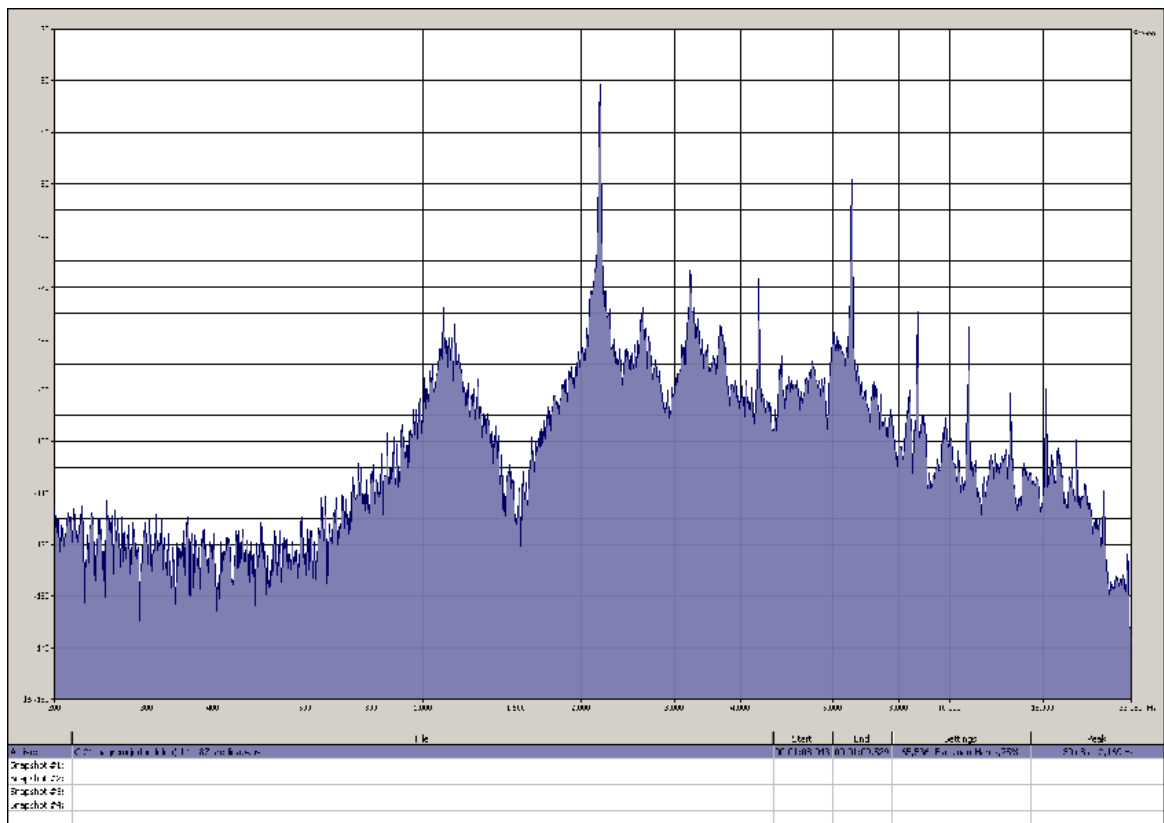
Slika 4.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 4.13: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

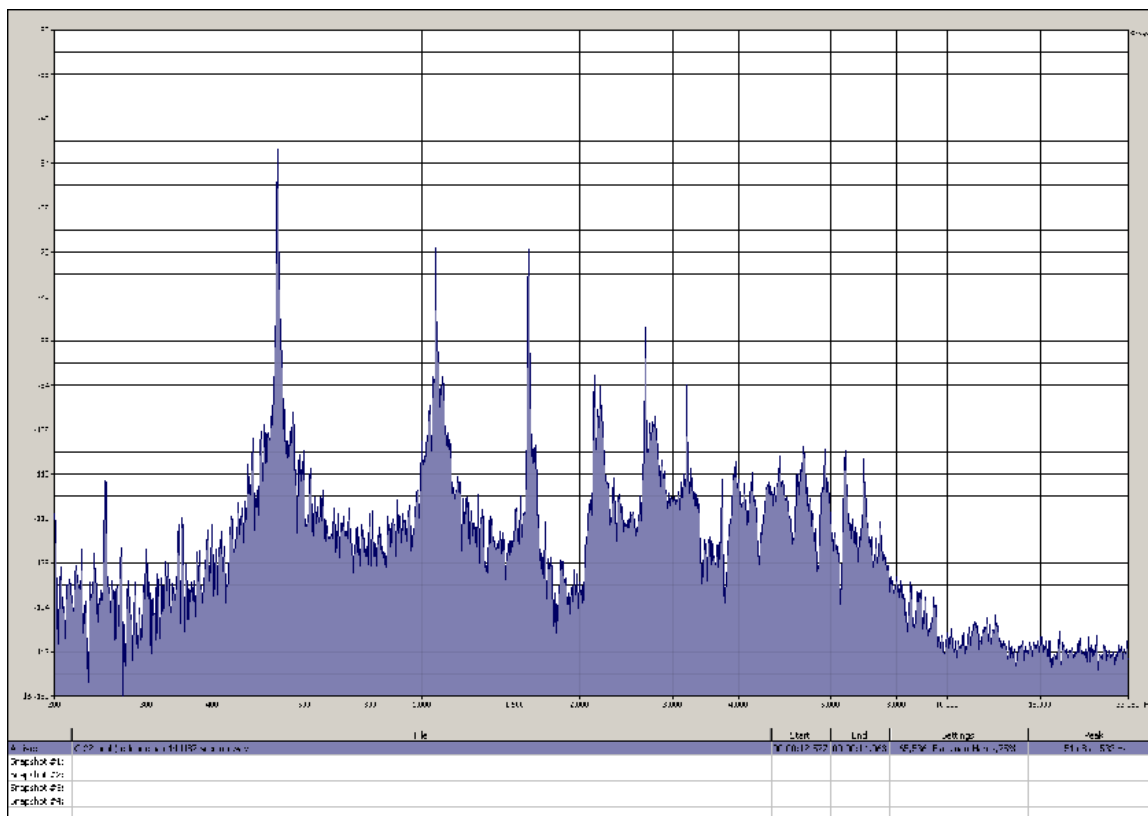


Slika 4.14: Frekvenčni spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

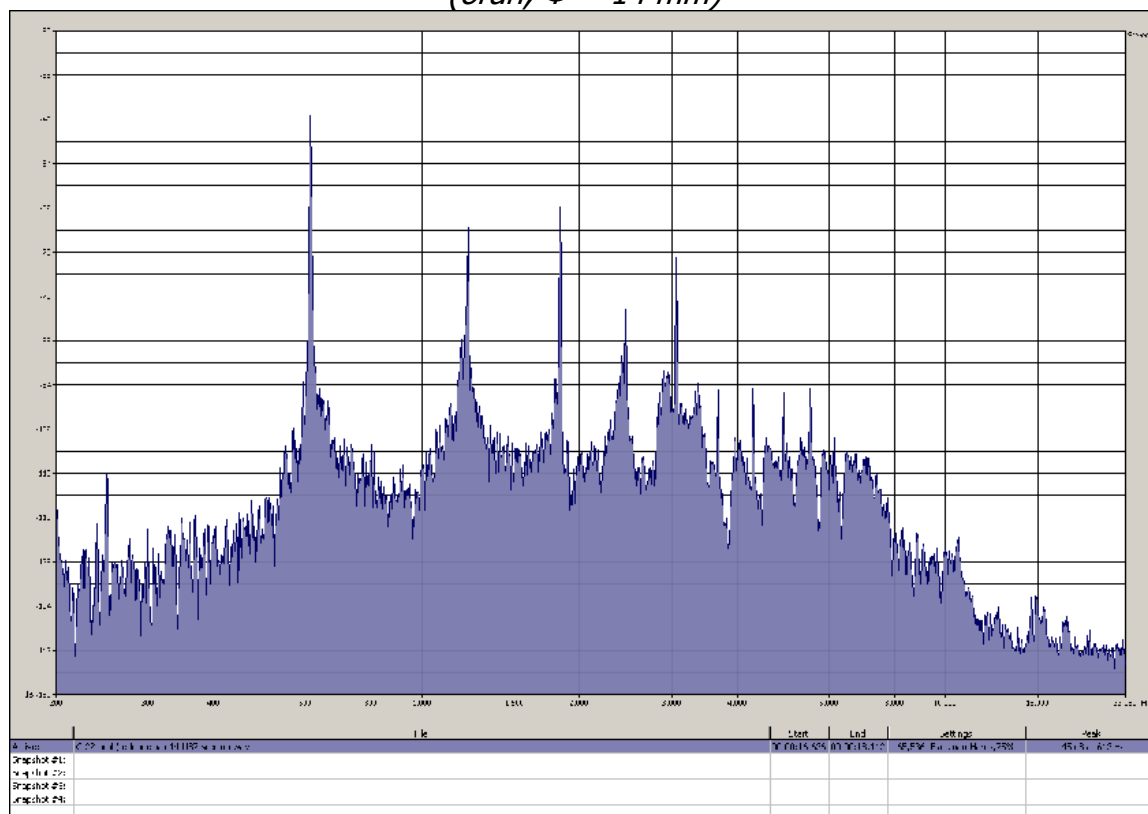


*Slika 4.15: Frekvenčni spekter tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 21 (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )*

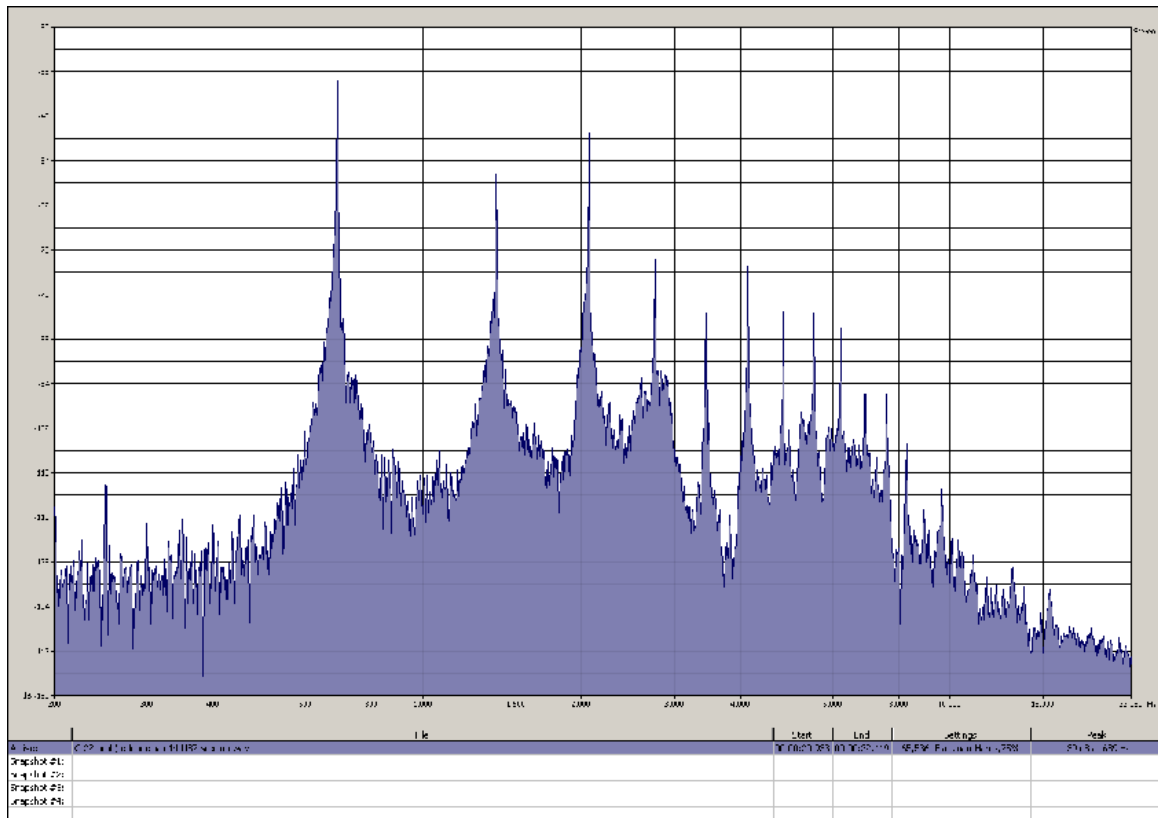
## DODATAK 5: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 22 (orah, $\Phi = 14$ mm)



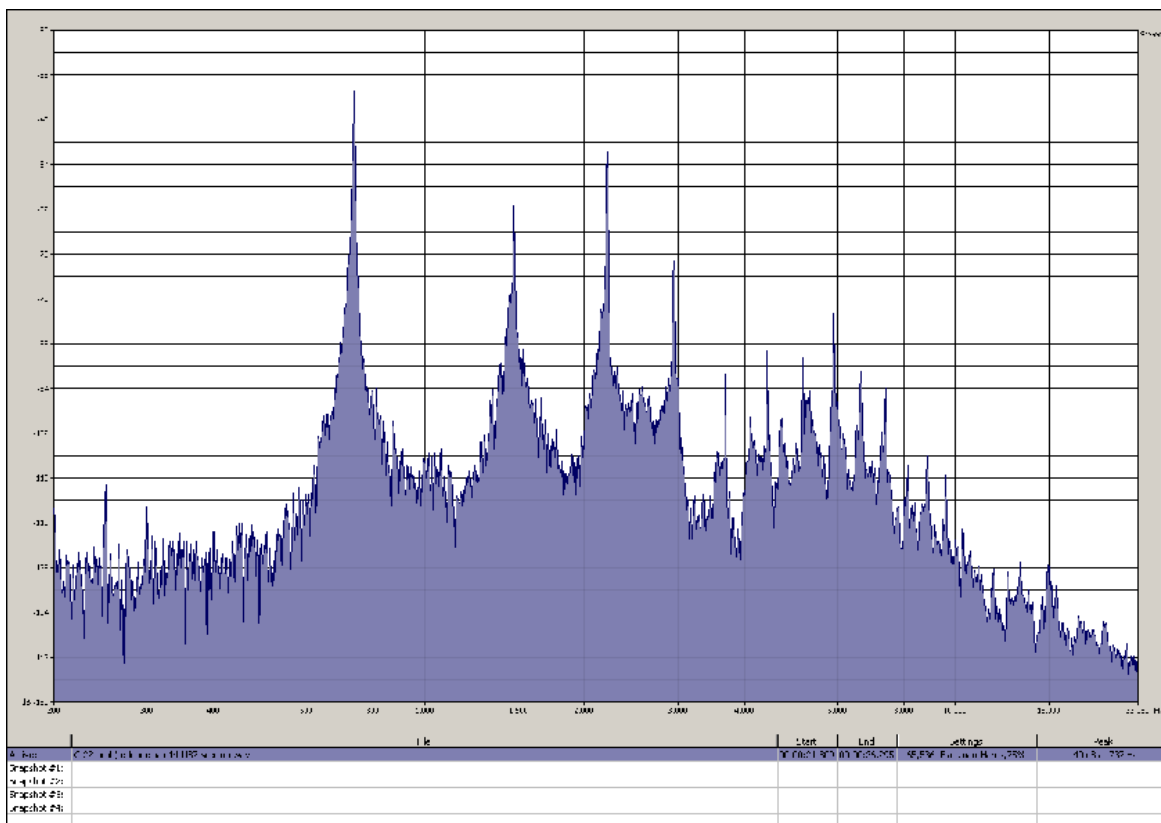
Slika 5.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 22  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)



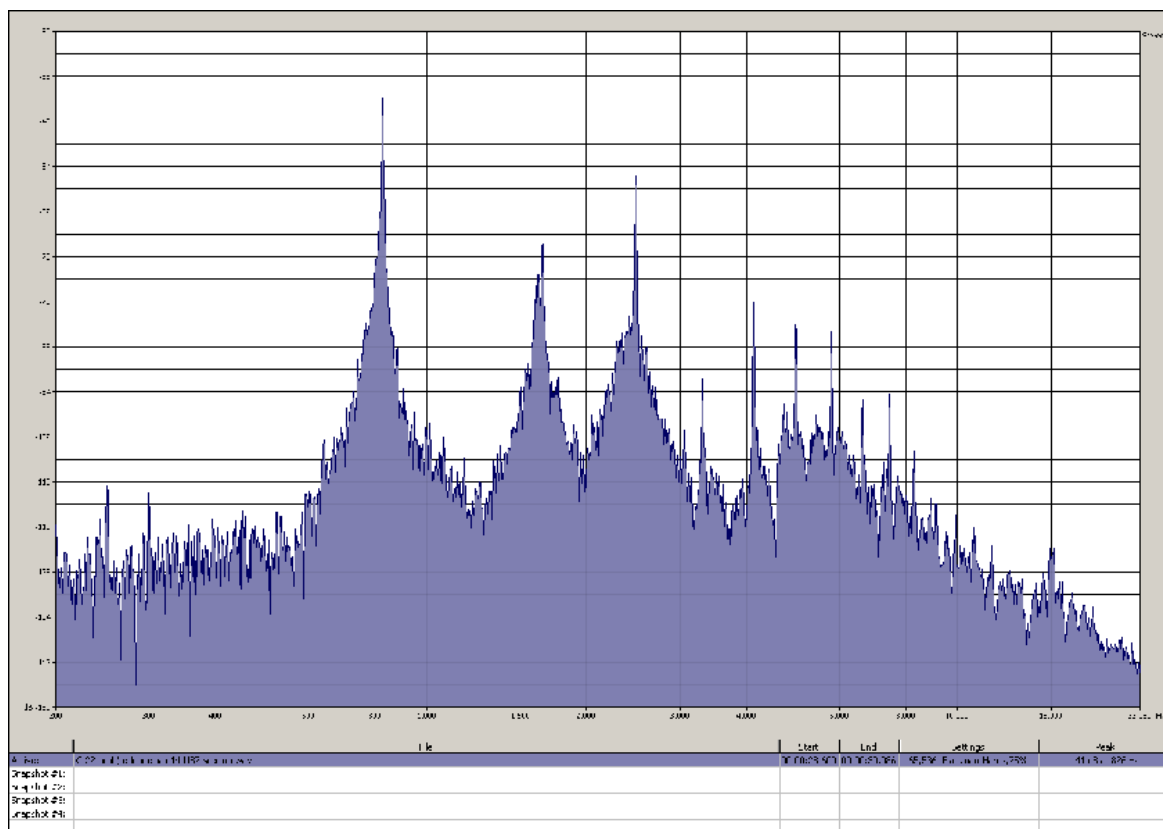
Slika 5.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 22  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)



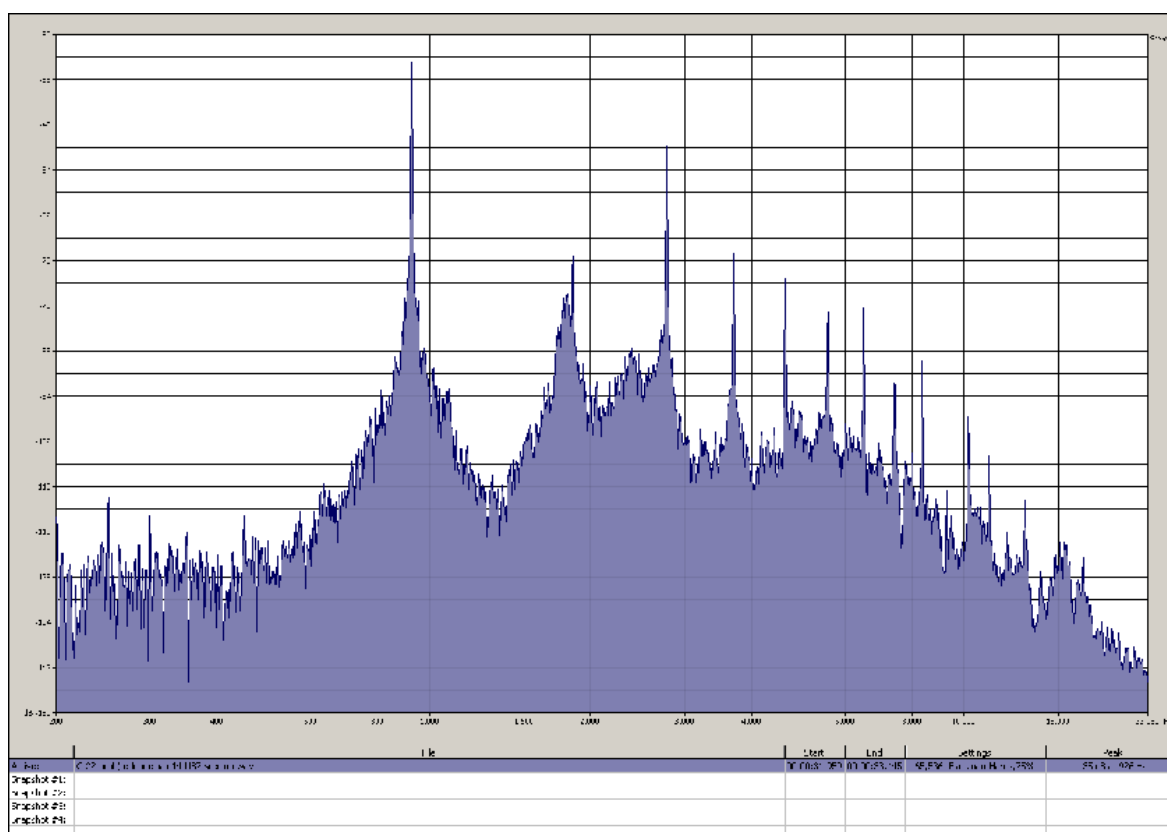
Slika 5.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 5.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

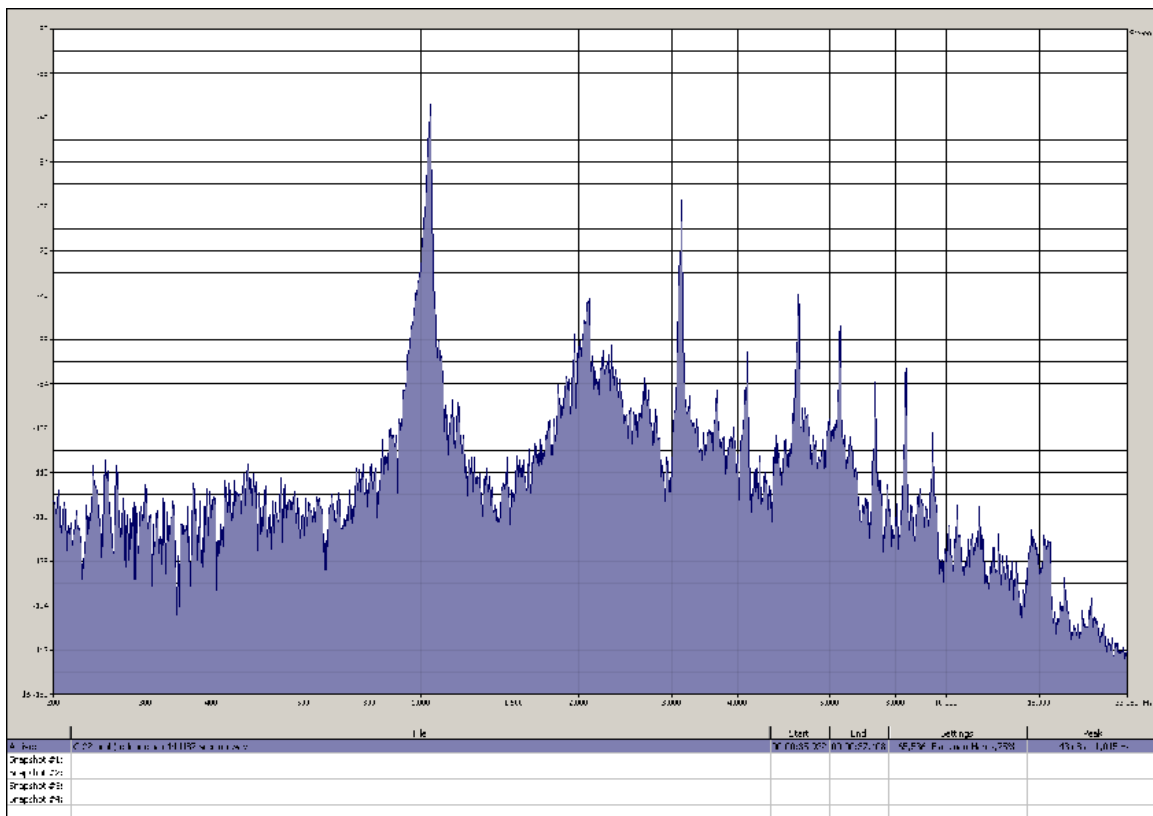


Slika 5.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

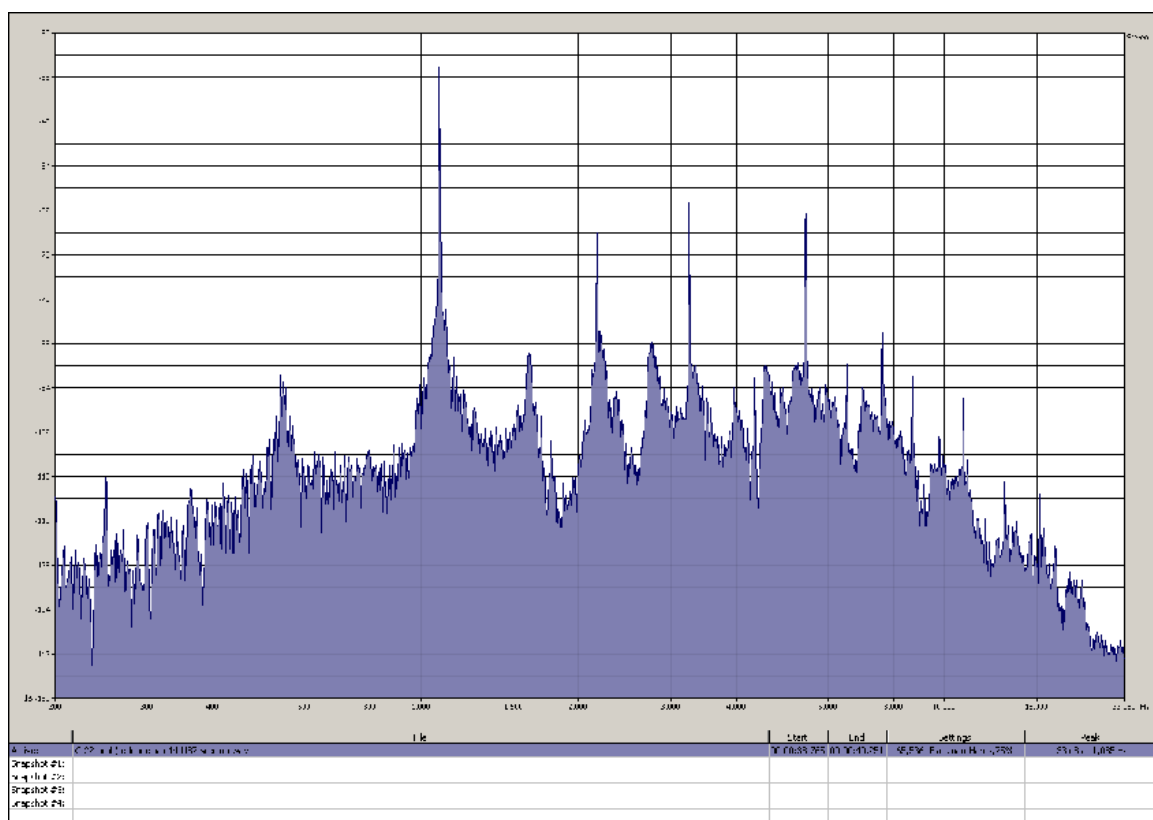


Slika 5.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

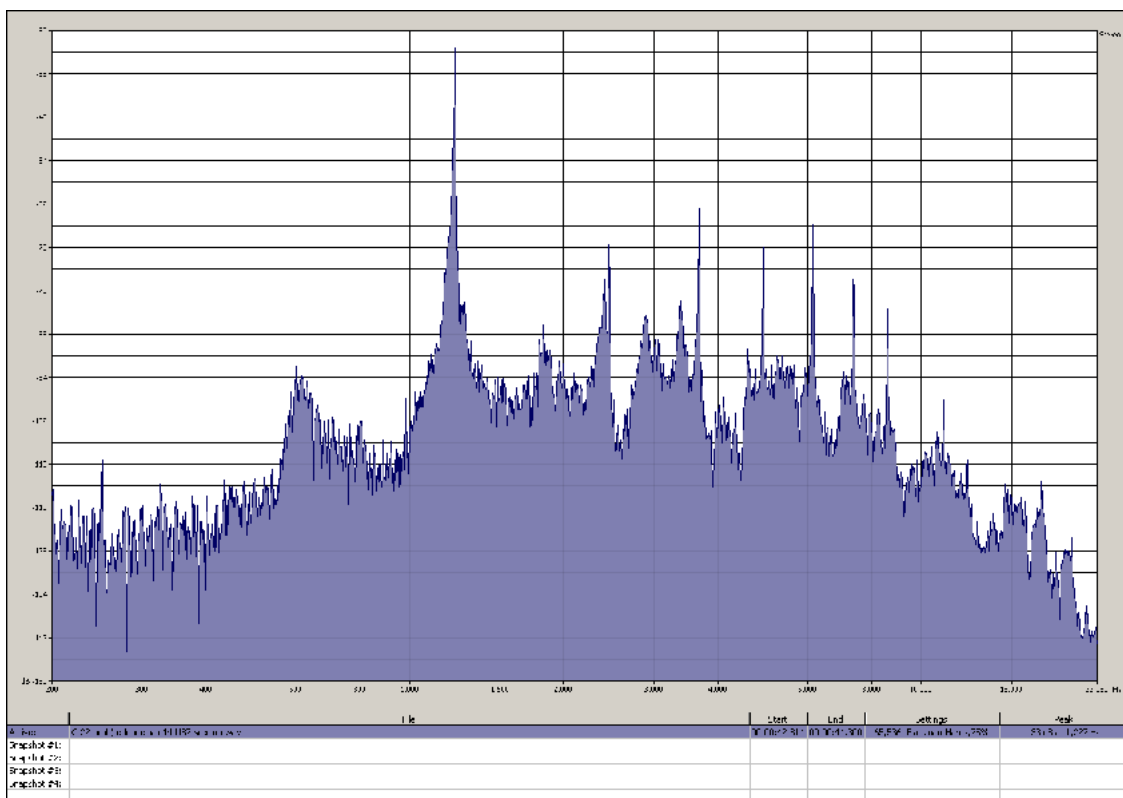




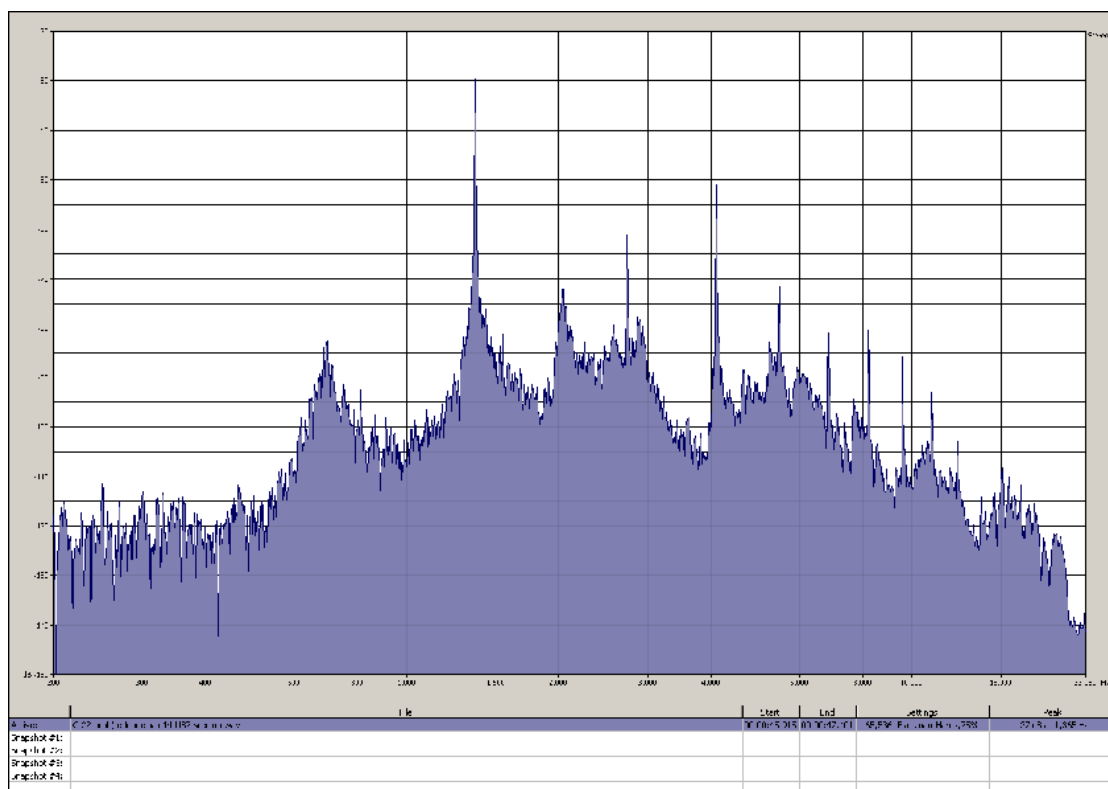
Slika 5.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



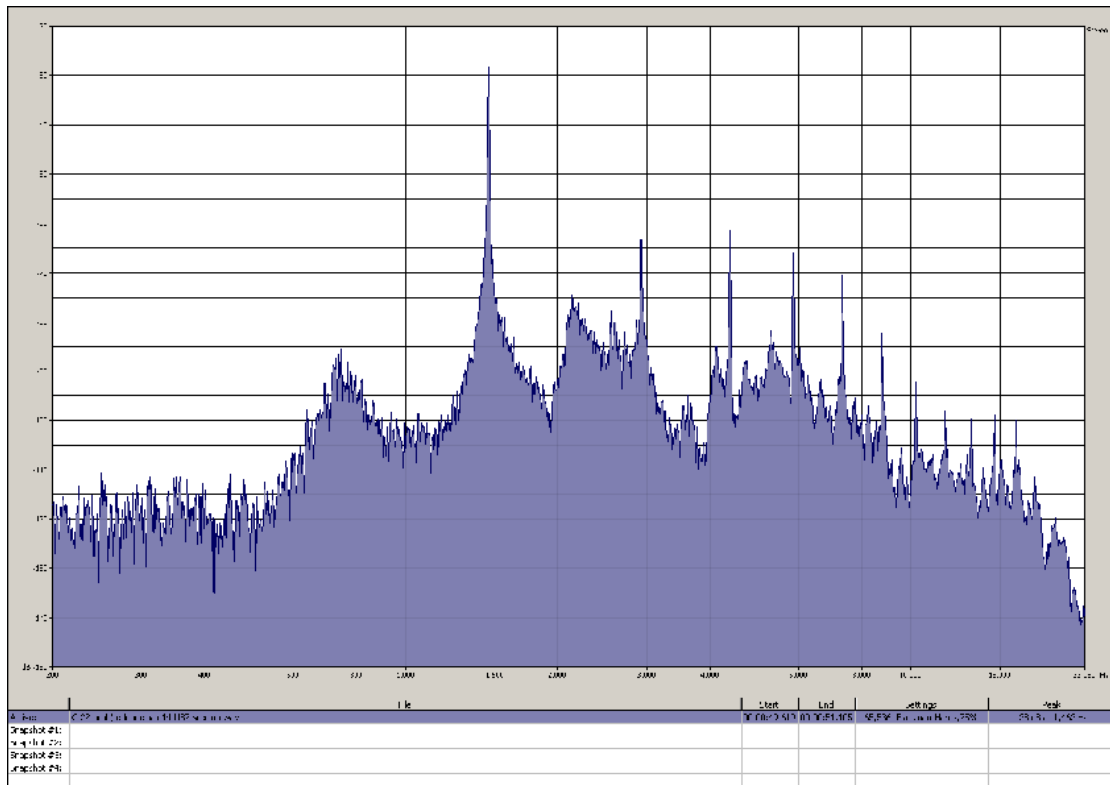
Slika 5.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



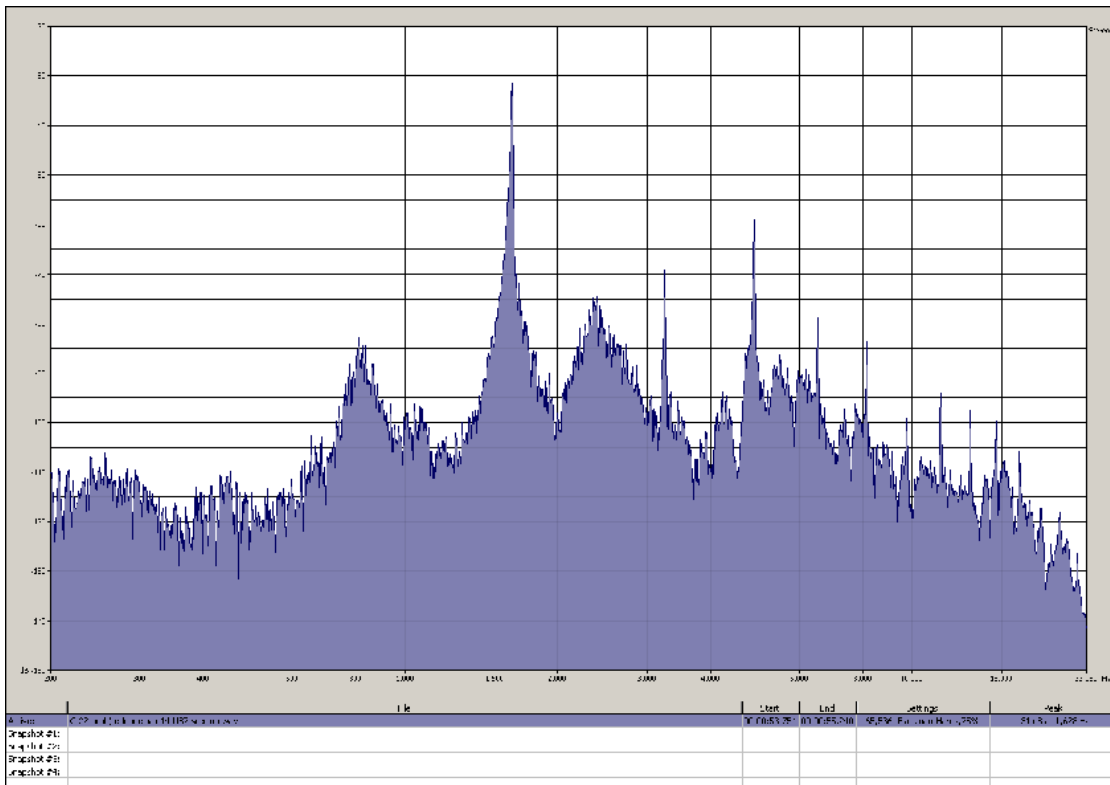
Slika 5.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



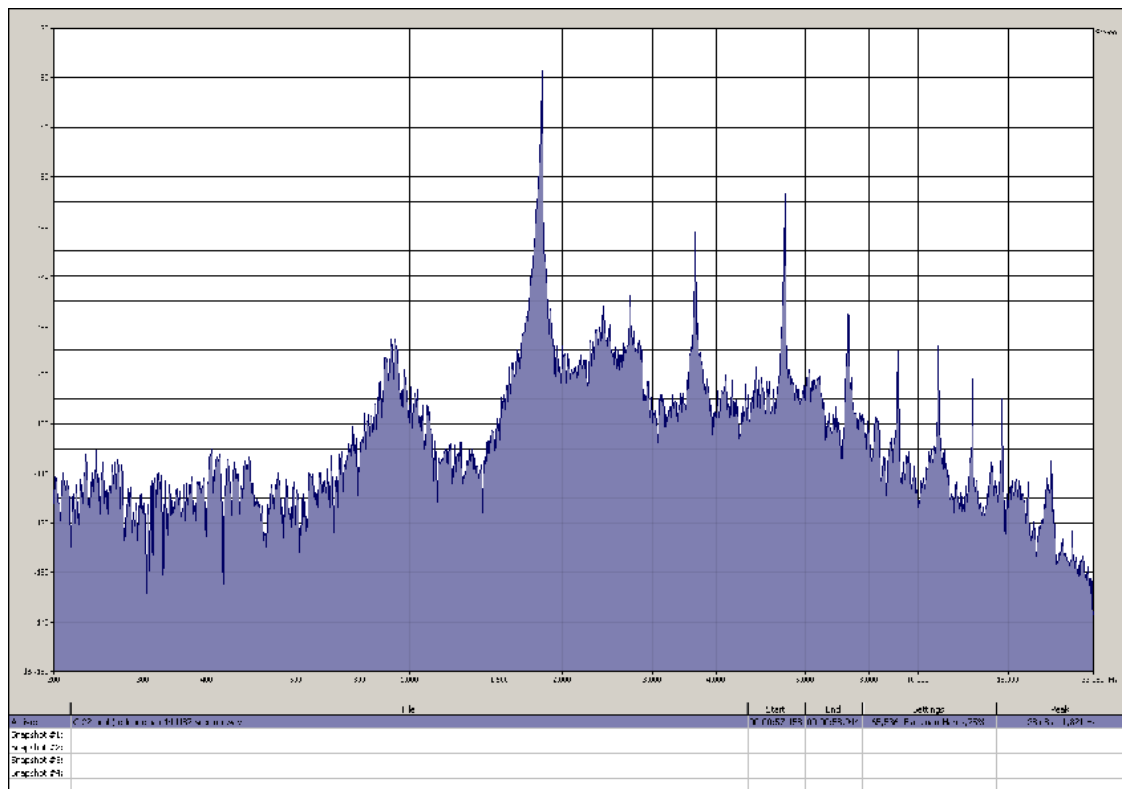
Slika 5.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



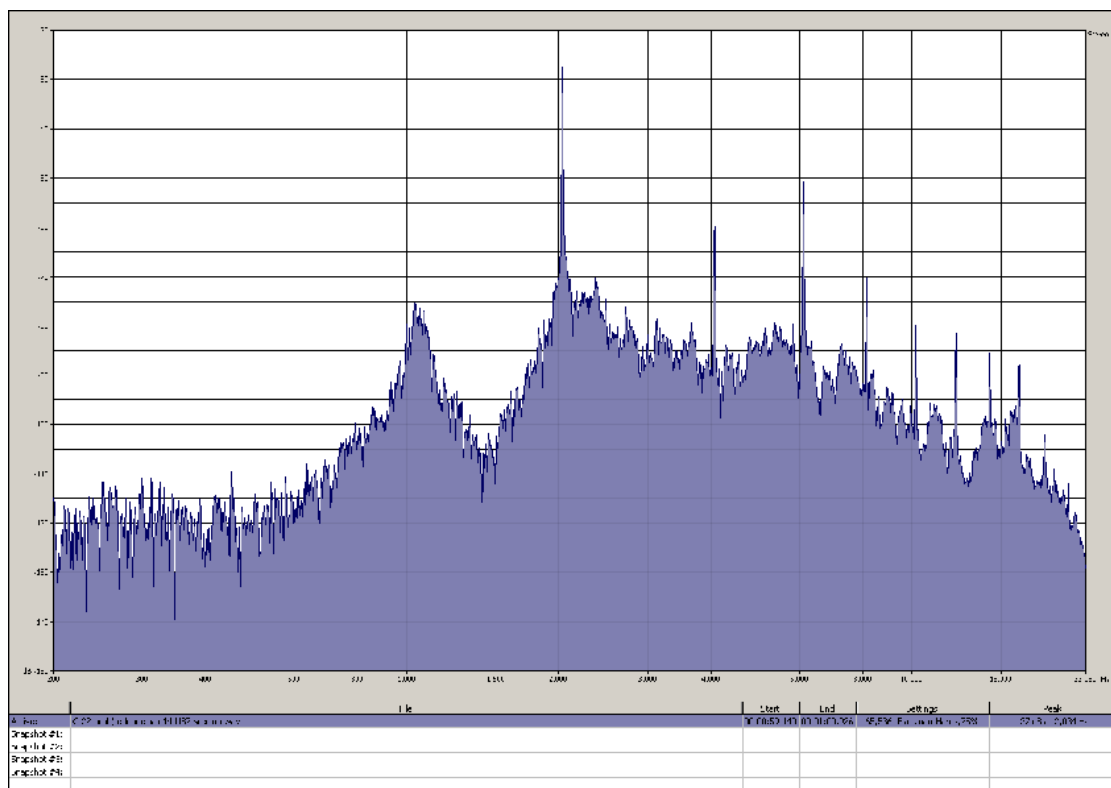
Slika 5.11: Frekvencijski spektar tona  $P^2$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



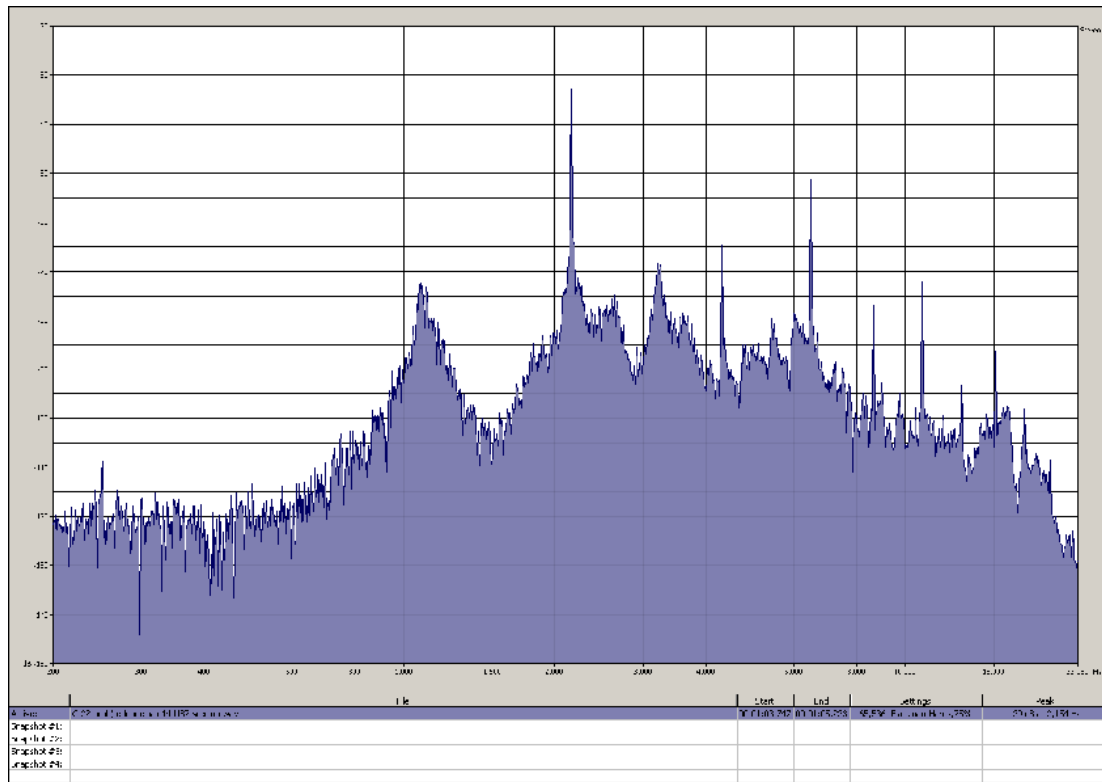
Slika 5.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 5.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

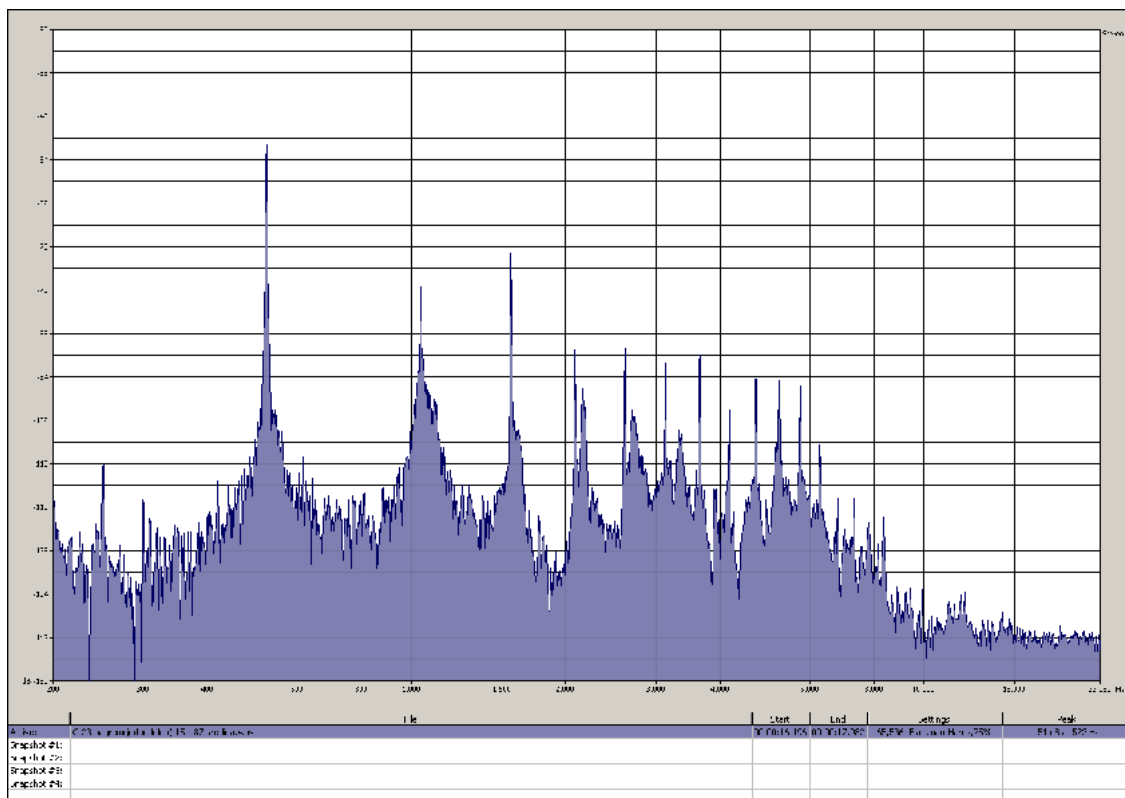


Slika 5.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

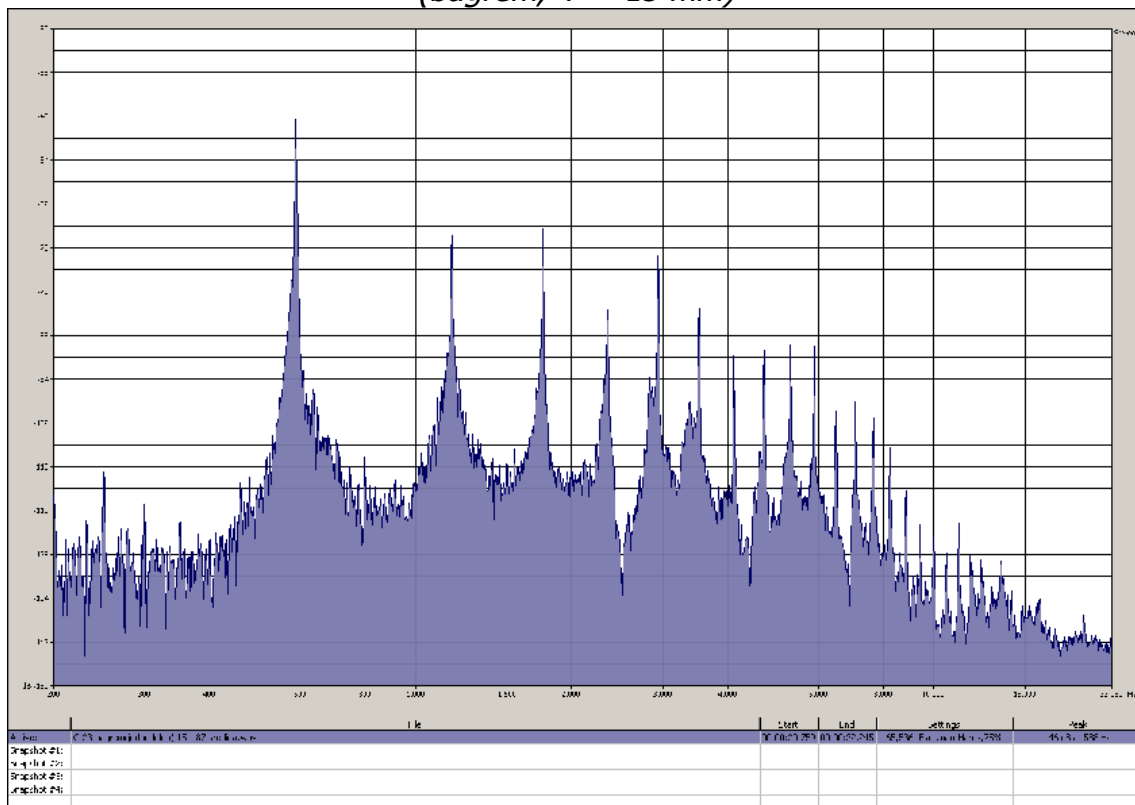


*Slika 5.15: Frekvencijski spektar tona  $C^4$ , odsviranog na fruli 22 (orah,  $\Phi = 14$  mm)*

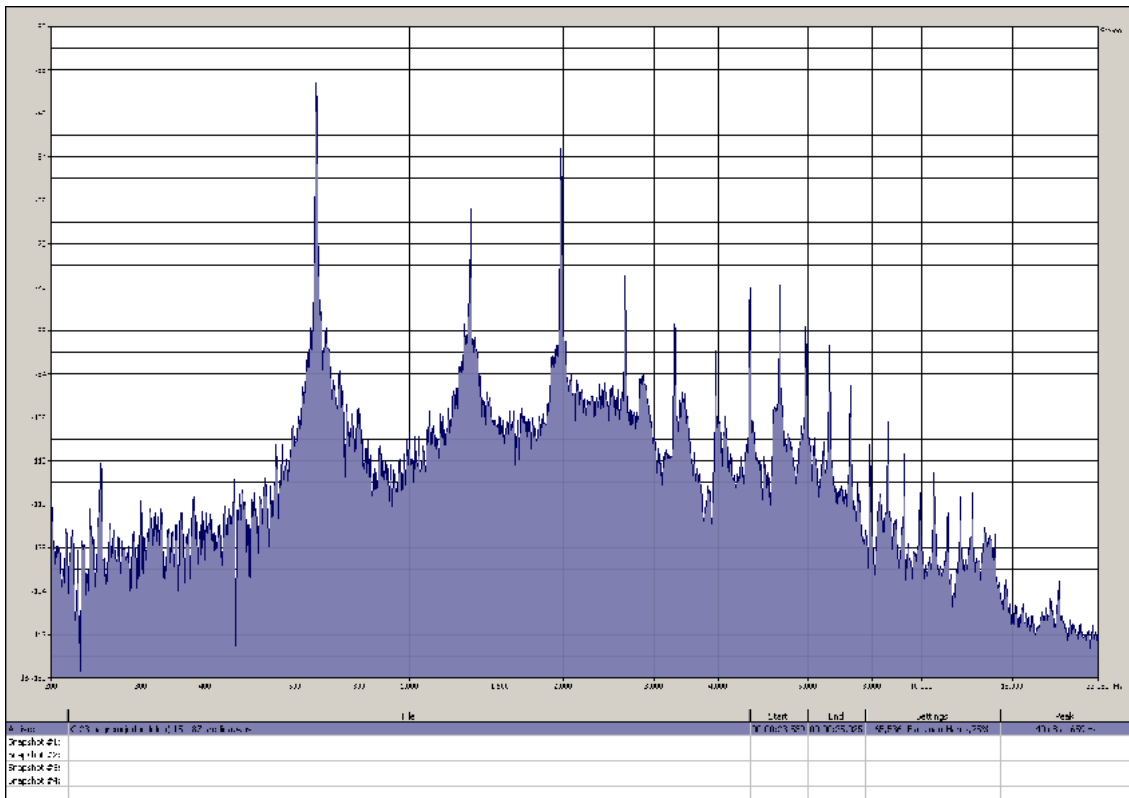
## DODATAK 6: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 23 (bagrem, $\Phi = 15$ mm)



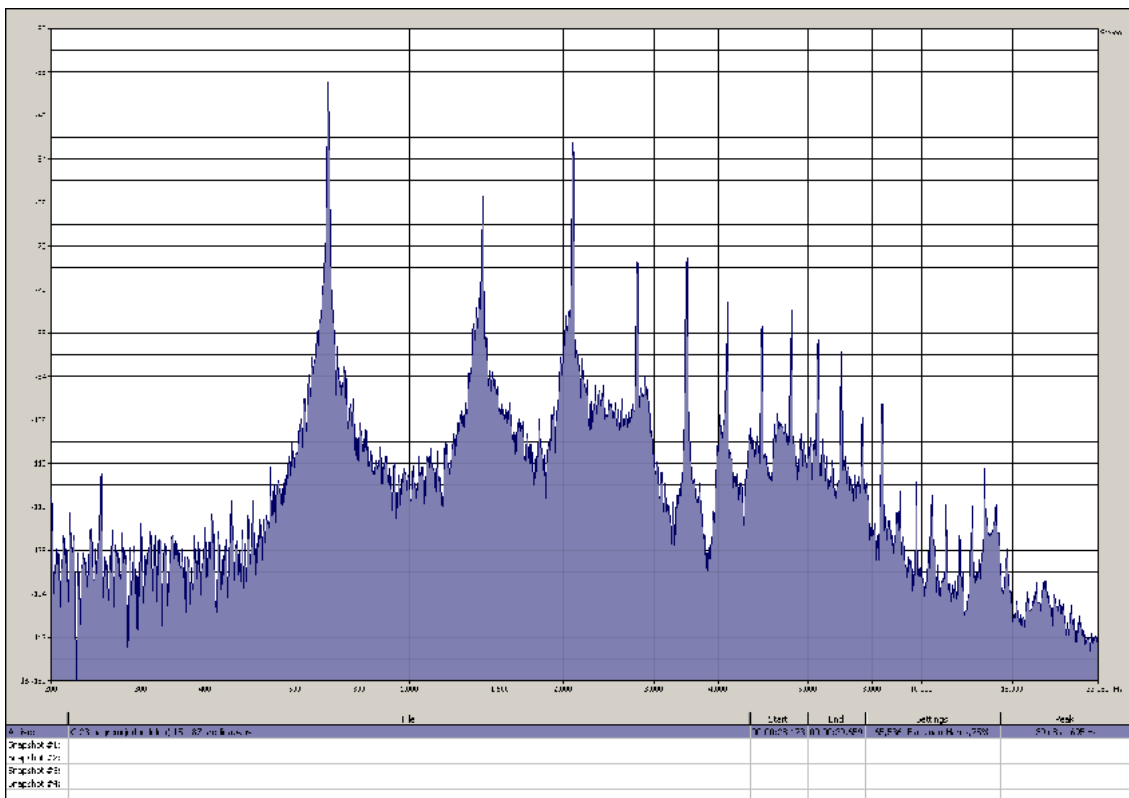
Slika 6.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 23  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



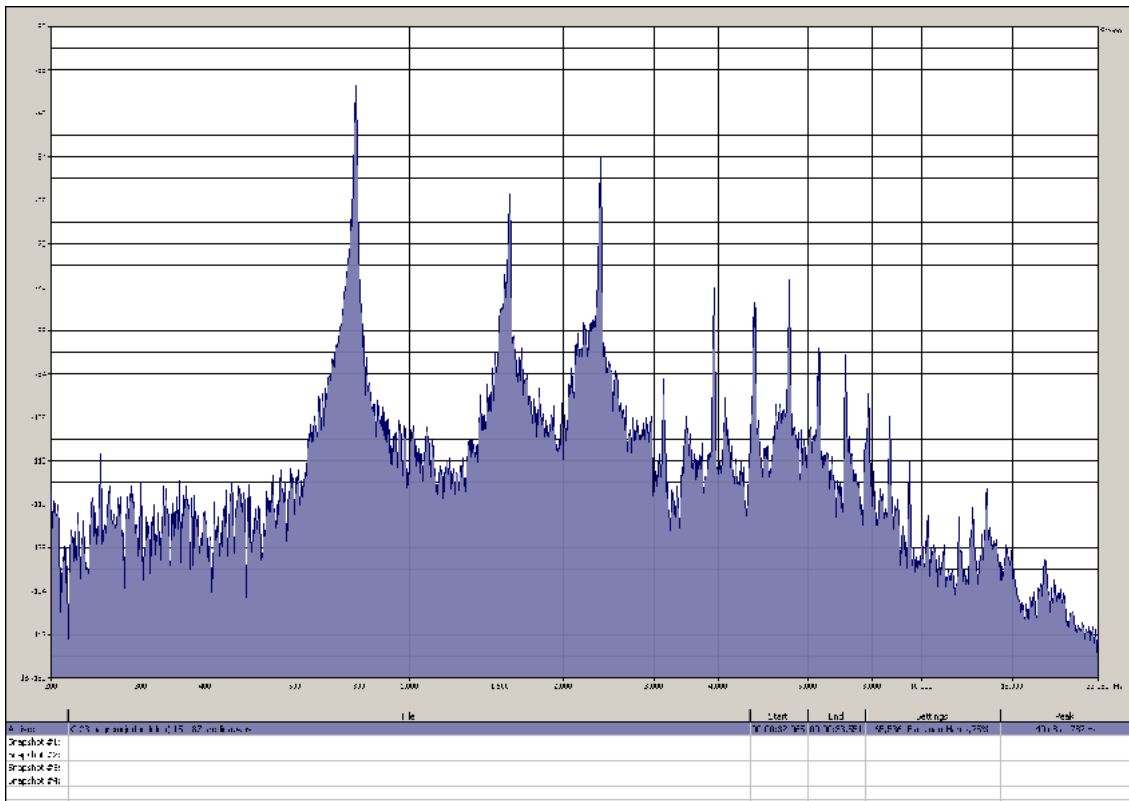
Slika 6.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 23  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



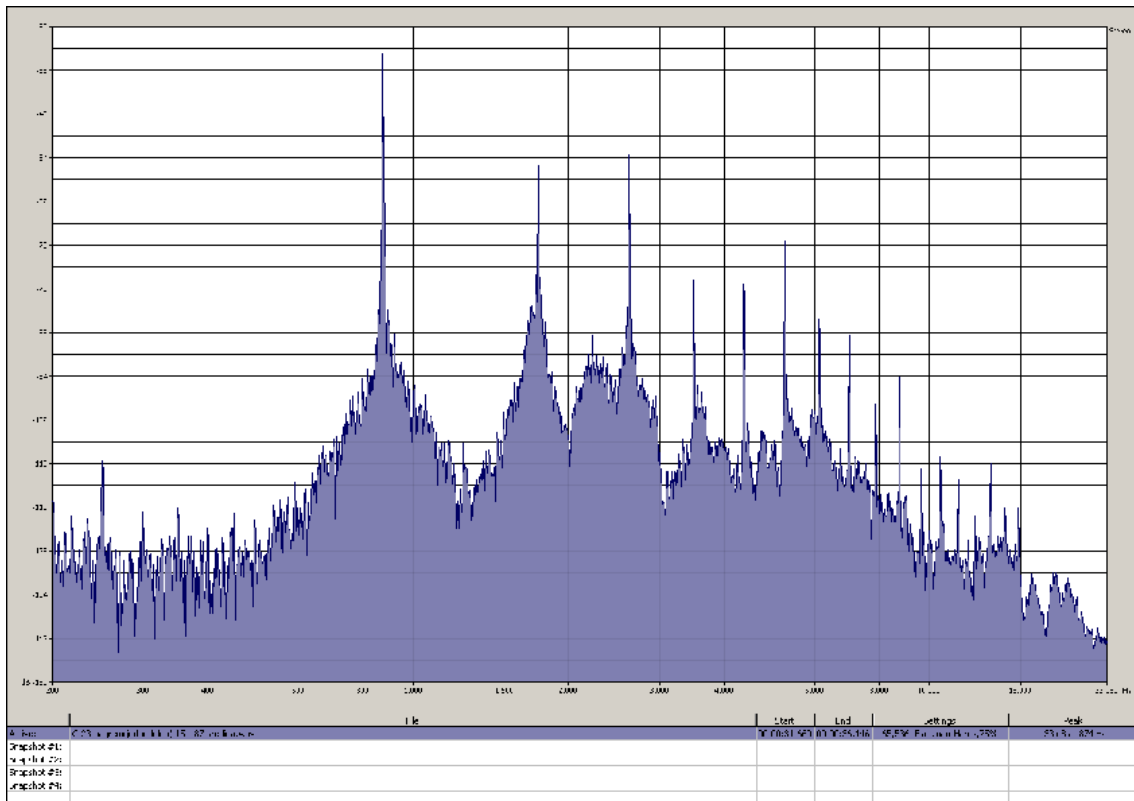
Slika 6.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



Slika 6.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

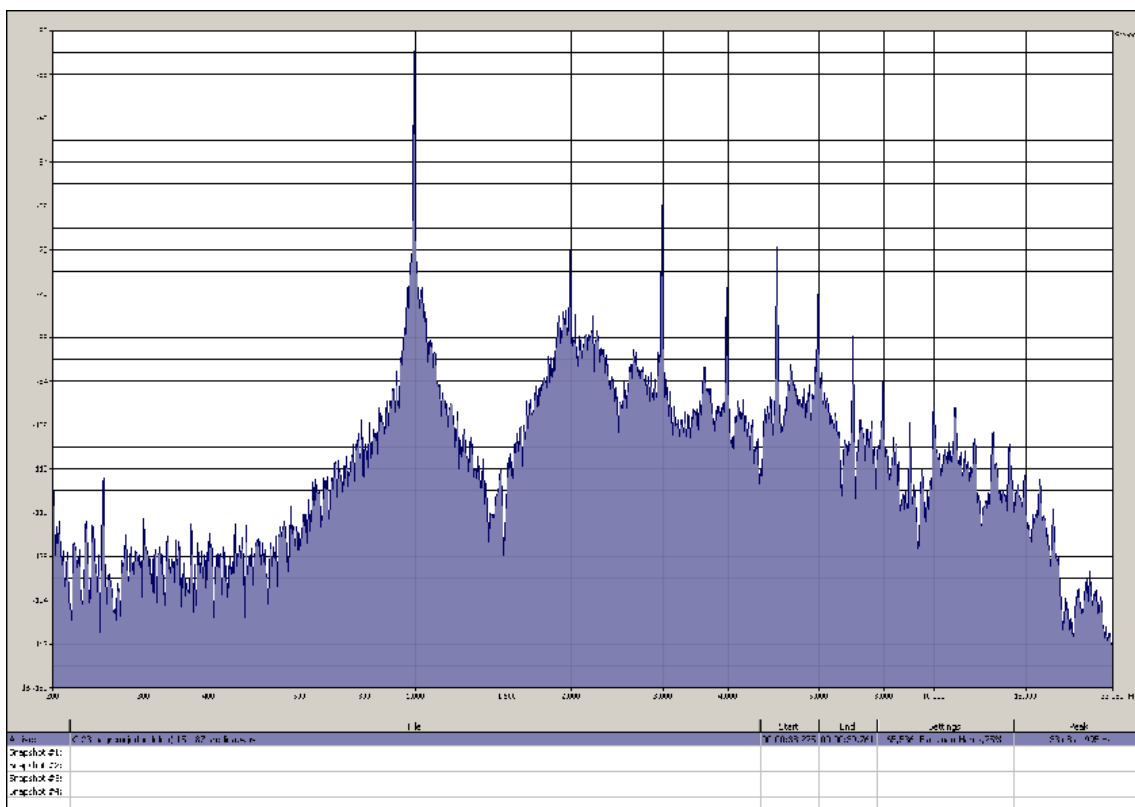


Slika 6.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrum,  $\Phi = 15$  mm)

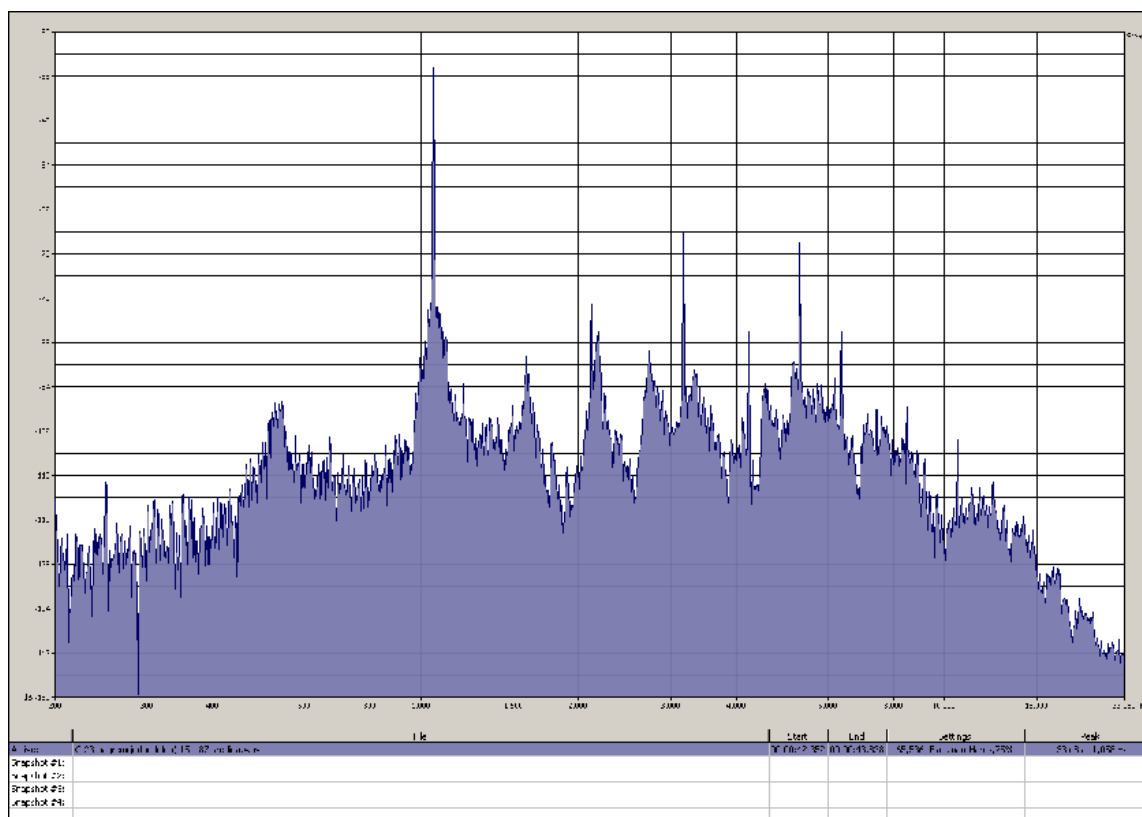


Slika 6.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrum,  $\Phi = 15$  mm)

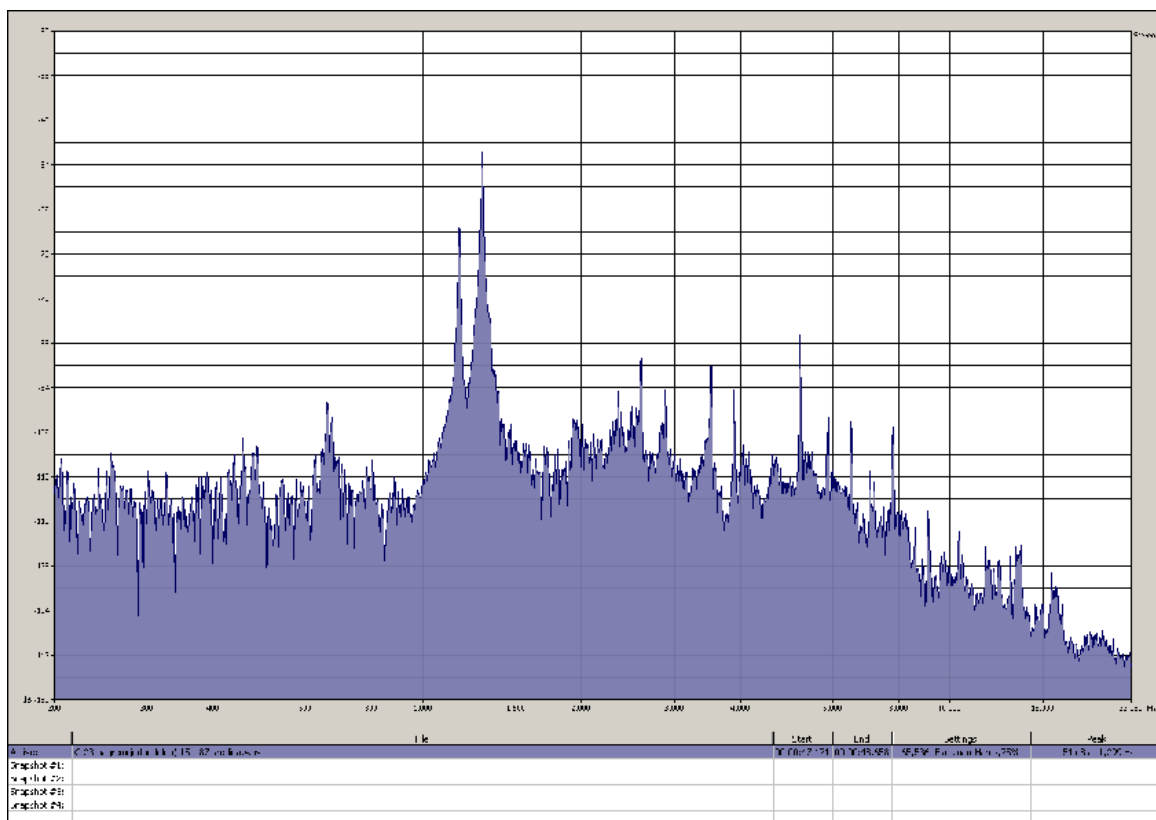




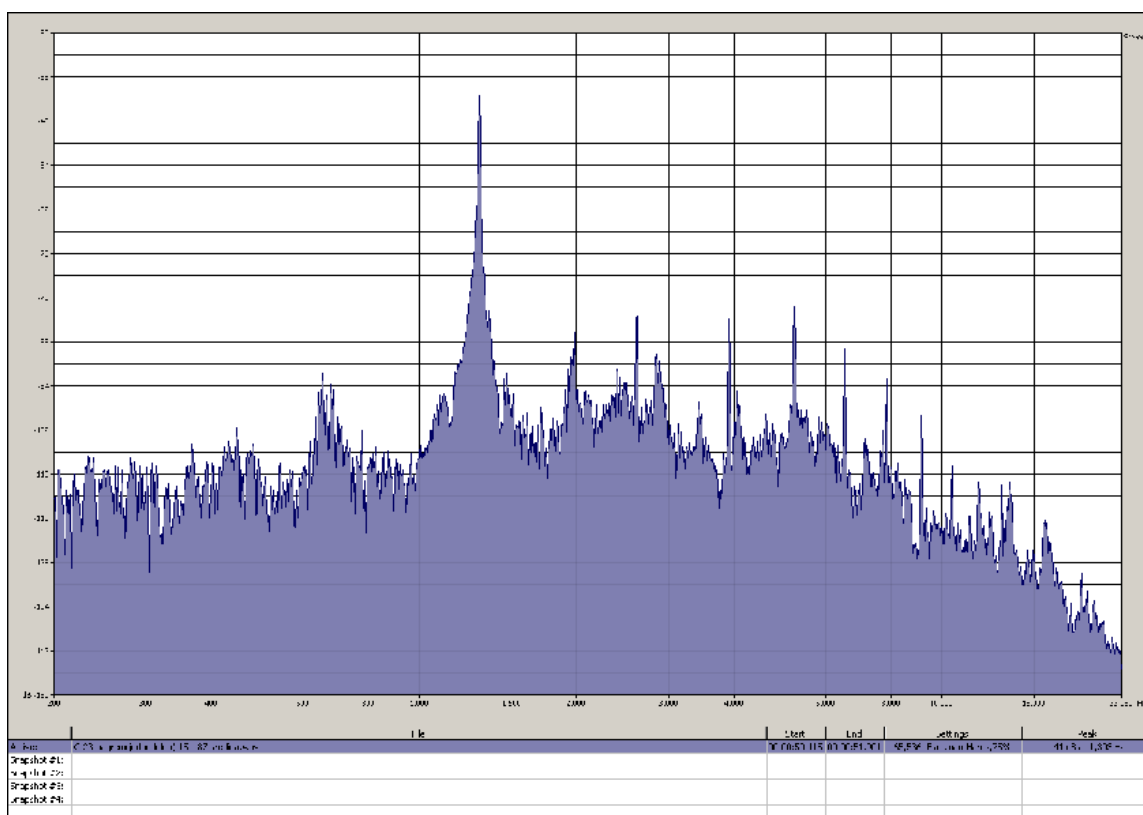
Slika 6.7: Frekvencijski spektar tona  $k^2$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



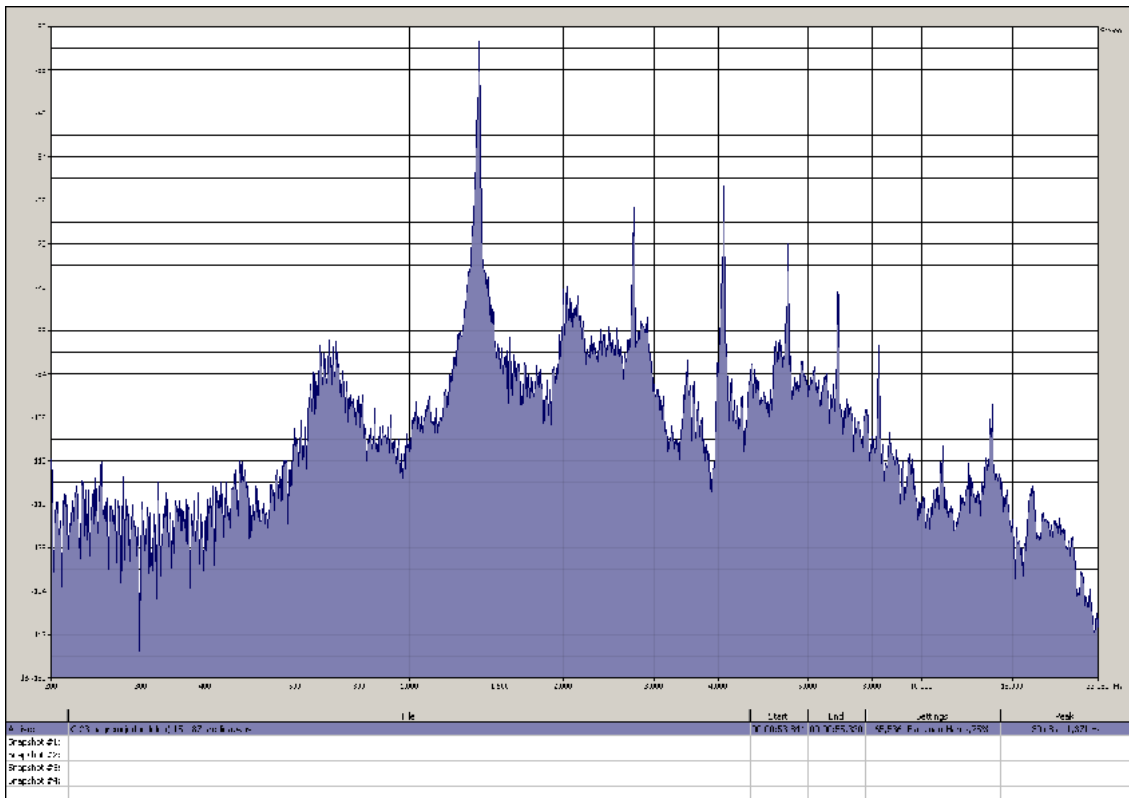
Slika 6.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



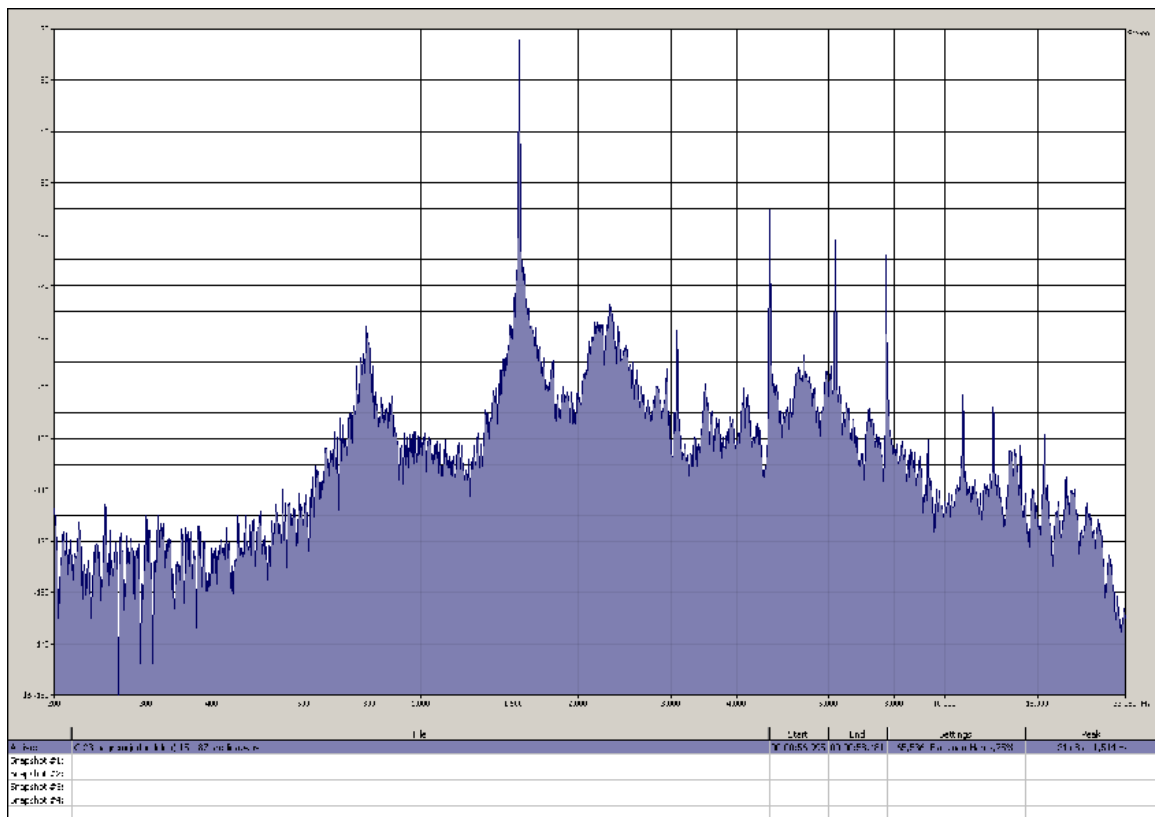
Slika 6.9: Frekvencijski spekter tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



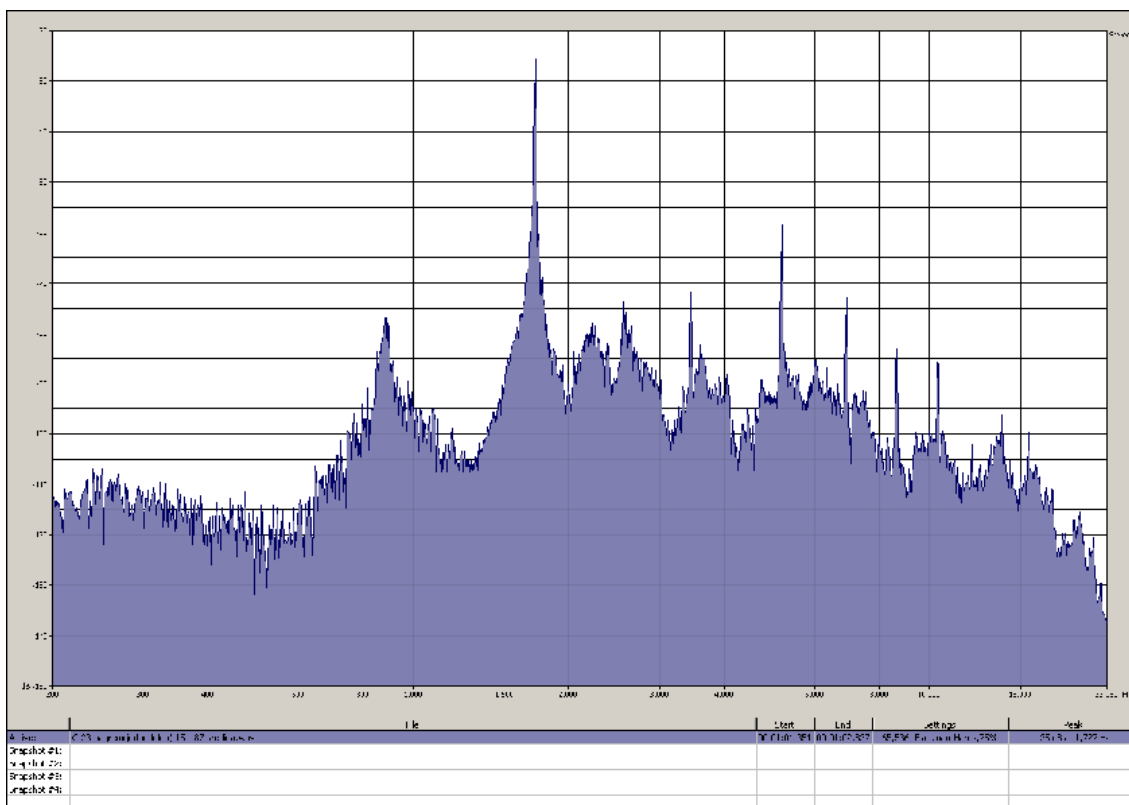
Slika 6.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



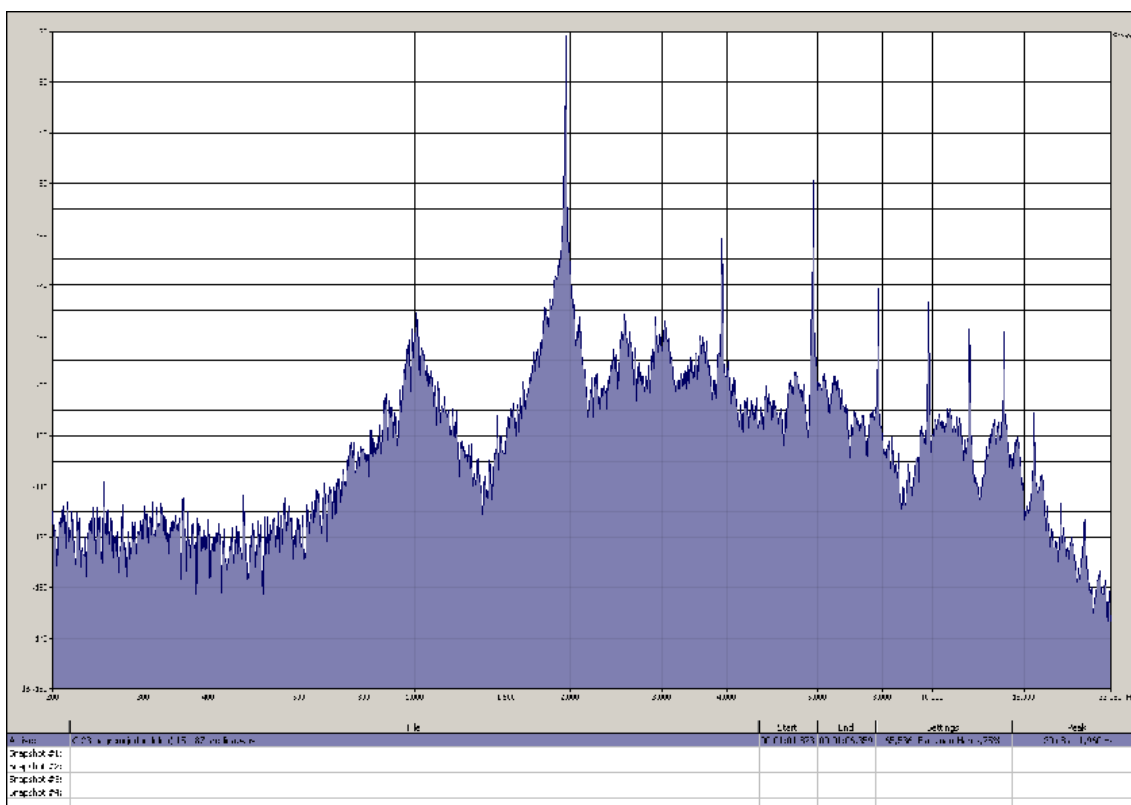
Slika 6.11: Frekvenčni spekter tona  $\bar{P}$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



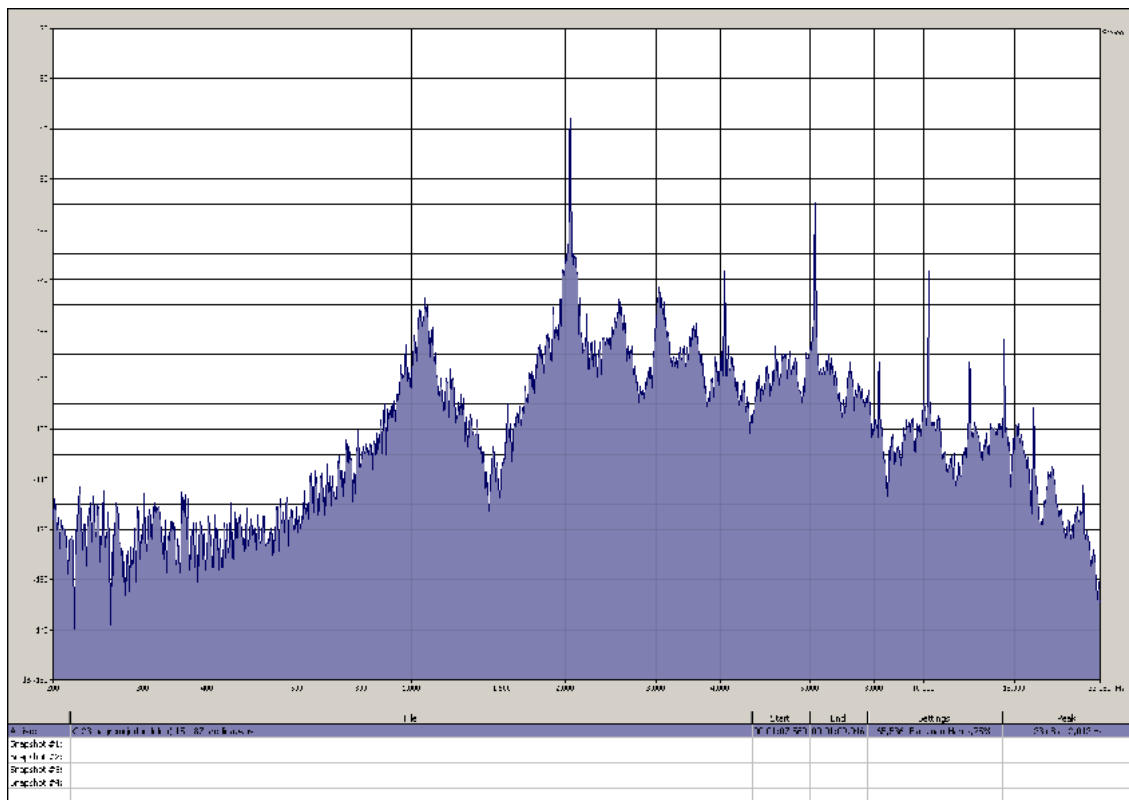
Slika 6.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)



*Slika 6.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)*

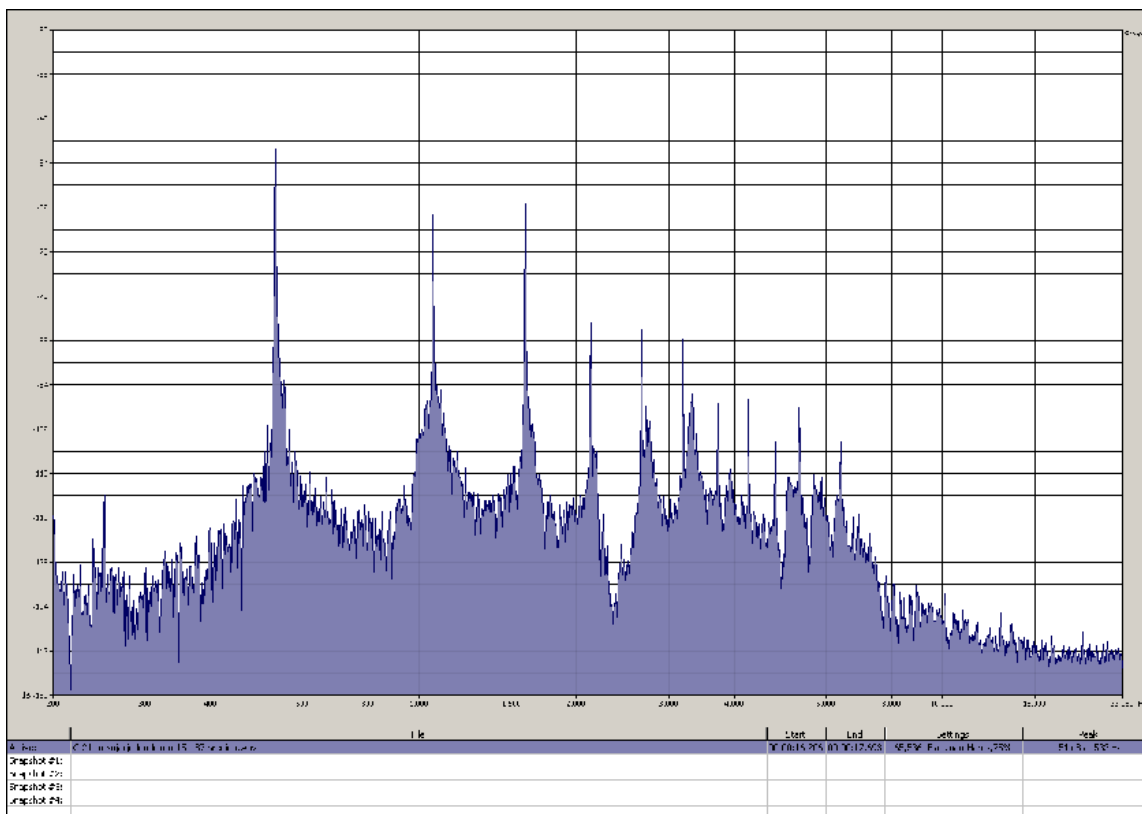


*Slika 6.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)*

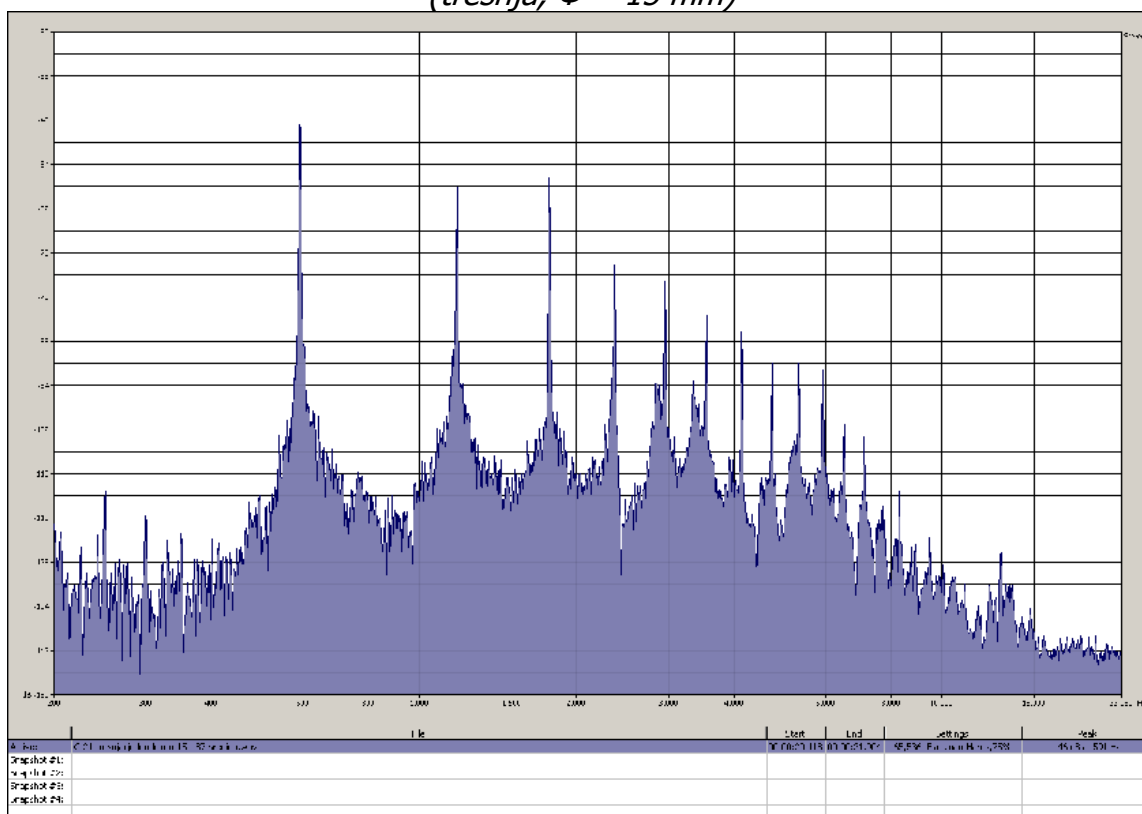


*Slika 6.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 23 (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)*

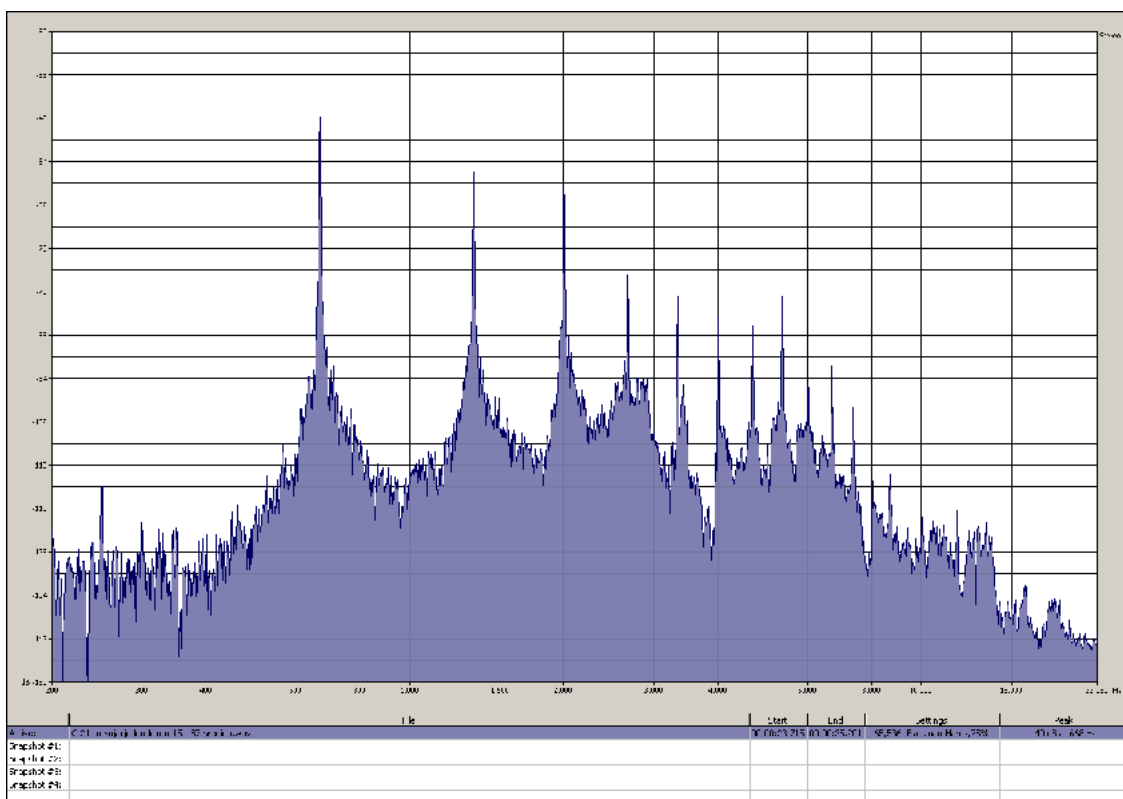
## DODATAK 7: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA JEDNODELNE C FRULE 24 (trešnja, $\Phi = 15$ mm)



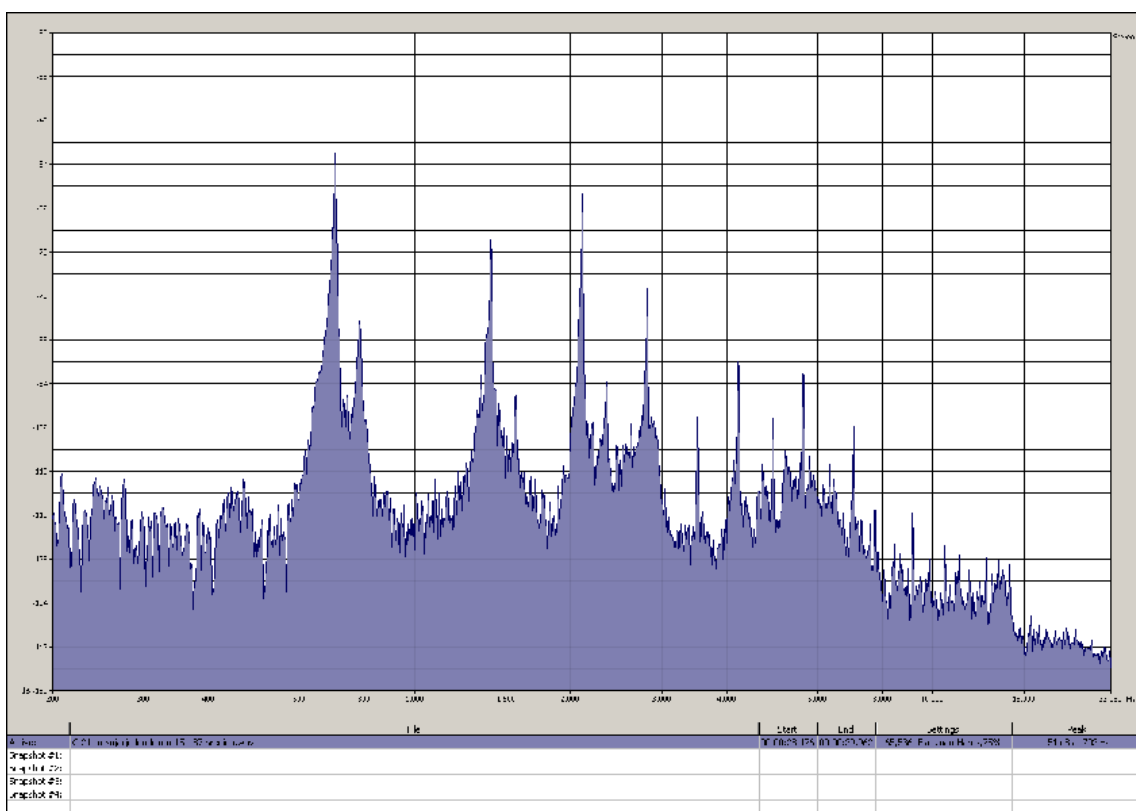
Slika 7.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)



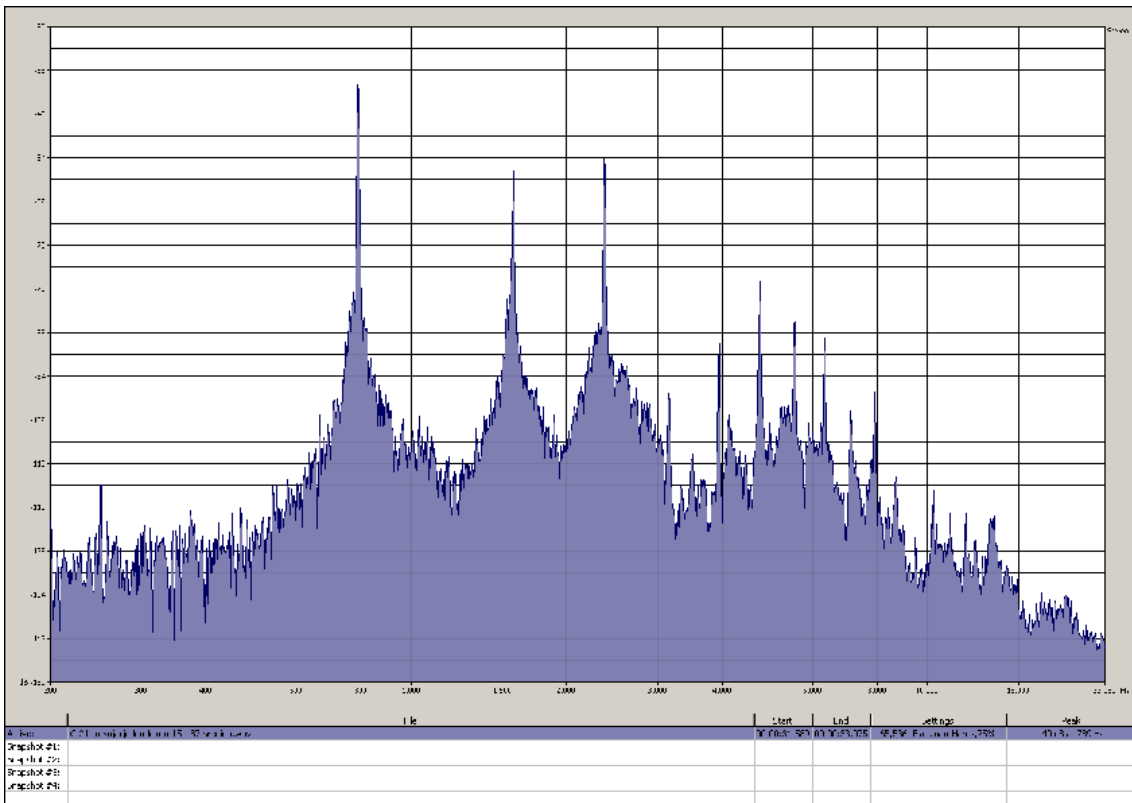
Slika 7.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)



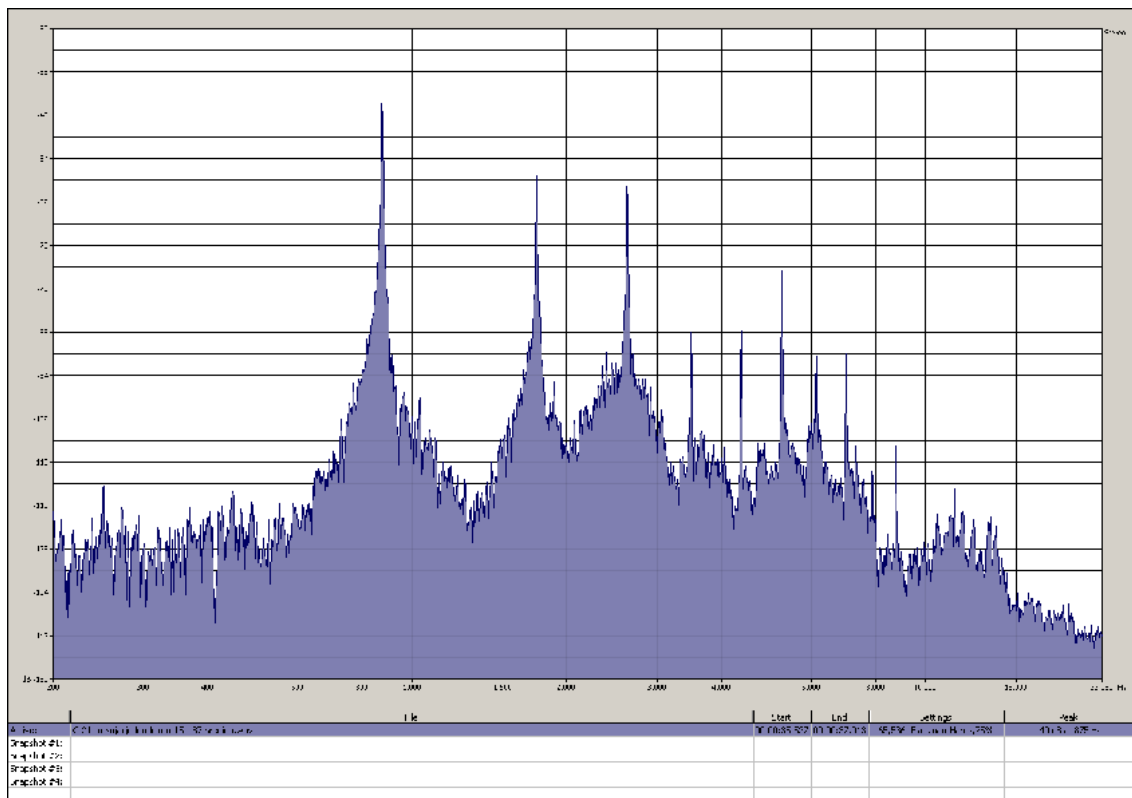
Slika 7.3: Frekvenjski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)



Slika 7.4: Frekvenjski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

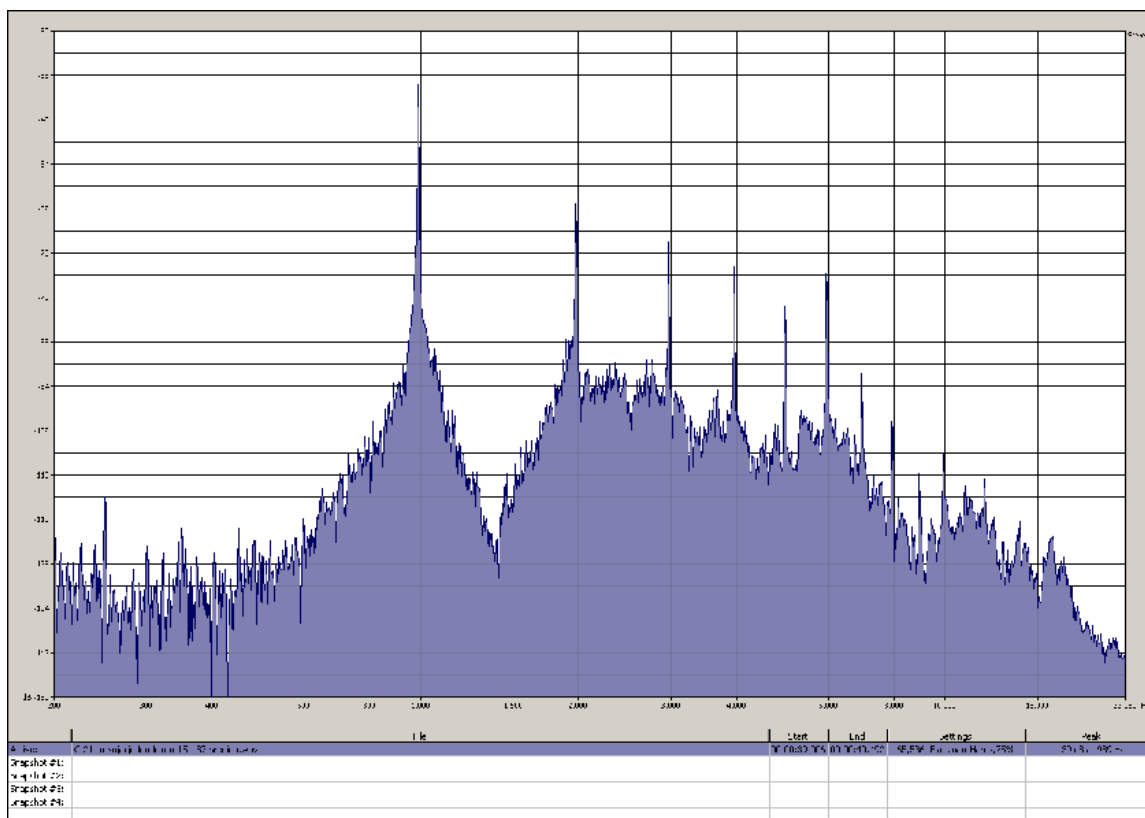


*Slika 7.5: Frekvencijski spekter tona  $g'$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)*

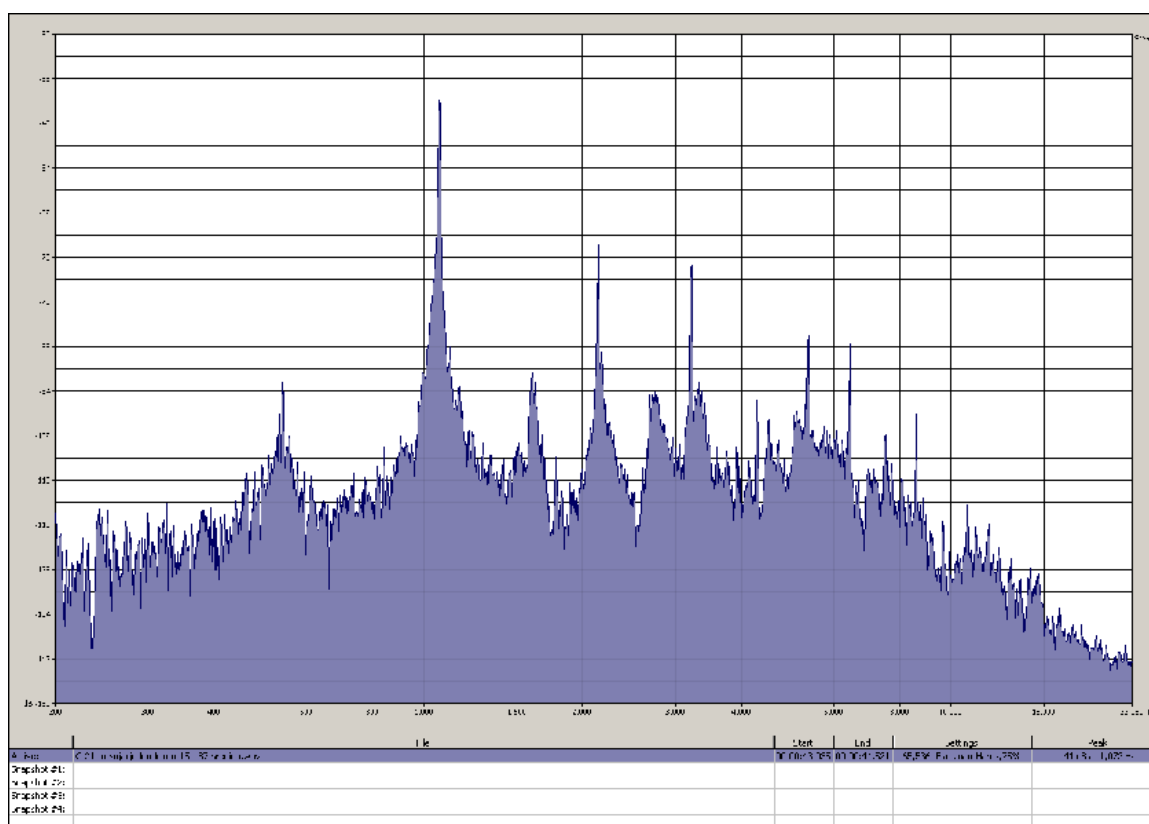


*Slika 7.6: Frekvencijski spekter tona  $a'$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)*

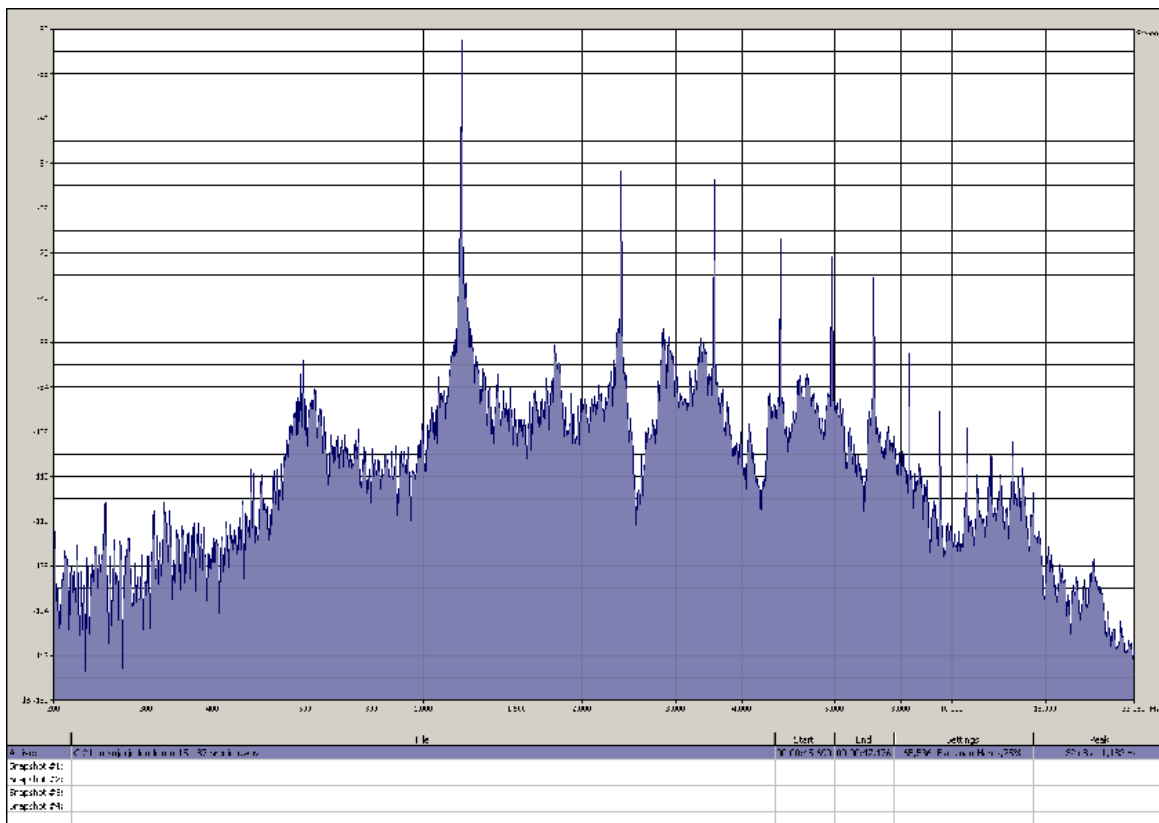




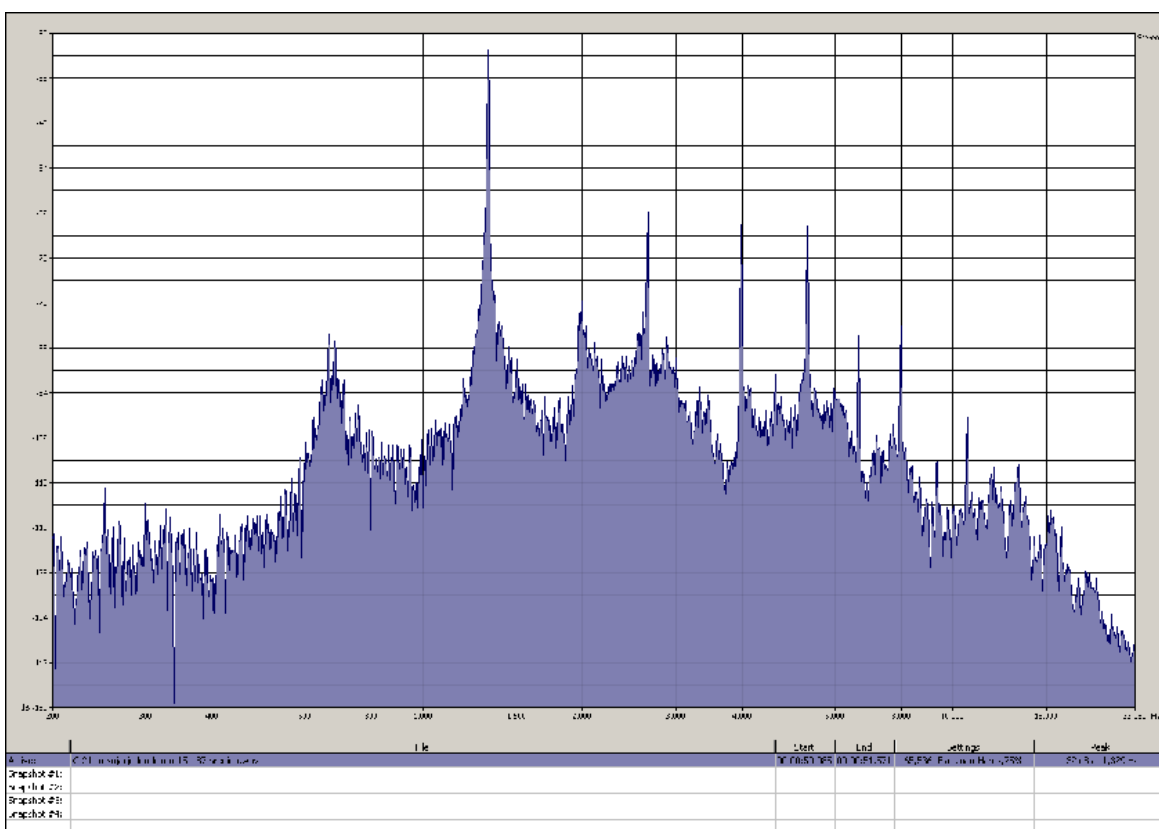
Slika 7.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



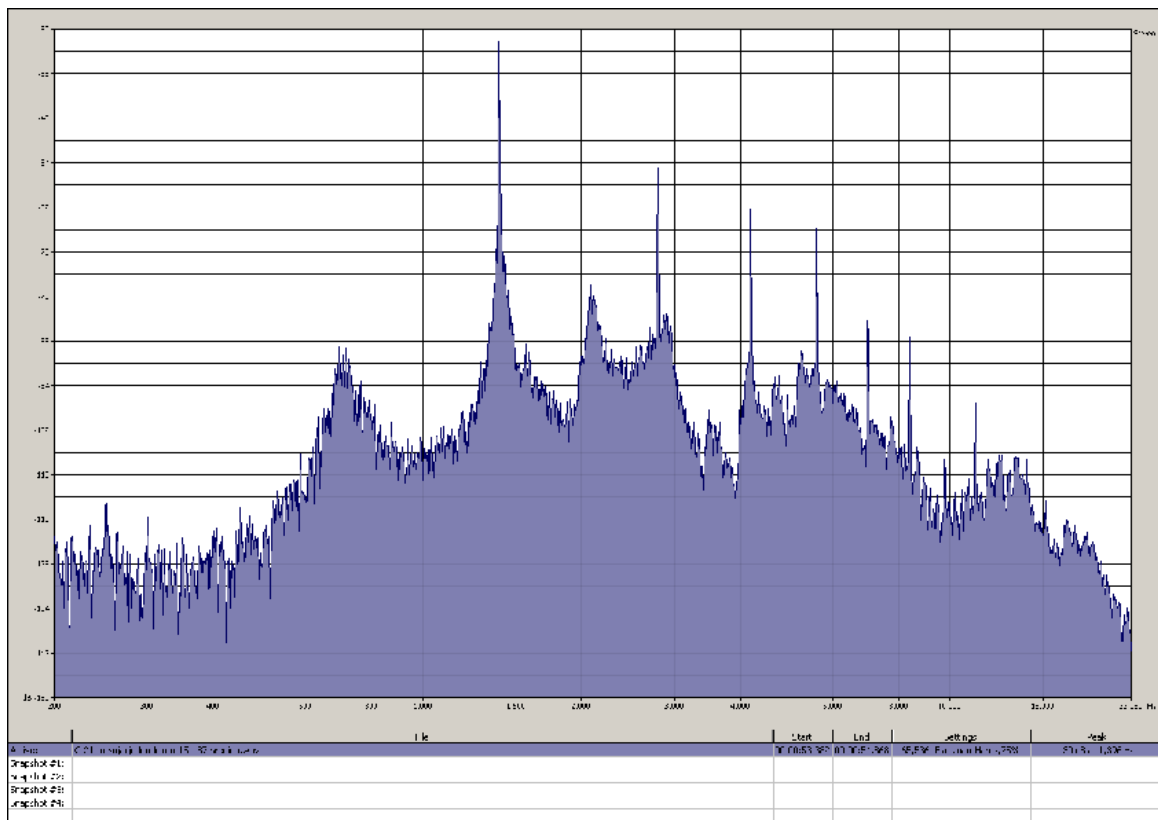
Slika 7.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



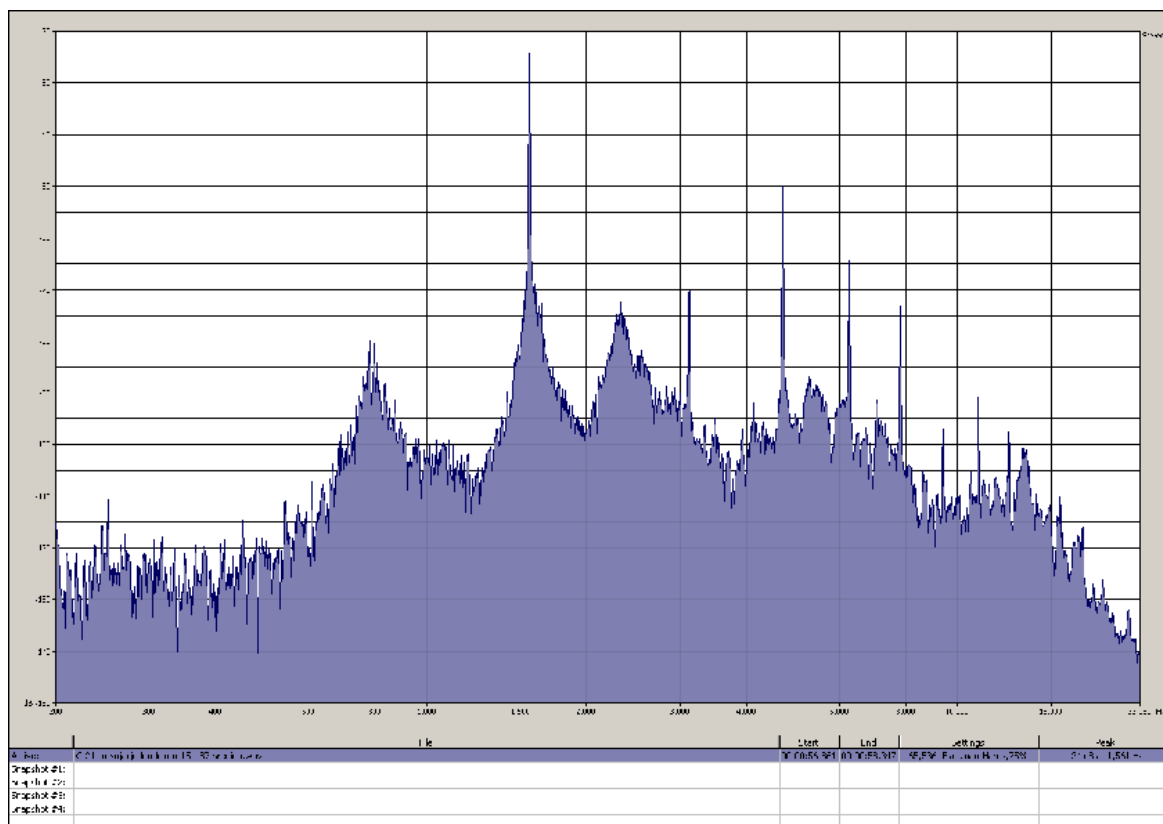
Slika 7.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)



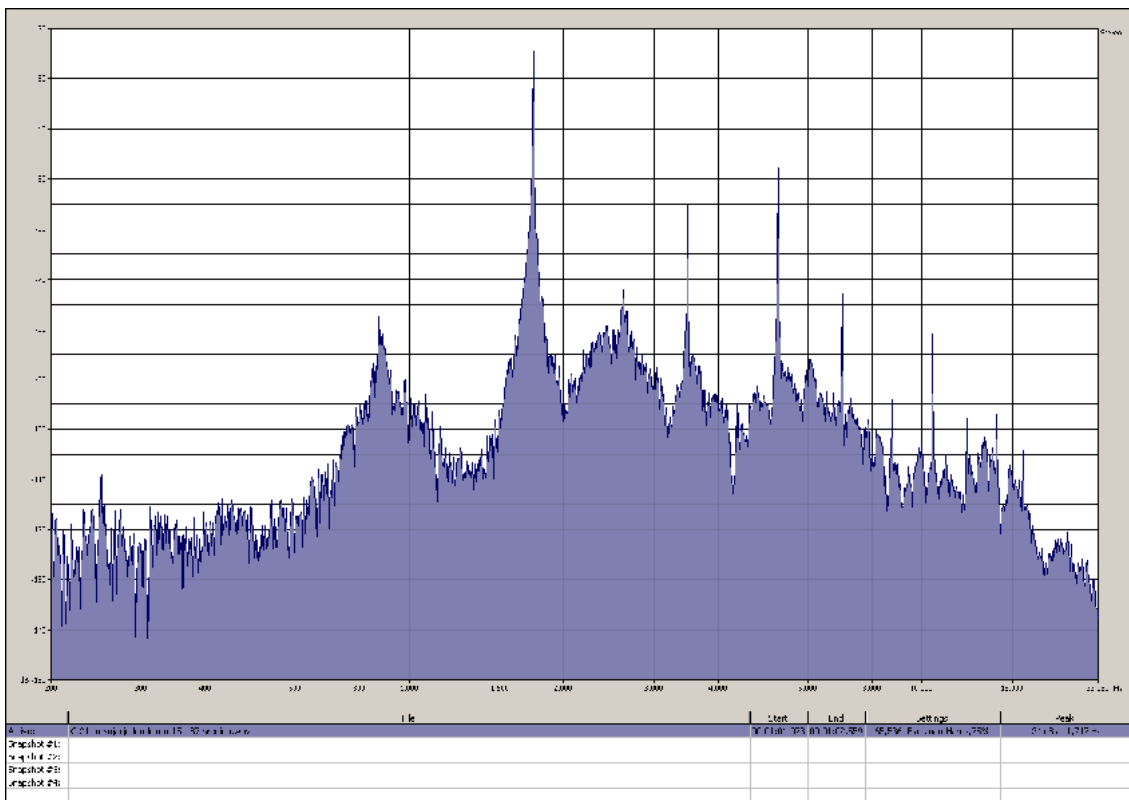
Slika 7.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)



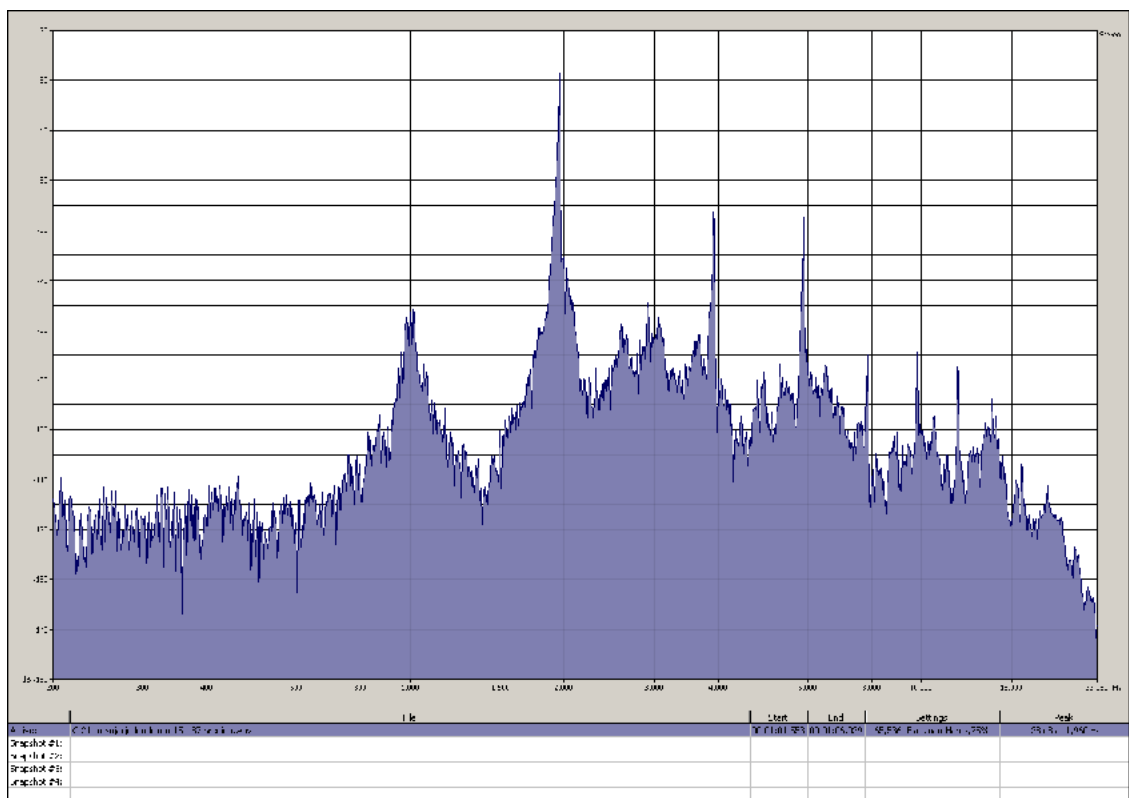
Slika 7.11: Frekvencijski spektar tona  $P$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



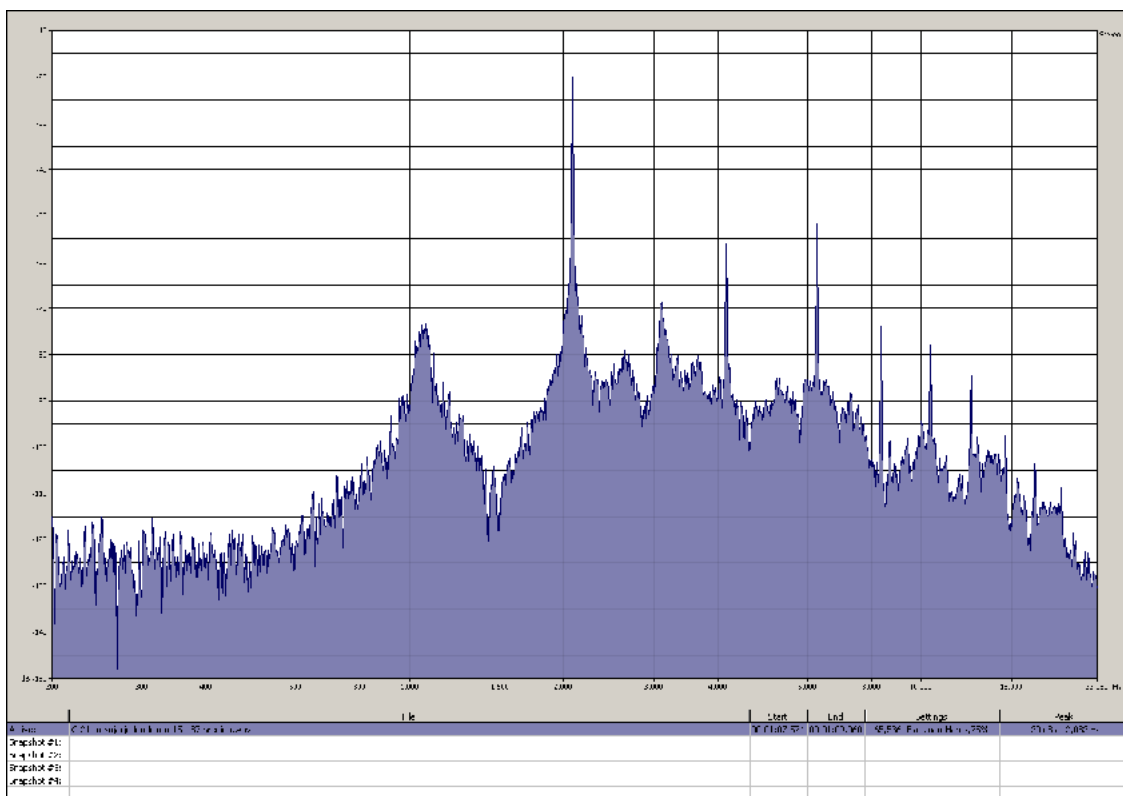
Slika 7.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



Slika 7.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



Slika 7.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15 \text{ mm}$ )



*Slika 7.15: Frekvencijski spekter tona  $c^A$ , odsviranog na fruli 24 (trešnja,  $\Phi = 15\text{ mm}$ )*

## DODATAK 8: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 18 (bukva, $\Phi = 14$ mm)

Tabela 8.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 18,  
(bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	528	1.009	4.75	-53
2	2 : 1	1059	2.023	12.5	-74.2
3	3 : 1	1588	3.034	18.25	-85.9
4	4 : 1	2133	4.076	40	-81.9
5	5 : 1	2648	5.080	31.75	-77.3
6	6 : 1	3184	6.085	44.5	-85
7	7 : 1	3689	7.050	26.25	-94.3
8	8 : 1	4235	8.093	49	-96.9
9	9 : 1	4774	9.123	64.75	-91.7
10	10 : 1	5283	10.96	50.5	-88.6

Tabela 8.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 18,  
(bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	609	1.036	21.67	-45.3
2	2 : 1	1210	2.060	35.34	-65.4
3	3 : 1	1824	3.105	62.01	-65.4
4	4 : 1	2415	4.111	65.68	-77.3
5	5 : 1	2999	5.105	82.35	-65.4
6	6 : 1				
7	7 : 1	4216	7.178	104.69	-84.5
8	8 : 1	4840	8.240	141.36	-99.1
9	9 : 1	5430	9.245	144.03	-87.1
10	10 : 1				

Tabela 8.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 18,  
(bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	683	1.036	23.74	-40.2
2	2 : 1	1364	2.068	45.48	-64.9
3	3 : 1	2046	3.103	68.22	-62.5
4	4 : 1	2735	4.148	97.96	-70.1
5	5 : 1	3396	5.151	99.70	-78.3
6	6 : 1	4082	6.191	126.44	-68.5
7	7 : 1	4752	7.208	137.18	-70.1
8	8 : 1	5406	8.200	131.92	-79.8
9	9 : 1	6121	9.284	187.66	-77.3
10	10 : 1	6773	10.273	180.40	-89.1

Tabela 8.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	726	1.039	27.54	-37.8
2	2:1	1455	2.083	58.08	-58.2
3	3:1	2183	3.125	87.62	-46.9
4	4:1	2890	4.137	96.16	-67
5	5:1	3638	5.208	145.7	-74.7
6	6:1	4334	6.205	143.24	-79.3
7	7:1	5088	7.255	178.78	-71.1
8	8:1	5792	8.292	204.32	-86
9	9:1	6498	9.303	211.86	-78.3
10	10:1	7257	10.390	272.4	-85.5

Tabela 8.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	811	1.034	27.01	-35
2	2:1	1618	2.063	50.02	-58.2
3	3:1	2426	3.094	74.03	-46.9
4	4:1	3243	4.136	107.04	-75.7
5	5:1	4083	5.182	143.05	-83.5
6	6:1	4907	6.259	203.06	-75.7
7	7:1	5686	7.252	198.07	-72.1
8	8:1	6498	8.288	226.08	-91.2
9	9:1	7291	9.299	235.09	-77.8
10	10:1				

Tabela 8.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	910	1.034	30	-34.5
2	2:1	1815	2.062	55	-55.6
3	3:1	2722	3.093	82	-51.5
4	4:1	3638	4.134	118	-68.5
5	5:1	4538	5.156	138	-68
6	6:1	5456	6.2	176	-73.7
7	7:1	6350	7.215	190	-71.1
8	8:1	7224	8.209	184	-84
9	9:1	8142	9.252	222	-81.4
10	10:1	9051	10.285	251	-94.8

Tabela 8.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1030	1.042752868	42.23	-31.4
2	2:1	2143	2.169533393	167.46	-73.7
3	3:1	3069	3.10698593	105.89	-45.8
4	4:1	4063	4.113305729	111.92	-71.1
5	5:1	5139	5.202628142	200.15	-56.7
6	6:1	6121	6.196786701	194.38	-68.5
7	7:1	7158	7.246626239	243.61	-64.4
8	8:1	8142	8.242809561	239.84	74.2
9	9:1	9177	9.290624336	287.07	-91.2
10	10:1	10249	10.37569722	371.3	-84

Tabela 8.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1074	1.02627807	27.5	-36
2	2:1	2163	2.066889832	70	-67
3	3:1	3228	3.084567806	88.5	-66.7
4	4:1	4294	4.103201147	108	-83.5
5	5:1	5356	5.118012422	123.5	-58.7
6	6:1	6468	6.180802007	189	-78.8
7	7:1	7529	7.194457716	203.5	-72.1
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 8.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1218	1.035193182	41.34	-28.8
2	2:1	2428	2.066981084	78.68	-62.3
3	3:1	3638	3.097066385	114.02	-54.1
4	4:1	4863	4.139921339	164.36	-65.9
5	5:1	6037	5.139359474	163.7	-58.2
6	6:1	7291	6.206902423	243.04	-70.1
7	7:1	8409	7.158867189	186.38	-79.8
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 8.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1352	1.025399883	33.49	-26.2
2	2:1	2685	2.036389561	47.98	-67.5
3	3:1	4045	3.067856899	89.47	-50
4	4:1	5381	4.081121872	106.96	-59.2
5	5:1	6742	5.113347642	149.45	-60.8
6	6:1	8068	6.119028297	156.94	-73.1
7	7:1	9478	7.188417229	248.43	-84
8	8:1	10682	8.101569196	133.92	-87.6
9	9:1	12040	9.13151967	173.41	-87.6
10	10:1				

Tabela 8.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1449	1.037289446	52.09	-24.2
2	2:1	2890	2.068851966	96.18	-61.8
3	3:1	4275	3.060326005	84.27	-49.4
4	4:1	5739	4.108353437	151.36	-66.4
5	5:1	7224	5.17141405	239.45	-53.6
6	6:1	8684	6.216578019	302.54	-77.8
7	7:1	10016	7.170111174	237.63	-68.5
8	8:1	11448	8.193799171	270.72	-85
9	9:1	13020	9.320571834	447.81	-90.7
10	10:1				



Tabela 8.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1803	1.022334489	35.02	-20.8
2	2 : 1	3228	2.058899728	92.04	-54.6
3	3 : 1	4818	3.072743275	117.1	-43.8
4	4 : 1	6380	4.068929451	108.08	-6..0
5	5 : 1	7957	5.074682075	117.1	-59.2
6	6 : 1	9565	6.10020536	157.12	-74.2
7	7 : 1	11185	7.133381803	209.14	-74.2
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 8.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1790	1.017045455	30	-17.5
2	2 : 1	3605	2.048295455	85	-53.6
3	3 : 1	5381	3.057386364	101	-42.7
4	4 : 1	7191	4.085795455	151	-60.8
5	5 : 1	9010	5.119318182	210	-61.8
6	6 : 1	10831	6.153977273	271	-65.9
7	7 : 1	12549	7.130113636	229	-74.2
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 8.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1991	1.00783081	15.47	-17
2	2 : 1	3989	2.019204973	37.94	-56.7
3	3 : 1	6034	3.05437022	107.41	-45.8
4	4 : 1	7994	4.046509038	91.88	-58.7
5	5 : 1	9970	5.046746949	92.35	-67.5
6	6 : 1	11875	6.011045137	21.82	-73.7
7	7 : 1	13385 - 13886		7.2	57.2
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 8.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 18, (bukva,  $\Phi = 14$  mm)

18	bukva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	2123	1.014333493	30	-20.8
2	2 : 1	4235	2.023411371	49	-58.7
3	3 : 1	6350	3.033922599	71	-39.1
4	4 : 1	8448	4.036311515	76	-63.4
5	5 : 1	10549	5.040133779	84	-65.9
6	6 : 1	12724	6.079311992	168	-72.1
7	7 : 1				
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

## DODATAK 9: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 19 (mahagoni, $\Phi = 14$ mm)

Tabela 9.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 19,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni $\Phi = 14$		NEUMANN U 87		NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	533	1.018	9.75	-51.5
2	2 : 1	1059	2.023	12.5	-69
3	3 : 1	1588	3.034	18.25	-71.1
4	4 : 1	2133	4.076	40	-80.4
5	5 : 1	2680	5.083	43.75	-76.8
6	6 : 1	3198	6.111	58.5	-84.5
7	7 : 1	3689	7.050	26.25	-85.3
8	8 : 1	4255	8.133	69	-87.1
9	9 : 1	4752	9.081	42.75	-94.8
10	10 : 1	5307	10.042	74.5	-87.6

Tabela 9.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 19,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni $\Phi = 14$		NEUMANN U 87		NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	601	1.023	13.67	-46.9
2	2 : 1	1222	2.080	47.34	-61.3
3	3 : 1	1824	3.105	62.01	-61.8
4	4 : 1	2426	4.130	76.68	-67.5
5	5 : 1	3040	5.166	103.35	-65.9
6	6 : 1	3638	6.194	114.02	-86
7	7 : 1	4255	7.244	143.69	-77.8
8	8 : 1	4840	8.240	141.36	-82.9
9	9 : 1	5456	9.289	170.03	-84.5
10	10 : 1	6009	1.231	135.7	-82.9

Tabela 9.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 19,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni $\Phi = 14$		NEUMANN U 87		NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	663	1.036	23.74	-40.2
2	2 : 1	1364	2.066	45.48	-53.6
3	3 : 1	2046	3.103	68.22	-61.3
4	4 : 1	2735	4.148	97.96	-70.1
5	5 : 1	3427	5.198	130.7	-79.3
6	6 : 1	4101	6.220	145.44	-70.6
7	7 : 1	4774	7.241	159.18	-73.7
8	8 : 1	5430	8.236	155.92	-83.5
9	9 : 1	6093	9.242	159.66	-80.4
10	10 : 1	6804	10.320	211.4	-87.6

Tabela 9.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	732	1.048	41.54	-39.1
2	2:1	1455	2.083	58.08	-50.5
3	3:1	2183	3.125	87.62	-47.4
4	4:1	2904	4.157	110.16	-72.6
5	5:1	3622	5.185	129.7	-73.1
6	6:1	4354	6.233	163.24	-80.9
7	7:1	5092	7.290	202.78	-77.3
8	8:1	5819	8.331	231.32	-80.9
9	9:1	6498	9.303	211.86	-78.8
10	10:1	7224	10.342	239.4	-86

Tabela 9.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	822	1.048	38.01	-35
2	2:1	1633	2.082	65.02	-54.6
3	3:1	2438	3.109	86.03	-43.8
4	4:1	3258	4.155	122.04	-74.2
5	5:1	4083	5.182	143.05	-68.5
6	6:1	4907	6.259	203.06	-70.6
7	7:1	5686	7.252	198.07	-73.7
8	8:1	6498	8.288	226.08	-74.7
9	9:1	7358	9.385	302.09	-81.9
10	10:1	8105	10.338	265.1	-93.8

Tabela 9.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	918	1.043	38	-34
2	2:1	1832	2.081	72	-50.5
3	3:1	2748	3.122	108	-51
4	4:1	3672	4.127	152	-63.4
5	5:1	4559	5.180	159	-73.1
6	6:1	5456	6.2176	176	-58
7	7:1	6380	7.25	220	-72.6
8	8:1	7324	8.322	2620	-79.3
9	9:1	8180	9.295	260	-87.1
10	10:1	9093	10.332	293	-89.6

Tabela 9.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1044	1.056926208	56.23	-29.3
2	2:1	2075	2.100691457	99.46	-54.1
3	3:1	3111	3.149518613	147.69	-44.8
4	4:1	4139	4.190246717	187.92	-78.3
5	5:1	5186	5.250210069	247.15	-80.8
6	6:1	6206	6.282839122	279.38	-63.9
7	7:1	7257	7.346852	342.61	-68
8	8:1	8332	8.435162032	429.84	-71.6
9	9:1				
10	10:1	10391	10.51965539	513.3	-9.7

Tabela 9.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19	<i>mahagoni</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1079	1.031055901	32.5	-37.5
2	2:1	2153	2.05733397	60	-65.9
3	3:1	3228	3.084567606	88.5	-80.8
4	4:1				
5	5:1	5356	5.118012422	123.5	-84.9
6	6:1	6439	6.152890588	160	-70.8
7	7:1	7529	7.194457716	203.5	-76.8
8	8:1	8526	8.147157191	154	-88.1
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 9.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19	<i>mahagoni</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1216	1.035193162	41.34	-31.9
2	2:1	2415	2.055914052	65.68	-57.2
3	3:1	3622	3.083445423	98.02	-62.3
4	4:1	4863	4.139921339	164.36	-65.9
5	5:1	6065	5.163196159	191.7	-63.4
6	6:1	7257	6.177957877	209.04	-69
7	7:1	8487	7.225069382	264.38	-80.4
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 9.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19	<i>mahagoni</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1364	1.034501066	45.49	-28.8
2	2:1	2710	2.055350358	72.98	-62.8
3	3:1	4045	3.087856899	89.47	-46.3
4	4:1	5406	4.100082689	131.96	-62.3
5	5:1	6711	5.089836255	118.45	-64.9
6	6:1	8105	6.147090276	187.94	-78.8
7	7:1	9434	7.155046226	204.43	-78.8
8	8:1	10831	8.214575544	282.92	-83.5
9	9:1	12096	9.173991854	229.41	-96.9
10	10:1				

Tabela 9.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19	<i>mahagoni</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1442	1.032276386	45.09	-26.2
2	2:1	2890	2.068851966	96.18	-61.8
3	3:1	4334	3.102562083	143.27	-51
4	4:1	5792	4.146294321	204.36	-63.4
5	5:1	7257	5.195037619	272.45	-64.9
6	6:1	8684	6.216576019	302.54	-71.6
7	7:1	10062	7.203040998	283.63	-81.4
8	8:1	11499	8.231740055	323.72	-88.1
9	9:1	12980	9.27761989	387.81	-91.7
10	10:1				

Tabela 9.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1598	1.017870128	28.02	-22.1
2	2:1	3198	2.039566831	62.04	-54.8
3	3:1	4818	3.072743275	114.06	-47.4
4	4:1	6439	4.108557482	167.08	-88
5	5:1	7994	5.098279315	15833.9	-68.5
6	6:1	9709	6.192043266	301.12	-77.3
7	7:1	11185	7.133381803	209.14	-79.3
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 9.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1799	1.022159091	39	-19
2	2:1	3599	2.039204645	69	-51
3	3:1	5356	3.043181818	78	-45.8
4	4:1	7125	4.048295455	85	-62.3
5	5:1	8968	5.095454545	168	-65.9
6	6:1	10833	6.041477273	73	-77.3
7	7:1	12549	7.130113836	229	-77.8
8	8:1	14275	8.110795455	195	-92.2
9	9:1	16090	9.142045455	250	-85
10	10:1				

Tabela 9.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	2000	1.012386549	24.47	-17
2	2:1	4008	2.028822645	56.94	-56.7
3	3:1	5982	3.028048169	55.41	-45.8
4	4:1	7994	4.046509038	91.88	-65.9
5	5:1	9970	5.046746949	92.35	-73.7
6	6:1	11875	6.011045137	21.82	-67
7	7:1	13951	7.061902376	122.29	-87.1
8	8:1	15942	8.069733186	137.76	-73.7
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 9.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 19, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

19 mahagoni		$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	2143	1.023889154	50	-22.6
2	2:1	4256	2.033444816	70	-62.3
3	3:1	6409	3.062111801	130	-46.9
4	4:1	8487	4.054945055	115	-62.3
5	5:1	10833	5.080267559	168	-74.2
6	6:1	12724	6.079311992	166	-69
7	7:1				
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

## DODATAK 10: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 20 (šljiva, $\Phi = 14$ mm)

Tabela 10.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 20,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		šljiva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	531	1.015	7.75		-51.4
2	2 : 1	1055	2.053	8.5		-71.9
3	3 : 1	1590	3.038	20.25		-71.4
4	4 : 1	2116	4.043	23		-80.9
5	5 : 1	2649	5.062	32.75		-83.3
6	6 : 1	3201	6.117	61.5		-86.6
7	7 : 1	3702	7.075	39.25		-103.3
8	8 : 1	4224	8.072	38		-93.8
9	9 : 1	4778	9.131	68.75		-93.8
10	10 : 1	5287	10.104	54.5		-100.9

Tabela 10.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 20,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		šljiva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	608	1.035	20.67		-45.8
2	2 : 1	1210	2.060	35.34		-61.4
3	3 : 1	1806	3.074	44.01		-62.3
4	4 : 1	2405	4.094	55.68		-66.6
5	5 : 1	3023	5.147	86.35		-70
6	6 : 1	3521	5.994	93.69		-82.3
7	7 : 1	4205	7.159	121.36		-83.3
8	8 : 1	4820	8.206	121.36		-88.5
9	9 : 1	5428	9.241	142.03		-90.9
10	10 : 1	6060	10.317	186.7		-92.8

Tabela 10.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 20,  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		šljiva	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	662	1.034	22.74		-39
2	2 : 1	1363	2.067	44.48		-58.5
3	3 : 1	2043	3.098	65.22		-66.1
4	4 : 1	2720	4.125	82.96		-68
5	5 : 1	3405	5.164	108.7		-80.9
6	6 : 1	4078	6.185	122.44		-89.5
7	7 : 1	4778	7.247	163.18		-80
8	8 : 1	5452	8.269	177.92		-85.7
9	9 : 1	6140	9.313	206.66		-85.2
10	10 : 1	6824	10.350	231.4		-91.4

Tabela 10.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	735	1.052	38.54	-37.6
2	2 : 1	1482	2.093	85.08	-53.3
3	3 : 1	2202	3.152	108.62	-50.4
4	4 : 1	2919	4.179	125.16	-61.4
5	5 : 1	3653	5.230	160.7	-70.9
6	6 : 1	4375	6.283	184.24	-74.7
7	7 : 1	5149	7.371	259.78	-7.6
8	8 : 1	5876	8.412	288.32	-76.6
9	9 : 1	6530	9.349	243.86	-81.4
10	10 : 1	7290	10.437	305.4	-83.8

Tabela 10.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	821	1.047	37.01	-34.2
2	2 : 1	1618	2.083	50.02	-57.6
3	3 : 1	2437	3.108	85.03	-46.6
4	4 : 1	3272	4.173	136.04	-72.3
5	5 : 1	4080	5.178	140.05	-64.7
6	6 : 1	4906	6.257	202.06	-71.9
7	7 : 1	5698	7.267	210.07	-79
8	8 : 1	6530	8.329	258.08	-76.6
9	9 : 1	7354	9.380	298.09	-82.3
10	10 : 1	8086	10.288	226.1	-94.7

Tabela 10.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	913	10.375	33	-34.2
2	2 : 1	1822	2.070	62	-57.6
3	3 : 1	2744	3.118	104	-58.5
4	4 : 1	3605	4.098	85	-68
5	5 : 1	4522	5.136	122	-69
6	6 : 1	5428	6.166	148	-71.9
7	7 : 1	6332	7.195	172	-76.1
8	8 : 1	7258	8.247	218	-85.7
9	9 : 1				
10	10 : 1	9044	10.277	244	-90.9

Tabela 10.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1023	1.035666198	35.23	-31.4
2	2 : 1	2043	2.068295251	67.46	-61.9
3	3 : 1	3077	3.115097644	113.69	-50.9
4	4 : 1	4098	4.148714316	144.92	-80.9
5	5 : 1	5104	5.167194792	165.15	-64.2
6	6 : 1	6086	6.161353351	159.38	-66.6
7	7 : 1	7163	7.251688146	248.61	-74.7
8	8 : 1	8210	8.311651498	307.84	-77.6
9	9 : 1				
10	10 : 1	10230	10.35666198	352.3	-93.3

Tabela 10.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	IZM ERENA FREKVENC IJA $f_1$	IZM ERENI ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZM ERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1084	1.035833731	37.5	-34.2	
2	2 : 1	2163	2.066889632	70	-65.2	
3	3 : 1	3229	3.085523172	89.5	-61.4	
4	4 : 1	4299	4.107978978	113	-82.3	
5	5 : 1	5381	5.141901577	148.5	-66.1	
6	6 : 1	6473	6.185379838	194	-72.3	
7	7 : 1	7551	7.215480172	225.5	-80.9	
8	8 : 1	8579	8.197802198	207	-87.1	
9	9 : 1					
10	10 : 1	10737	10.259914	272	-97.6	

Tabela 10.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	IZM ERENA FREKVENC IJA $f_1$	IZM ERENI ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZM ERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1210	1.030085301	35.34	-28.5	
2	2 : 1	2415	2.055914052	65.68	-60	
3	3 : 1	3605	3.06897315	81.02	-60.9	
4	4 : 1	4820	4.103315002	124	-67.6	
5	5 : 1	6033	5.135954234	159.7	-67.6	
6	6 : 1	7194	6.124325337	146.04	-70.4	
7	7 : 1	8466	7.207191868	243.38	-80.9	
8	8 : 1	9576	8.152146153	178.72	-91.9	
9	9 : 1	10737	9.140517256	165.06	-97.1	
10	10 : 1	11986	10.20380365	239.4	-97.6	

Tabela 10.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20		<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	IZM ERENA FREKVENC IJA $f_1$	IZM ERENI ODNOS FREKVENC IJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZM ERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1340	1.016298701	21.49	-28.5	
2	2 : 1	2684	2.035831129	46.98	-64.7	
3	3 : 1	4024	3.05192983	68.47	-49	
4	4 : 1	5428	4.11676817	153.96	-62.3	
5	5 : 1	6735	5.108036619	1473.45	-67.1	
6	6 : 1	8066	6.117511433	154.94	-73.3	
7	7 : 1	9493	7.199793707	263.43	-82.3	
8	8 : 1	10785	8.179687678	236.92	-91.9	
9	9 : 1					
10	10 : 1					



Tabela 10.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1604	1.022972232	36.02	-24.2
2	2 : 1	3201	2.041480121	65.04	-80.9
3	3 : 1	4820	3.074018801	116.06	-48.5
4	4 : 1	6360	4.056174186	88.08	-72.3
5	5 : 1	7961	5.077233128	121.1	-66.1
6	6 : 1	9576	6.107220755	244.14	-91.4
7	7 : 1	11220	7.155703517	259.16	-82.8
8	8 : 1	12803	8.16528272		-89.5
9	9 : 1			259.16	
10	10 : 1				

Tabela 10.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1782	1.0125	22	-17.6
2	2 : 1	3573	2.030113636	53	-55.2
3	3 : 1	5357	3.04375	77	-43.8
4	4 : 1	7036	3.998863636	-2	-73.3
5	5 : 1	8886	5.048863636	86	-65.7
6	6 : 1	10643	6.047159091	83	-76.6
7	7 : 1	12361	7.023295455	41	-90
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 10.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1990	1.007324817	14.47	-18.5
2	2 : 1	3972	2.010599687	20.94	-52.8
3	3 : 1	5954	3.013874758	27.41	-45.2
4	4 : 1	7961	4.02990466	58.88	-82.8
5	5 : 1	9920	5.021437285	42.35	-65.7
6	6 : 1	11829	5.987760247	-24.18	-86.1
7	7 : 1				
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 10.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 20, (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

20	<i>šljiva</i>	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	2135	1.02006669	42	-23.3
2	2 : 1	4261	2.035833731	75	-56.5
3	3 : 1	6332	3.025322504	53	-45.2
4	4 : 1	8429	4.027233636	57	-61.2
5	5 : 1	10596	5.062589584	131	-76.6
6	6 : 1	12747	6.090301003	189	-80.4
7	7 : 1	15000	7.166746297	349	-78.5
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

## DODATAK 11: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 21 (bagrem, $\Phi = 14$ mm)

Tabela 11.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 21,  
(bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	539	1.030	15.78	-50.4
2	2 : 1	1071	2.048	24.5	-66.1
3	3 : 1	1618	3.092	48.25	-59
4	4 : 1	2134	4.078	41	-85.7
5	5 : 1	2680	5.121	63.75	-76.6
6	6 : 1	3223	6.159	83.5	-83.3
7	7 : 1	3820	7.300	157.25	-95.7
8	8 : 1	4271	8.162	85	-99.5
9	9 : 1	4893	9.351	183.75	-92.3
10	10 : 1	5340	10.205	107.5	-85.2

Tabela 11.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 21,  
(bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	612	1.042	24.67	-43.8
2	2 : 1	1221	2.078	46.34	-58.5
3	3 : 1	1825	3.107	63.01	-62.8
4	4 : 1	2432	4.140	82.68	-77.6
5	5 : 1	3071	5.228	134.35	-65.7
6	6 : 1	3657	6.226	133.02	-88.5
7	7 : 1	4251	7.237	139.69	-84.2
8	8 : 1	4870	8.291	171.36	-83.8
9	9 : 1	5471	9.315	185.03	-80
10	10 : 1				

Tabela 11.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 21,  
(bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	685	1.039	25.74	-39
2	2 : 1	1372	2.081	53.48	-61.4
3	3 : 1	2062	3.127	84.22	-49.5
4	4 : 1	2760	4.186	122.96	-68.5
5	5 : 1	3417	5.183	120.7	-76.6
6	6 : 1	4149	6.293	193.44	-68.5
7	7 : 1	4799	7.279	184.18	-76.1
8	8 : 1	5498	8.339	223.92	-76.1
9	9 : 1	6177	9.369	243.66	-82.8
10	10 : 1				

Tabela 11.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	740	1.059	41.54	-36.6
2	2 : 1	1475	2.111	78.08	-65.7
3	3 : 1	2207	3.159	111.62	-45.2
4	4 : 1	2939	4.207	145.12	-66.6
5	5 : 1	3675	5.261	182.7	-70
6	6 : 1	4376	6.265	185.24	-78
7	7 : 1	5162	7.390	272.78	-73.3
8	8 : 1	5856	8.384	268.32	-75.2
9	9 : 1	6579	9.419	292.86	-80.4
10	10 : 1	7320	10.480	335.4	-83

Tabela 11.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	840	1.071	56.01	-36.1
2	2 : 1	1682	2.145	114.02	-53.3
3	3 : 1	2504	3.193	152.03	-41.4
4	4 : 1	3335	4.253	199.04	-72.8
5	5 : 1	4169	5.317	249.05	-58
6	6 : 1	5013	6.394	309.08	-68
7	7 : 1	5856	7.469	368.07	-70
8	8 : 1	6643	8.473	371.08	-73.8
9	9 : 1	7536	9.612	480.09	-76.1
10	10 : 1	8386	10.696	546.1	-79.5

Tabela 11.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	934	1.081	54	-32.8
2	2 : 1	1871	2.126	111	-54.7
3	3 : 1	2775	3.153	135	-48.5
4	4 : 1	3711	4.217	191	-67.1
5	5 : 1	4639	5.271	239	-70
6	6 : 1	5605	6.369	325	-68
7	7 : 1	6484	7.388	324	-69
8	8 : 1	7426	8.440	388	-78.5
9	9 : 1	8386	9.529	466	-83.8
10	10 : 1	9285	10.551	485	-96.7

Tabela 11.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1065	1.078186217	77.23	-31.4
2	2 : 1	2113	2.139161951	137.46	-53.3
3	3 : 1	3177	3.216335787	213.69	-43.3
4	4 : 1	4230	4.282373427	278.92	-66.6
5	5 : 1	5288	5.353472974	349.15	-57.1
6	6 : 1	6328	6.406349656	401.38	-63.8
7	7 : 1	7392	7.483523492	477.61	-68
8	8 : 1	8426	8.530325886	523.84	-73.8
9	9 : 1	9467	9.584214949	577.07	-79.5
10	10 : 1	10534	10.66442593	656.3	-85.2

Tabela 11.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21		bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	1089	1.040611562	42.5	-32.8	
2	2:1	2184	2.088956522	91	-66.8	
3	3:1	3266	3.120879121	126.5	-55.2	
4	4:1	4336	4.143334926	150	-79	
5	5:1	5422	5.18107979	189.5	-59	
6	6:1	6484	6.195891065	205	-72.8	
7	7:1	7527	7.192546584	201.5	-78	
8	8:1	8650	8.265647396	278	-85.2	
9	9:1					
10	10:1					

Tabela 11.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21		bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	1227	1.044557574	52.34	-29.5	
2	2:1	2461	2.095074319	111.68	-65.2	
3	3:1	3696	3.148144995	174.02	-54.2	
4	4:1					
5	5:1	6140	5.227044421	266.7	-58.5	
6	6:1	7342	6.250319241	294.04	-73.3	
7	7:1	8565	7.291471575	342.38	-73.3	
8	8:1	9843	8.379445967	445.72	-86.6	
9	9:1	11089	9.440178435	517.06	-91.4	
10	10:1	12248	10.42684692	501.4	-92.3	

Tabela 11.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21		bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	1375	1.042843816	56.49	-26.6	
2	2:1	2047,2307,2473	1.552,1.875	-164.02	-70	
3	3:1	4105	3.113362811	149.47	-46.6	
4	4:1	5477	4.153931332	202.96	-64.7	
5	5:1	6849	5.194499852	256.45	-57.1	
6	6:1	8313	6.304844104	401.94	-83.3	
7	7:1	9506	7.209653321	276.43	-73	
8	8:1	10552,10980	8.002	3.92	-95.5	
9	9:1	12370	9.381802186	503.41	-90.9	
10	10:1					

Tabela 11.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21		bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	1467	1.050175029	70.09	-25.2	
2	2:1	2957	2.11681497	163.18	-59	
3	3:1	4379	3.134776041	188.27	-52.8	
4	4:1	5900	4.22360782	312.36	-65.2	
5	5:1	7306	5.23011504	321.45	-58.5	
6	6:1	8736	6.253803037	354.54	-73.3	
7	7:1	10191	7.295387677	412.63	-83.8	
8	8:1	11654	8.342699243	478.72	-85.2	
9	9:1					
10	10:1					

Tabela 11.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1645	1.049120524	77.02	-20
2	2 : 1	3266	2.082934731	130.04	-61.9
3	3 : 1	4909	3.130779729	205.06	-47.1
4	4 : 1	6582	4.197757624	310.08	-58.5
5	5 : 1	8231	5.249429202	391.1	-76.6
6	6 : 1	9892	6.308753938	484.12	-75.2
7	7 : 1	11425	7.28644498	449.14	-78.5
8	8 : 1	13085	8.332376688	521.16	-88.5
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 11.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1835	1.042613636	75	, 17.1
2	2 : 1	3662	2.080681818	142	, 53.8
3	3 : 1	5504	3.127272727	224	, 41.4
4	4 : 1	7342	4.171590909	302	-63.8
5	5 : 1	9181	5.216477273	381	-66.6
6	6 : 1	10925	6.207386364	365	-77.6
7	7 : 1	12872	7.313636364	552	-73.8
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 11.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	2057	1.041239566	81.47	-20.4
2	2 : 1	4105	2.077923393	153.94	-51.9
3	3 : 1	6170	3.123212505	243.41	-39.5
4	4 : 1	8272	4.187230768	369.88	-60.4
5	5 : 1	10293	5.210247377	415.35	-58
6	6 : 1	12304	6.228202052	450.82	-70.4
7	7 : 1	14350	7.263873492	521.29	-72.3
8	8 : 1	16501	8.352695226	696.76	-76.6
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 11.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 21, (bagrem,  $\Phi = 14$  mm)

21	bagrem	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	2184	1.043478261	91	-22.3
2	2 : 1	4357	2.081700908	171	-58.5
3	3 : 1	6549	3.129001433	270	-39.5
4	4 : 1	8693	4.153366371	321	-69
5	5 : 1	10871	5.193979933	406	-68.5
6	6 : 1	13000	6.211160124	442	-75.7
7	7 : 1	15015	7.173913043	364	-76.1
8	8 : 1				
9	9 : 1				
10	10 : 1				

DODATAK 12: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 22  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)

Tabela 12.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 22,  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	534	1.020	10.75	-51.4
2	2 : 1	1073	2.050	28.5	-72.3
3	3 : 1	1605	3.067	35.25	-67.6
4	4 : 1	2141	4.091	48	-87.6
5	5 : 1	2651	5.066	34.75	-79.5
6	6 : 1	3218	6.150	78.5	-87.1
7	7 : 1	3717	7.103	54.25	-99
8	8 : 1	3965	8.164	88	-102
9	9 : 1	4489	9.293	153.75	-95.7
10	10 : 1	5342	10.209	109.5	-93.3

Tabela 12.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 22,  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	614	1.045	26.67	-44.2
2	2 : 1	1227	2.089	52.34	-57.6
3	3 : 1	1844	3.139	82.01	-57.6
4	4 : 1	2400	4.086	50.68	-76.6
5	5 : 1	3047	5.167	110.35	-65.7
6	6 : 1	3680	6.265	156.02	-95.2
7	7 : 1	4272	7.273	160.69	-89
8	8 : 1	4885	8.317	186.36	-89
9	9 : 1	5477	9.325	191.03	-91.4
10	10 : 1	6170	10.505	296.7	-87.6

Tabela 12.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 22,  
(orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	696	1.055	36.74	-37.6
2	2 : 1	1389	2.106	70.48	-57.1
3	3 : 1	2078	3.152	100.22	-46.1
4	4 : 1	2772	4.204	134.96	-67.1
5	5 : 1	3450	5.233	153.7	-69.5
6	6 : 1	4146	6.288	190.44	-69.5
7	7 : 1	4837	7.337	222.18	-76.1
8	8 : 1	5559	8.432	284.92	-78
9	9 : 1	6201	9.406	267.66	-78.5
10	10 : 1	6883	10.440	290.4	-84.7

Tabela 12.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		$\Phi = 14$		NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	738	1.056	39.54		-37.1
2	2:1	1482	2.121	85.08		-56.1
3	3:1	2217	3.174	121.62		-46.1
4	4:1	2957	4.233	163.16		-61.9
5	5:1	3698	5.294	205.7		-73.8
6	6:1	4445	6.364	254.24		-76.1
7	7:1	5160	7.387	270.78		-73.8
8	8:1	5930	8.490	342.32		-69.5
9	9:1	6615	9.470	328.86		-77.1
10	10:1	7379	10.564	394.4		-81.4

Tabela 12.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		$\Phi = 14$		NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	836	1.066	52.01		-36.7
2	2:1	1661	2.118	93.02		-58
3	3:1	2497	3.184	145.03		-46.6
4	4:1	3315	4.228	179.04		-80.9
5	5:1	4167	5.315	247.05		-69.5
6	6:1	4950	6.313	246.06		-72.3
7	7:1	5755	7.340	267.07		-76.6
8	8:1	6681	8.521	409.08		-66.1
9	9:1	7452	9.505	666.01		-80.9
10	10:1	8272	10.551	432.1		-90

Tabela 12.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		$\Phi = 14$		NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	933	1.060	53		-33.8
2	2:1	1853	2.105	93		-54.2
3	3:1	2800	3.181	160		-46.6
4	4:1	3717	4.223	197		-63.3
5	5:1	4648	5.281	248		-70.4
6	6:1	5559	6.317	279		-65.7
7	7:1	6517	7.405	357		-67.6
8	8:1	7452	8.468	412		-76.1
9	9:1	8354	9.493	434		-78.5
10	10:1	9319	10.589	519		-98.5

Tabela 12.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		$\Phi = 14$		NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	1051	1.064012877	63.23		-29
2	2:1	2099	2.124988611	1111.23		-59
3	3:1	3155	3.194063395	191.69		-43.8
4	4:1					
5	5:1	5237	5.301841522	298.15		-54.7
6	6:1	6325	6.403312512	398.38		-63.3
7	7:1	7379	7.470362534	464.61		-65.7
8	8:1	8354	8.467434423	451.84		-71.4
9	9:1	9459	9.576115897	569.07		-80.9
10	10:1	10500	10.63000496	622.3		-88

Tabela 12.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1089	1.040611562	42.5	-31.9
2	2 : 1	2195	2.09746775	102	-65.7
3	3 : 1	3266	3.120879121	126.5	-55.7
4	4 : 1				
5	5 : 1	5422	5.18107979	189.5	-57.6
6	6 : 1				
7	7 : 1	7640	7.300525661	314.5	-70.9
8	8 : 1				
9	9 : 1	9746	9.312947922	327.5	-88.5
10	10 : 1	10871	10.38795987	406	-96.1

Tabela 12.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1233	1.049665435	58.34	-27.1
2	2 : 1	2448	2.084007287	98.68	-63.8
3	3 : 1	3698	3.148144995	174.02	-52.8
4	4 : 1	4909	4.179081807	210.36	-61.9
5	5 : 1	6140	5.227044421	266.7	-57.6
6	6 : 1	7306	6.219672075	258.04	-70.9
7	7 : 1	8650	7.363832939	427.38	-70.4
8	8 : 1				
9	9 : 1	11034	9.393356375	462.06	-84.7
10	10 : 1				

Tabela 12.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1369	1.038293225	50.49	-25.2
2	2 : 1	2731	2.071277427	1412.49	-57.1
3	3 : 1	4085	3.098194174	2766.49	-43.3
4	4 : 1	5449	4.132695239	174.96	-62.8
5	5 : 1	6849	5.194499852	256.45	-69
6	6 : 1	8231	6.242652691	319.94	-72.8
7	7 : 1	9554	7.24605805	324.43	-76.1
8	8 : 1	10871	8.244912818	322.92	-82.8
9	9 : 1				
10	10 : 1				

Tabela 12.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22	orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	1475	1.055901955	78.09	-23.3
2	2 : 1	2957	2.11681497	163.18	-51.9
3	3 : 1	4379	3.134776041	188.27	-50
4	4 : 1	5842	4.182087608	254.36	-58.5
5	5 : 1	7306	5.23011504	321.45	-58.5
6	6 : 1	8780	6.285301129	398.54	-72.3
7	7 : 1	10293	7.368405982	514.63	-80.4
8	8 : 1	11712	8.384219456	536.72	-87.1
9	9 : 1	13130	9.399317064	557.81	-92.8
10	10 : 1				



Tabela 12.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1645	1.049120524	77.02		-20
2	2 : 1	3266	2.082934731	130.04		-57.1
3	3 : 1	4909	3.130779729	205.06		-43.8
4	4 : 1	6549	4.176711438	277.08		-62.8
5	5 : 1	8149	5.197132616	309.1		-74.2
6	6 : 1	9794	6.246253141	386.12		-80.4
7	7 : 1	11425	7.28644498	449.14		-81.9
8	8 : 1	13000	8.290922078	456.16		-86.1
9	9 : 1					
10	10 : 1					

Tabela 12.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1835	1.042813636	75		-17.8
2	2 : 1	3644	2.070454545	124		-51.4
3	3 : 1	5477	3.111931818	197		-39.5
4	4 : 1	7306	4.151136364	266		-63.8
5	5 : 1	9136	5.190909091	376		-64.7
6	6 : 1	10980	6.238636364	420		-73.3
7	7 : 1	12744	7.240909091	424		-77.8
8	8 : 1					
9	9 : 1					
10	10 : 1					

Tabela 12.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	2037	1.031115701	61.47		-20.9
2	2 : 1	4085	2.067799527	133.94		-50.9
3	3 : 1	6079	3.077148917	152.41		-40.4
4	4 : 1	8109	4.104721265	206.88		-59.5
5	5 : 1	10242	5.18443152	364.35		-71.4
6	6 : 1	12309	6.230733018	455.82		-76.1
7	7 : 1	14287	7.231983316	458.29		-74.2
8	8 : 1	16257	8.229184067	452.76		-79
9	9 : 1	18134	9.179308844	354.23		-88
10	10 : 1					

Tabela 12.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 22, (orah,  $\Phi = 14$  mm)

22		orah	$\Phi = 14$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	2162	1.032967033	69		-23.8
2	2 : 1	4314	2.061156235	128		-50.4
3	3 : 1	6484	3.097945533	205		-41.9
4	4 : 1	8650	4.132823698	278		-76.6
5	5 : 1	10817	5.168179646	352		-63.3
6	6 : 1	12936	6.180802007	378		-77.1
7	7 : 1	15089	7.209268992	438		-73.8
8	8 : 1	17255	8.244147157	511		-7.6
9	9 : 1					
10	10 : 1					

DODATAK 13: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 23  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

Tabela 13.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 23,  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	526	1.005	2.75	-50.9
2	2 : 1	1067	2.039	20.5	-79.5
3	3 : 1	1573	3.006	3.25	-70.4
4	4 : 1	2099	4.011	6	-90.9
5	5 : 1	2612	4.991	-4.25	-80.4
6	6 : 1	3139	5.999	-0.5	-89
7	7 : 1	3662	6.998	-0.75	-88
8	8 : 1	4187	7.983	-19	-94.7
9	9 : 1	4871	8.926	-38.25	-94.7
10	10 : 1	5237	10.003	4.5	-90.4

Tabela 13.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 23,  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	590	1.004	2.67	-43.8
2	2 : 1	1179	2.007	4.34	-61.4
3	3 : 1	1772	3.017	10.01	-55.7
4	4 : 1	2353	4.006	3.68	-74.7
5	5 : 1	2957	5.034	20.35	-64.2
6	6 : 1	3537	6.022	13.02	-73.8
7	7 : 1	4128	7.025	14.89	-75.7
8	8 : 1	4718	8.032	19.36	-80
9	9 : 1	5342	9.095	58.03	-76.1
10	10 : 1	5930	10.096	56.7	-79

Tabela 13.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 23,  
(bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1 : 1	662	1.004	2.74	-38
2	2 : 1	1328	2.014	9.48	-61.9
3	3 : 1	1987	3.013	9.22	-47.8
4	4 : 1	2638	4.304	0.96	-70
5	5 : 1	3315	5.028	18.7	-71.4
6	6 : 1	3985	6.044	29.44	-79
7	7 : 1	4648	7.050	33.18	-70.4
8	8 : 1	5289	8.022	14.92	-69.5
9	9 : 1	5959	9.036	25.66	-77.8
10	10 : 1	6615	10.033	22.4	-80.9

Tabela 13.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23		bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	703	1.006	4.54	-36.6	
2	2 : 1	1396	1.998	-0.92	-53.3	
3	3 : 1	2088	2.989	-6.78	-44.2	
4	4 : 1	2800	4.008	6.16	-65.2	
5	5 : 1	3484	4.988	-8.3	-62.8	
6	6 : 1	4188	5.996	-2.76	-71.4	
7	7 : 1	4885	6.993	-4.22	-76.1	
8	8 : 1	5586	7.997	-1.68	-70.9	
9	9 : 1	6294	9.011	7.86	-78.5	
10	10 : 1	6952	9.953	-32.6	-79.5	

Tabela 13.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23		bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	788	1.005	4.01	-34.2	
2	2 : 1	1581	2.016	13.02	-51.9	
3	3 : 1	2365	3.016	13.03	-46.1	
4	4 : 1	3155	4.024	19.04	-90.4	
5	5 : 1	3945	5.033	25.05	-69.5	
6	6 : 1	4742	6.048	38.06	-67.6	
7	7 : 1	5531	7.054	43.07	-68	
8	8 : 1	6325	8.067	53.08	-77.6	
9	9 : 1	7091	9.044	35.09	-84.2	
10	10 : 1	7871	10.039	31.1	-84.7	

Tabela 13.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23		bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	879	0.998	-1	-31.9	
2	2 : 1	1748	1.984	-14	-53.3	
3	3 : 1	2625	2.982	-15	-46.6	
4	4 : 1	3519	4.125	-1	-71.9	
5	5 : 1	4357	4.951	-43	-73.8	
6	6 : 1	5283	5.980	-17	-65.2	
7	7 : 1	6170	7.258	10	-69.5	
8	8 : 1	7021	7.978	-19	-80	
9	9 : 1	7871	8.944	-49	-84.7	
10	10 : 1	8780	9.977	-20	-88	

Tabela 13.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23		bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1000	1.012381425	12.23	-32.8	
2	2 : 1	1987	2.011601891	11.46	-62.3	
3	3 : 1	3017	3.054354759	53.69	-56.1	
4	4 : 1	3985	4.034339978	33.92	-66.6	
5	5 : 1	5008	5.070006178	69.15	-61.9	
6	6 : 1	5989	6.063152353	62.38	-63.8	
7	7 : 1	6986	7.072496834	71.61	-77.6	
8	8 : 1	7949	8.047419946	46.84	-82.8	
9	9 : 1	9001	9.112445205	111.07	-91.9	
10	10 : 1	10040	10.16430951	162.3	-88.5	

Tabela 13.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	IZMEREANA FREKVENCija $f_1$	IZMEREANI ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMEREANI NIVO [dB]
1	1:1	1062	1.014811276	15.5	-31.9
2	2:1	2130	2.035355948	37	-63.8
3	3:1	3170	3.029144768	30.5	-58.5
4	4:1	4272	4.082176691	86	-76.6
5	5:1	5316	5.079789775	83.5	-60
6	6:1	6357	6.074534161	78	-69.5
7	7:1	7162	6.843764931	-163.5	-82.3
8	8:1	8480	8.103201147	108	-82.8
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 13.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	IZMEREANA FREKVENCija $f_1$	IZMEREANI ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMEREANI NIVO [dB]
1	1:1	1185	1.008802547	10.34	-26.6
2	2:1	2365	2.013348543	15.68	-56.1
3	3:1	3537	3.011084058	13.02	-49.5
4	4:1	4742	4.036912809	43.36	-66.6
5	5:1	5871	4.998041987	-2.3	-56.6
6	6:1	7056	6.006844534	8.04	-67.6
7	7:1	8272	7.042037696	49.38	-75.2
8	8:1	9459	8.052542863	61.72	-66.6
9	9:1	10657	9.072412443	85.06	-89
10	10:1	11829	10.07014796	82.4	-69.5

Tabela 13.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	IZMEREANA FREKVENCija $f_1$	IZMEREANI ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMEREANI NIVO [dB]
1	1:1	1315	0.997337804	-3.51	-25.7
2	2:1	2638	2.000743263	0.98	-60.9
3	3:1	3926	2.977803507	-29.53	-62.8
4	4:1	5263	3.991626912	-11.04	-56.1
5	5:1	6549	4.966970292	-43.55	-65.7
6	6:1	7871	5.969617219	-40.06	-71.9
7	7:1	9181	6.963162964	-48.57	-81.9
8	8:1	10447	7.923337707	-101.08	-89.5
9	9:1	11829	8.971490546	-37.59	-91.8
10	10:1	12432	9.428824962	-753.1	-93.3

Tabela 13.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	IZMEREANA FREKVENCija $f_1$	IZMEREANI ODNOS FREKVENCija $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMEREANI NIVO [dB]
1	1:1	1382	0.989326442	-14.91	-22.3
2	2:1	2759	1.975073555	-34.82	-54.7
3	3:1	4146	2.967979326	-44.73	-49
4	4:1	5531	3.959453365	-56.64	-60
5	5:1	6883	4.927303835	-101.55	-65.2
6	6:1	8272	5.921641337	-109.46	-72.8
7	7:1	9649	6.90738845	-129.37	-84.7
8	8:1	11034	7.898862489	-133.28	-90
9	9:1	12432	8.899642783	-140.19	-87.6
10	10:1	13261	9.493095475	-708.1	-88

Tabela 13.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1557	0.99299736	-10.98	-19
2	2:1	3093	1.972601891	-42.96	-72.8
3	3:1	4625	2.94965497	-78.94	-50.4
4	4:1	6201	3.954769831	-70.92	-56.6
5	5:1	7716	4.920981135	-123.9	-62.3
6	6:1	9319	5.943315604	-88.88	-90.4
7	7:1	10871	6.933124147	-104.86	-82.3
8	8:1	12432	7.92867256	-111.84	-80.4
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 13.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1737	0.986931818	-23	-19.5
2	2:1	3484	1.979545455	-36	-61.4
3	3:1	5237	2.975566182	-43	-48.5
4	4:1	6952	3.95	-88	-63.8
5	5:1	8650	4.914772727	-150	-70.9
6	6:1	10344	5.877272727	-216	-73.8
7	7:1				
8	8:1				
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 13.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1977	1.000744104	1.47	-16.8
2	2:1	3945	1.996932469	-6.06	-53.8
3	3:1	5930	3.001726119	3.41	-46.1
4	4:1	7871	3.984247265	-31.12	-62.8
5	5:1	9794	4.957656933	-83.65	-64.7
6	6:1	11770	5.957894843	-83.18	-68.5
7	7:1	13730	6.950033662	-98.71	-72.3
8	8:1	15779	7.987223682	-25.24	-81.9
9	9:1				
10	10:1				

Tabela 13.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 23, (bagrem,  $\Phi = 15$  mm)

23	bagrem	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	2037	0.973244147	944	-22.3
2	2:1	4105	1.96129957	-81	-58
3	3:1	6140	2.933588151	-139	-40.9
4	4:1	8190	3.913043478	-182	-73.3
5	5:1	10293	4.917821309	-172	-65.2
6	6:1	12248	5.851887243	-310	-72.3
7	7:1	14287	6.826066957	-364	-73.8
8	8:1	16338	7.806020067	-406	-81.4
9	9:1				
10	10:1				

DODATAK 14: OSNOVNI REZULTATI MERENJA ZA JEDNODELNU C FRULU 24  
(trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

Tabela 14.1: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^2$ , odsviran na fruli 24,  
(trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^2 = 523,25$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	537	1.026	13.75	-60.4	
2	2:1	1073	2.050	26.5	-60.4	
3	3:1	1613	3.082	43.25	-58	
4	4:1	2130	4.070	37	-79	
5	5:1	2677	5.116	60.75	-78	
6	6:1	3202	6.119	62.5	-79.5	
7	7:1					
8	8:1	4272	8.164	86	-89	
9	9:1	4813	9.198	103.75	-98.5	
10	10:1	5369	10.260	136.5	-89	

Tabela 14.2: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^2$ , odsviran na fruli 24,  
(trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^2 = 587,33$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	593	1.009	5.67	-45.2	
2	2:1	1185	2.017	10.34	-53.3	
3	3:1	1764	3.003	2.01	-54.2	
4	4:1	2376	4.045	26.68	-68.5	
5	5:1	2972	5.060	35.35	-65.7	
6	6:1	3554	6.051	30.02	-75.7	
7	7:1	4146	7.059	34.69	-78.5	
8	8:1	4718	8.032	19.36	-82.3	
9	9:1	5316	9.051	30.03	-80.9	
10	10:1	5930	10.096	56.7	-82.3	

Tabela 14.3: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^2$ , odsviran na fruli 24,  
(trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^2 = 659,26$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1:1	669	1.014	9.74	-39.5	
2	2:1	1342	2.035	23.48	-52.3	
3	3:1	2017	3.059	39.22	-46.1	
4	4:1	2684	4.040	26.96	-64.7	
5	5:1	3365	5.104	68.7	-75.7	
6	6:1	4005	6.074	49.44	-75.2	
7	7:1	4648	7.050	33.18	-78	
8	8:1	5369	8.143	94.92	-73.3	
9	9:1	6019	9.129	85.66	-83.3	
10	10:1	6714	10.184	121.4	-84.7	

Tabela 14.4: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^2$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^2 = 698,46$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	703	1.008	4.54	-40
2	2:1	1403	2.008	6.08	-53.8
3	3:1	2109	3.019	13.62	-45.2
4	4:1	2800	4.088	6.16	-61
5	5:1	3502	5.013	9.7	-62.8
6	6:1	4209	6.026	18.24	-73.8
7	7:1	4909	7.028	19.78	-81.9
8	8:1	5614	8.037	26.32	-80.9
9	9:1				
10	10:1	6986	10.002	1.4	-89.5

Tabela 14.5: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^2$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^2 = 783,99$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	792	1.010	8.01	-38
2	2:1	1589	2.026	21.02	-52.3
3	3:1	2388	3.045	36.03	-46.6
4	4:1	3155	4.024	19.04	-81.9
5	5:1	3985	5.082	65.05	-77.6
6	6:1	4742	6.048	38.06	-70.9
7	7:1	5531	7.054	43.07	-77.6
8	8:1	6294	8.026	22.08	-78.5
9	9:1	7162	9.135	106.09	-96.6
10	10:1	7910	10.089	70.1	-93.3

Tabela 14.6: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^2$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^2 = 880,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	883	1.003	3	-35.2
2	2:1	1755	1.994	-5	-50.9
3	3:1	2651	30.125	11	-47.1
4	4:1	3537	4.019	17	-72.3
5	5:1	4401	5.001	1	-85.7
6	6:1	5289	6.010	9	-66.6
7	7:1	6170	7.011	10	-77.6
8	8:1	7056	8.018	16	-81.9
9	9:1	7949	9.032	29	-101.4
10	10:1	8780	9.77	-20	-99.0

Tabela 14.7: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^2$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^2 = 987,77$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	996	1.007319518	7.23	-35.7
2	2:1	1997	2.021725705	21.46	-56.6
3	3:1	2997	3.023983316	23.69	-57.6
4	4:1	3985	4.034339978	33.92	-63.3
5	5:1	4958	5.019387104	19.15	-70
6	6:1	5989	6.083152353	62.38	-62.3
7	7:1	6952	7.038075665	37.61	-7.6
8	8:1	7949	8.047419946	46.84	-90.4
9	9:1	8912	9.022343258	22.07	-90.9
10	10:1	9941	10.06408374	63.29	-92.3

Tabela 14.8: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^3 = 1046,50$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1073	1.025322504	26.5	-33.8	
2	2 : 1	2141	2.045867176	48	-58	
3	3 : 1	3234	3.090301003	94.5	-59.5	
4	4 : 1	4272	4.082178891	86	-76.6	
5	5 : 1	5342	5.104634496	109.5	-68	
6	6 : 1	6452	6.165312948	173	-68.5	
7	7 : 1	7489	7.156235089	163.5	-85.2	
8	8 : 1	8565	8.184424271	193	-85.2	
9	9 : 1					
10	10 : 1					

Tabela 14.9: Osnovni rezultati merenja za ton  $d^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$d^3 = 1174,66$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1197	1.019018289	22.34	-29	
2	2 : 1	2376	2.022712955	26.68	-53.3	
3	3 : 1	3554	3.025556331	30.02	-55.2	
4	4 : 1	4742	4.036912809	43.36	-63.3	
5	5 : 1	5930	5.048269286	56.7	-65.7	
6	6 : 1	7091	6.03664039	43.04	-69	
7	7 : 1	8272	7.042037896	50.78	-84.7	
8	8 : 1	9459	8.052542883	61.71	-94.7	
9	9 : 1	10604	9.027293004	33.86	-97.1	
10	10 : 1	11770	10.01992086	25.4	-95.2	

Tabela 14.10: Osnovni rezultati merenja za ton  $e^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$e^3 = 1318,51$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1322	1.002646927	3.49	-28.5	
2	2 : 1	2651	2.010602877	13.98	-51.9	
3	3 : 1	3985	3.022350987	29.47	-58.5	
4	4 : 1	5342	4.05154303	67.96	-55.7	
5	5 : 1	6681	5.067083299	88.45	-71.9	
6	6 : 1	7989	6.05911218	77.94	-73.8	
7	7 : 1					
8	8 : 1	10552	8.002973053	3.92	-94.2	
9	9 : 1					
10	10 : 1					

Tabela 14.11: Osnovni rezultati merenja za ton  $f^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24		trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$f^3 = 1396,91$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]	
1	1 : 1	1410	1.009370682	13.09	-26.1	
2	2 : 1	2800	2.00442405	6.18	-50.9	
3	3 : 1	4209	3.013078867	18.27	-54.7	
4	4 : 1	5586	3.99882598	-1.64	-56.6	
5	5 : 1	7021	5.026093306	36.45	-73.3	
6	6 : 1	8313	5.950991832	-68.46	-76.6	
7	7 : 1					
8	8 : 1	11089	7.938235105	-86.28	-86.6	
9	9 : 1					
10	10 : 1					



Tabela 14.12: Osnovni rezultati merenja za ton  $g^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$g^3 = 1567,98$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1573	1.003201571	5.02	-23.3
2	2:1	3123	1.991734588	-12.98	-57.1
3	3:1	4718	3.008966951	14.06	-48.5
4	4:1	6263	3.994311152	-8.92	-59.5
5	5:1	7832	4.99496167	-7.9	-70.4
6	6:1	9319	5.943315604	-88.88	-85.7
7	7:1	10925	6.967563362	-50.86	-90.4
8	8:1	12432	7.92867256	-111.84	-86.1
9	9:1	13993	8.54156303	-718.82	-89
10	10:1				

Tabela 14.13: Osnovni rezultati merenja za ton  $a^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$a^3 = 1760,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1764	1.002272727	4	-20
2	2:1	3502	1.989772727	-18	-53.3
3	3:1	5289	3.005113636	9	-43.8
4	4:1	6986	3.969318182	-54	-72.8
5	5:1	8736	4.963636364	-64	-79.5
6	6:1	10500	5.965909091	-60	-76.6
7	7:1	12370	7.028409091	50	-84.2
8	8:1	14006	7.957954545	-74	-83.8
9	9:1	15779	8.965340909	-61	-91.4
10	10:1				

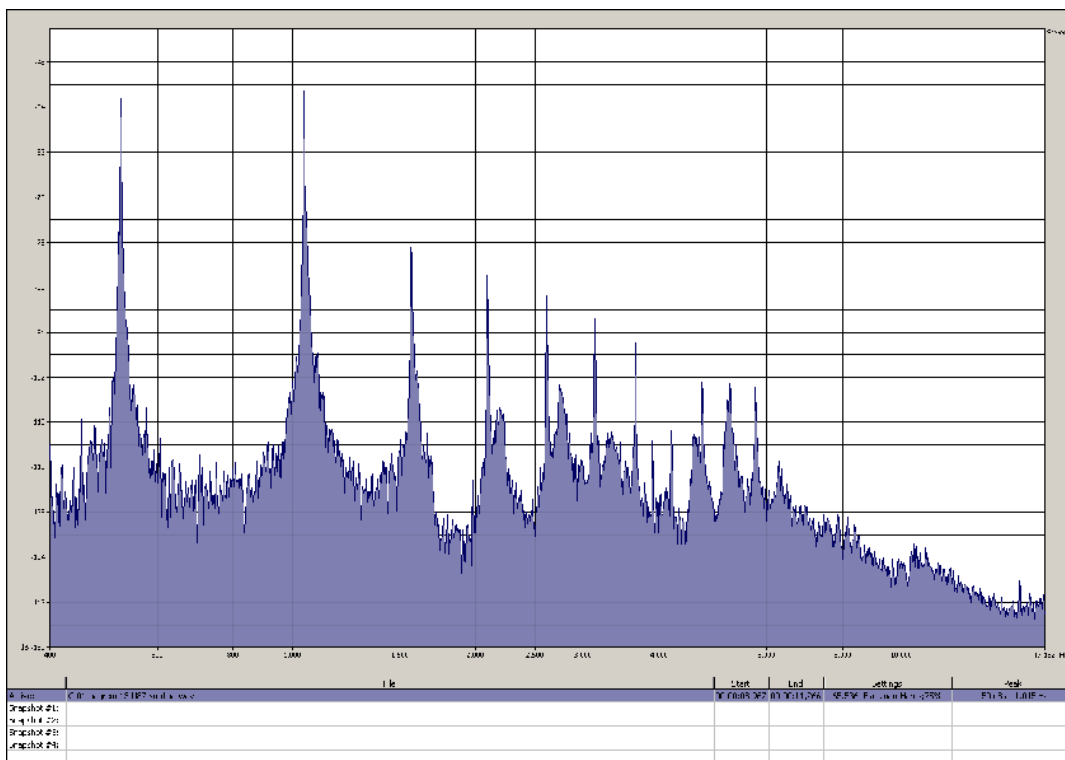
Tabela 14.14: Osnovni rezultati merenja za ton  $h^3$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$h^3 = 1975,53$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	1977	1.000744104	1.47	-17.6
2	2:1	3945	1.99932489	-6.06	-47.1
3	3:1	5871	2.971860716	-55.59	-44.2
4	4:1	7871	3.984247265	-31.12	-62.3
5	5:1	9843	4.982460403	-34.715	-70.4
6	6:1	11829	5.987760247	-24.18	-70
7	7:1	13730	6.950033662	-98.71	-79
8	8:1	15779	7.987223682	-25.24	-86.1
9	9:1				
10	10:1				

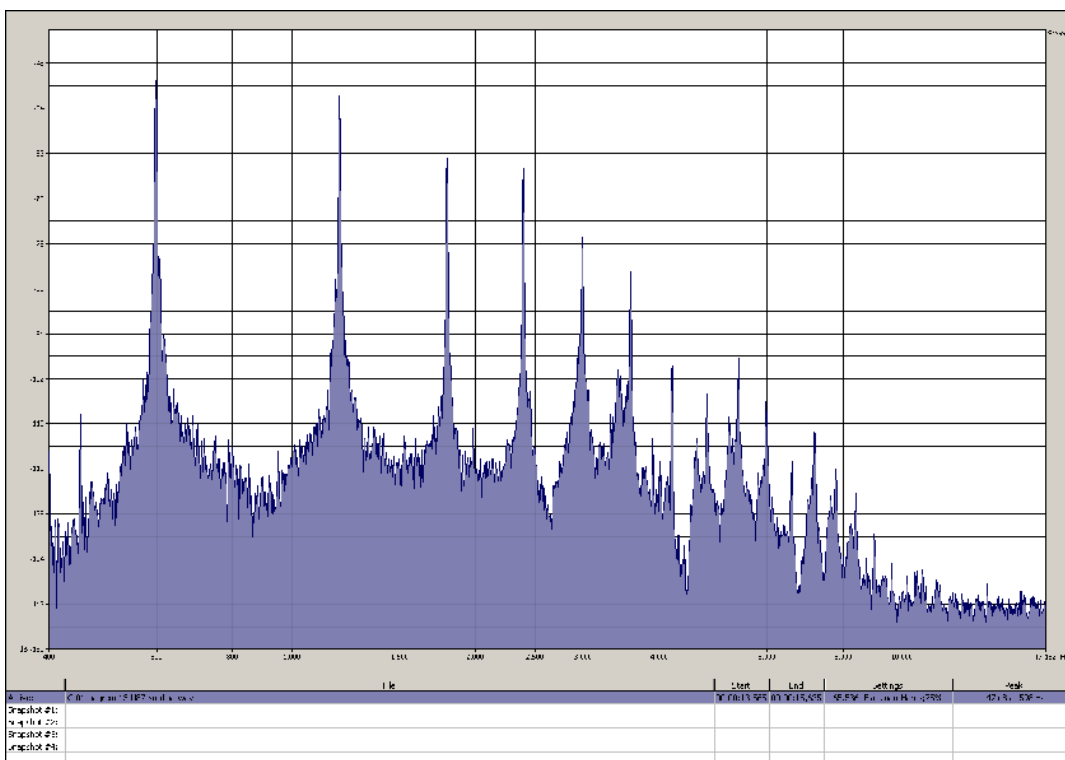
Tabela 14.15: Osnovni rezultati merenja za ton  $c^4$ , odsviran na fruli 24, (trešnja,  $\Phi = 15$  mm)

24	trešnja	$\Phi = 15$	NEUMANN U 87	NORMAL	$c^4 = 2093,00$ Hz
HARMONIK	IDEALAN ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	IZMERENA FREKVENCIJA $f_1$	IZMERENI ODNOS FREKVENCIJA $f_1/f_0$	ODSTUPANJE $\Delta f$	IZMERENI NIVO [dB]
1	1:1	2109	1.007644629	16	-14.7
2	2:1	4186	2.000955666	2	-48
3	3:1	6294	3.007166746	15	-48.5
4	4:1	8313	3.971810798	-59	-65.2
5	5:1	10396	4.967032987	-69	-75.7
6	6:1	12616	6.028666985	60	-62.3
7	7:1	14574	6.963210702	-77	-69.5
8	8:1	16749	8.002388915	5	-73.3
9	9:1	18776	8.970855232	-61	-71.4
10	10:1	20841	9.957477305	-89	-73.8

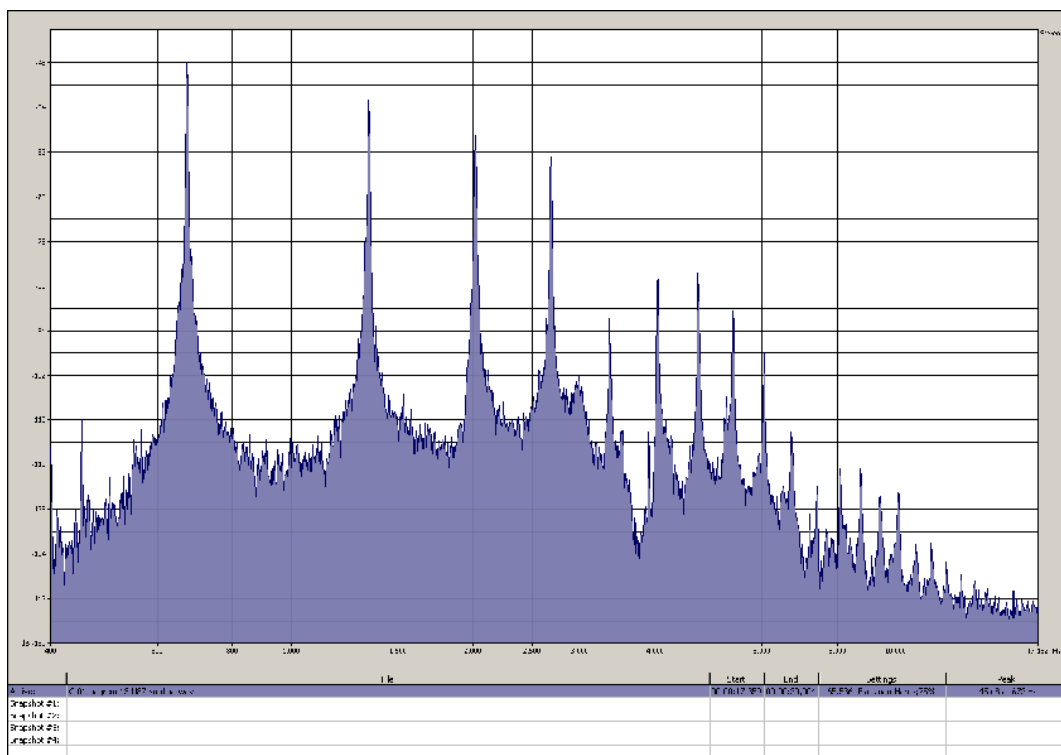
DODATAK 15: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



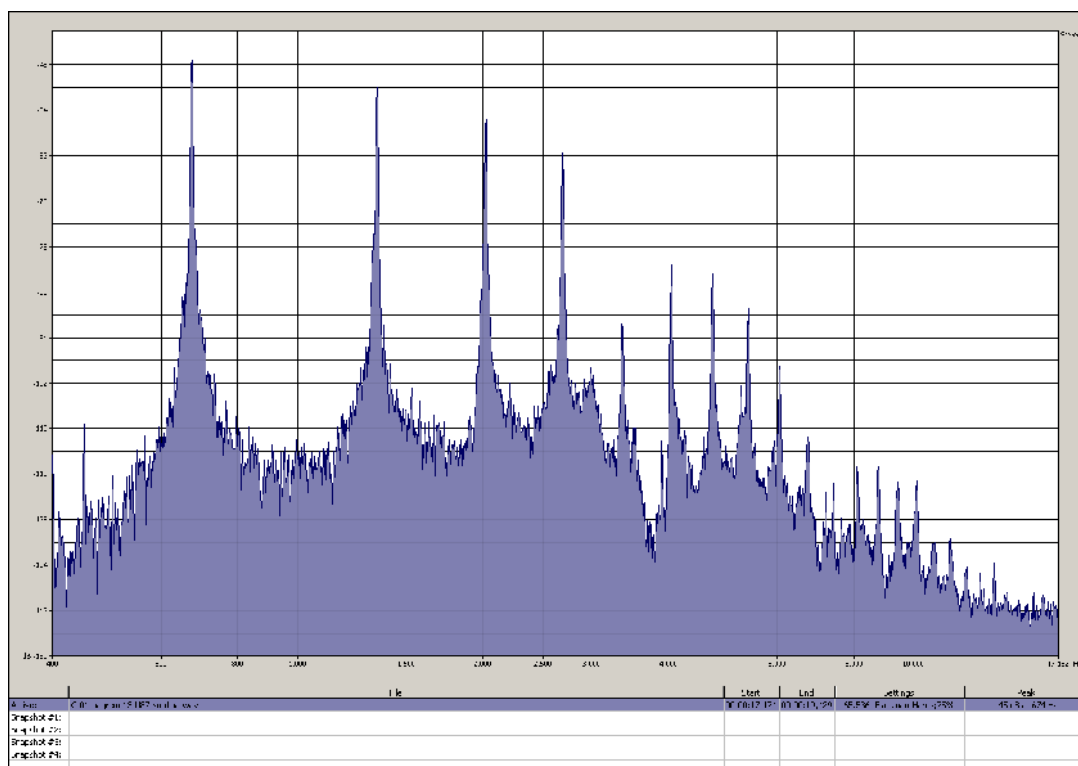
Slika 15.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 1  
(bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



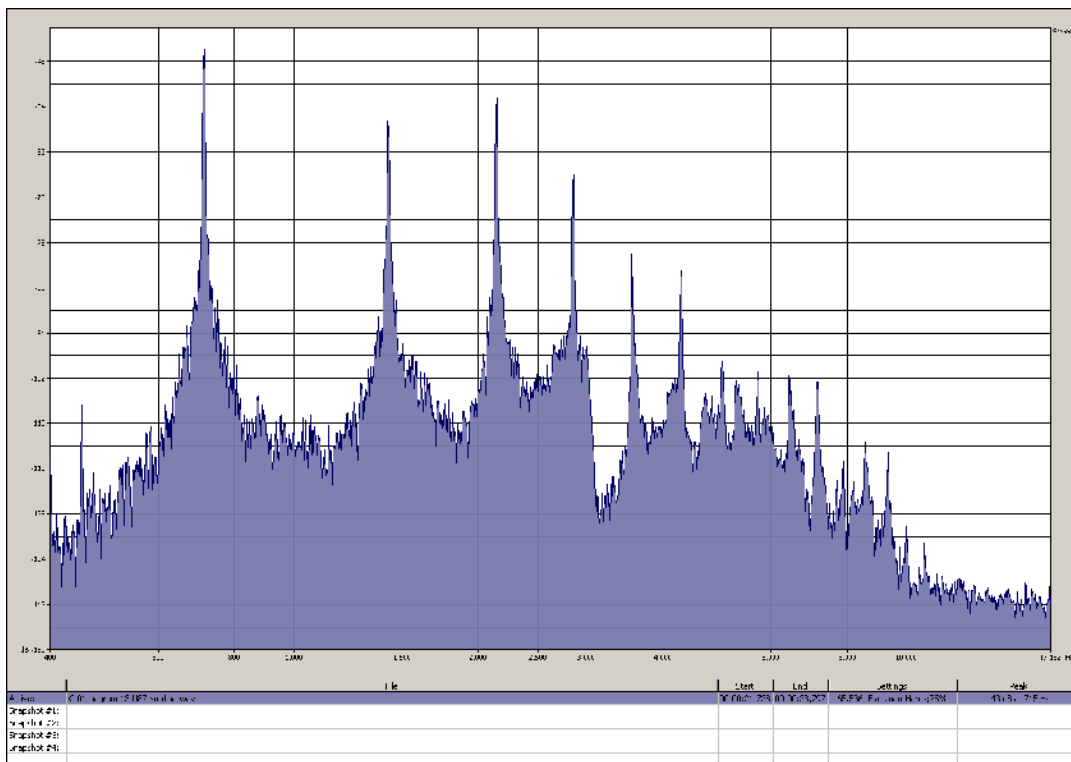
Slika 15.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 2  
(bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



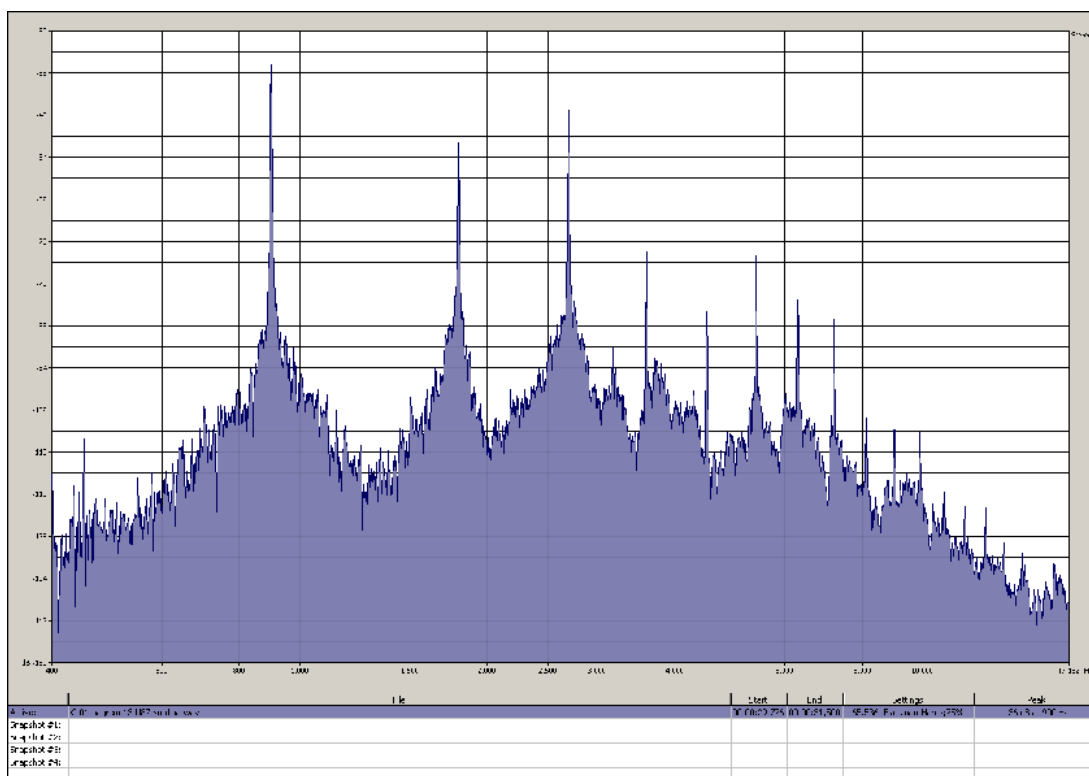
Slika 15.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



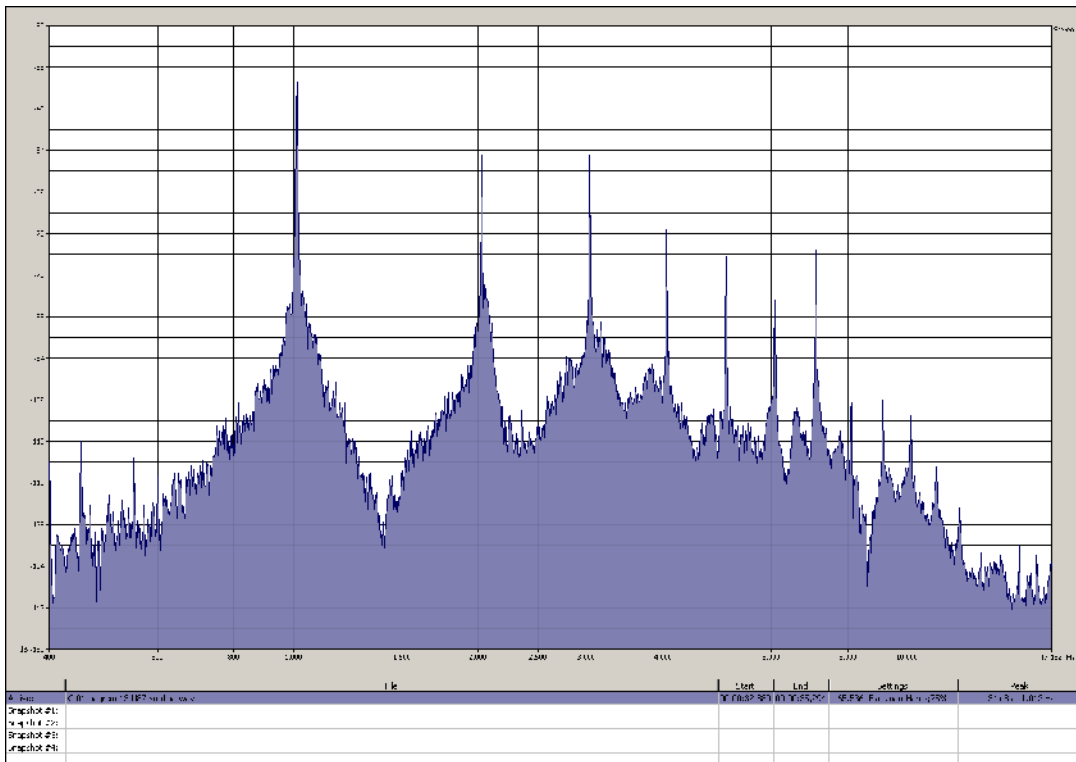
Slika 15.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



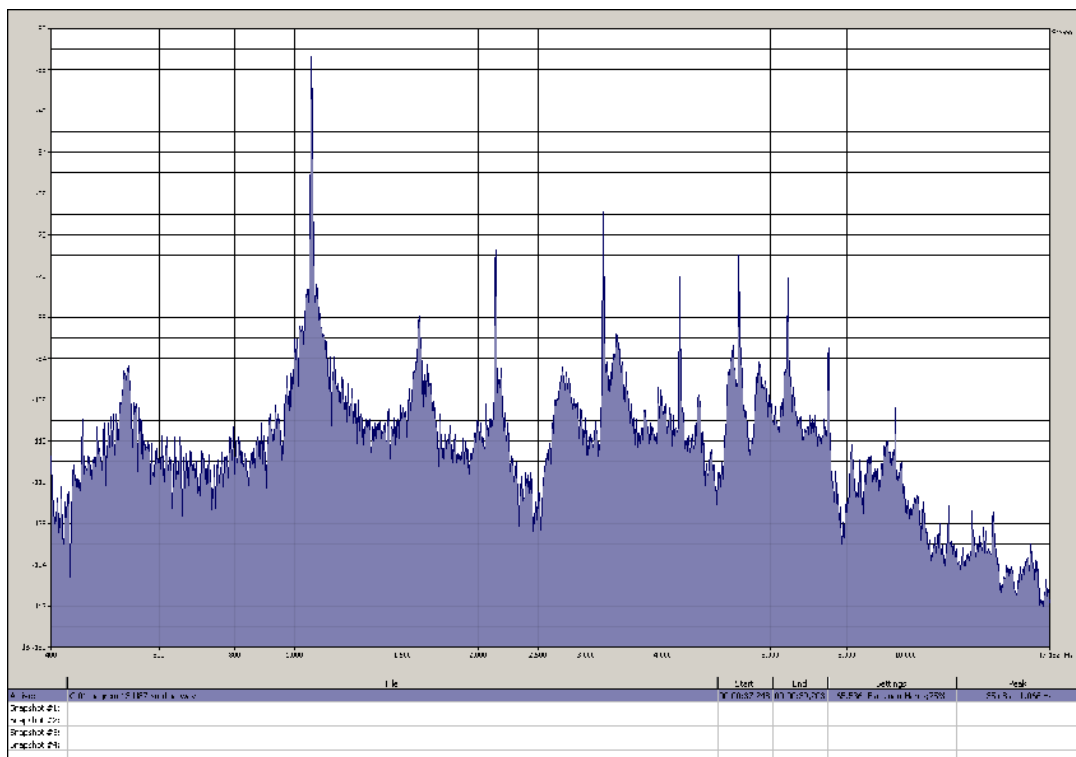
Slika 15.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



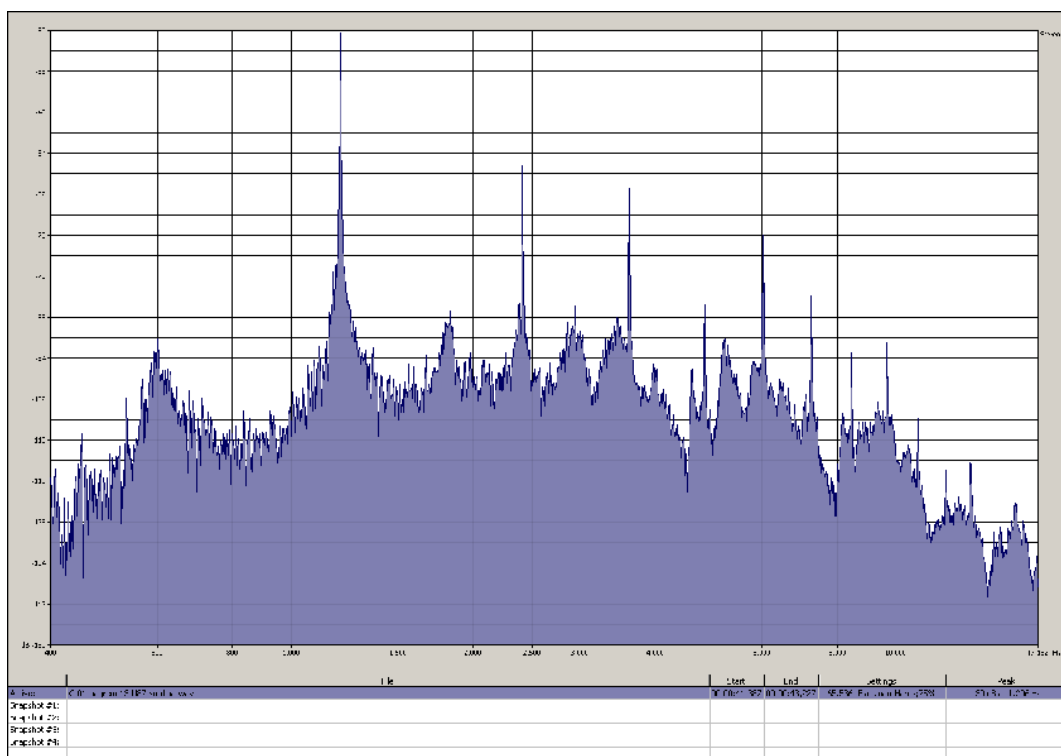
Slika 15.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



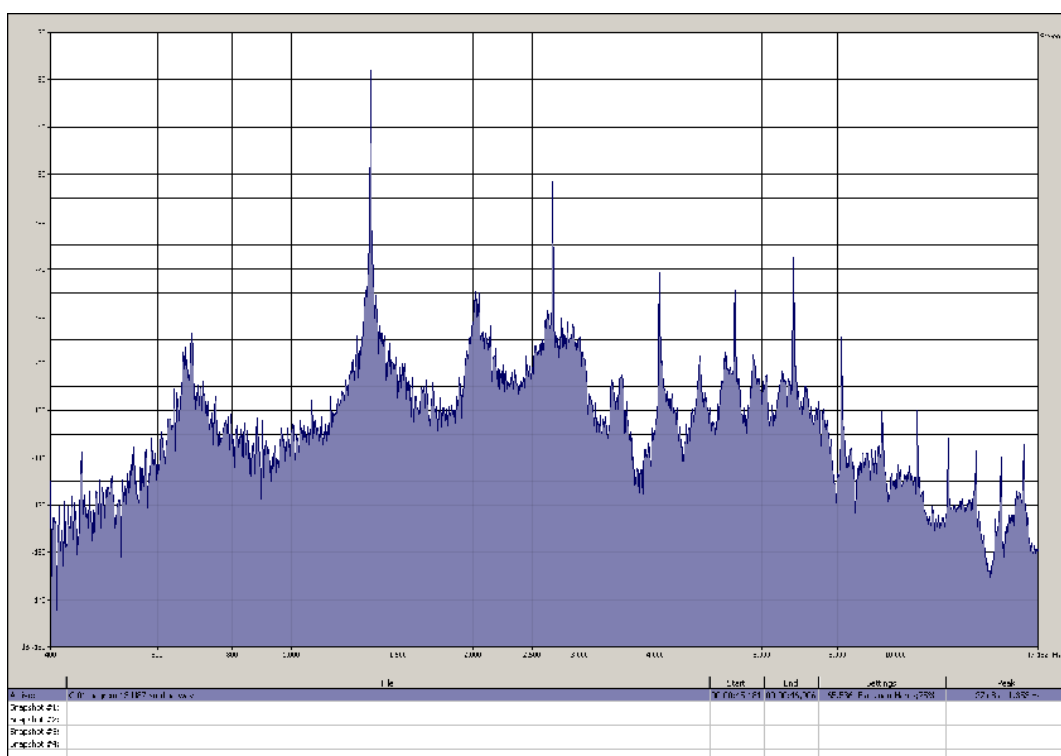
Slika 15.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



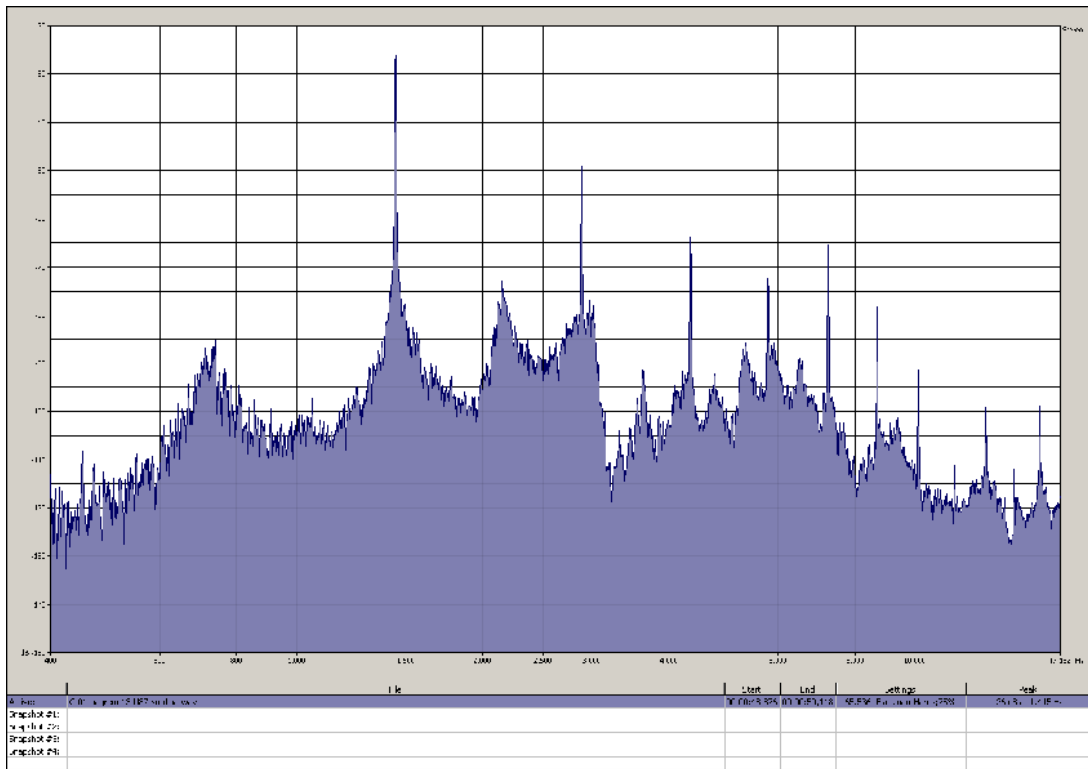
Slika 15.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



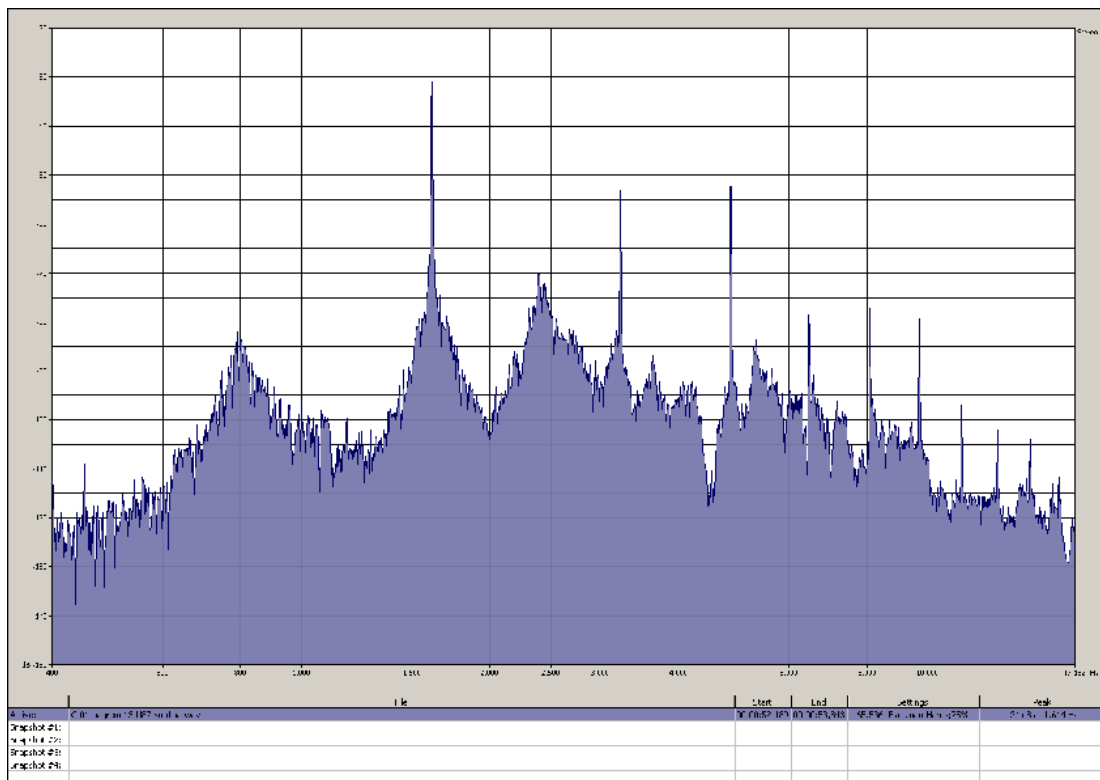
Slika 15.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



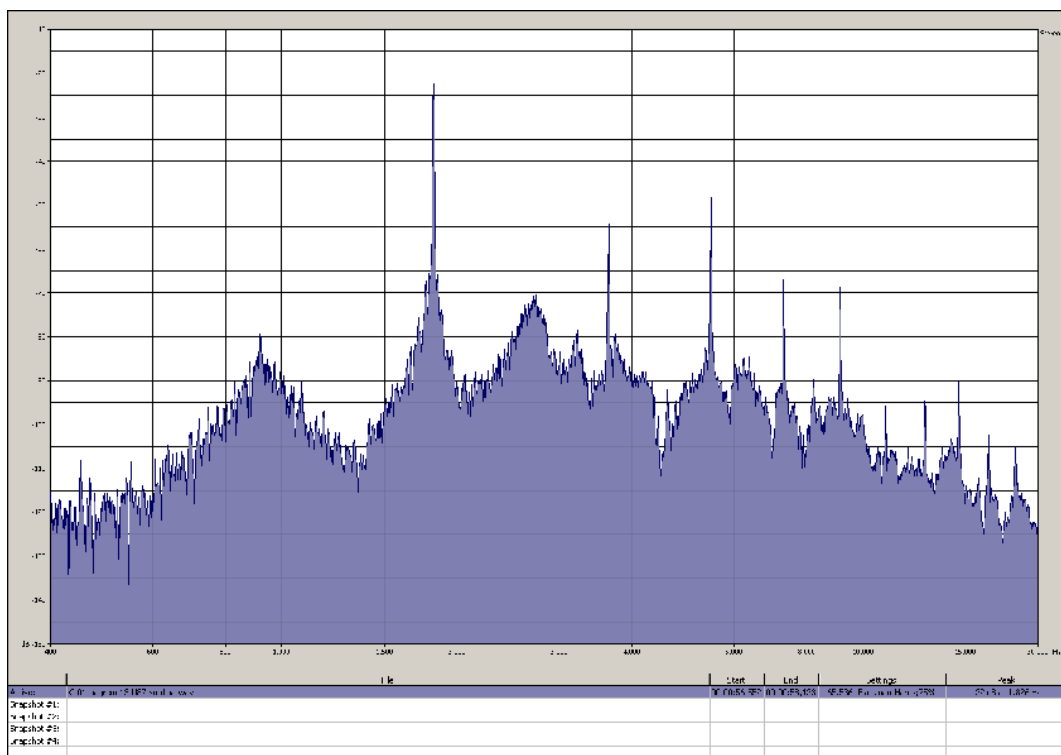
Slika 15.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



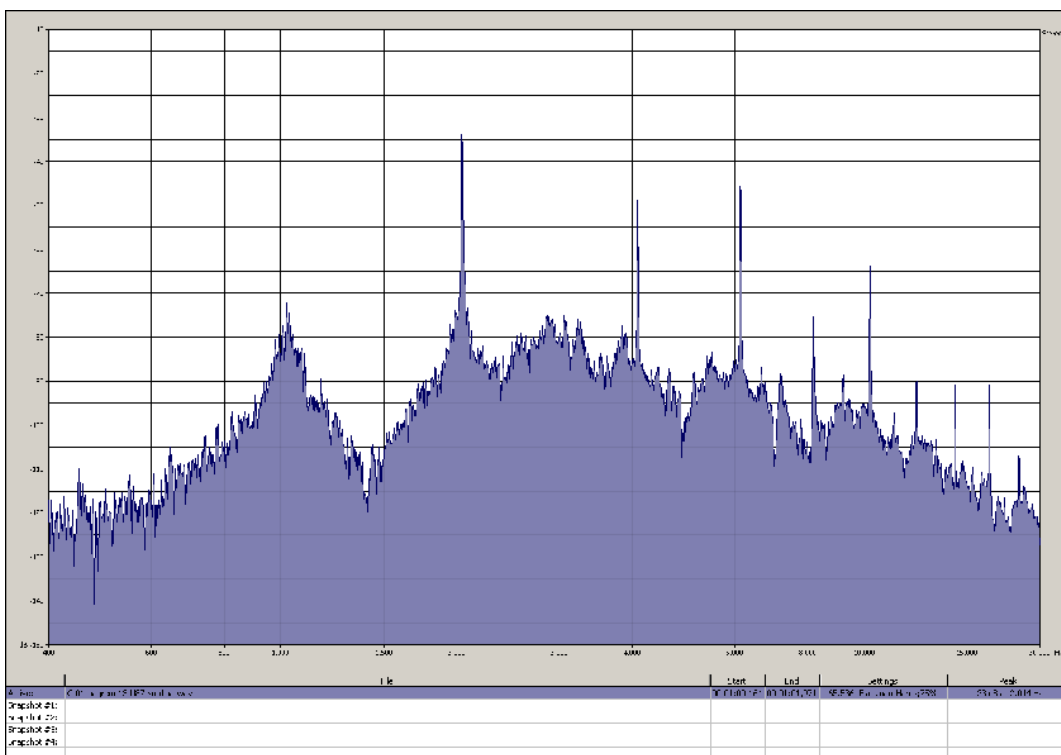
Slika 15.11: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 15.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)

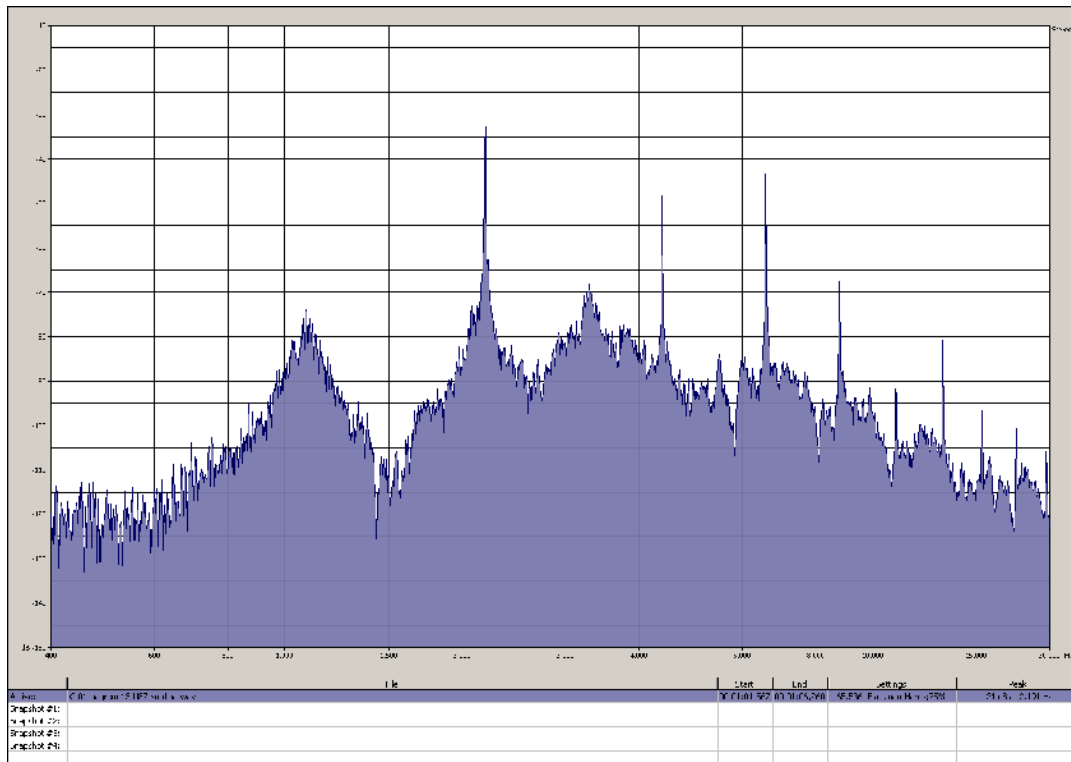


Slika 15.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



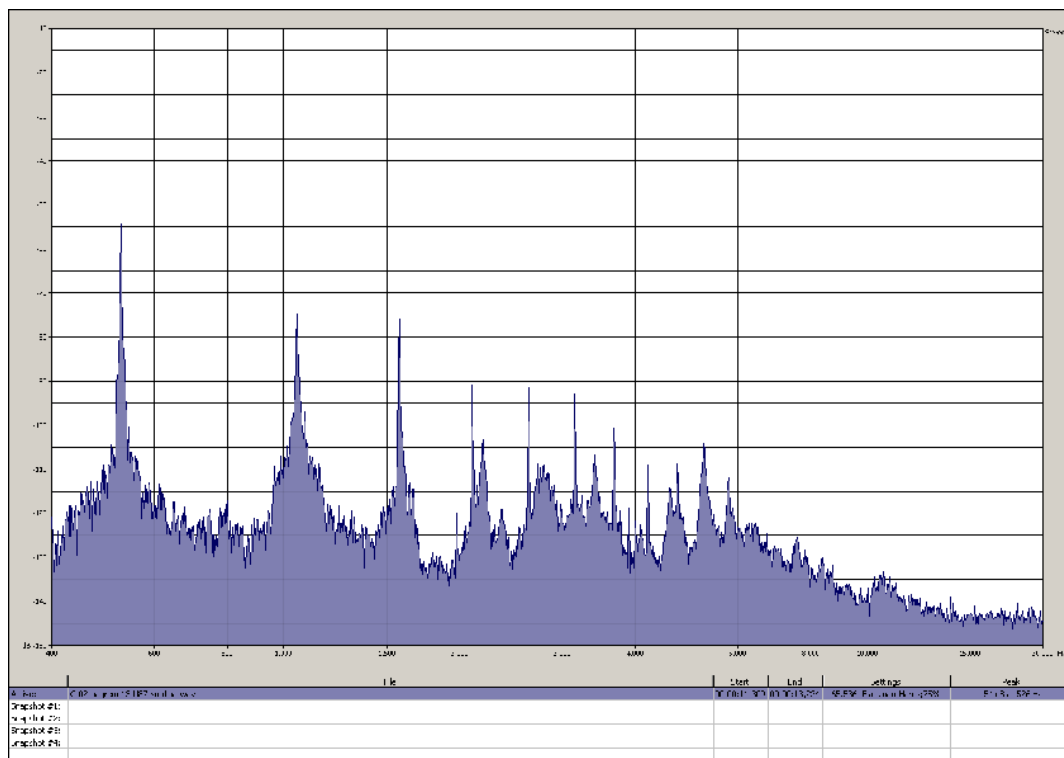
Slika 15.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13$  mm)



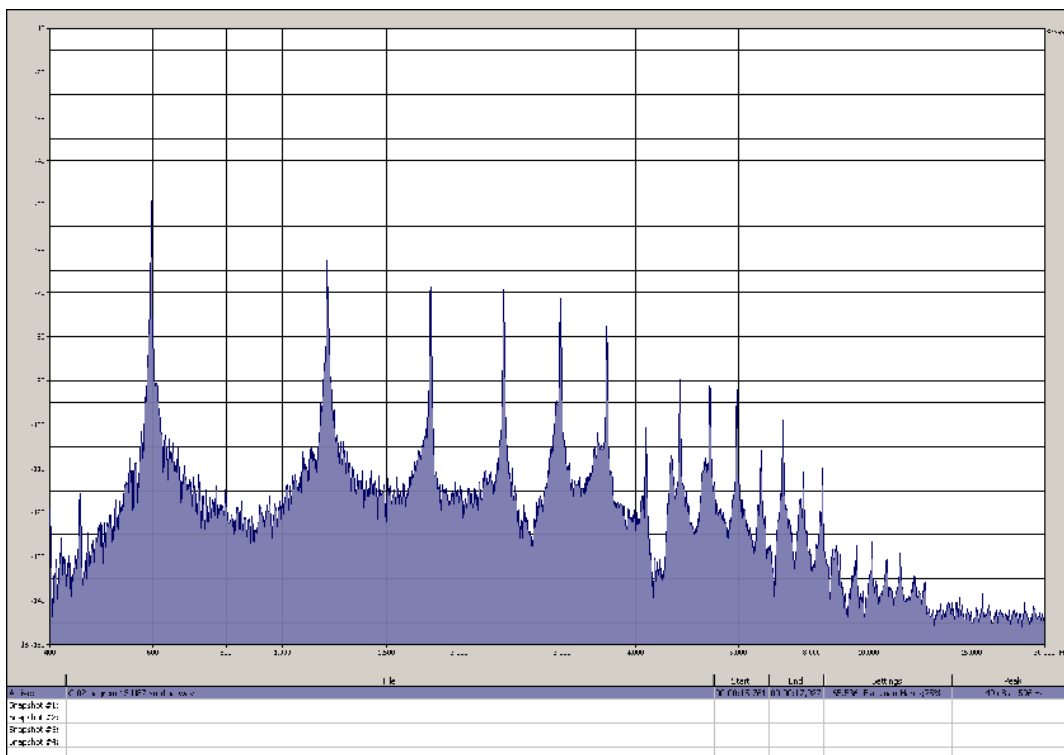


*Slika 15.15: Frekvencijski spektar tona  $C^4$ , odsviranog na fruli 1 (bagrem 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )*

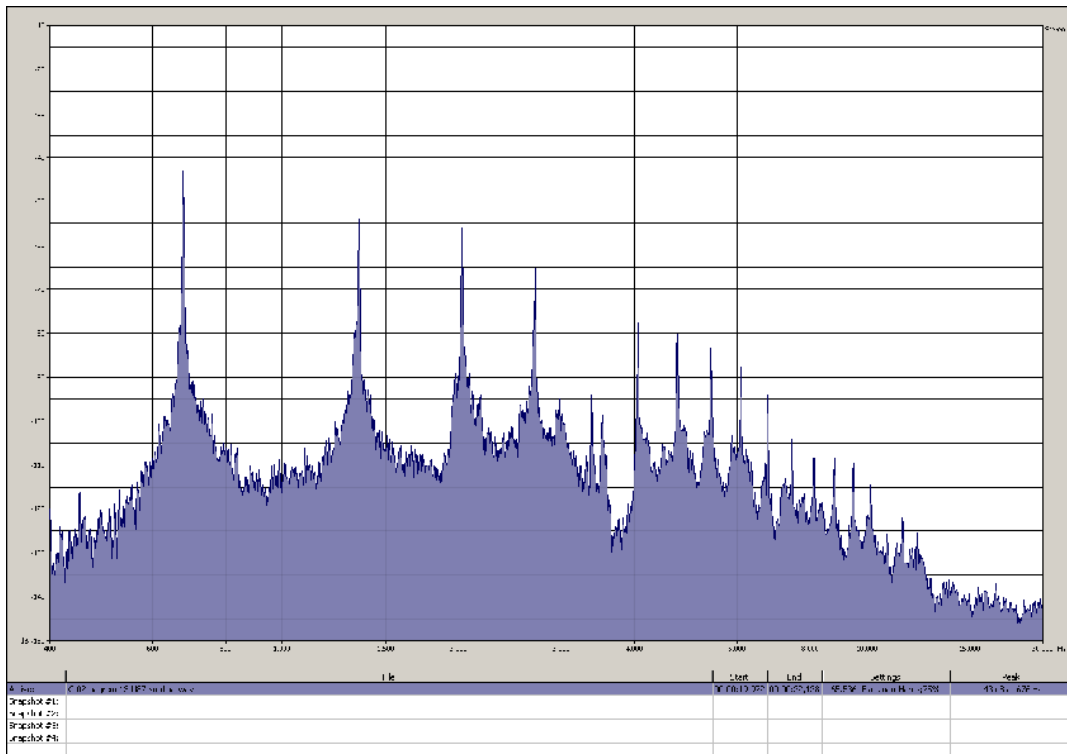
DODATAK 16: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



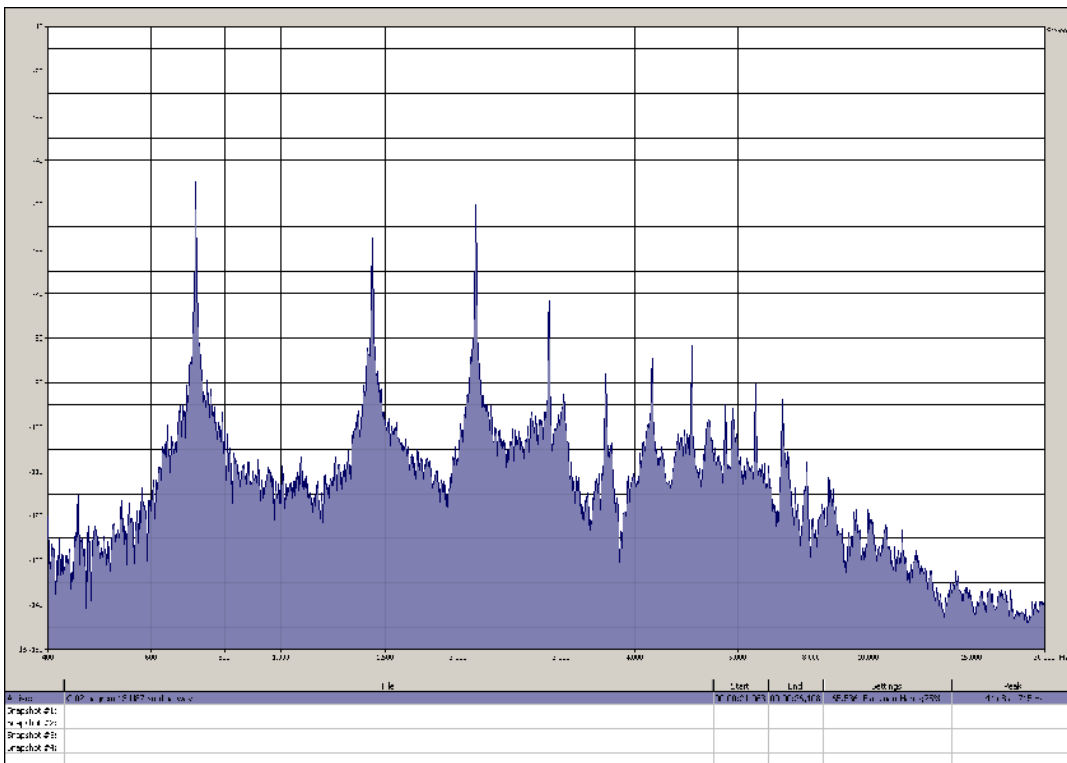
Slika 16.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 2  
(bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



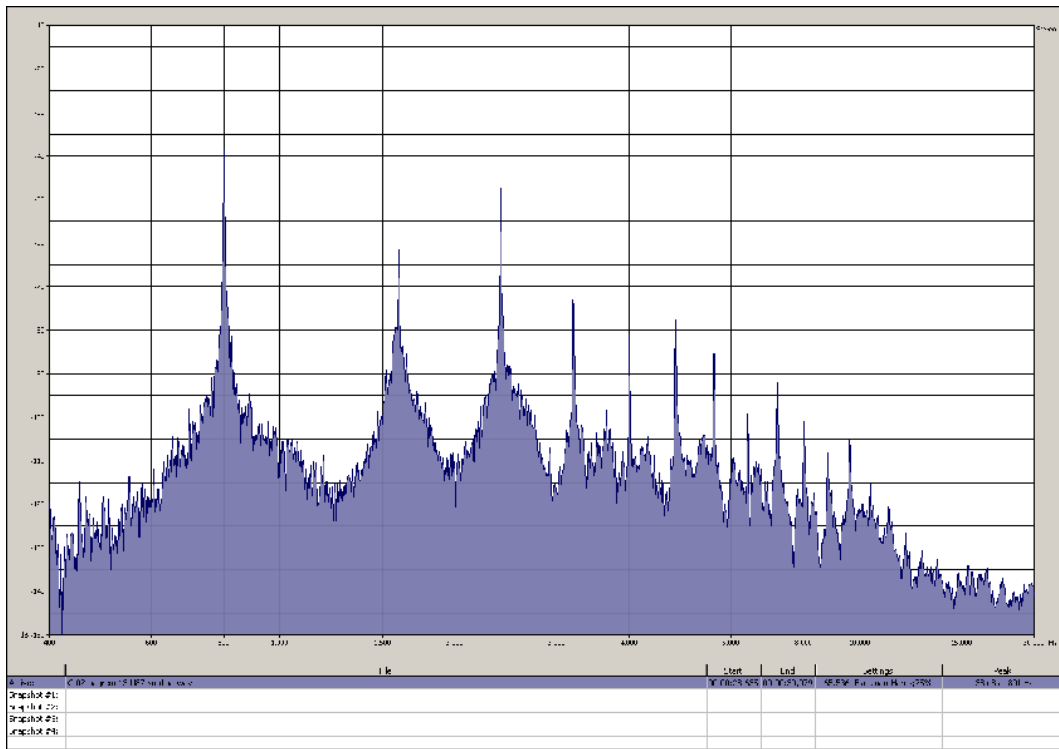
Slika 16.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 2  
(bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



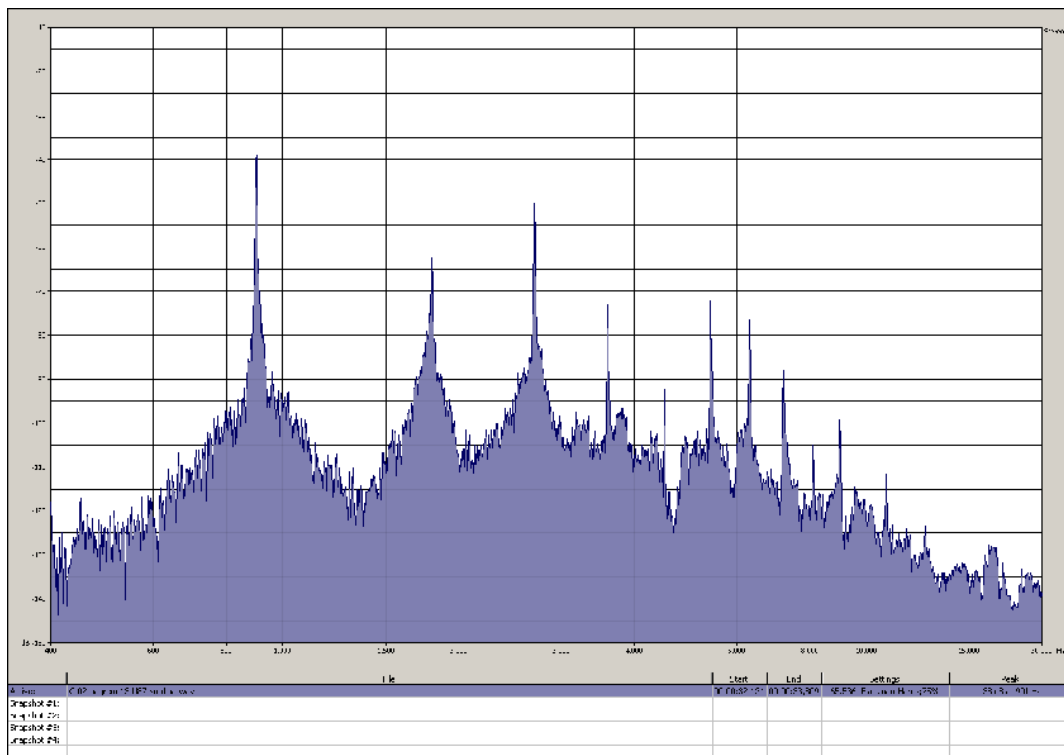
Slika 16.3: Frekvenjski spekter tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



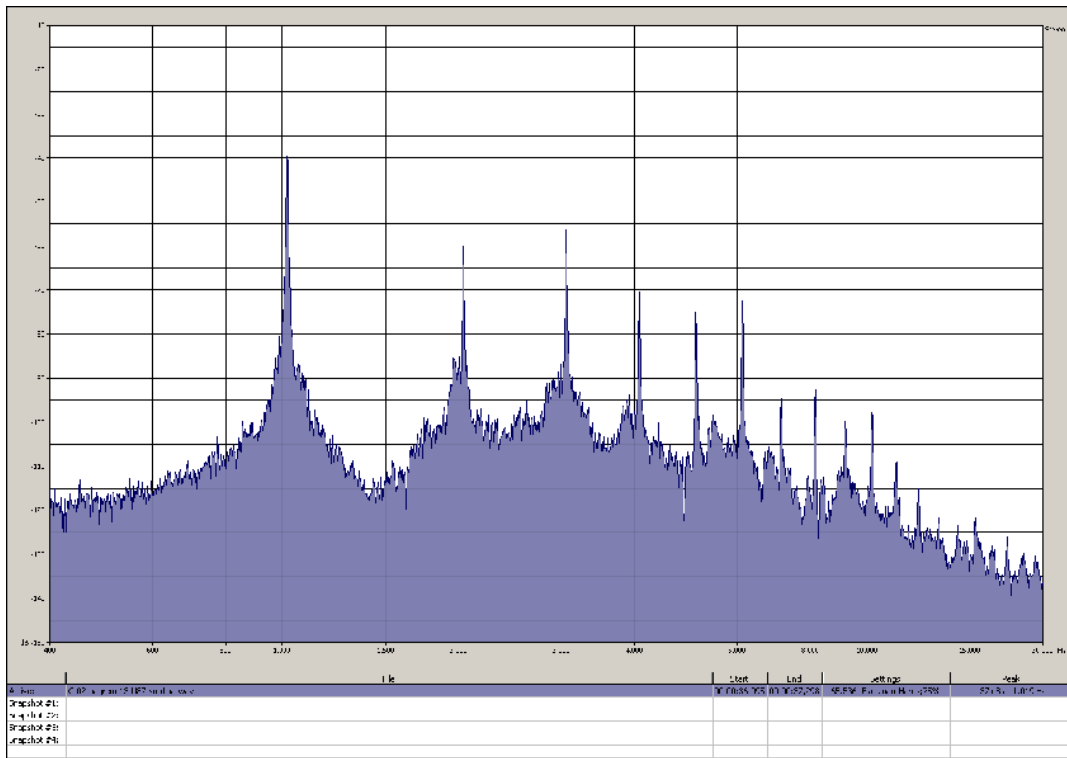
Slika 16.4: Frekvenjski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



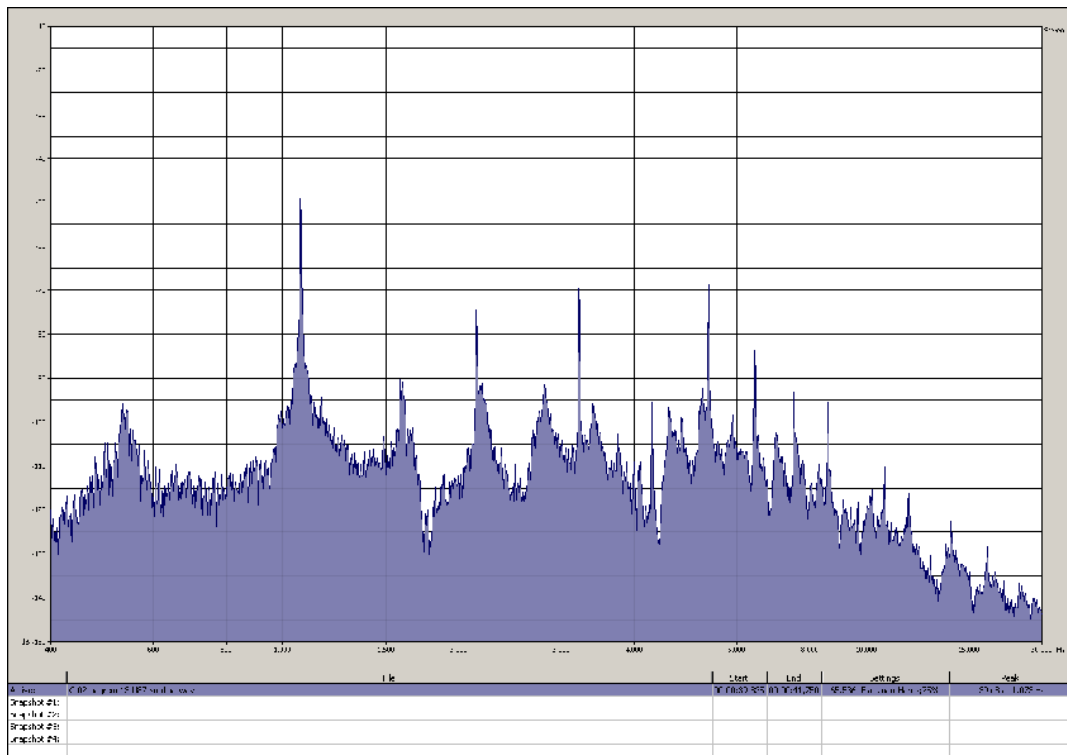
Slika 16.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



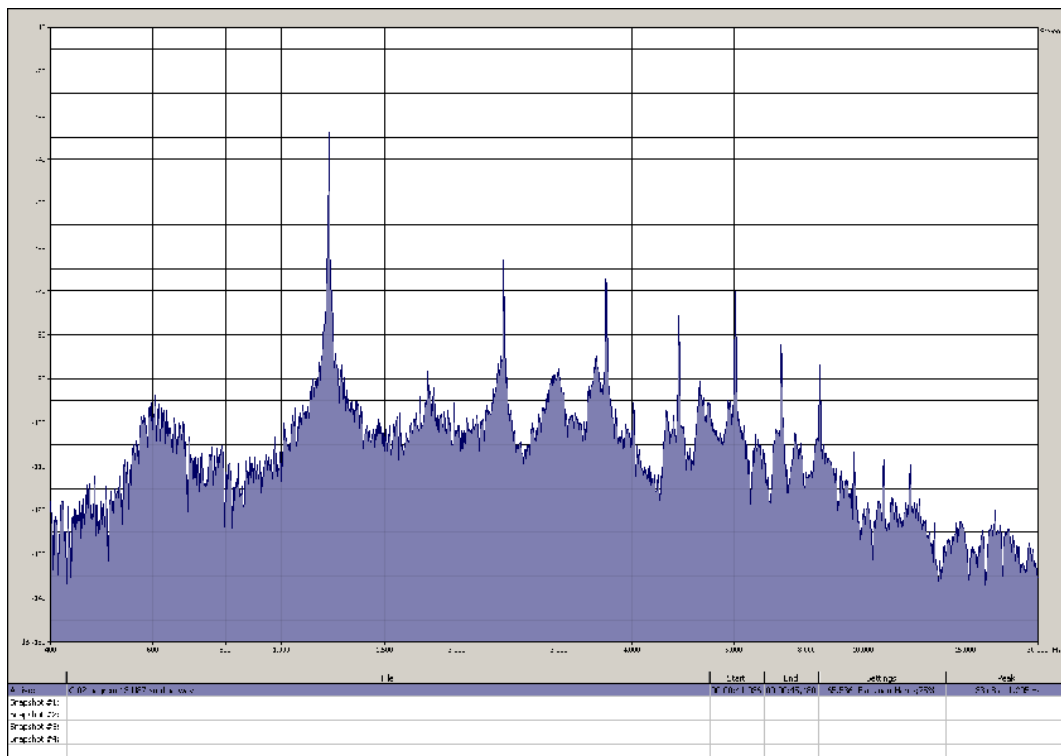
Slika 16.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



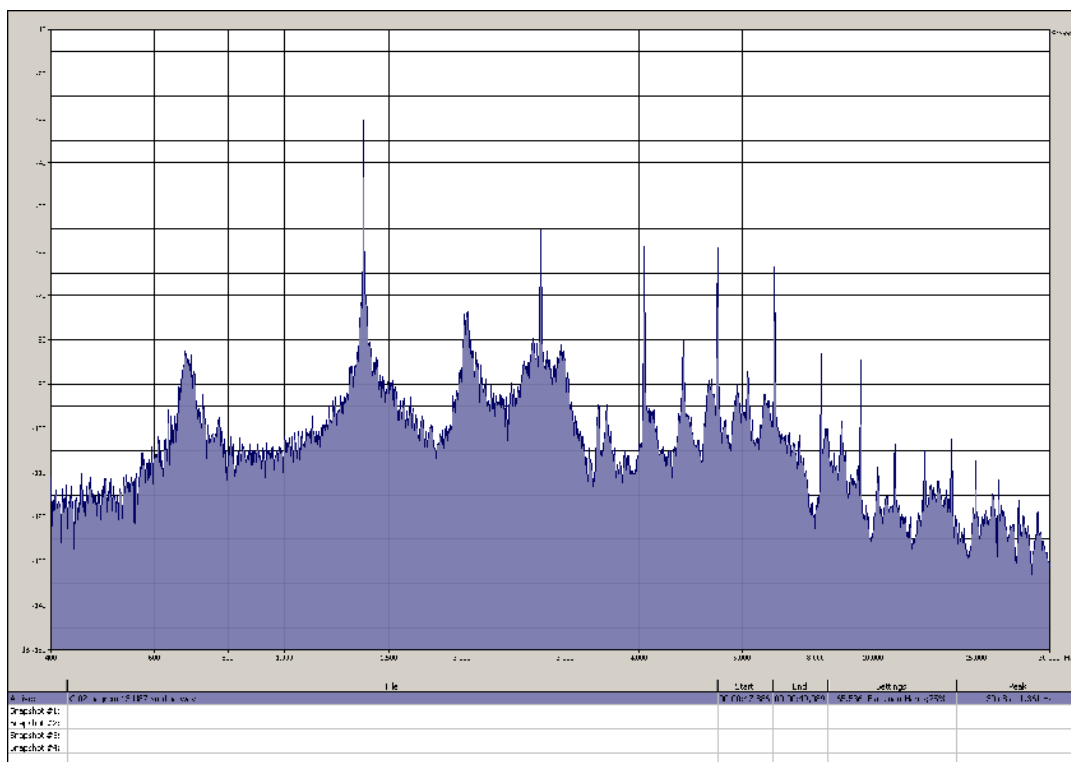
Slika 16.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



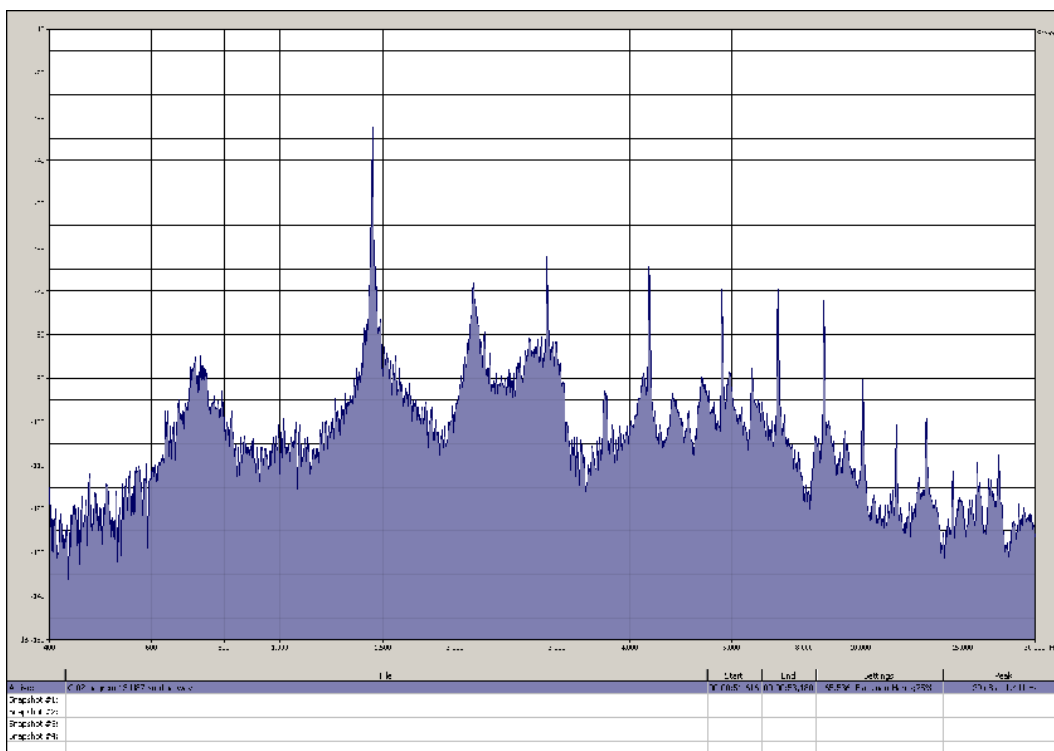
Slika 16.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



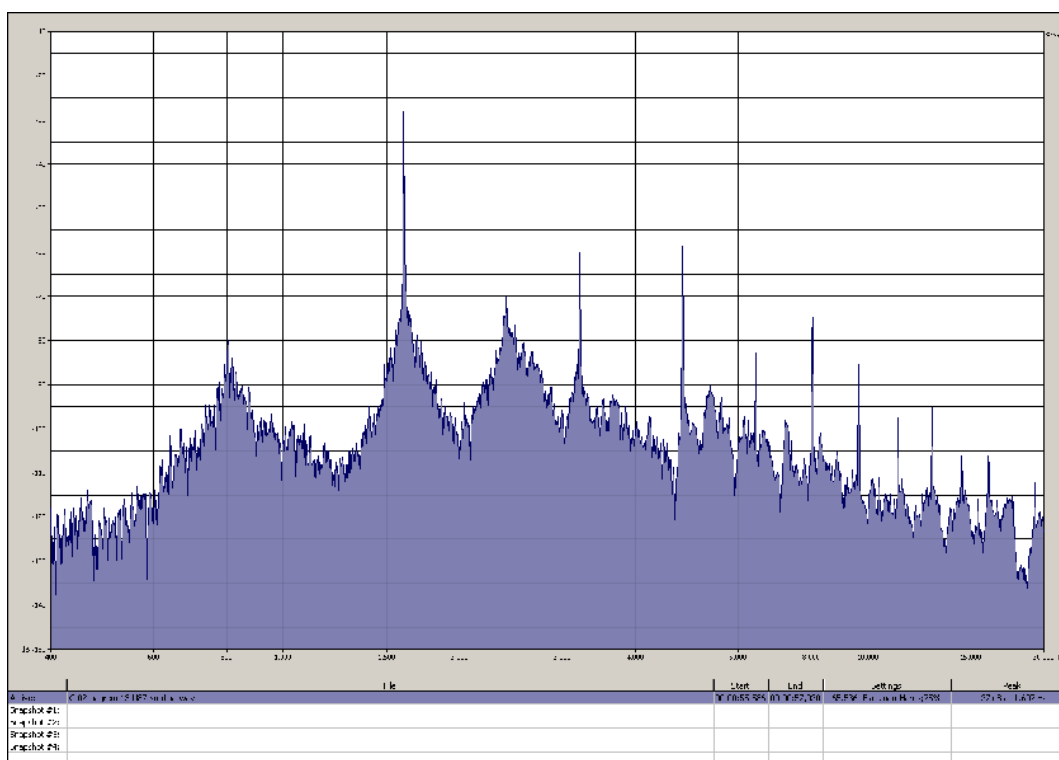
Slika 16.9: Frekvencijski spekter tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



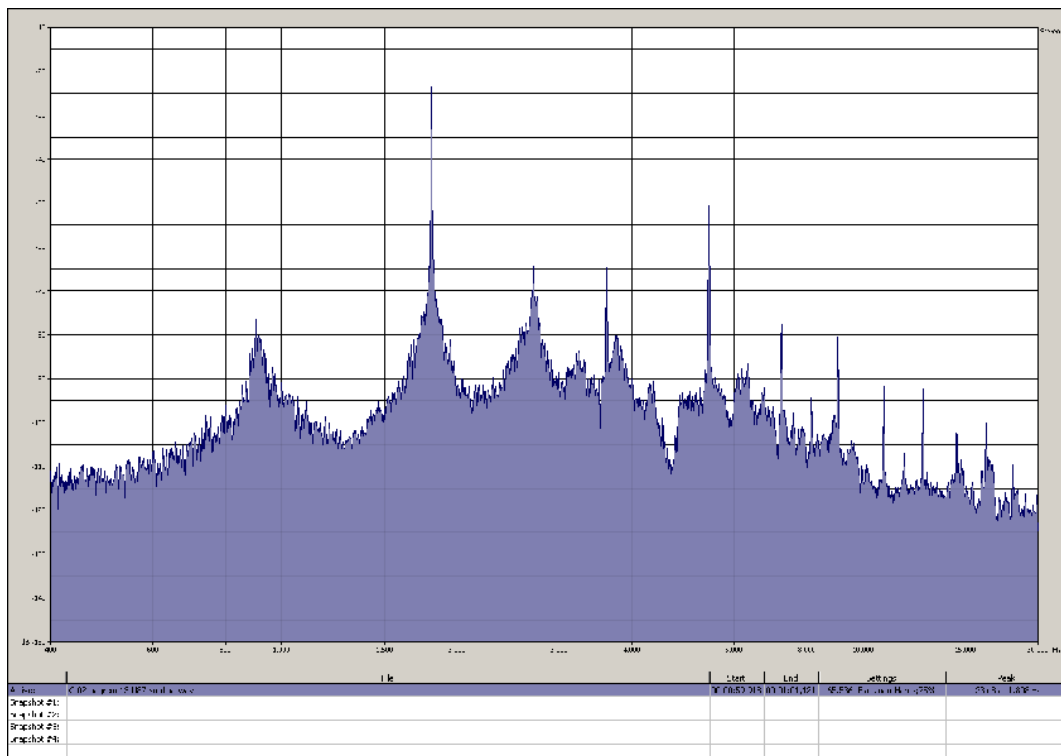
Slika 16.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



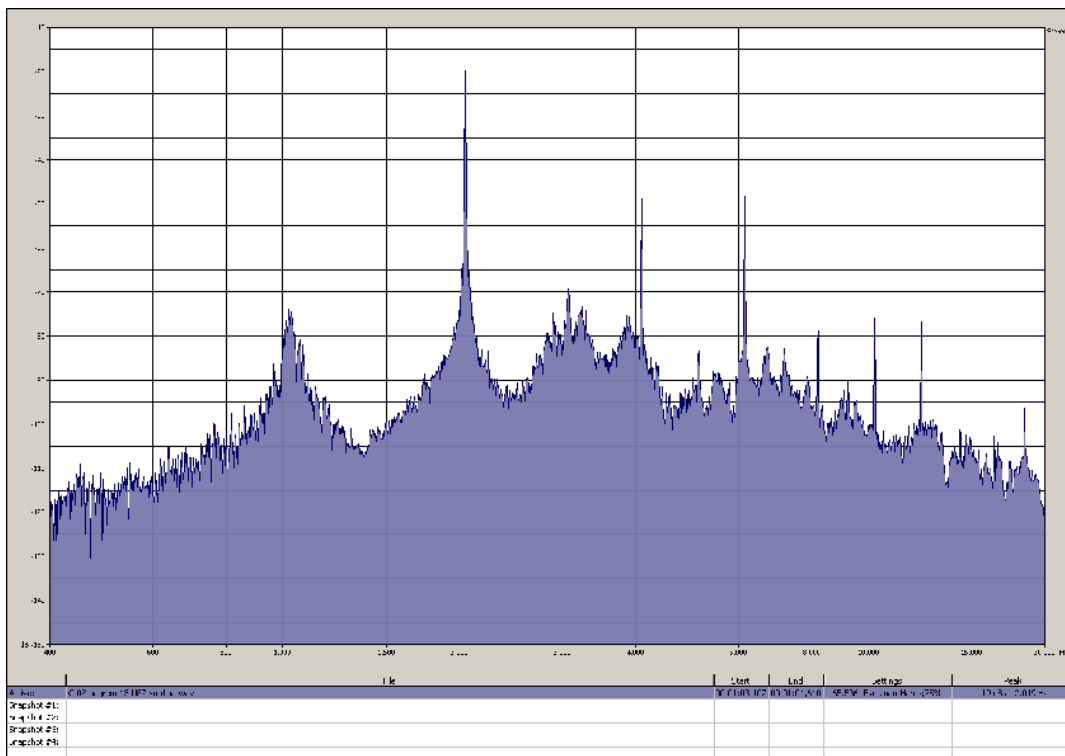
Slika 16.11: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 16.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)

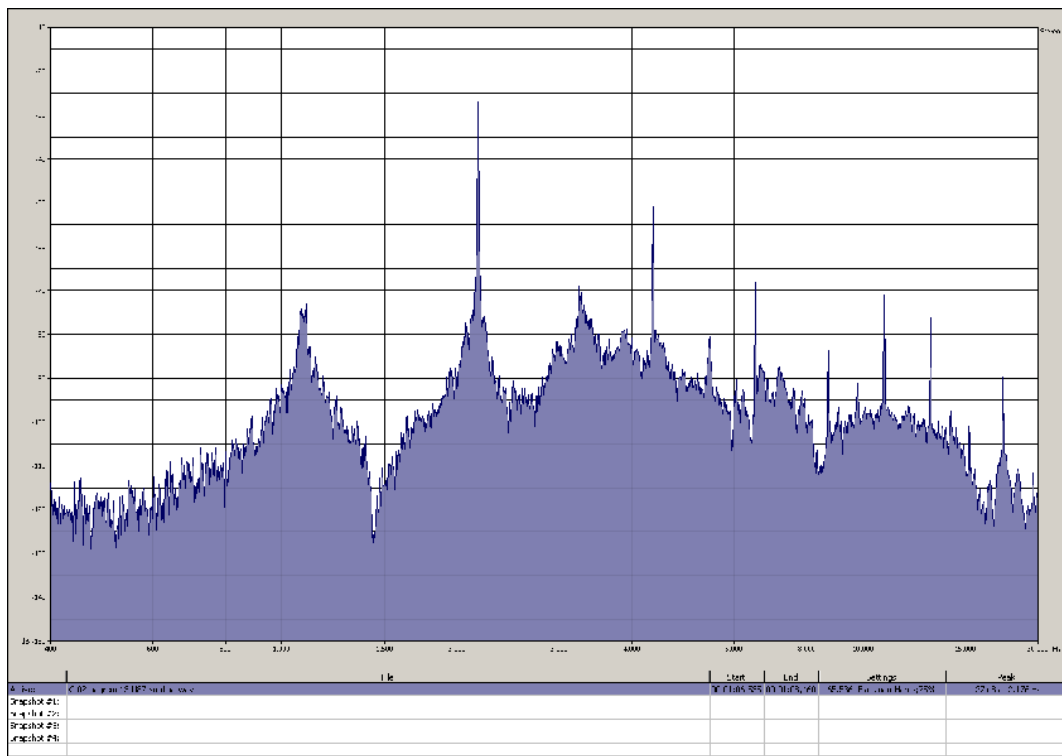


Slika 16.13: Frekvenjski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



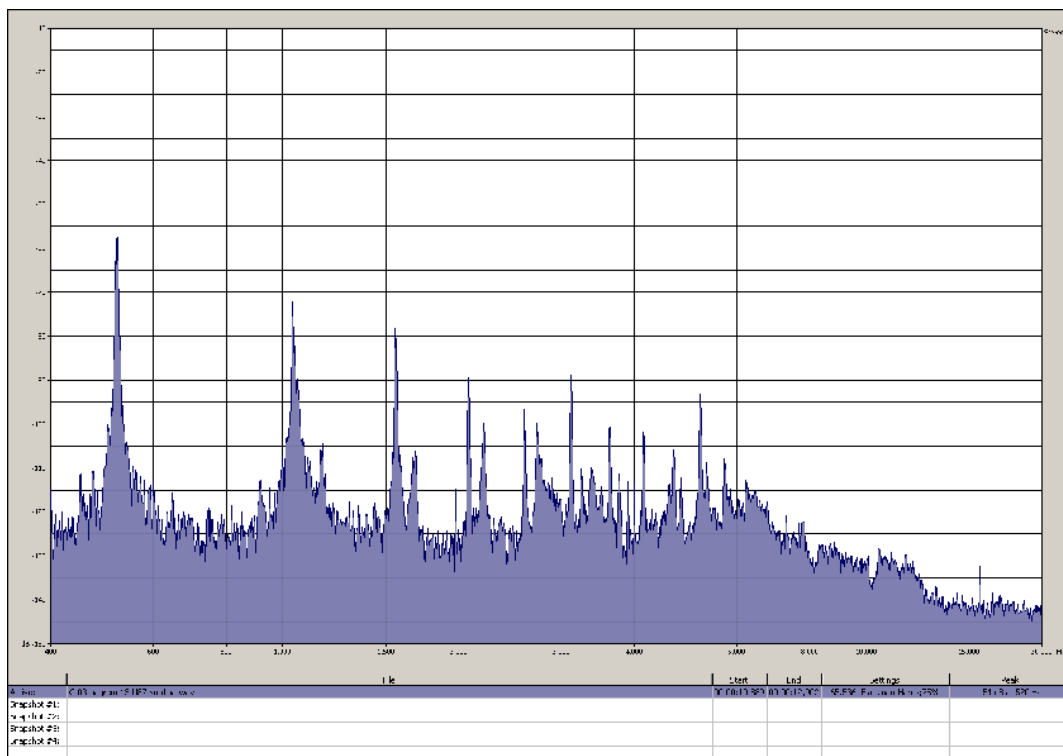
Slika 16.14: Frekvenjski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)



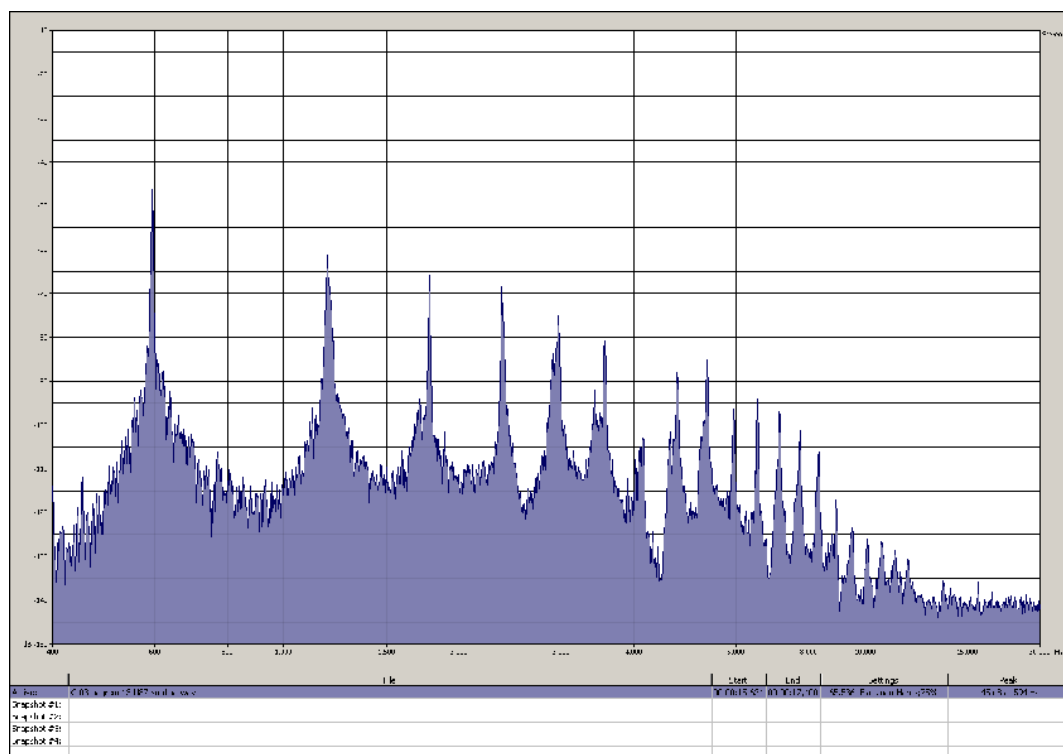


*Slika 16.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 2 (bagrem 2,  $\Phi = 13$  mm)*

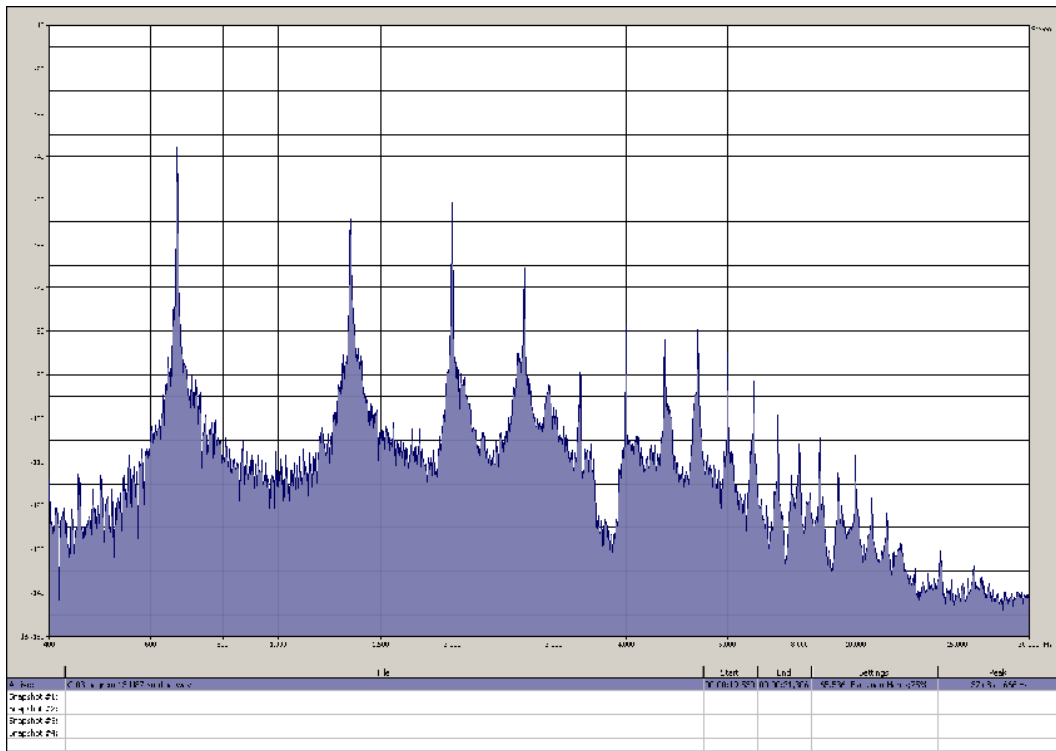
DODATAK 17: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



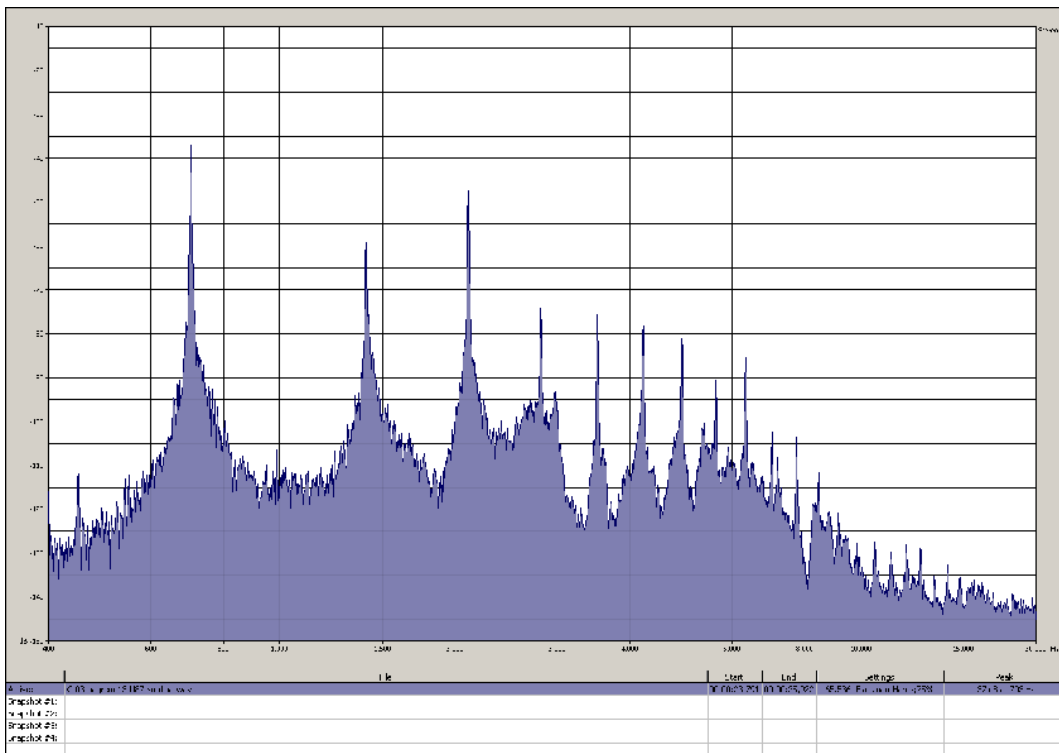
Slika 17.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 3  
(bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



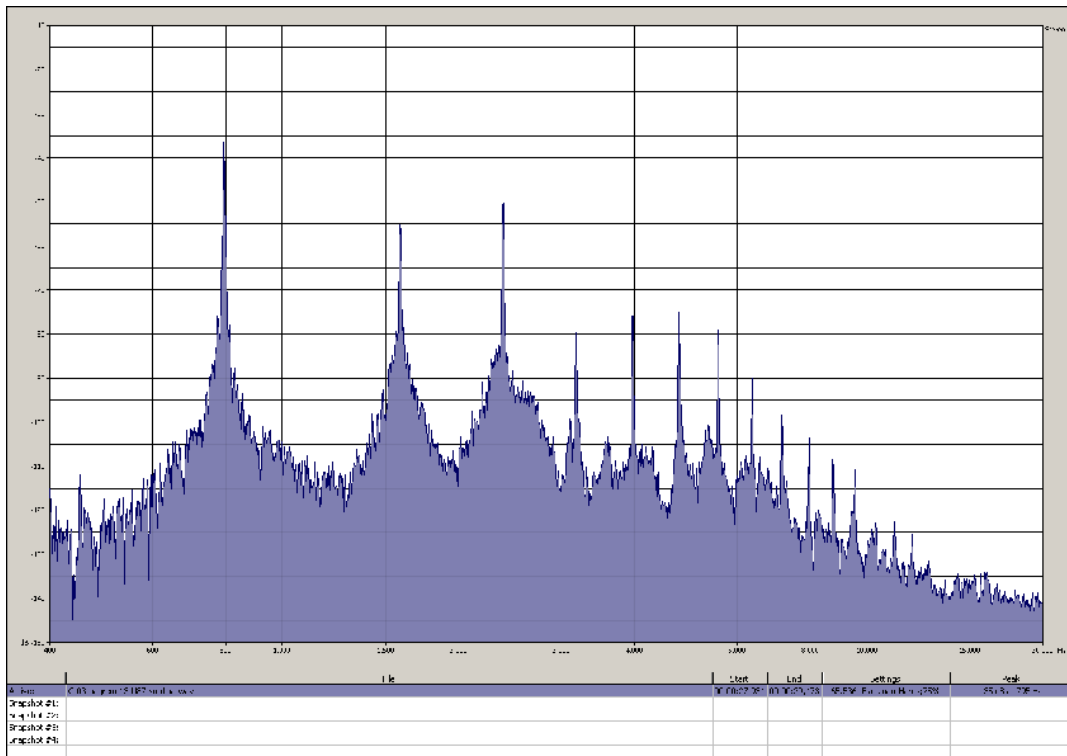
Slika 17.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 3  
(bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



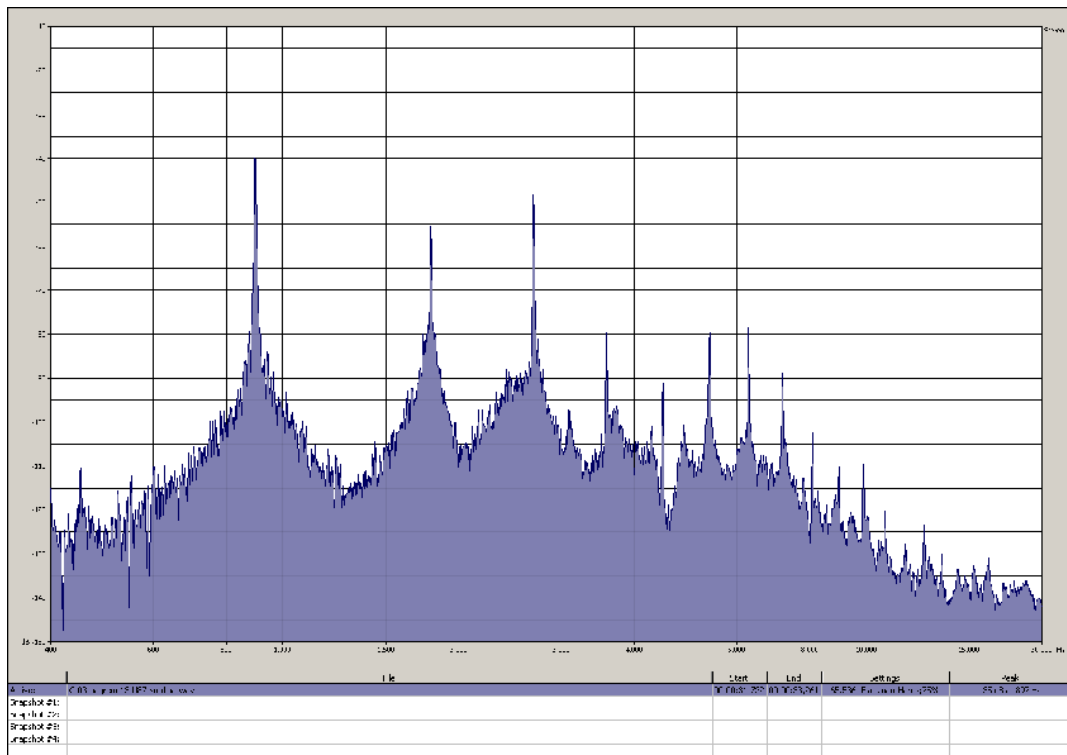
Slika 17.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



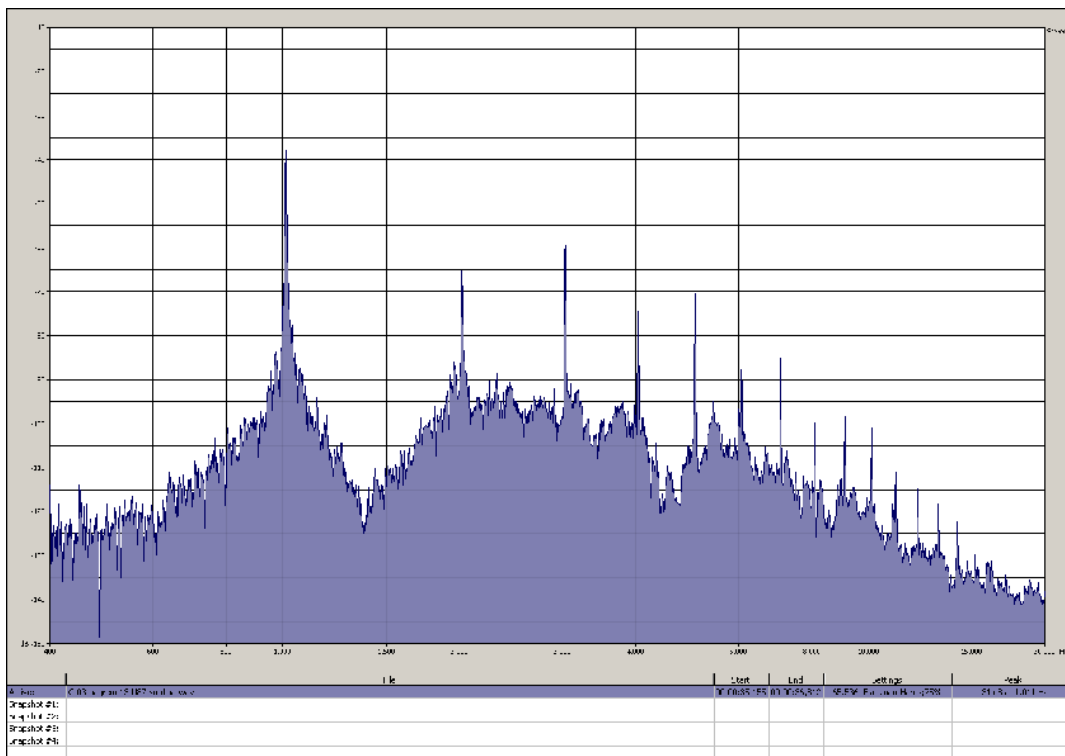
Slika 17.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



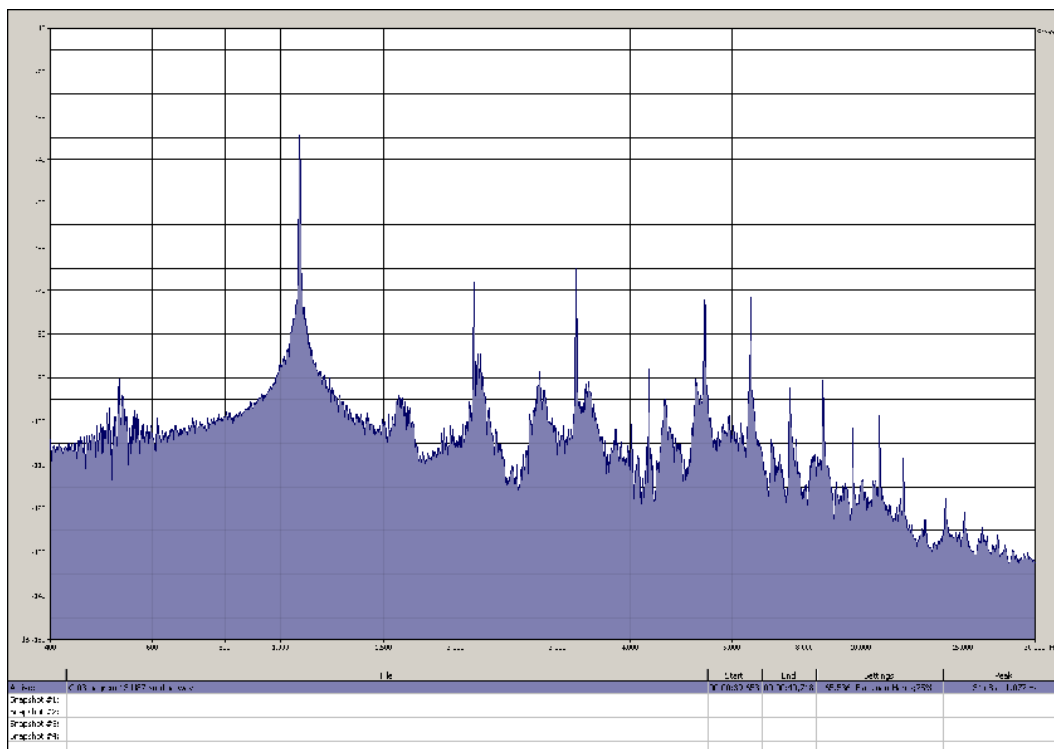
Slika 17.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



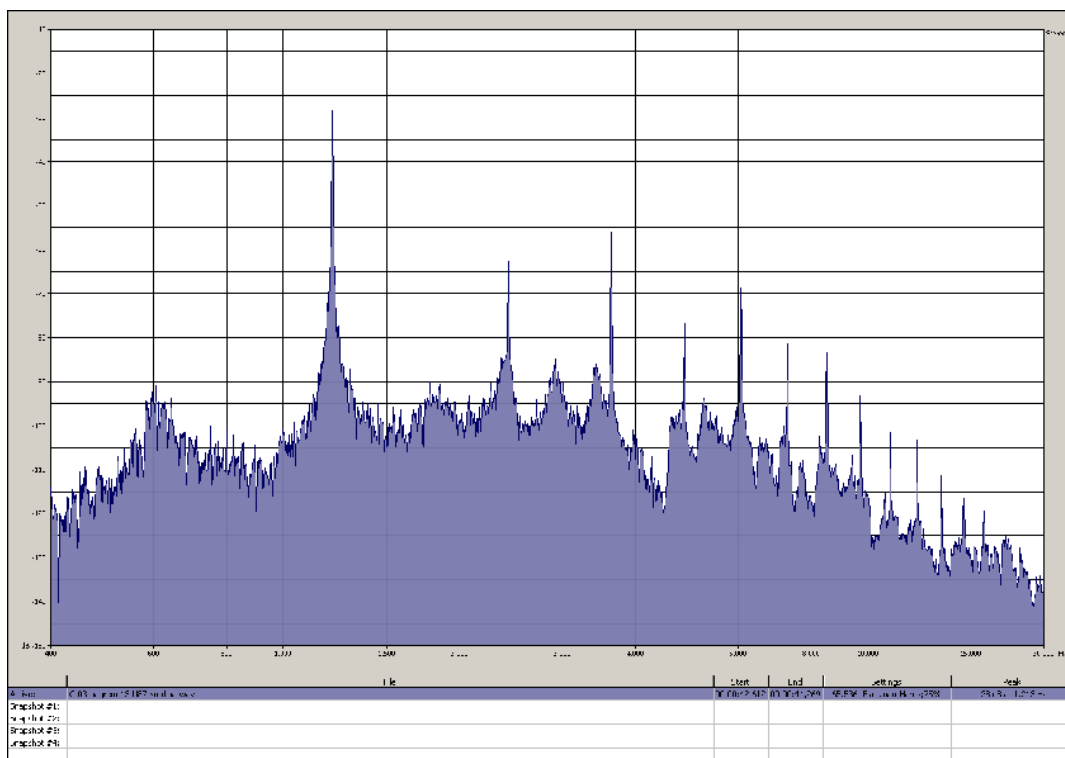
Slika 17.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



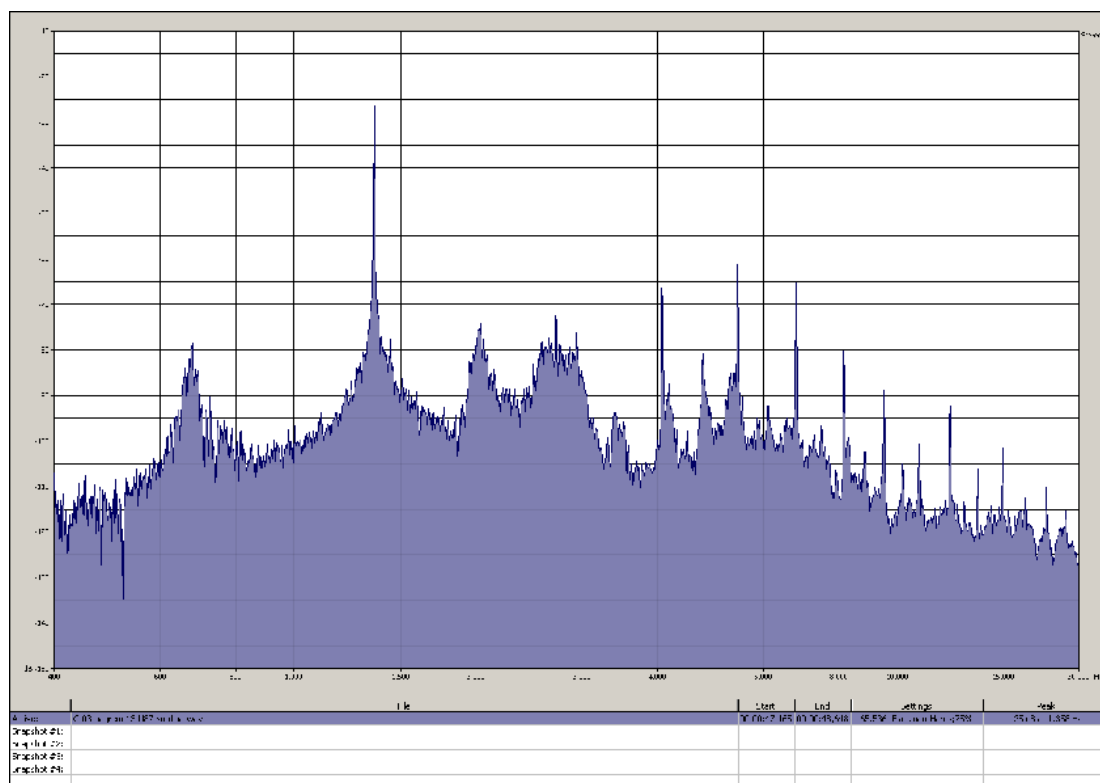
Slika 17.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



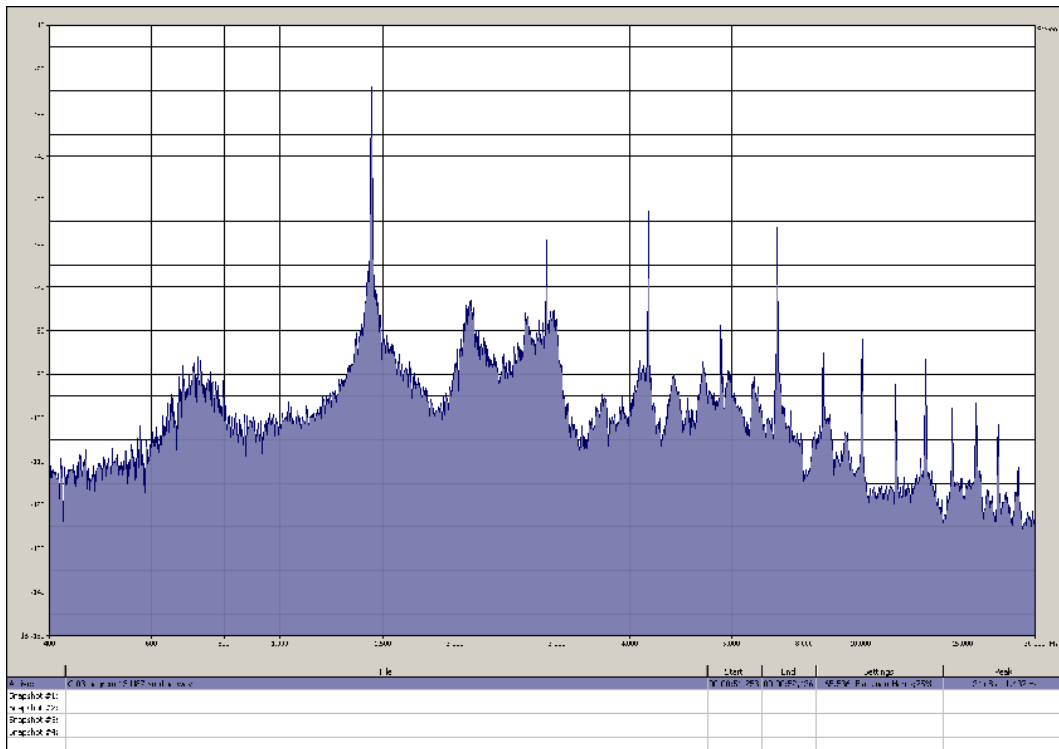
Slika 17.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



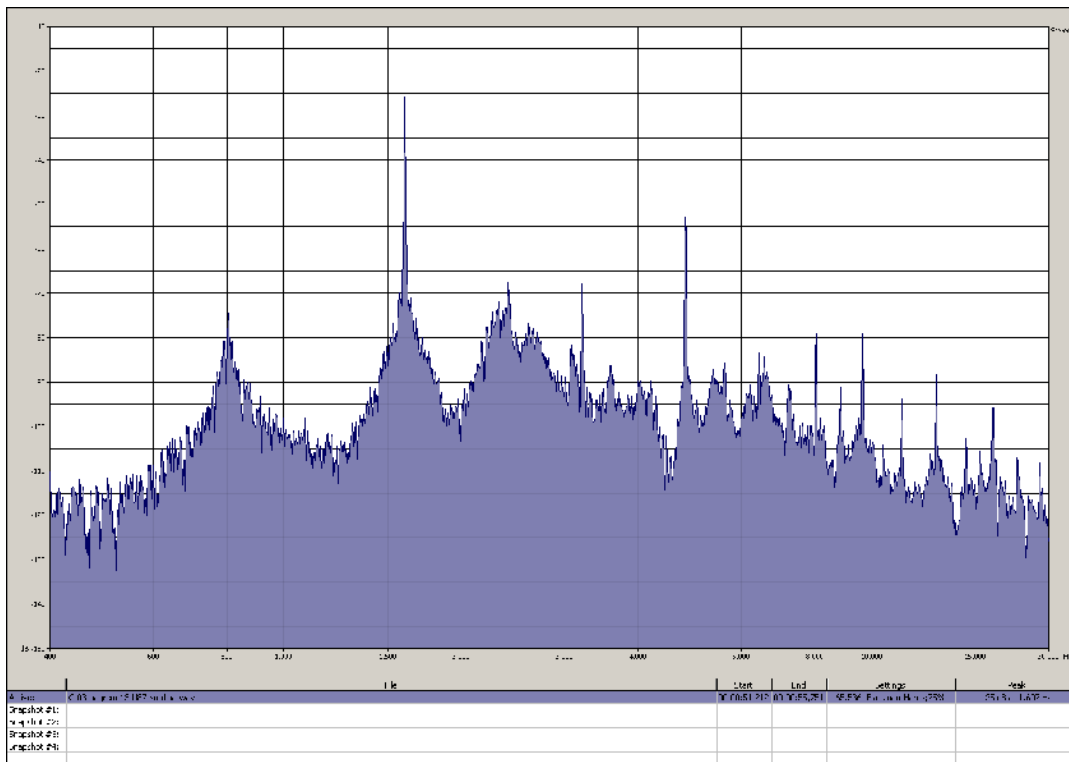
Slika 17.9: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



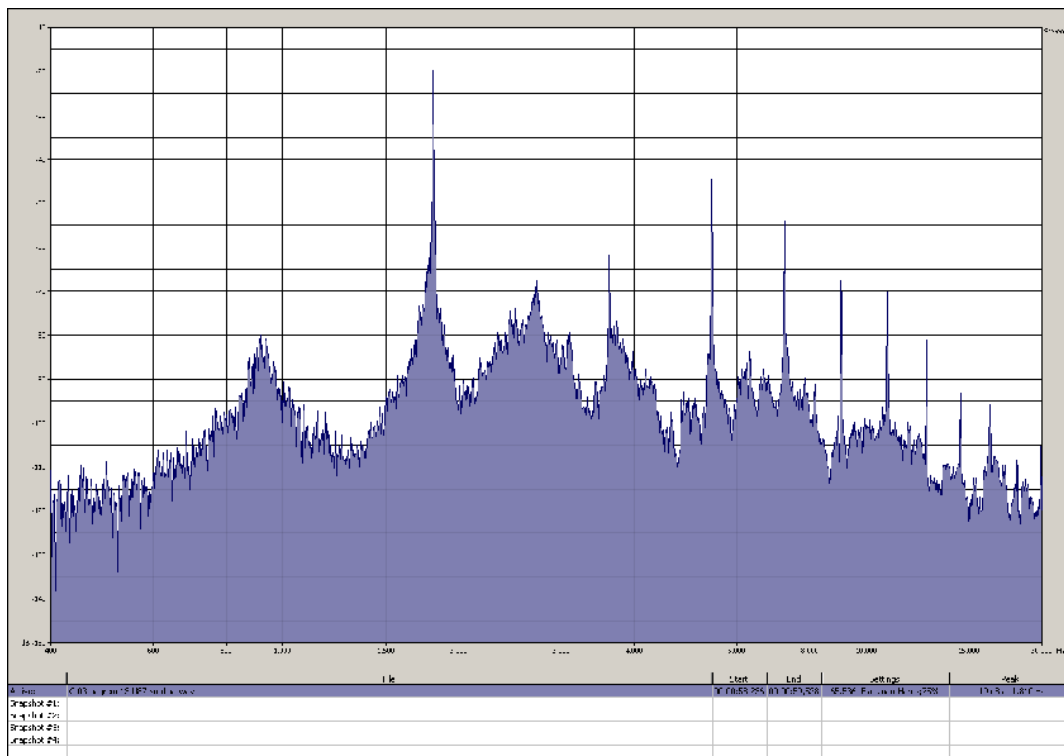
Slika 17.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



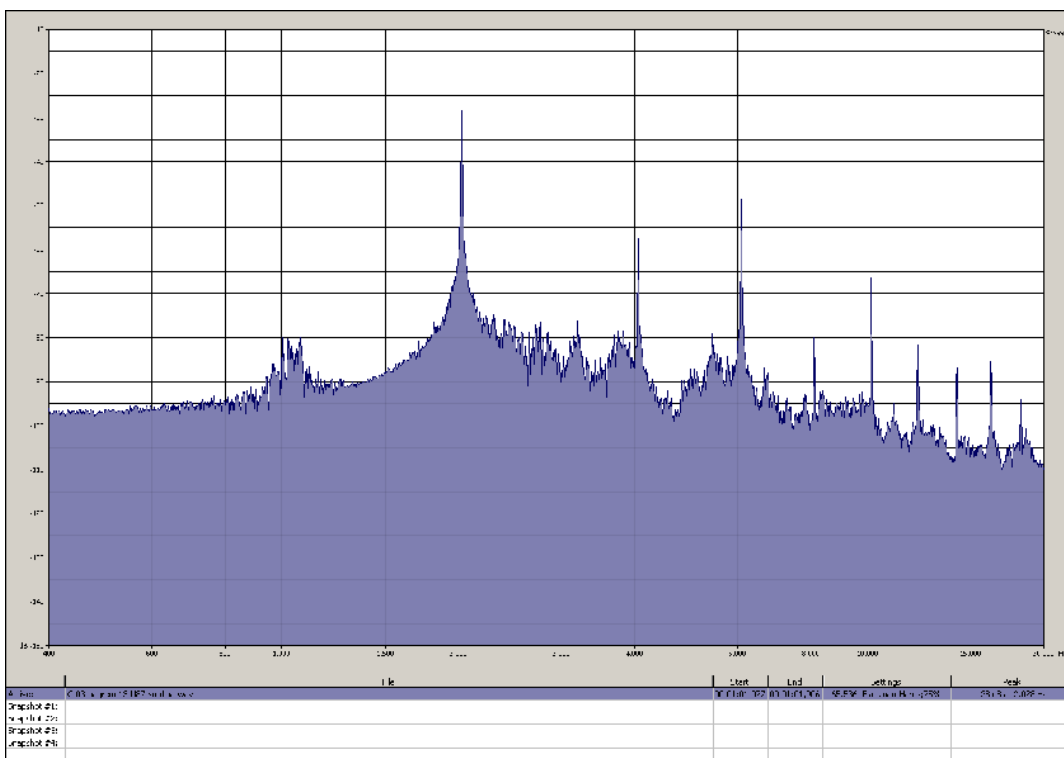
Slika 17.11: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 17.12: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)

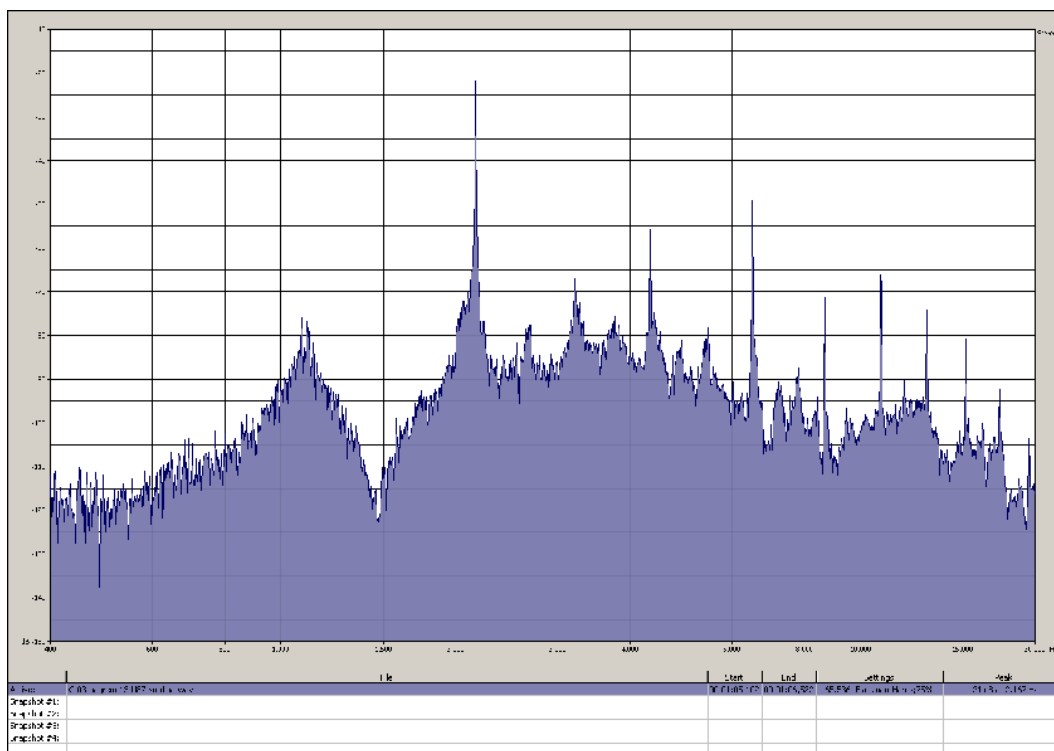


Slika 17.13: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



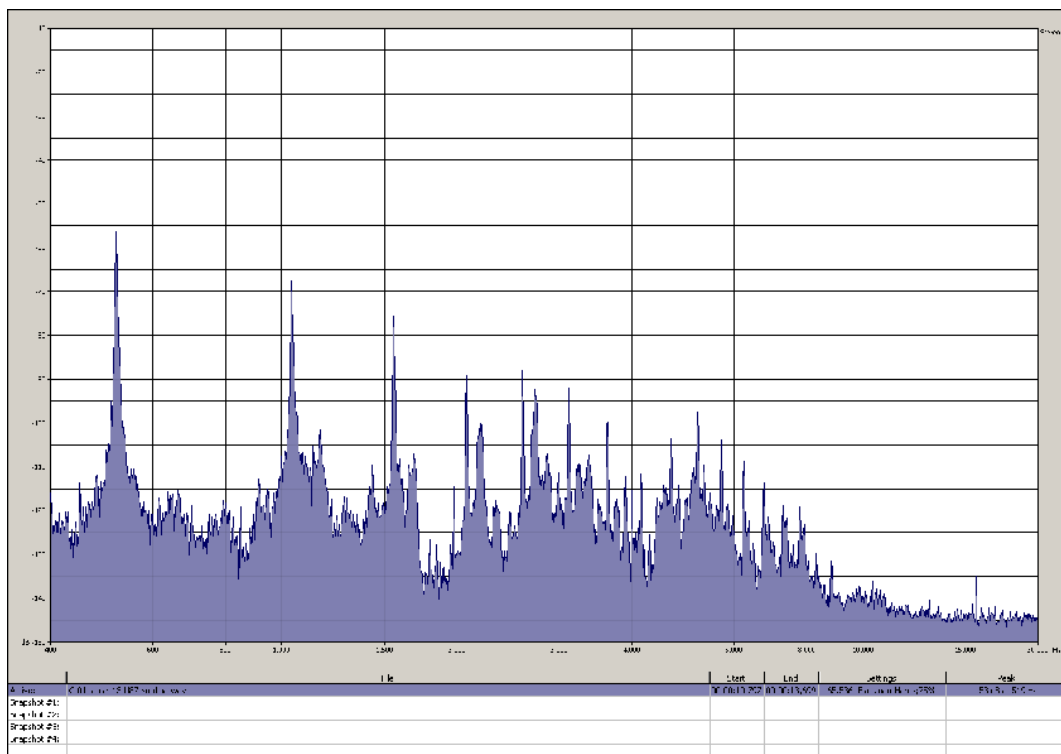
Slika 17.14: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm)



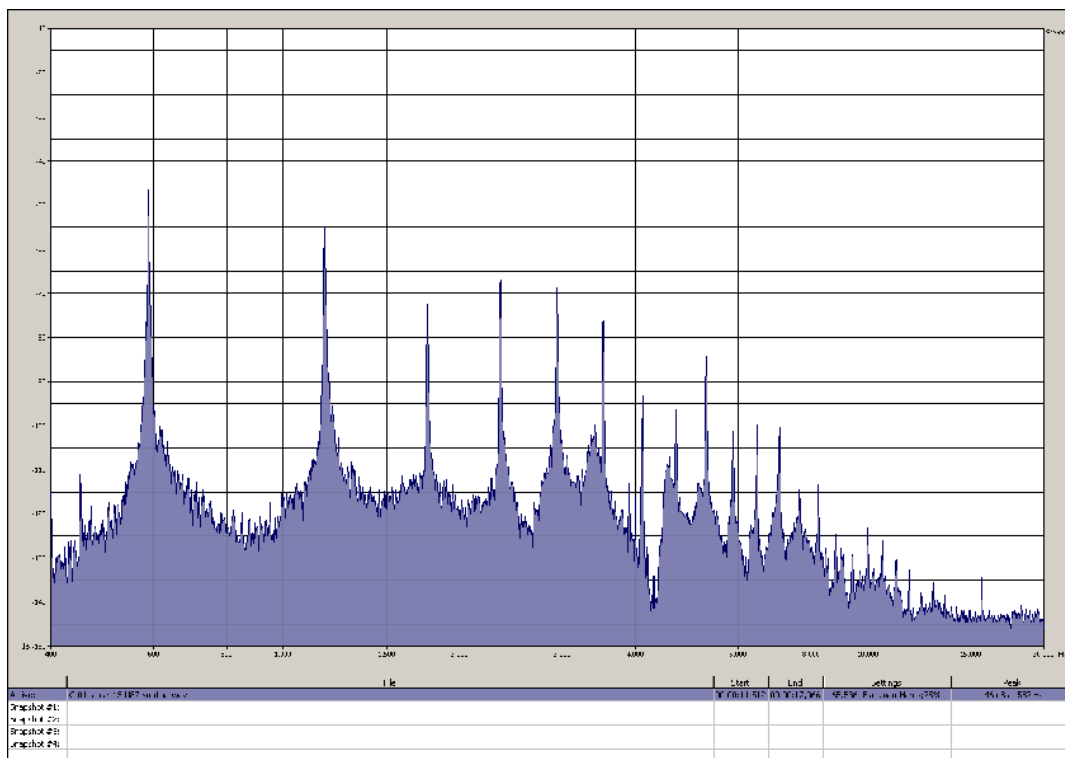


*Slika 17.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 3 (bagrem 3,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )*

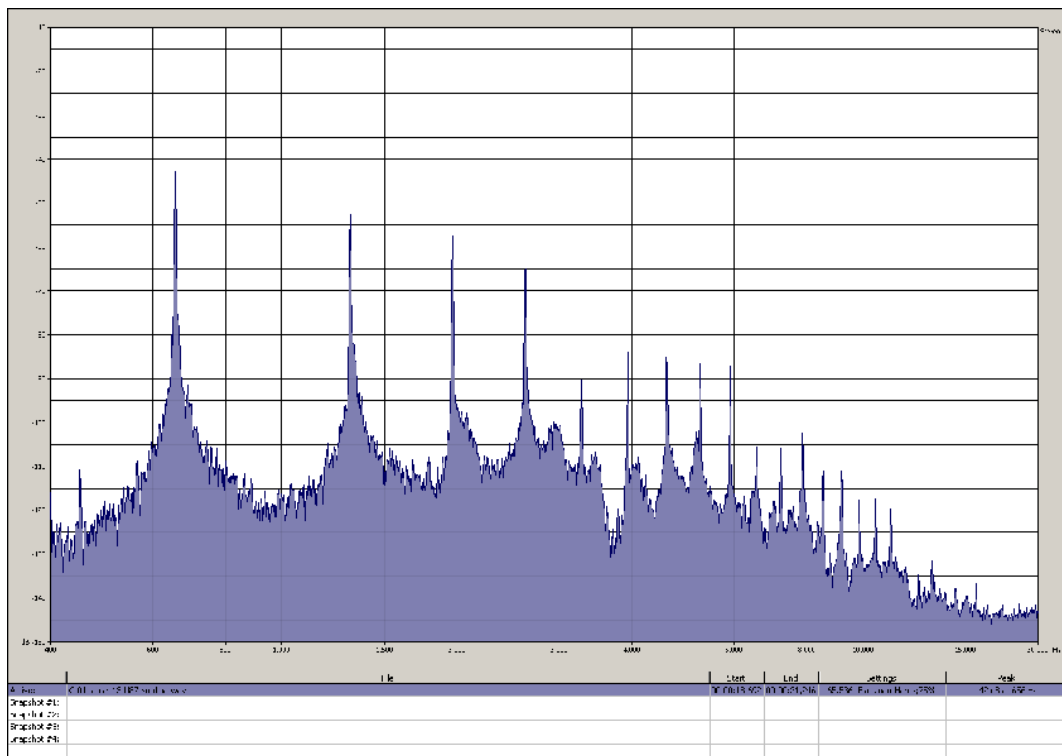
## DODATAK 18: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA DVODELNE C FRULE 4 (šimšir 1, $\Phi = 13$ mm)



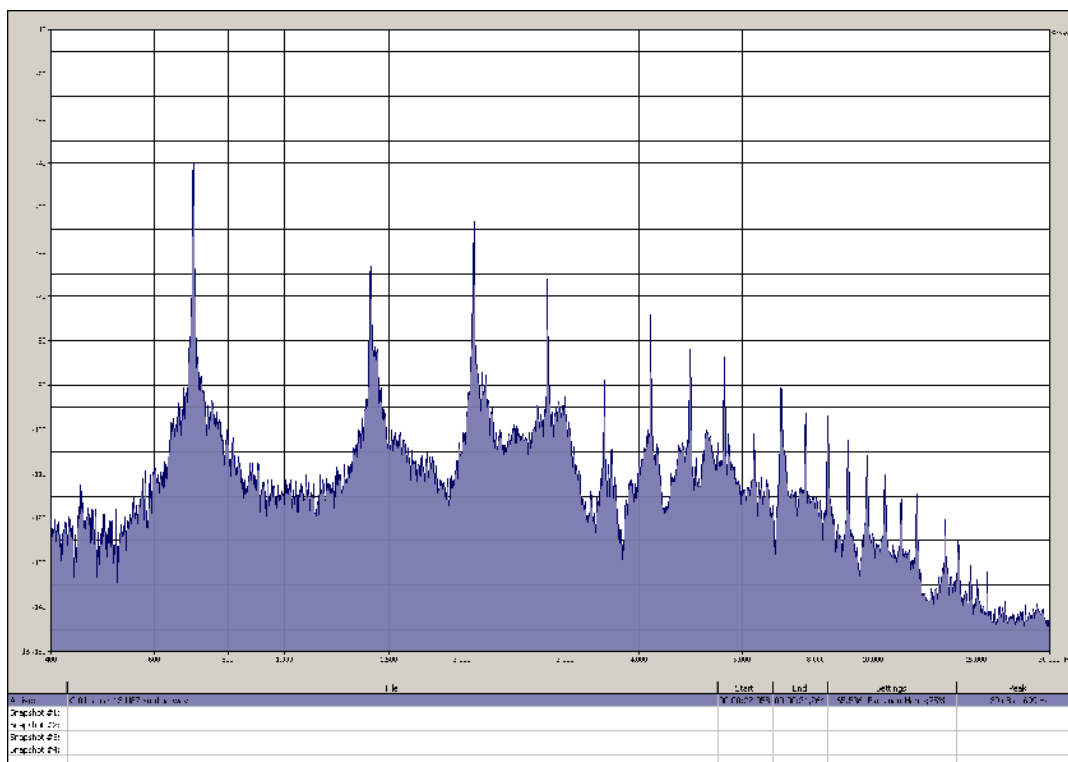
Slika 18.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 4  
(šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



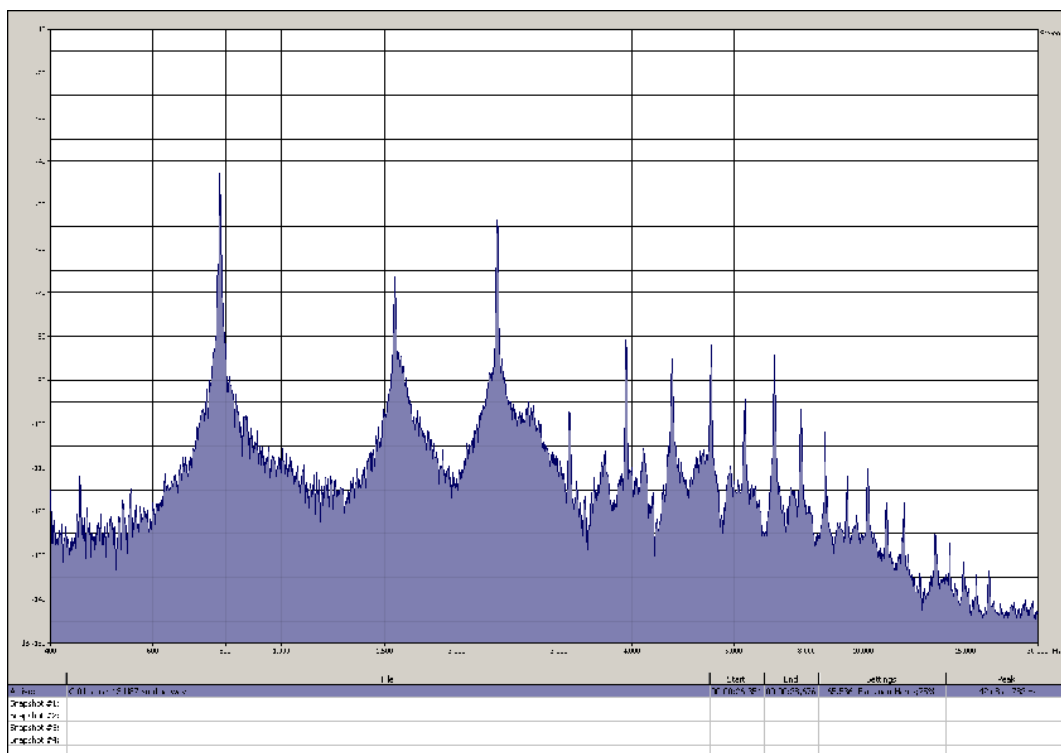
Slika 18.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 4  
(šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



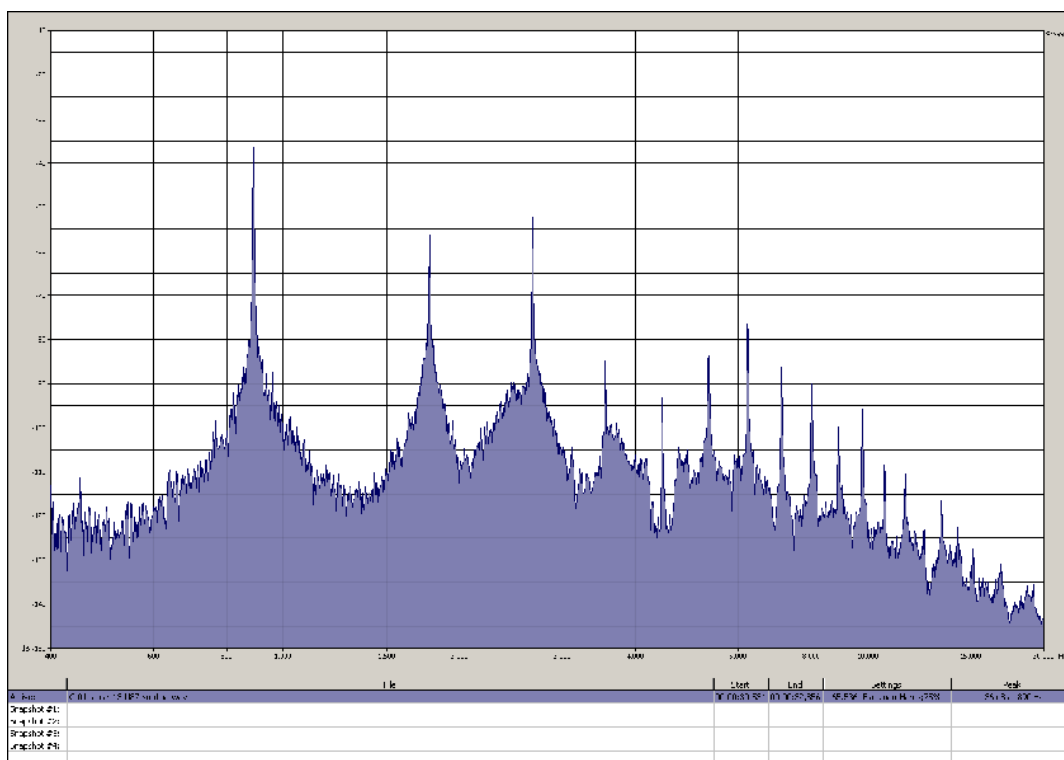
Slika 18.3: Frekvenjski spekter tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



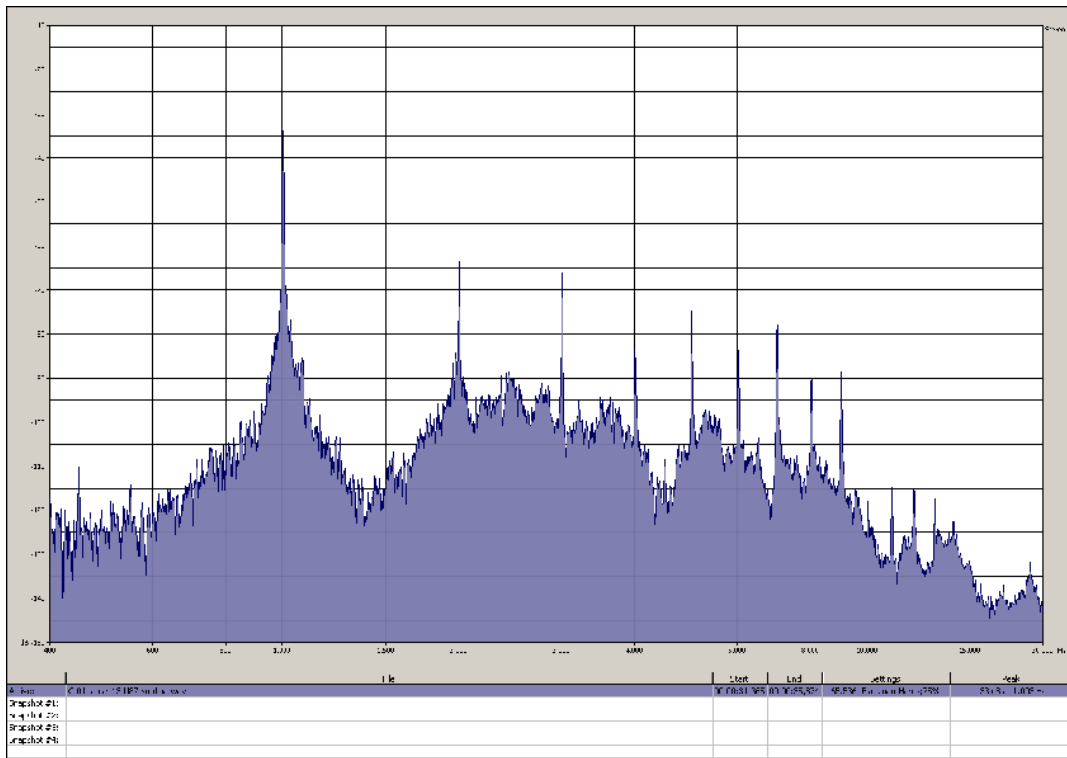
Slika 18.4: Frekvenjski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



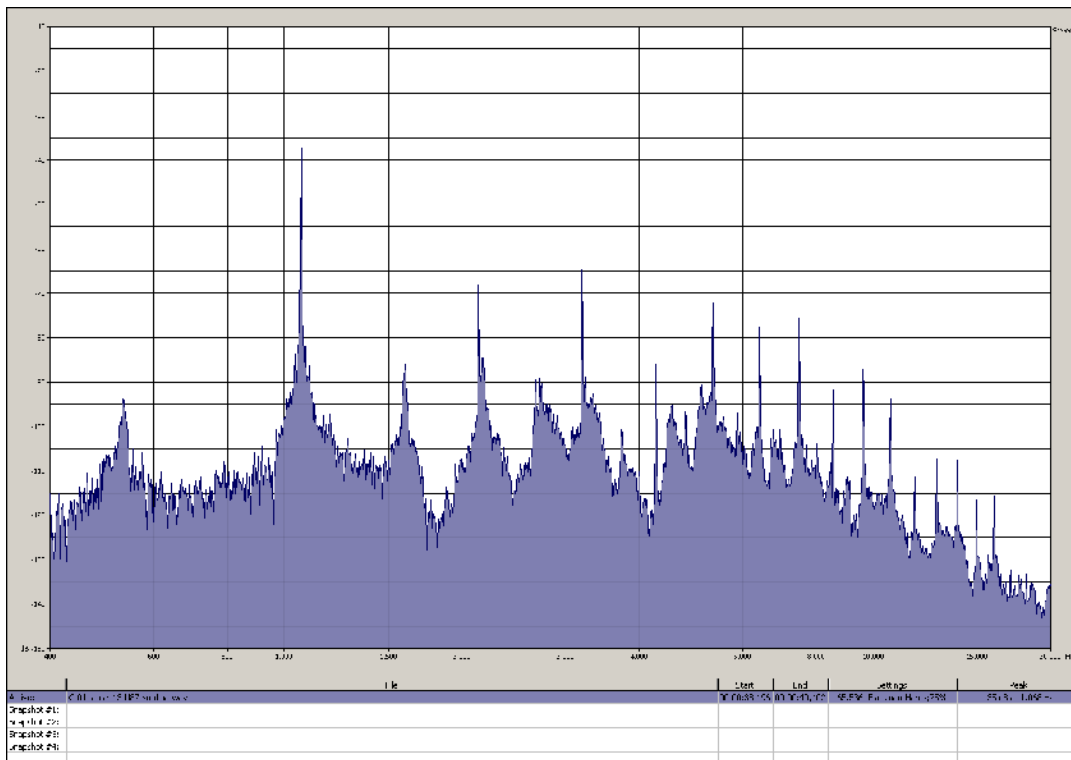
Slika 18.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



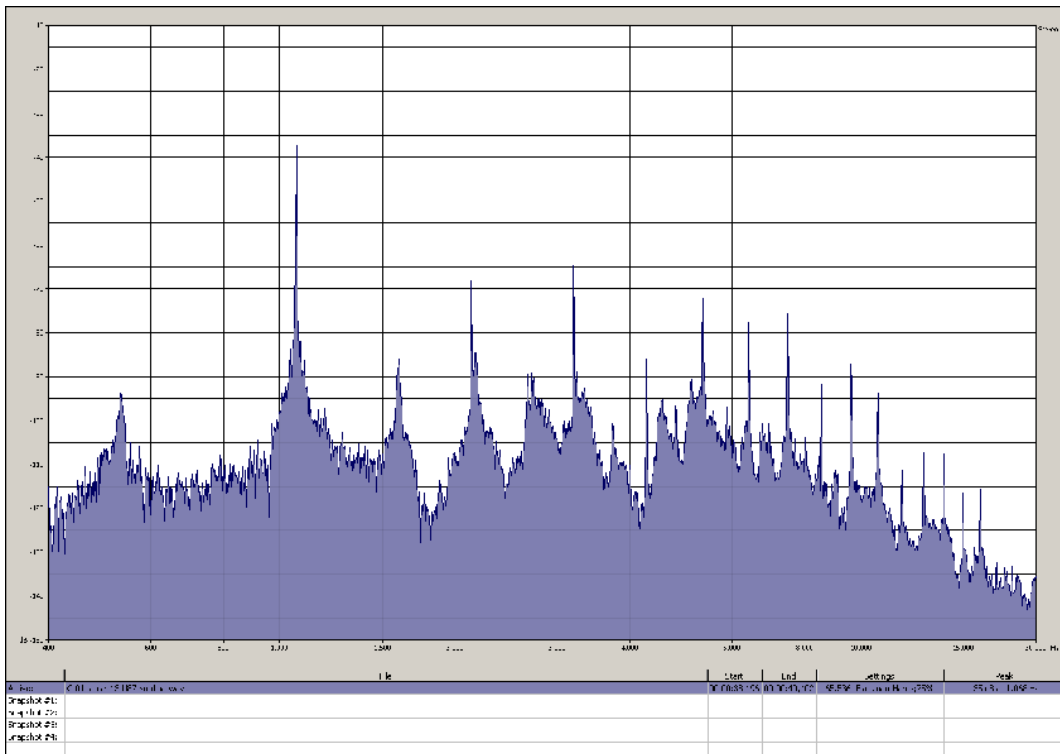
Slika 18.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



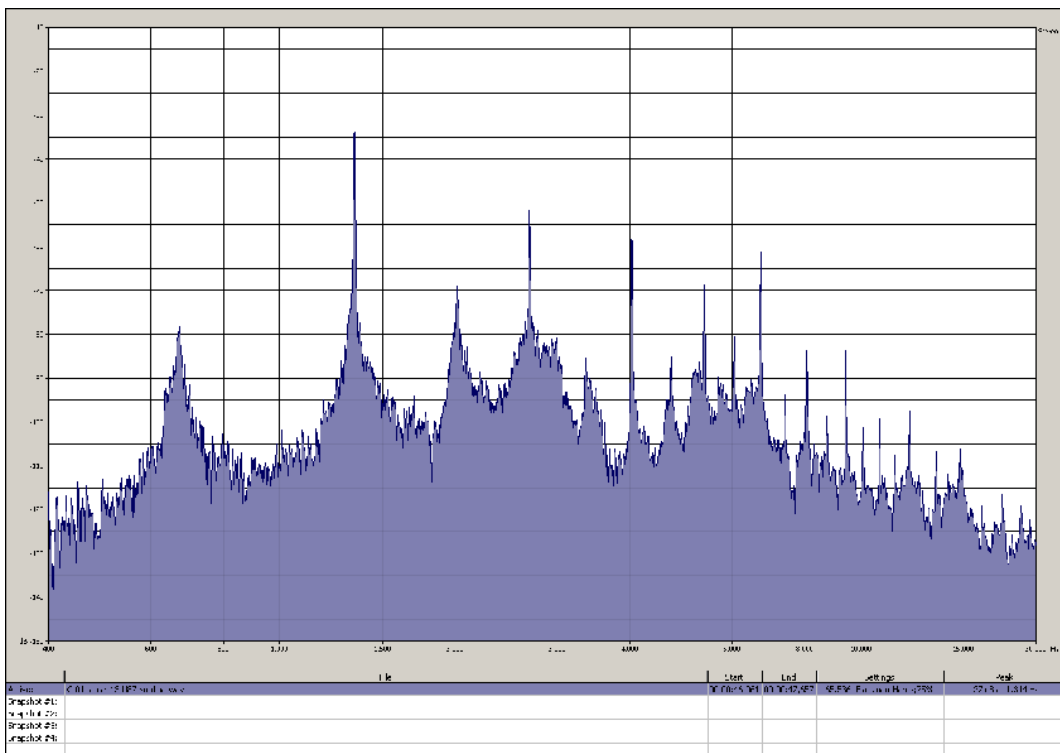
*Slika 18.7: Frekvencijski spekter tona  $H^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)*



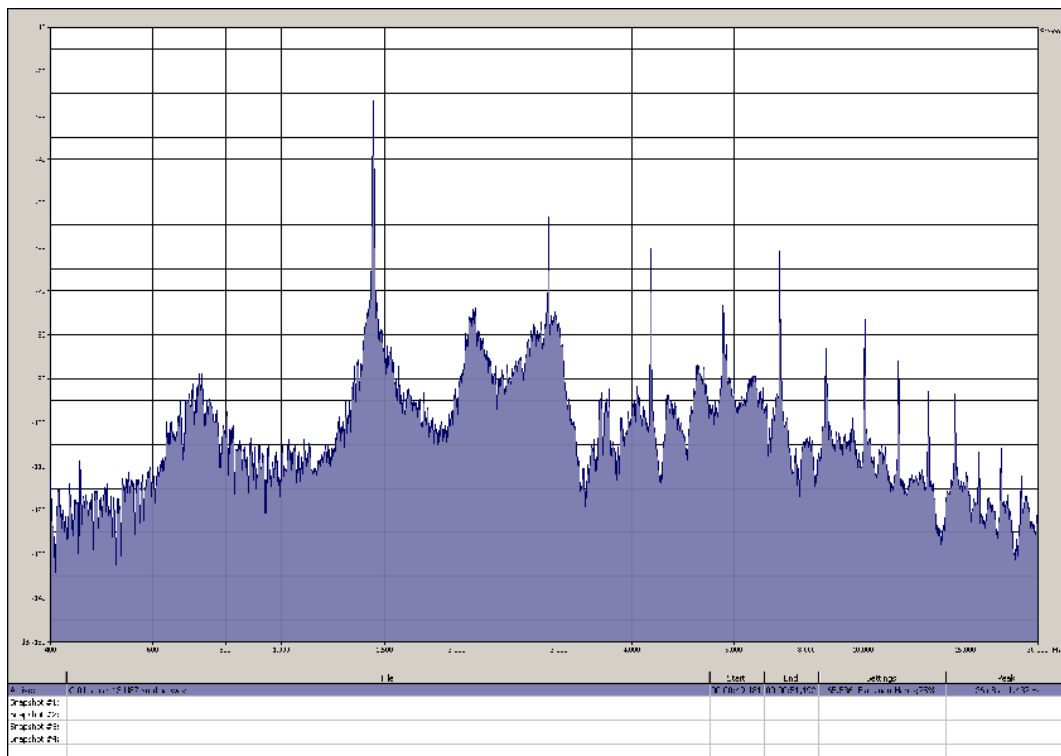
*Slika 18.8: Frekvencijski spekter tona  $C^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)*



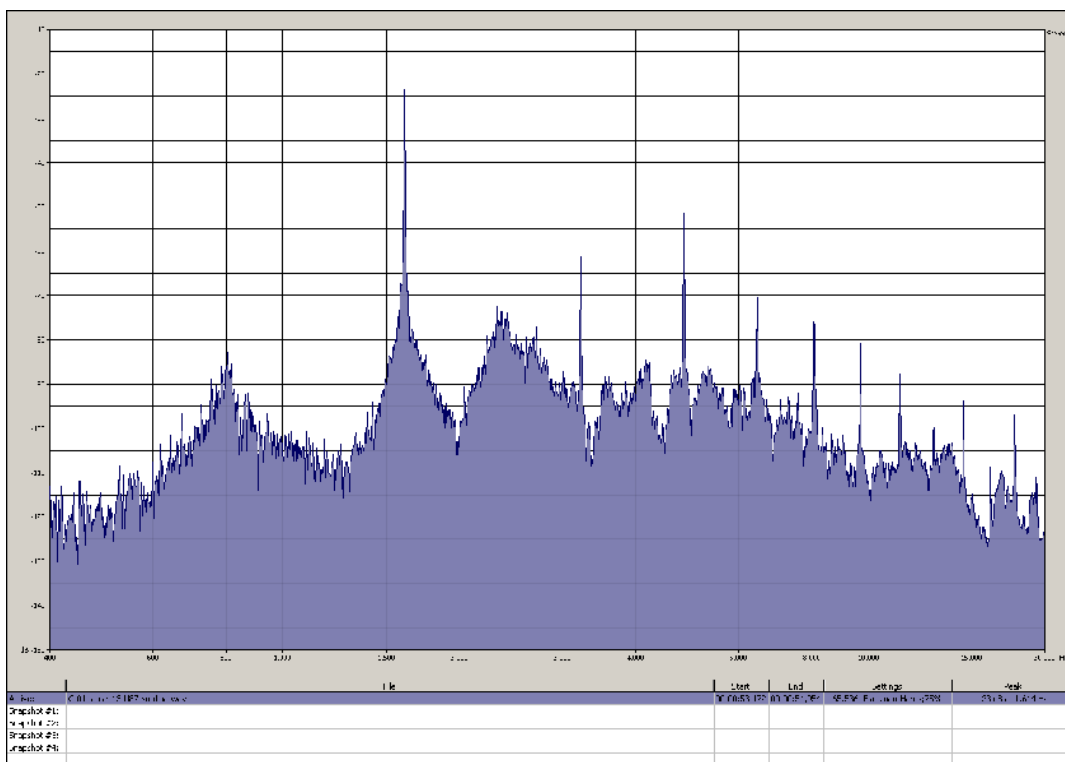
Slika 18.9: Frekvencijski spekter tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



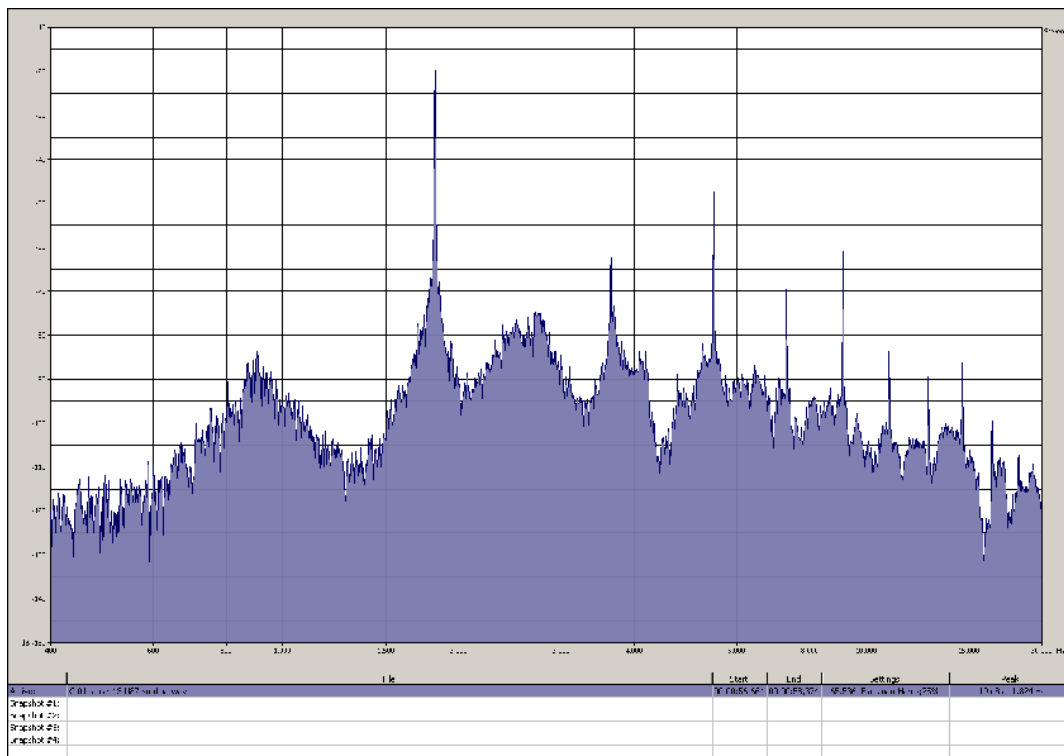
Slika 18.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



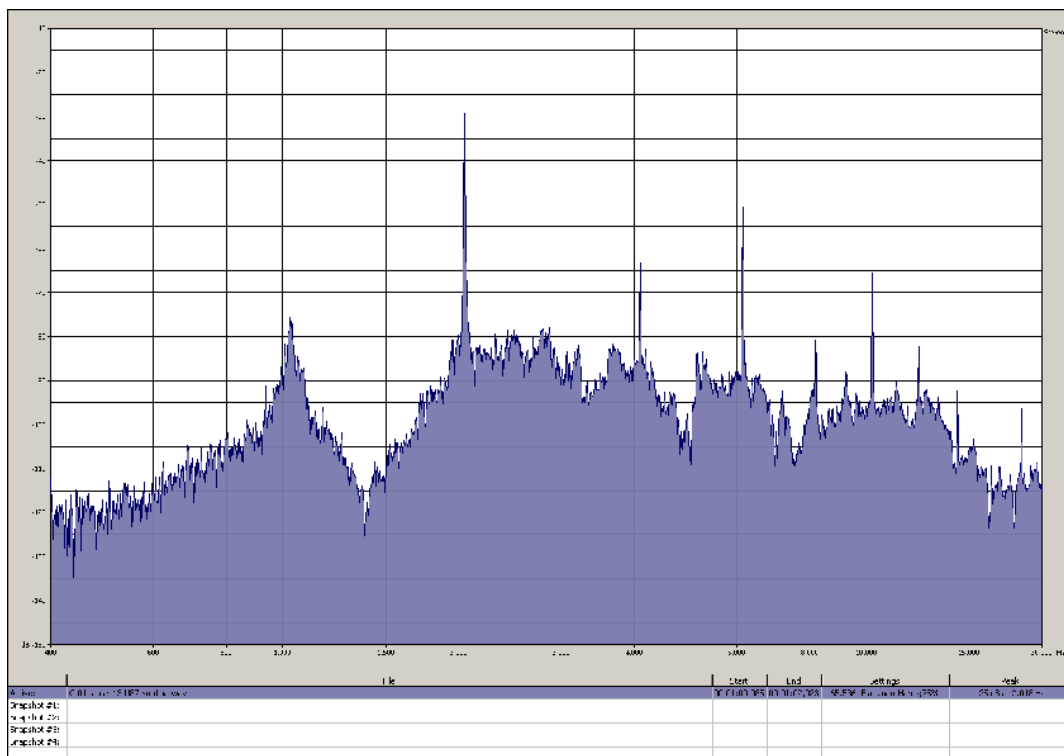
Slika 18.11: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 18.12: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm)

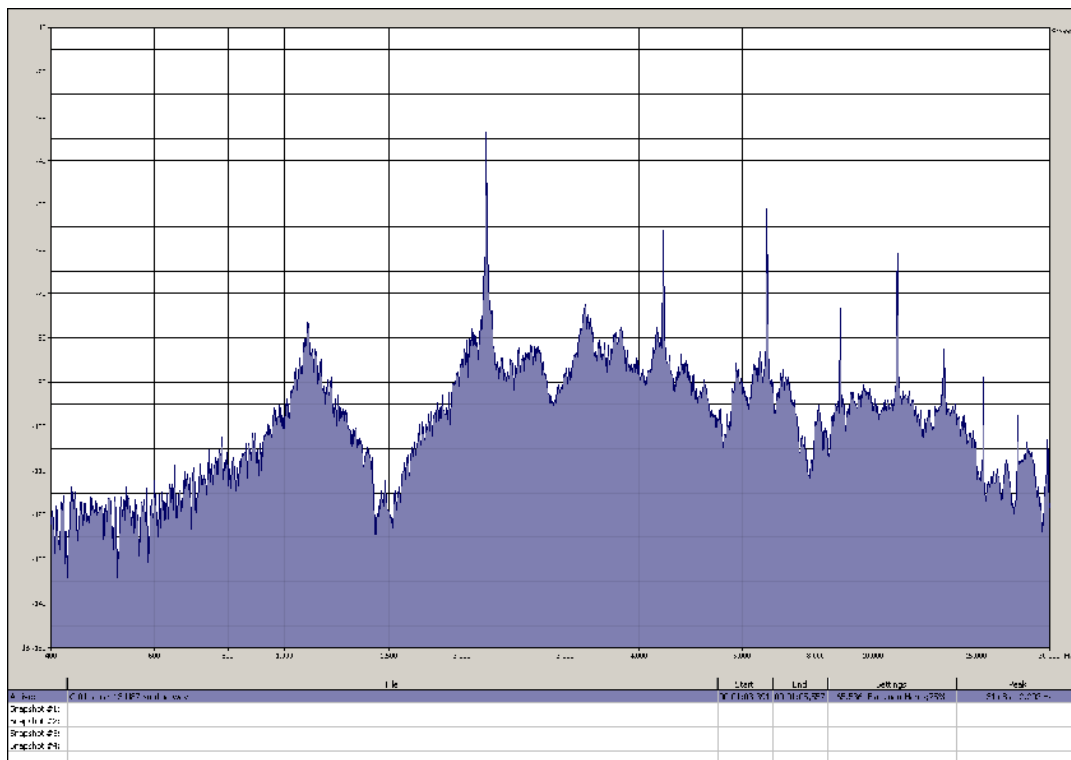


Slika 18.13: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



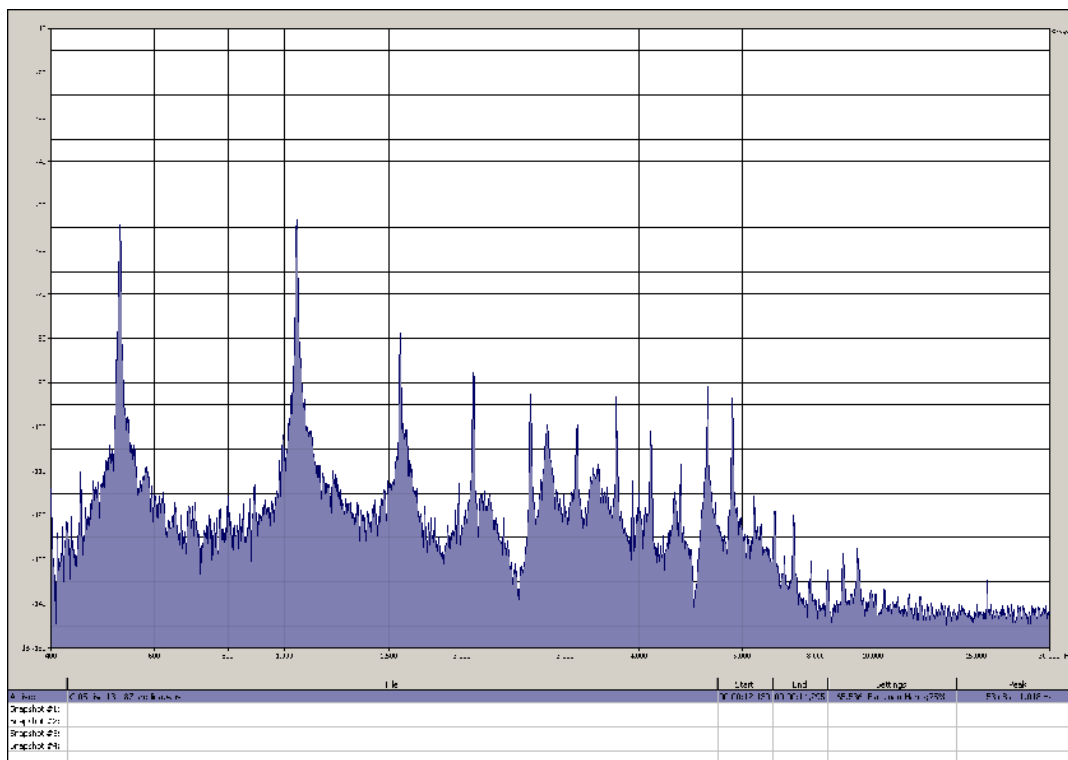
Slika 18.14: Frekvenčni spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



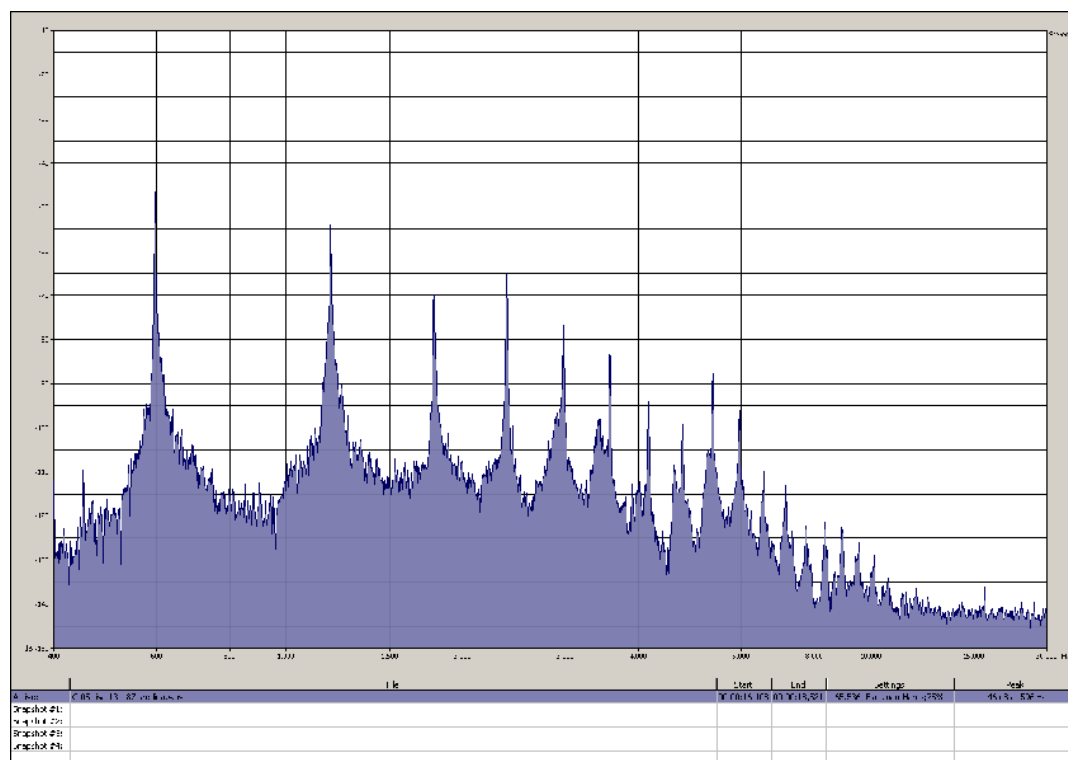


*Slika 18.15: Frekvencijski spektar tona  $C^4$ , odsviranog na fruli 4 (šimšir 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )*

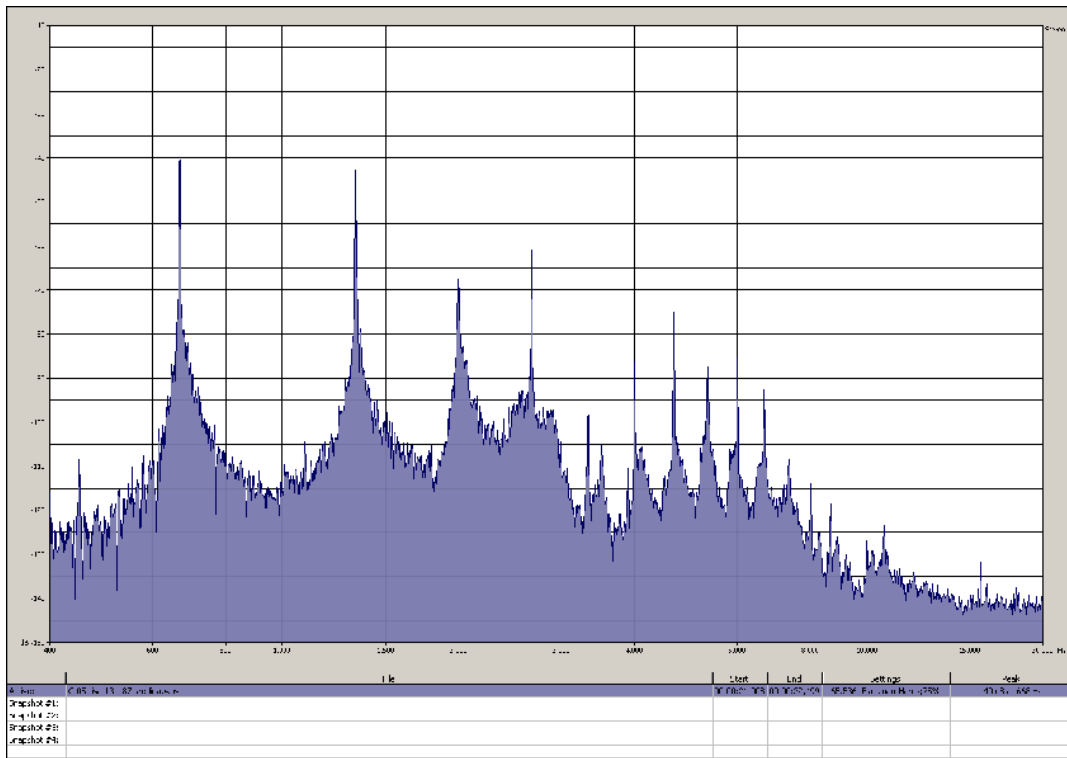
DODATAK 19: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



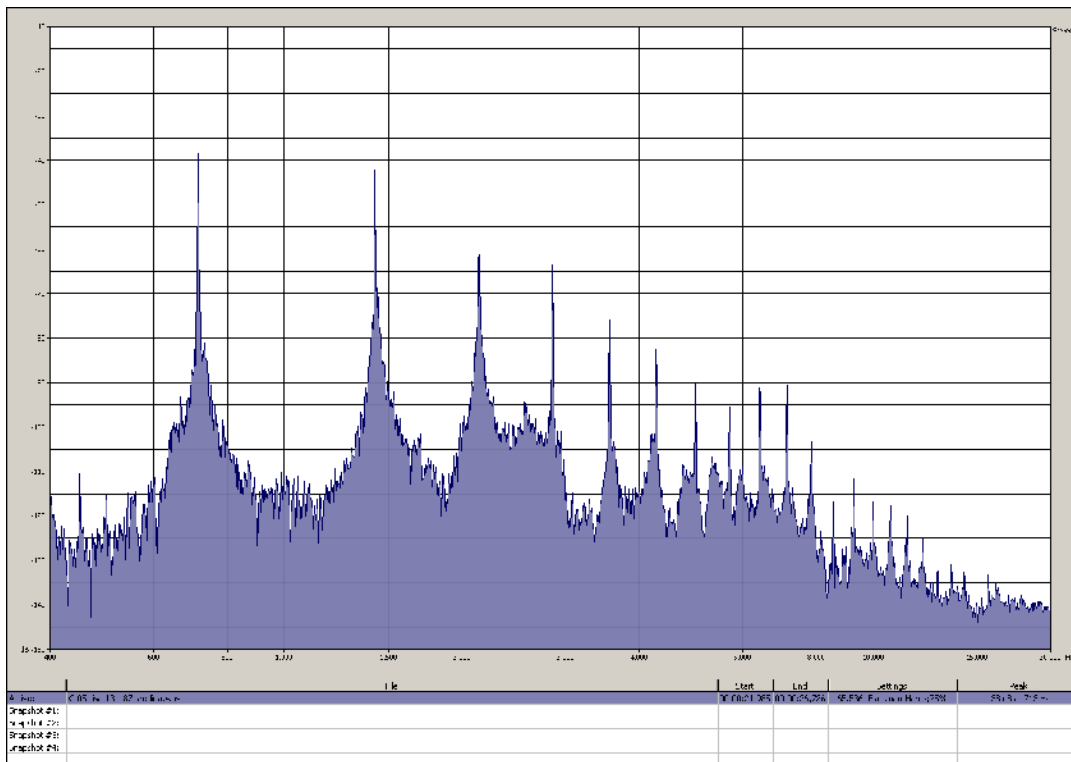
Slika 19.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 5  
(tisa,  $\Phi = 13$  mm)



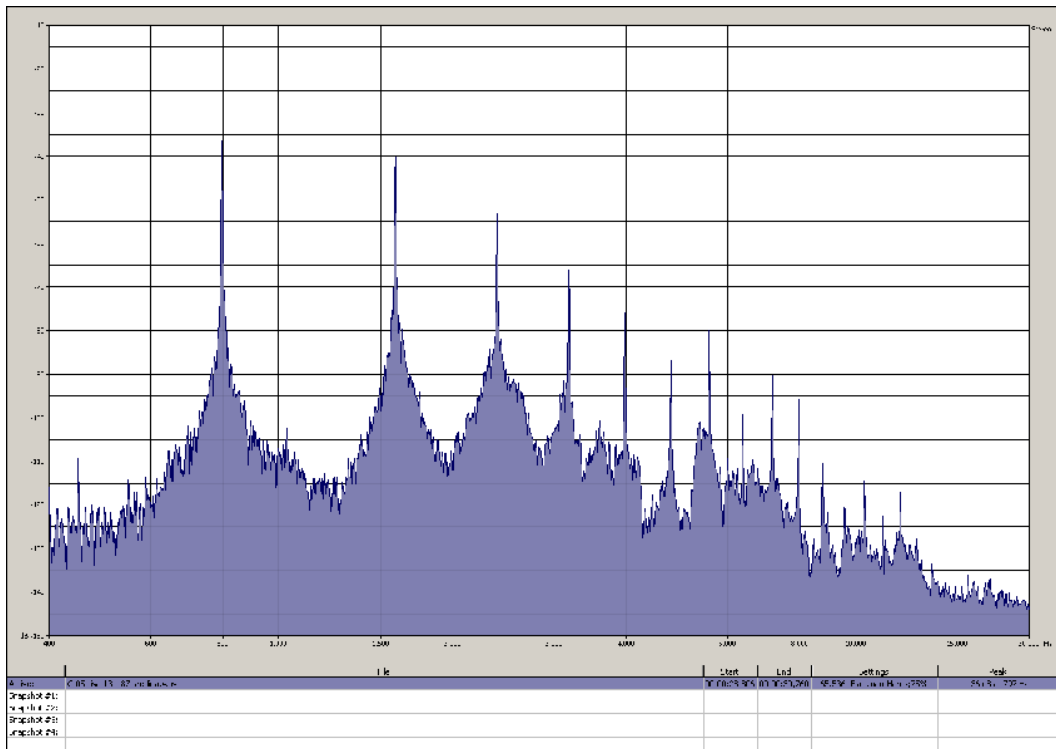
Slika 19.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 5  
(tisa,  $\Phi = 13$  mm)



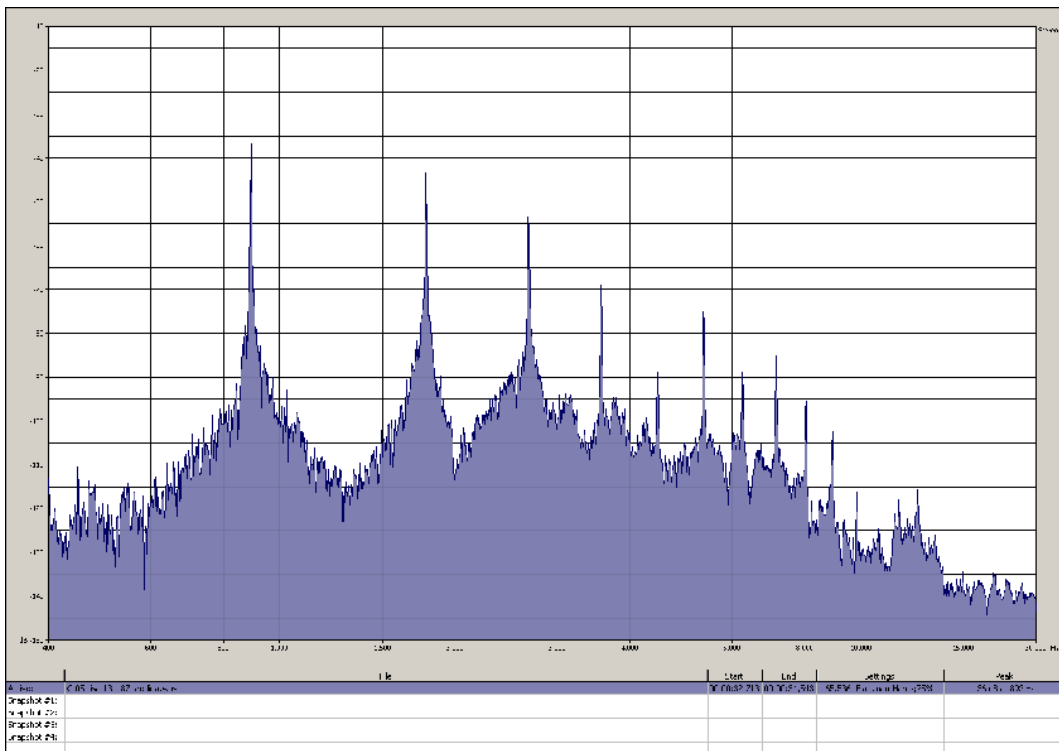
Slika 19.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



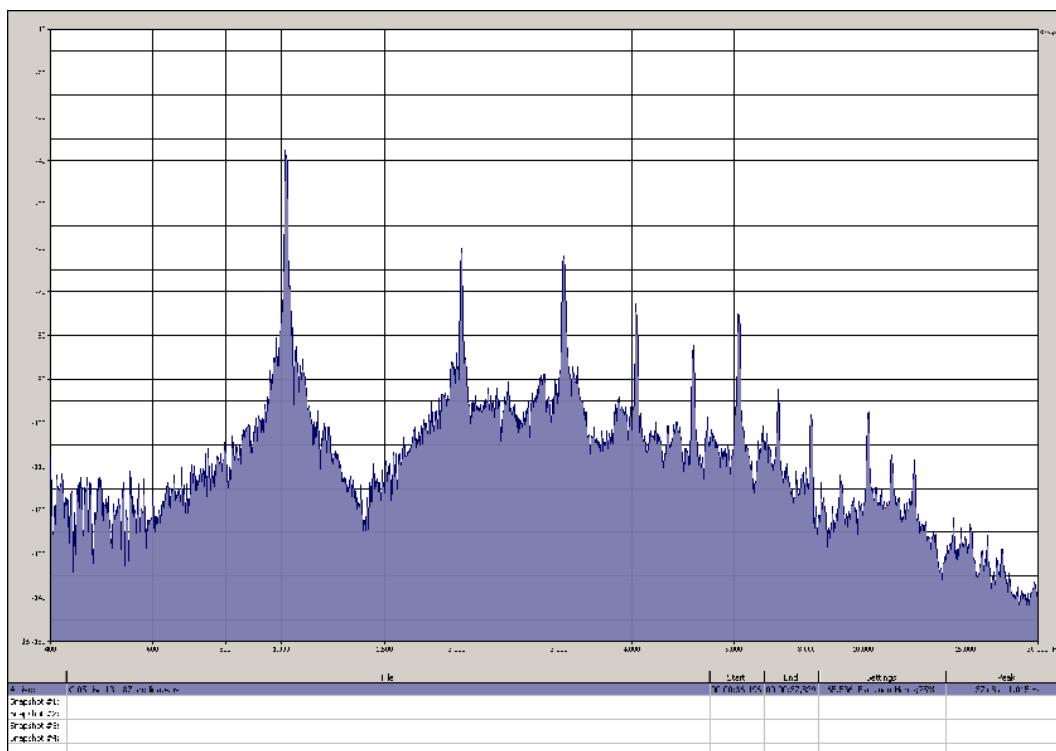
Slika 19.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



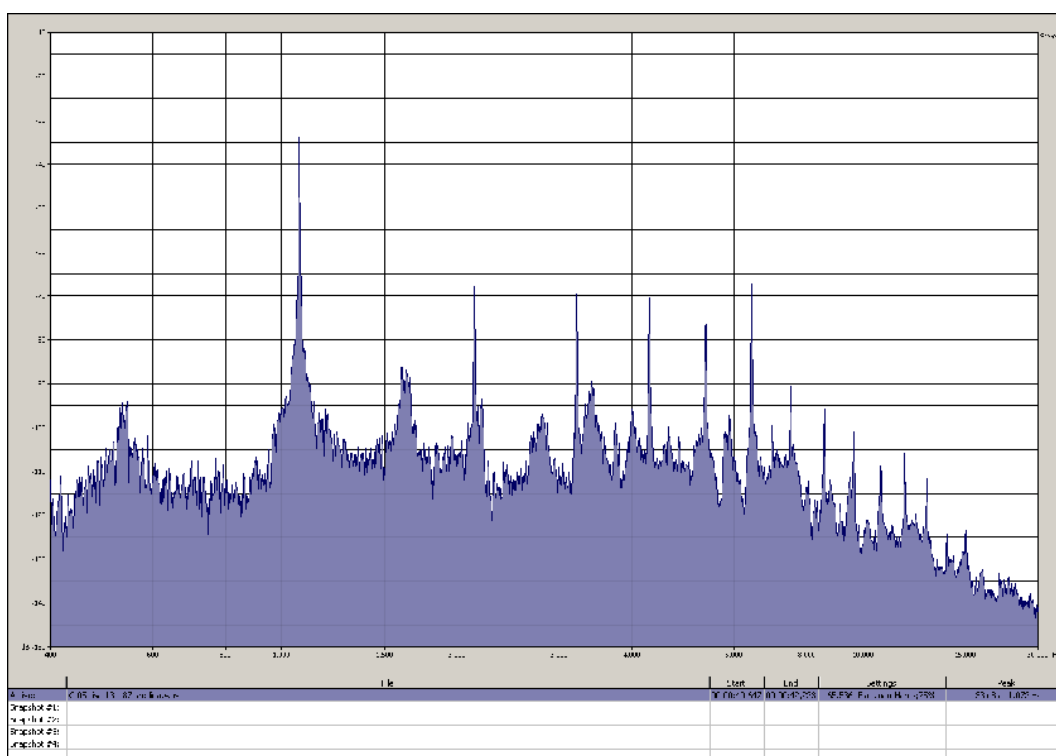
Slika 19.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



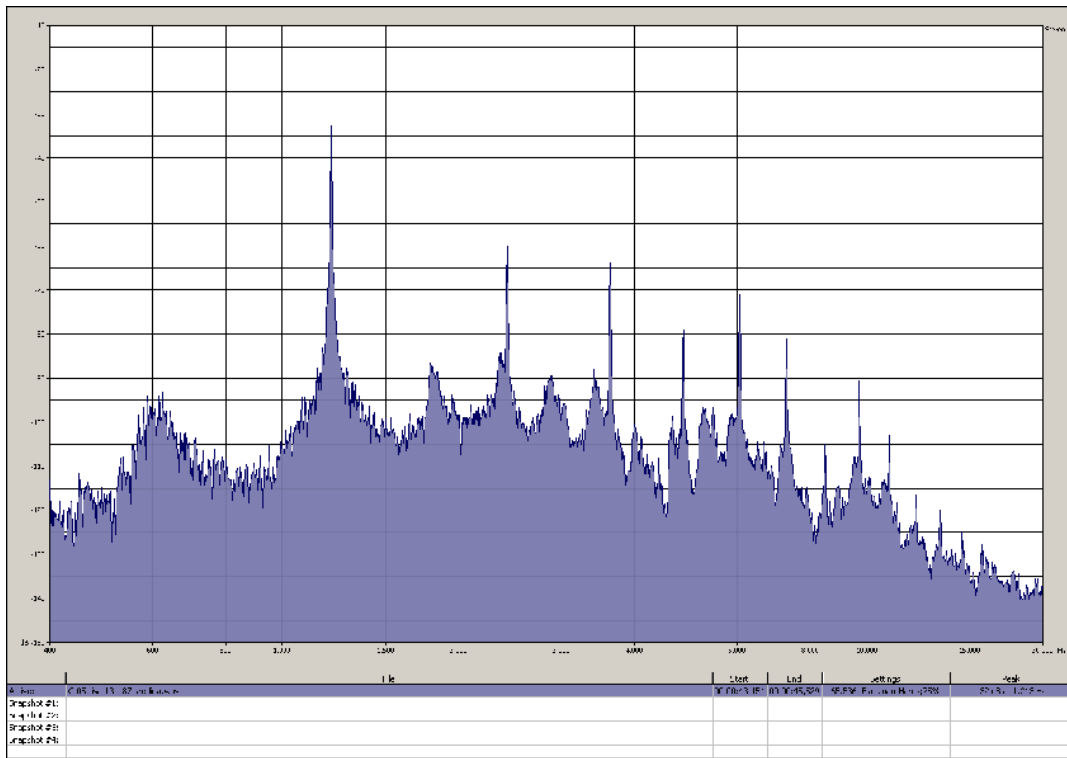
Slika 19.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



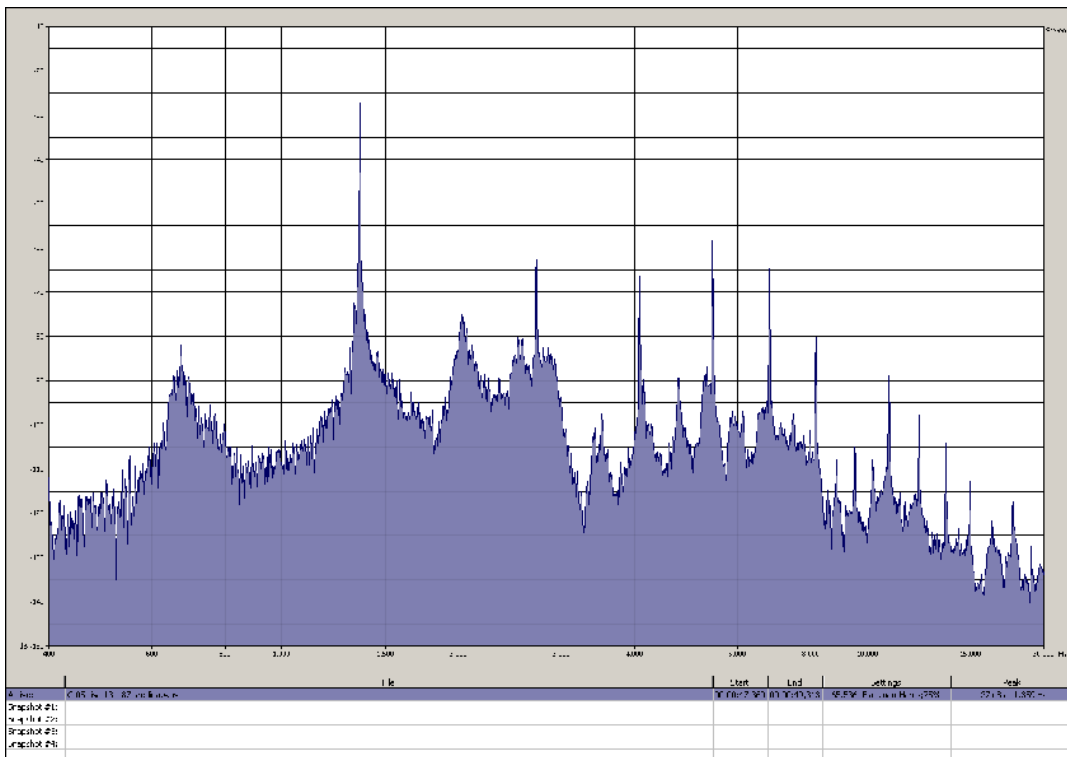
Slika 19.7: Frekvencijski spekter tona  $H^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



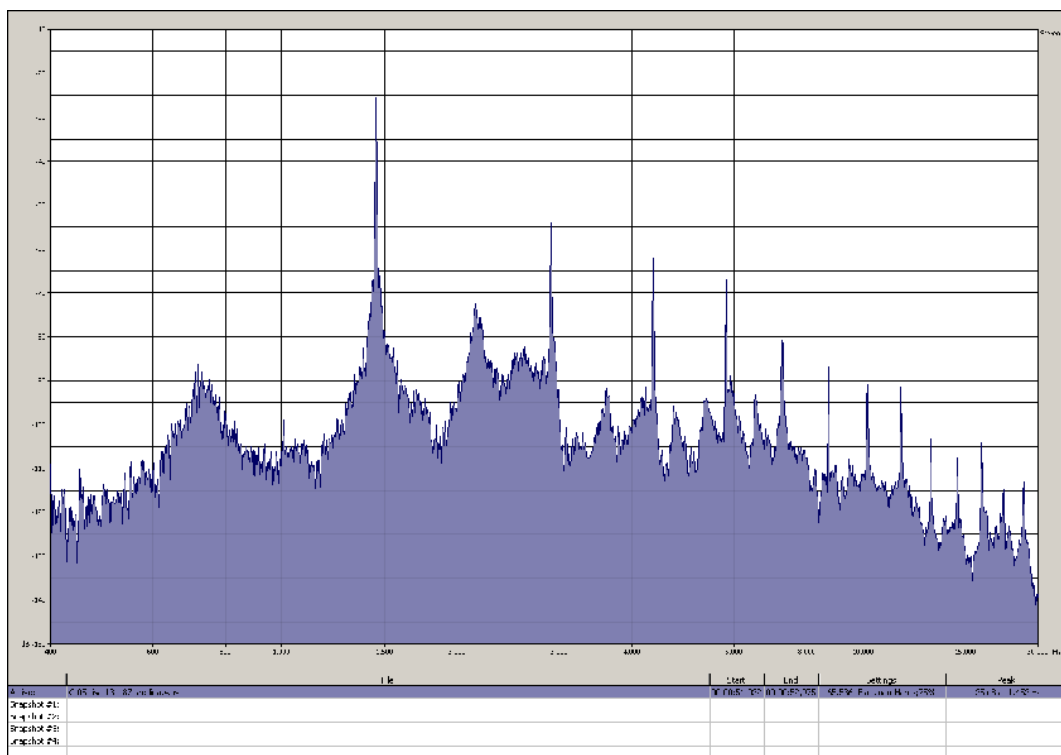
Slika 19.8: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



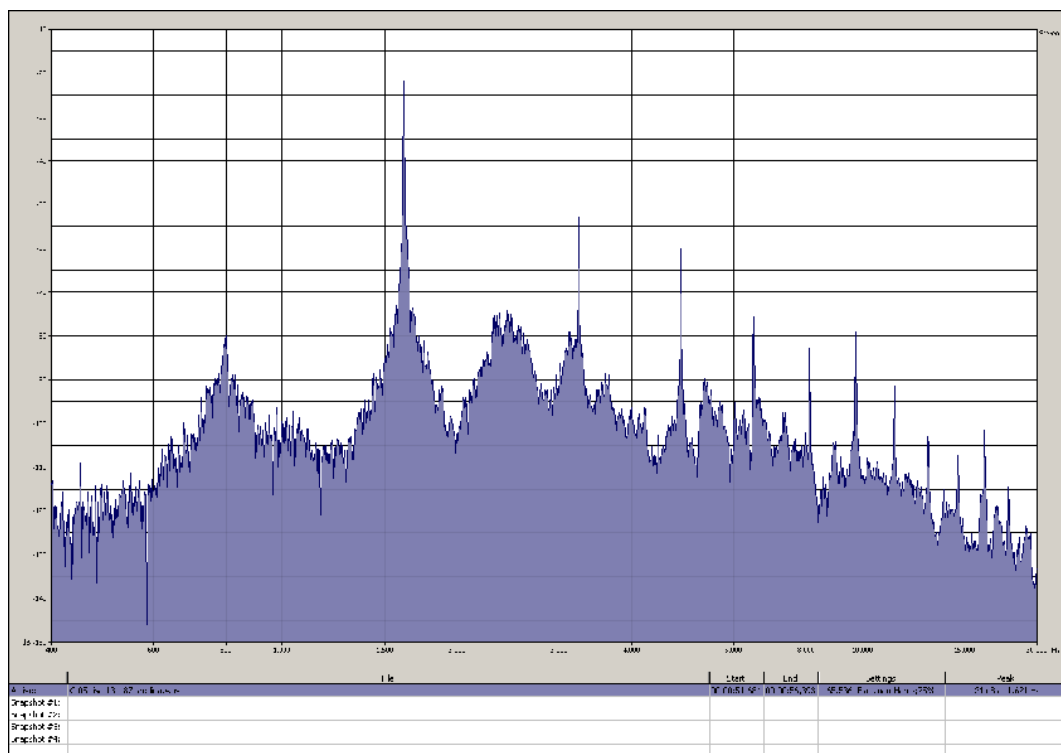
Slika 19.9: Frekvencijski spekter tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



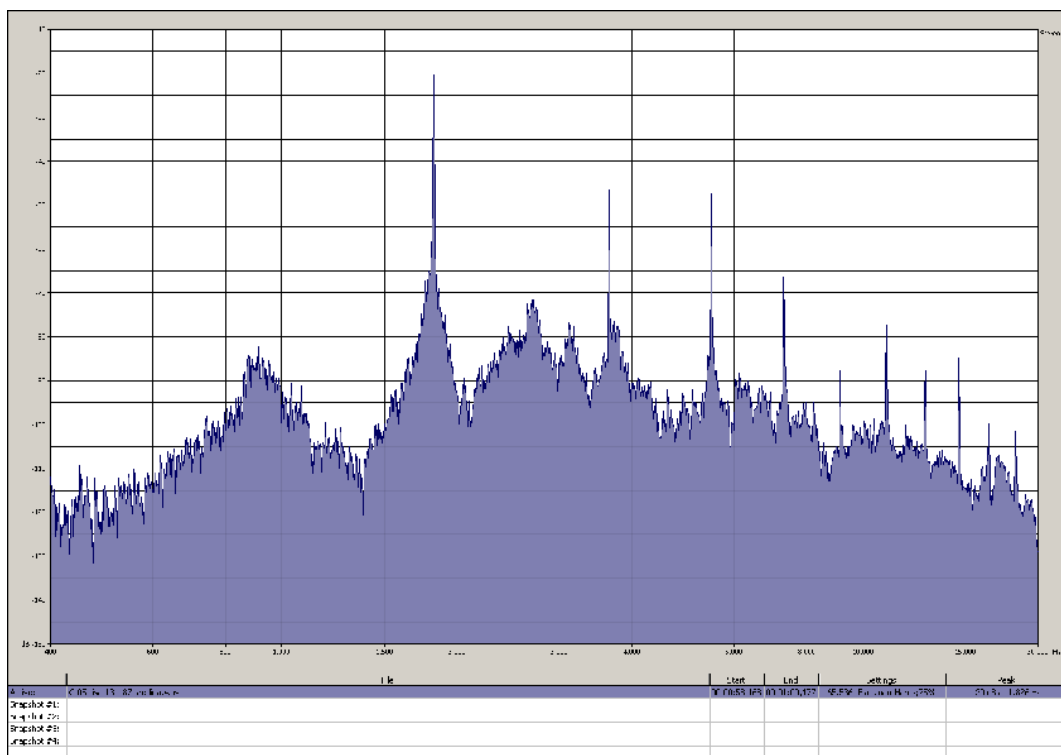
Slika 19.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )



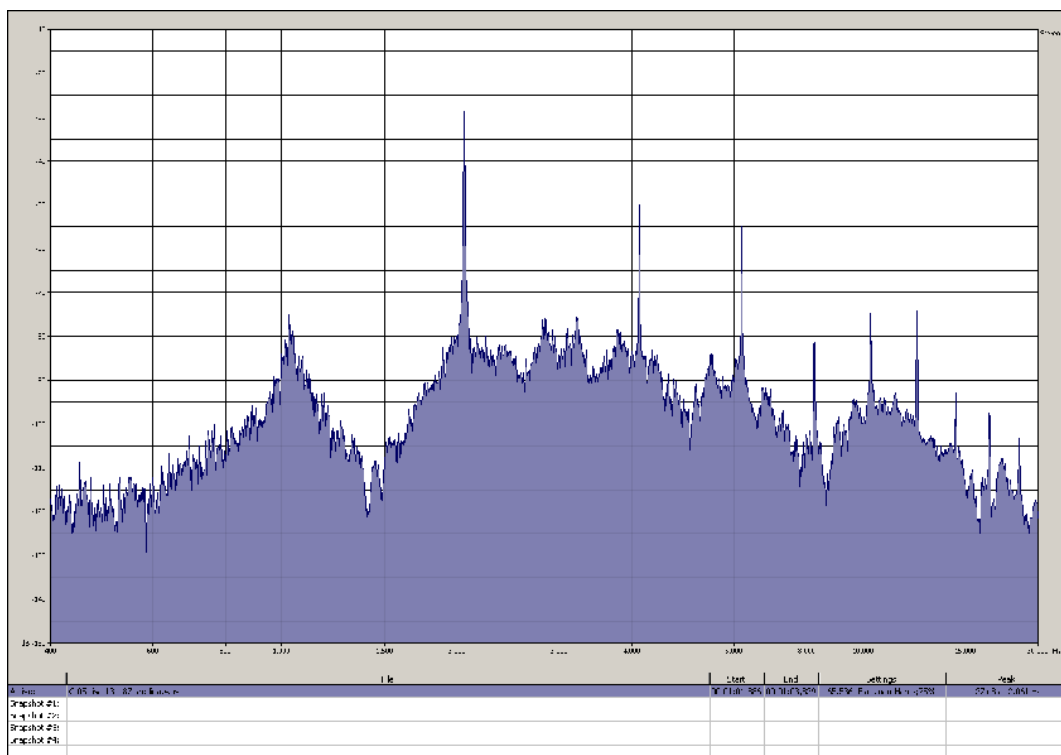
Slika 19.11: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 19.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)

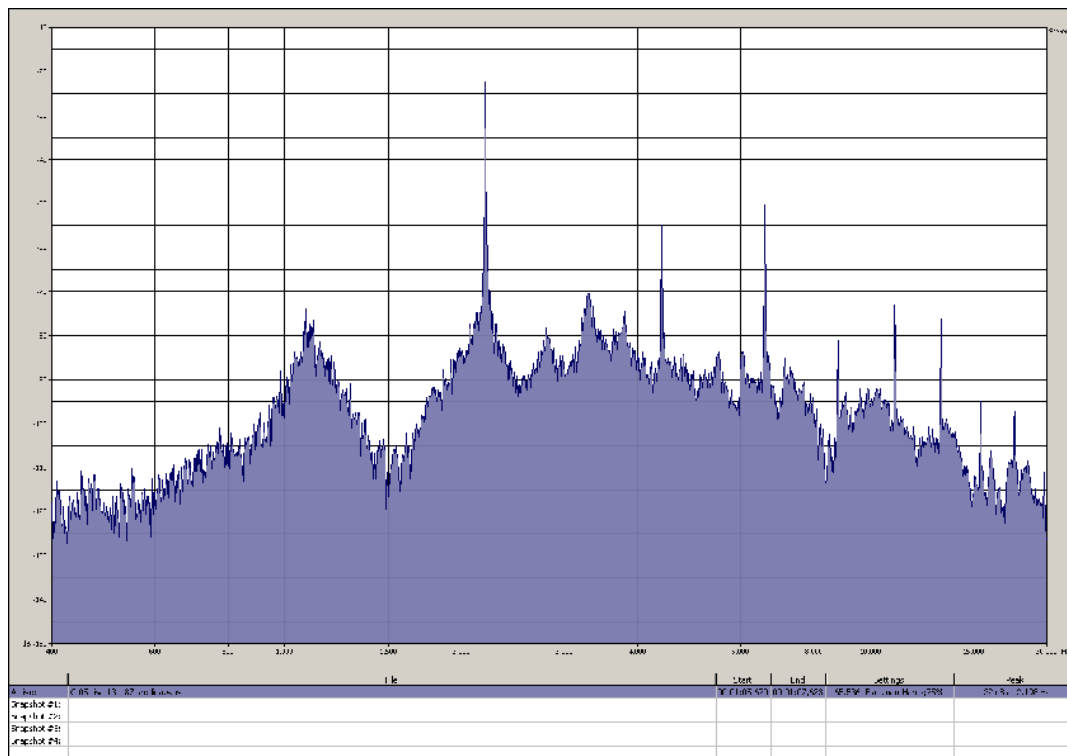


Slika 19.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



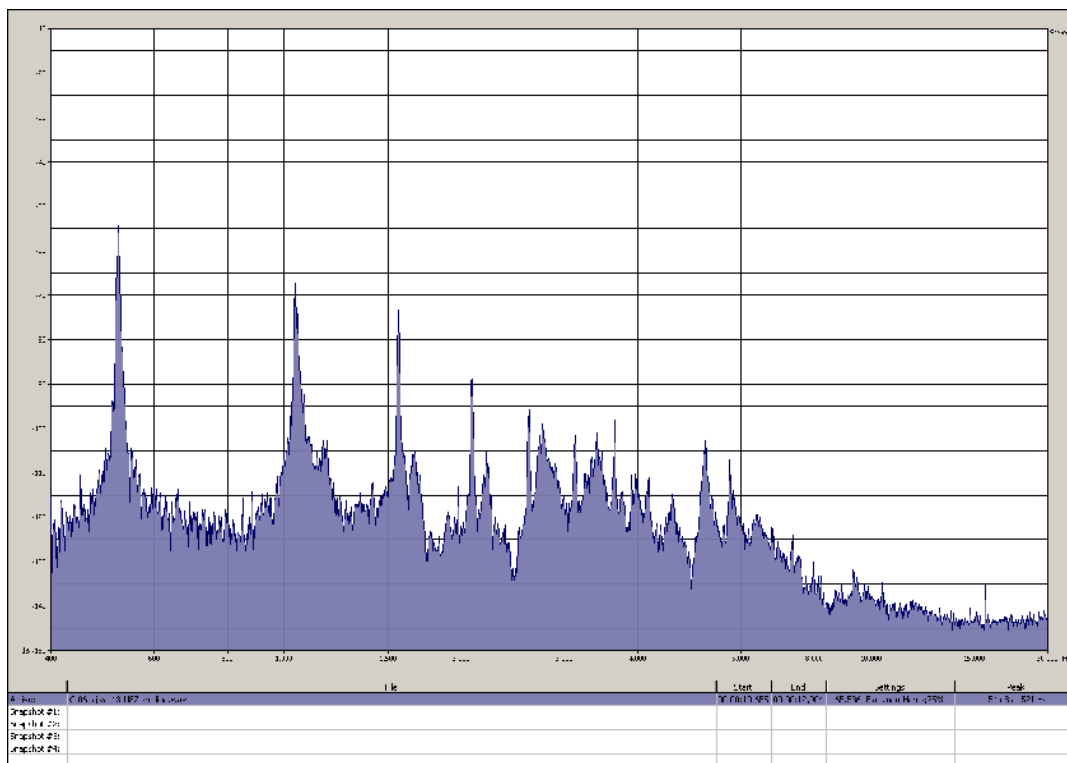
Slika 19.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)



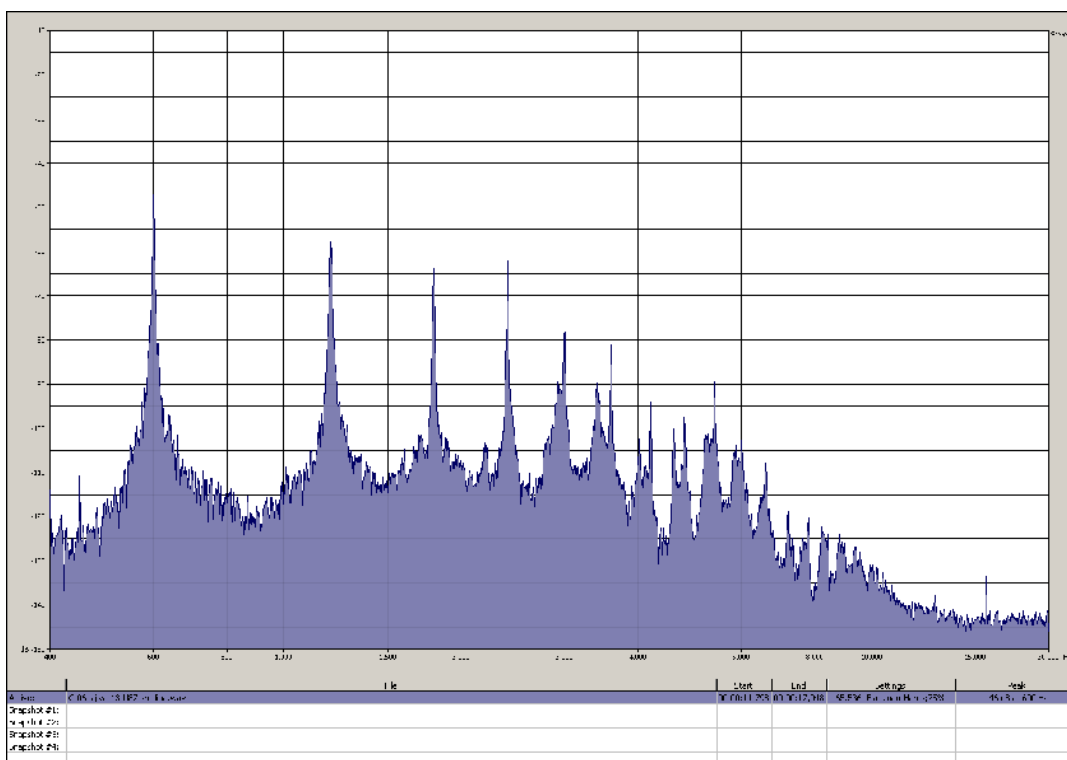


*Slika 19.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 5 (tisa,  $\Phi = 13$  mm)*

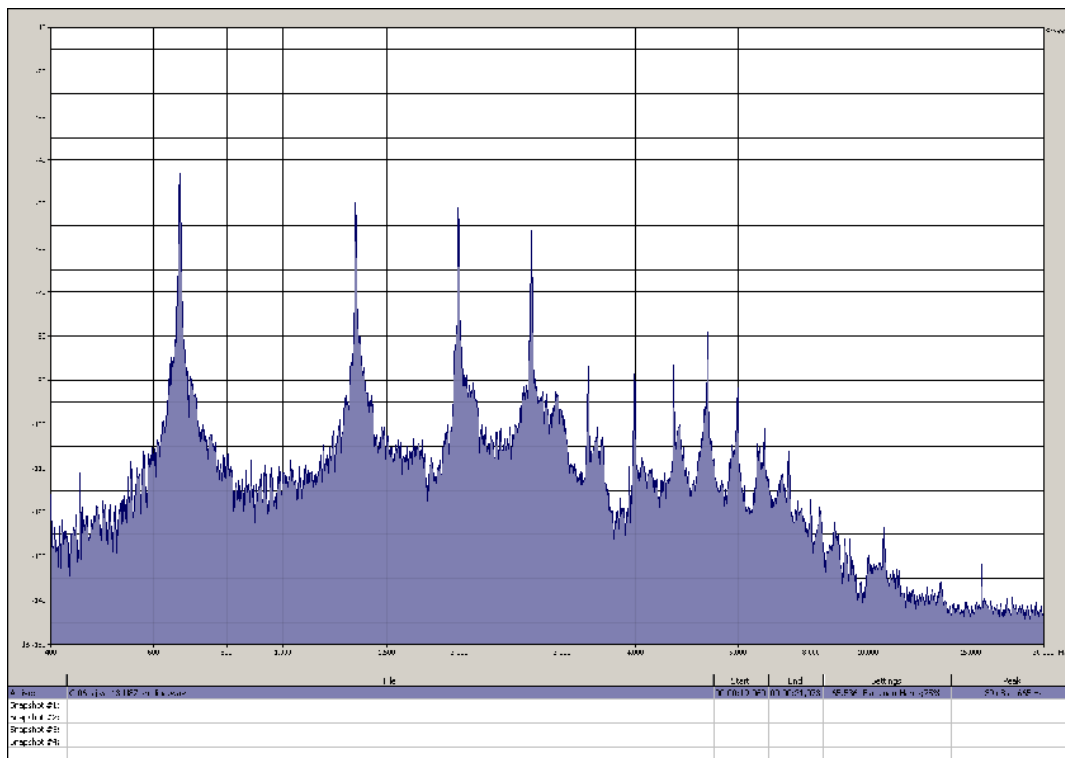
DODATAK 20: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



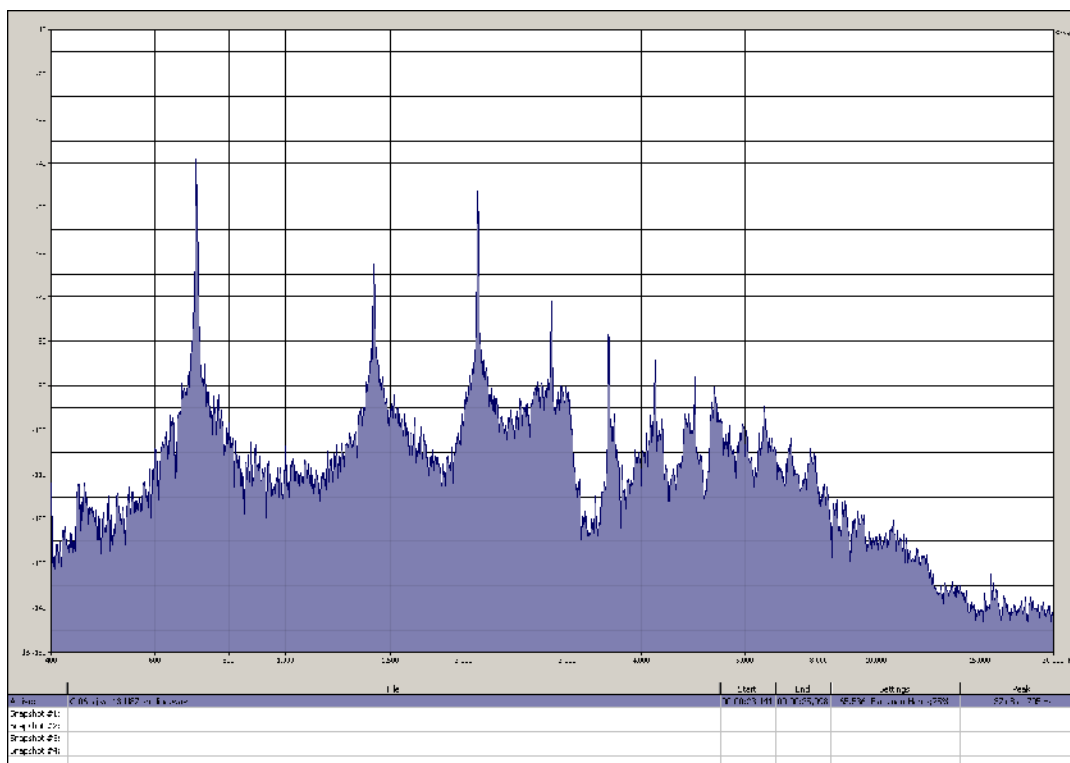
Slika 20.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 6  
(šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



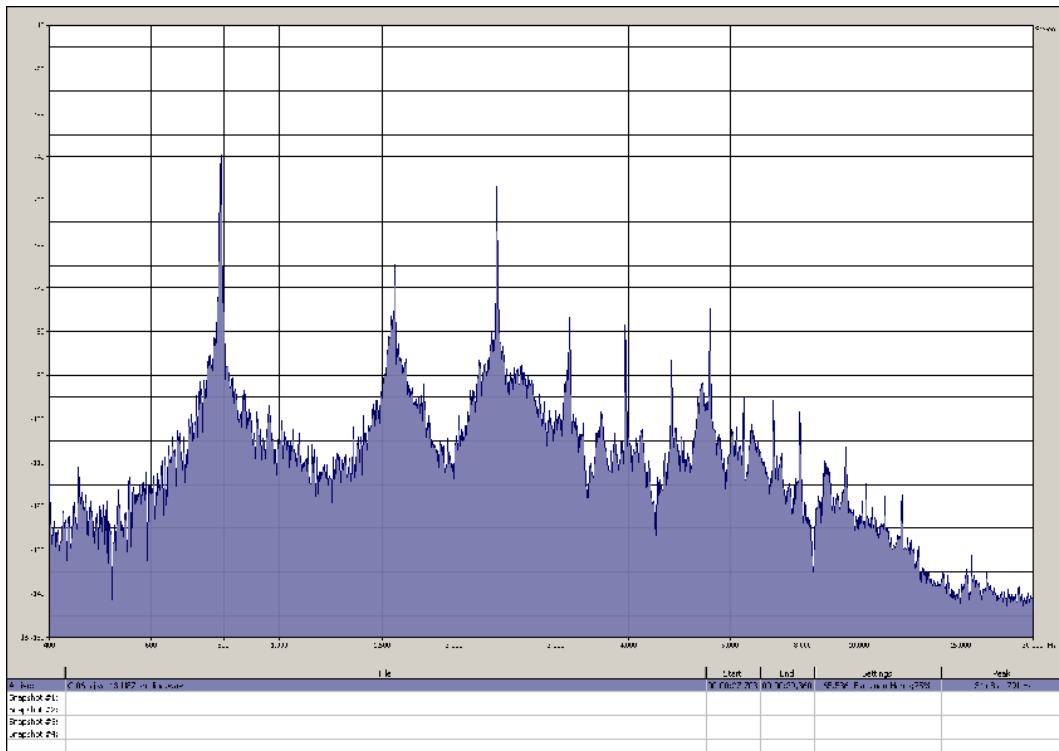
Slika 20.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 6  
(šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



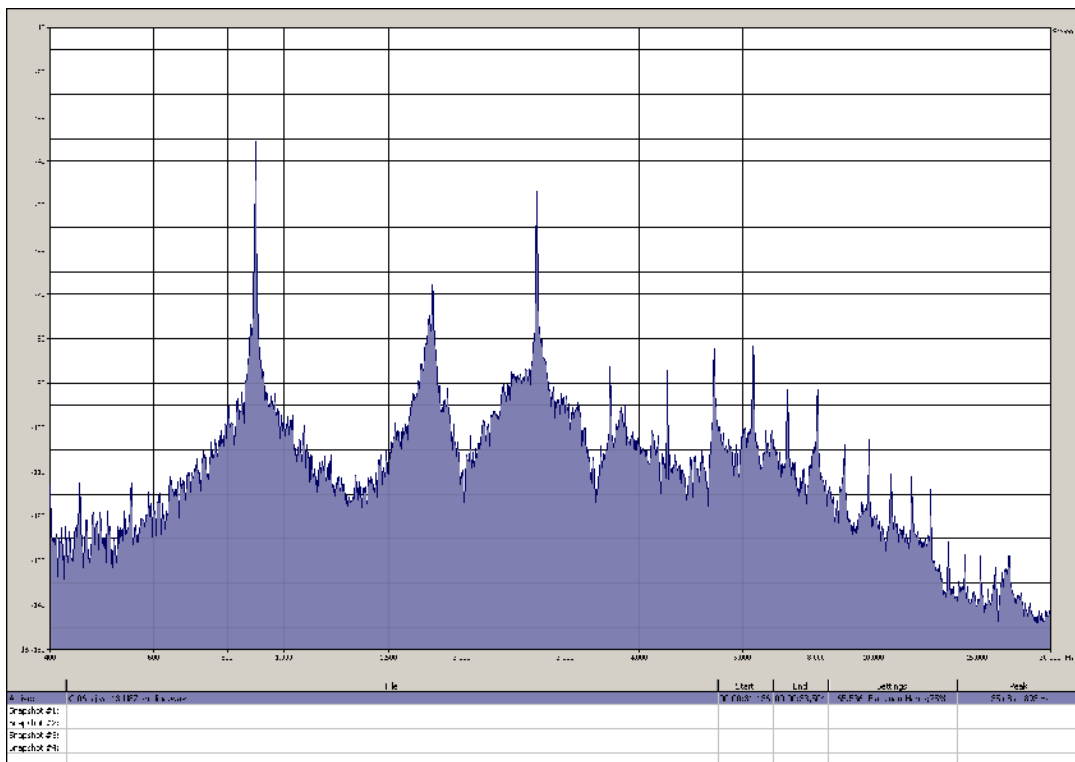
*Slika 20.3: Frekvencijski spekter tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)*



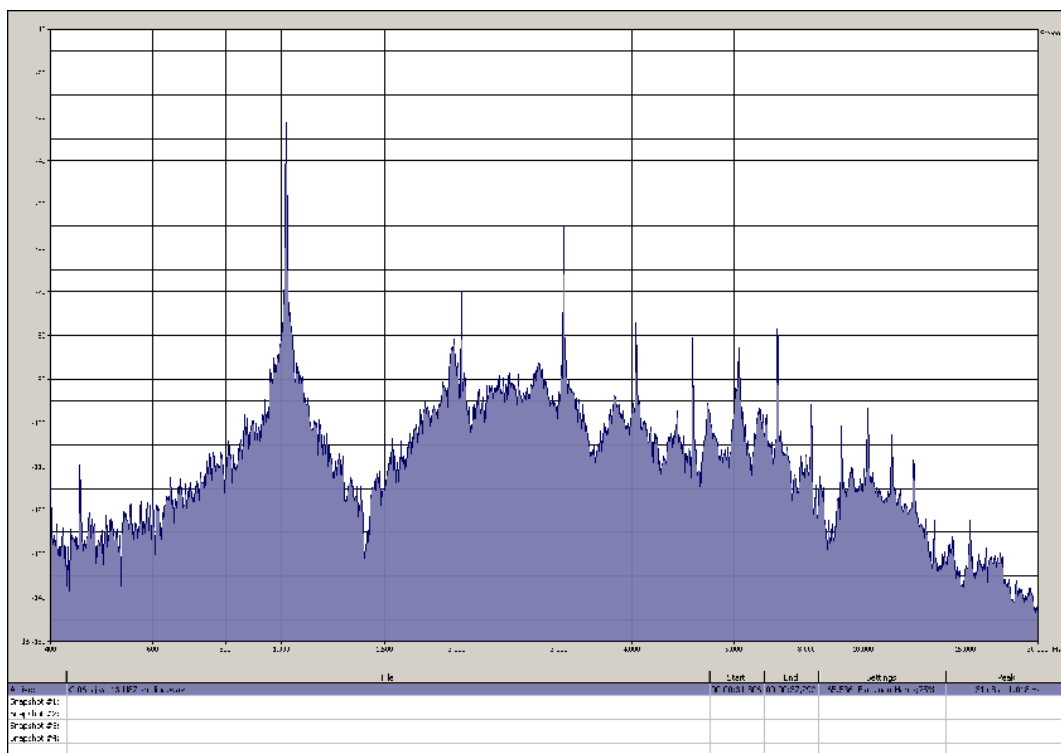
*Slika 20.4: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)*



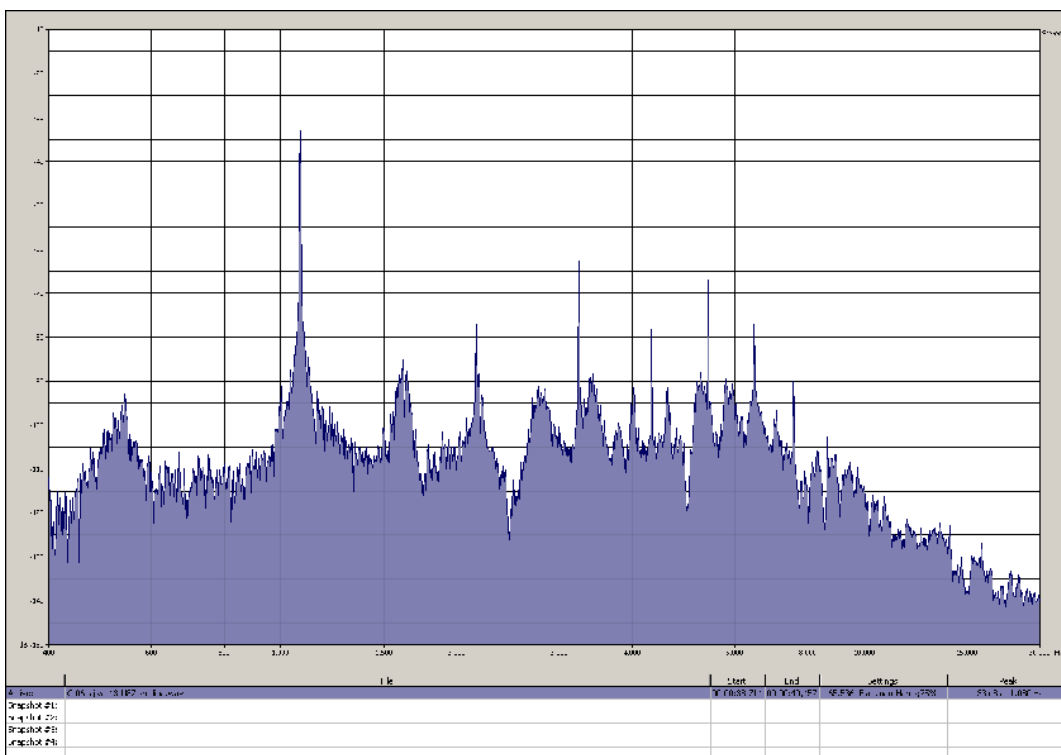
Slika 20.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



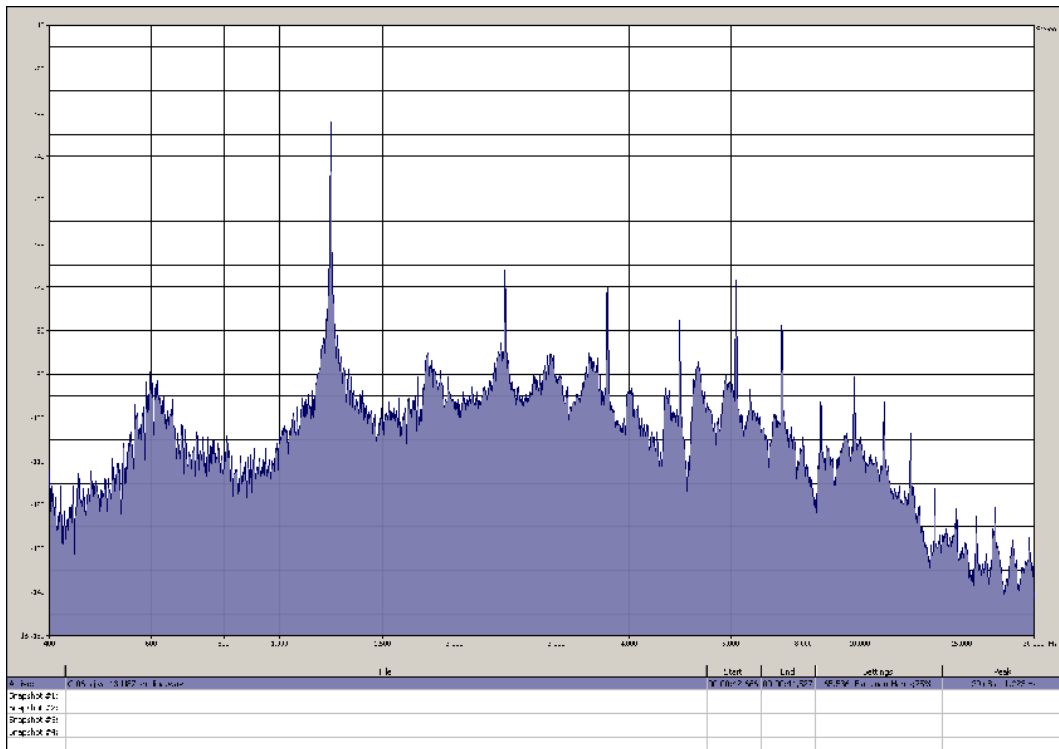
Slika 20.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



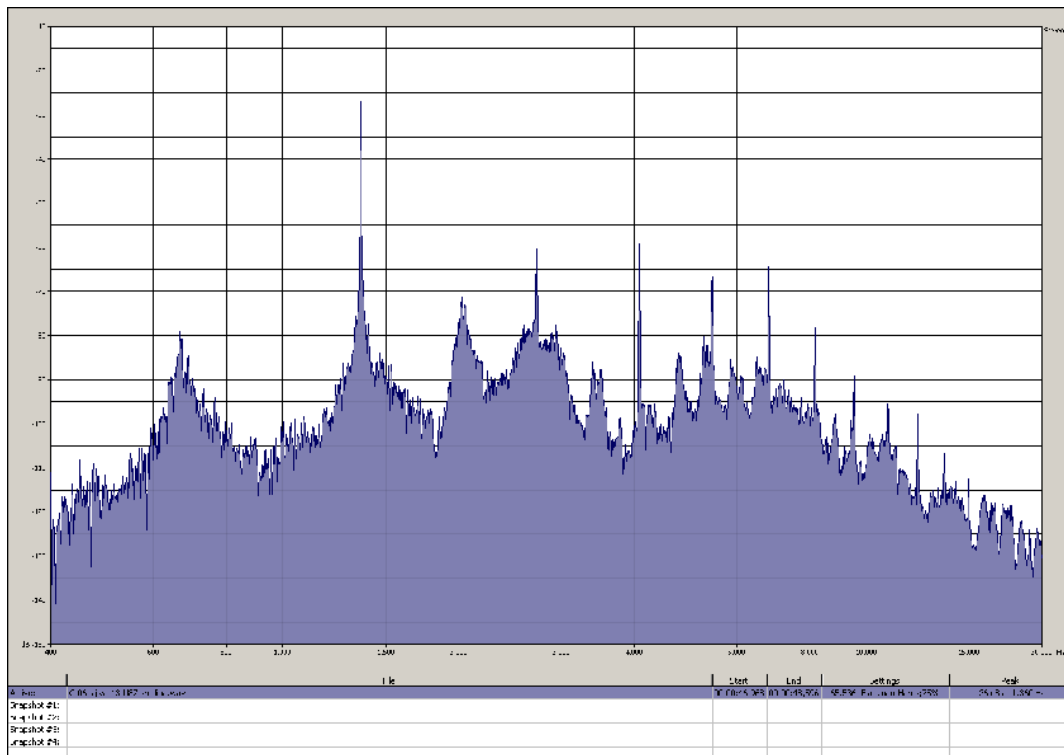
Slika 20.7: Frekvenjski spekter tona  $H^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



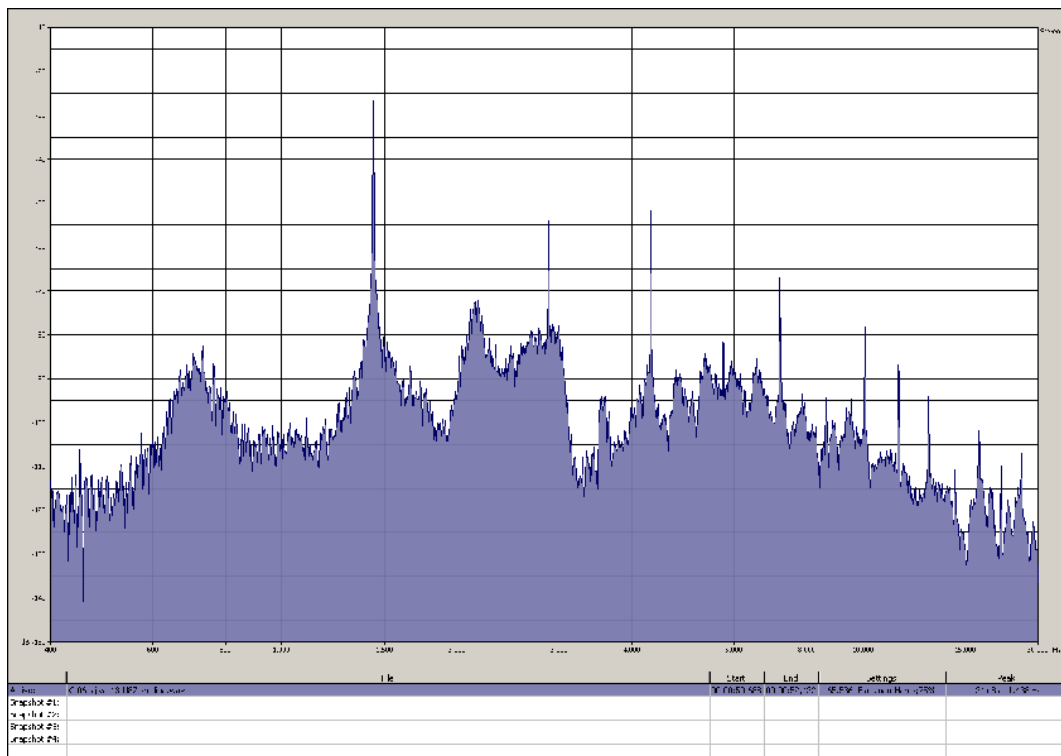
Slika 20.8: Frekvenjski spekter tona  $C^3$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



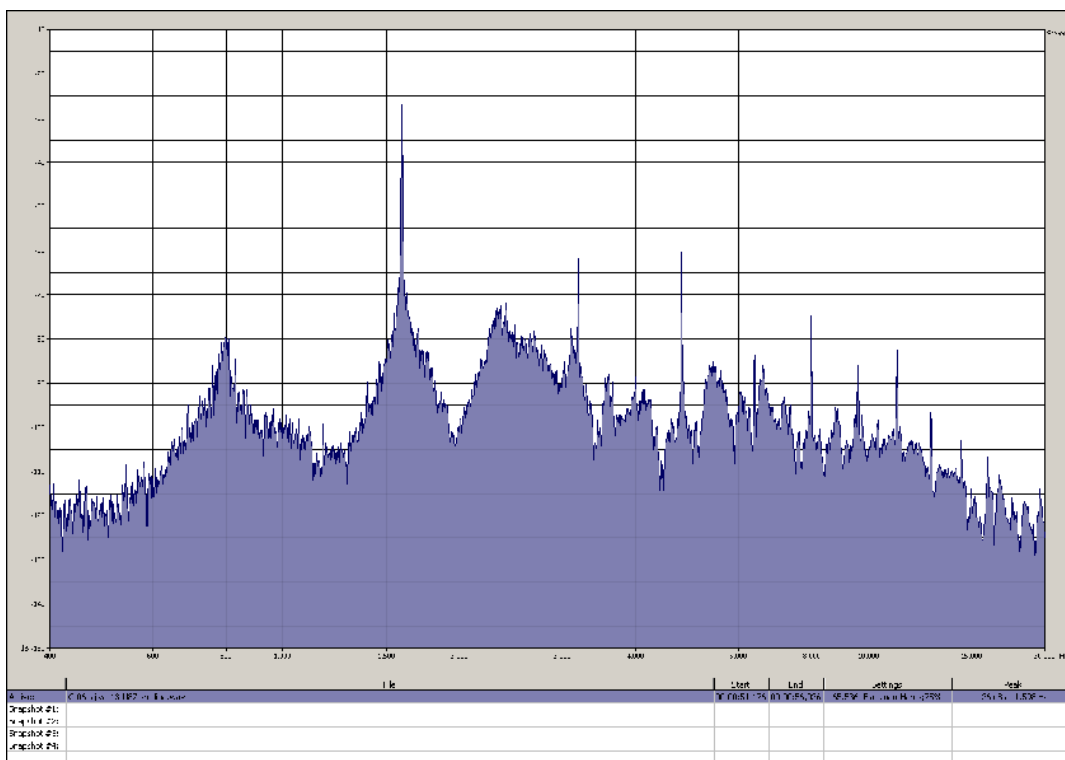
Slika 20.9: Frekvenčni spekter tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



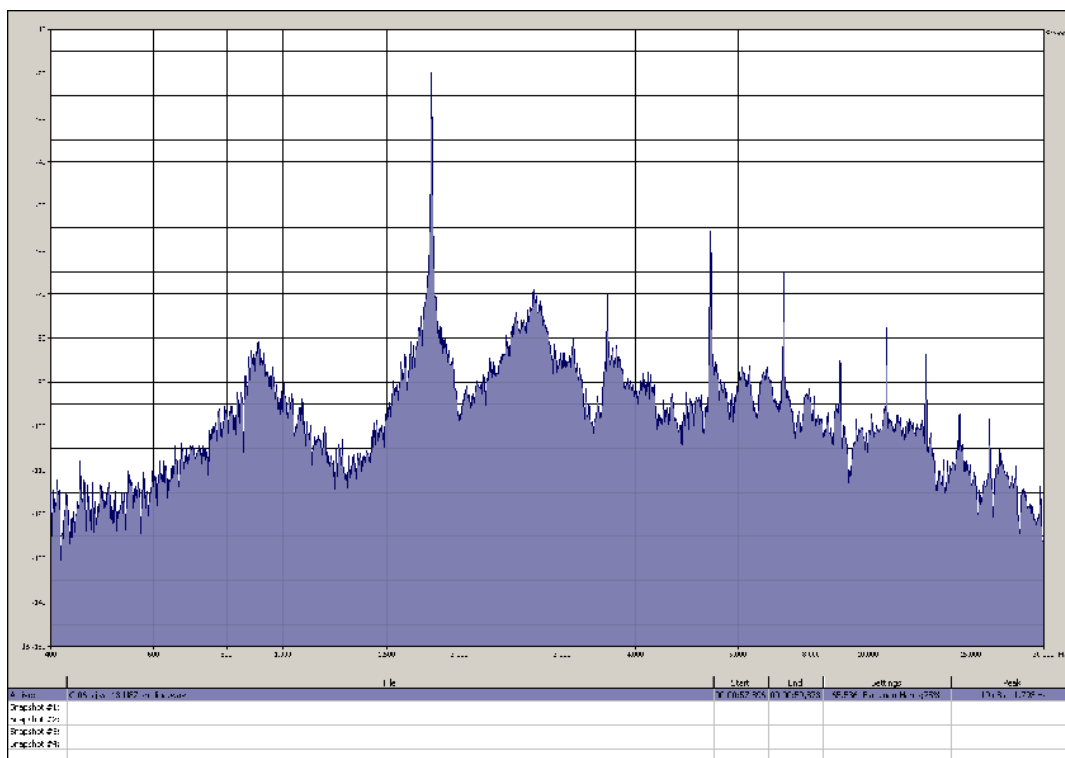
Slika 20.10: Frekvenčni spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



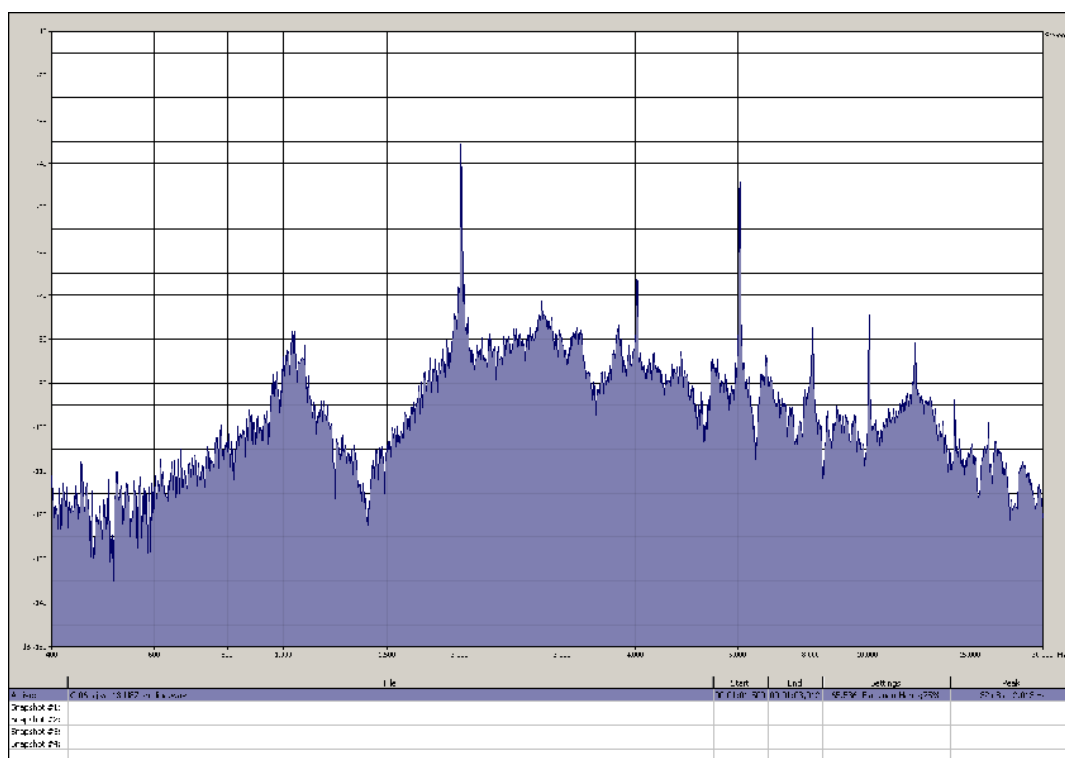
Slika 20.11: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 20.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)

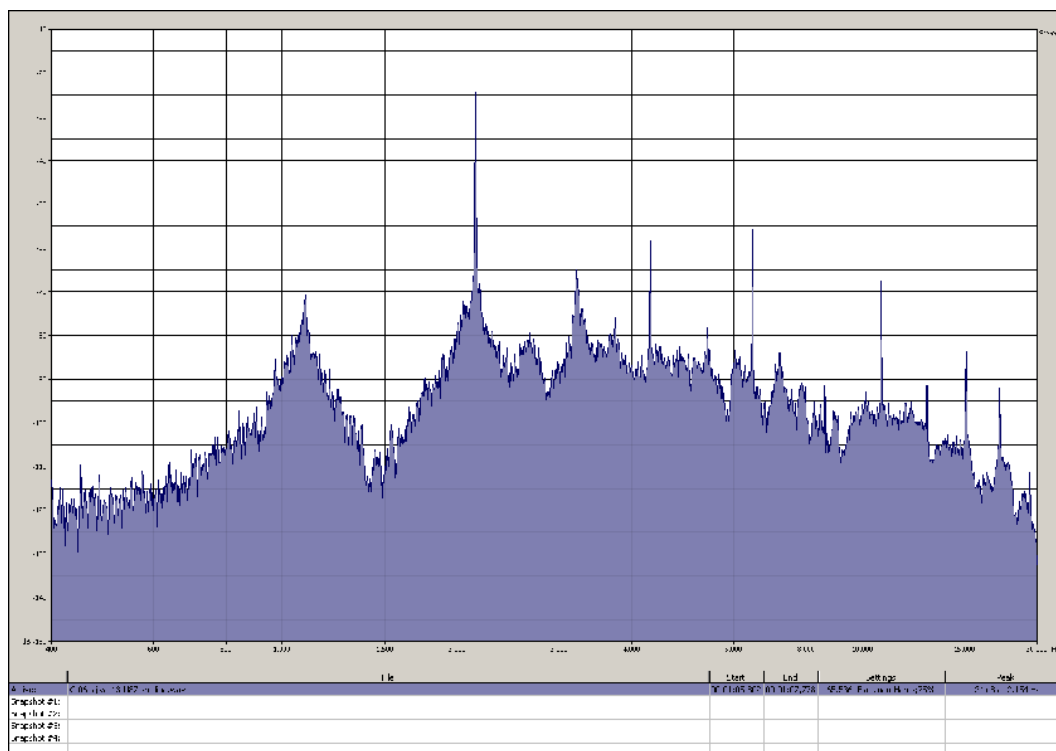


Slika 20.13: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



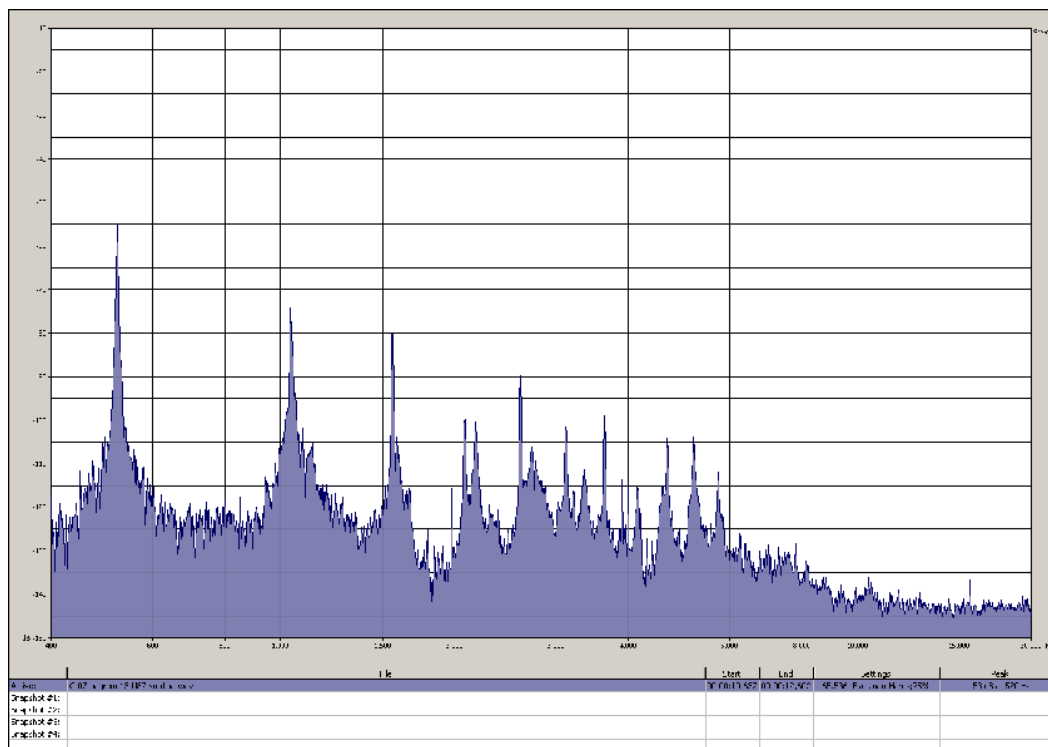
Slika 20.14: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm)



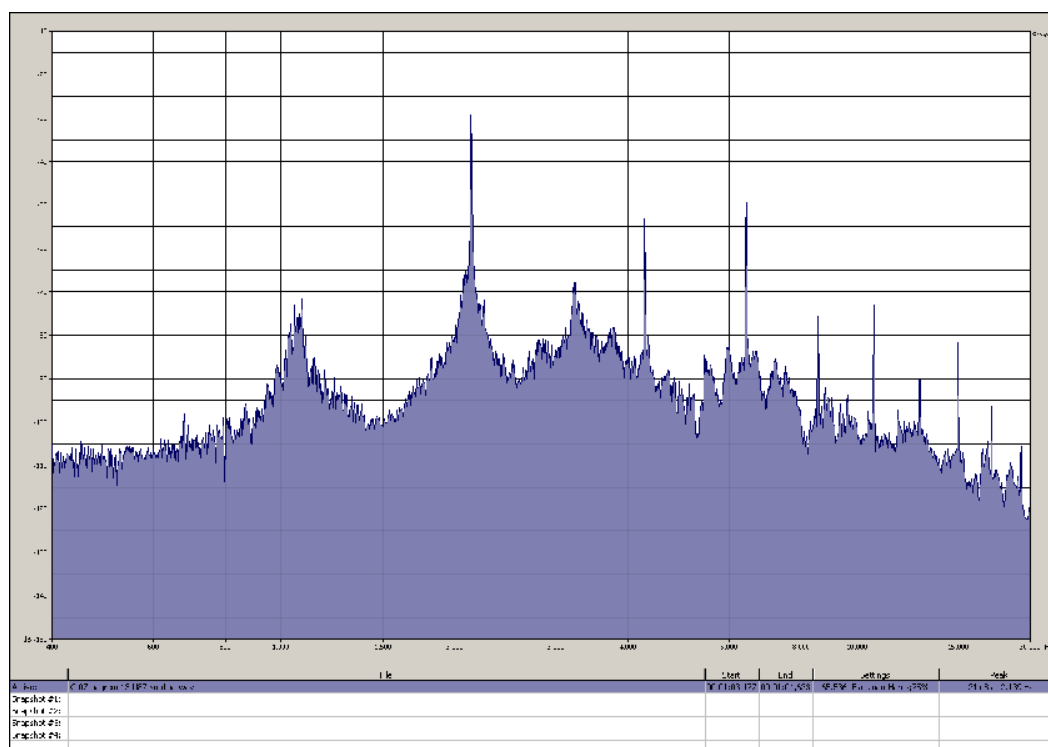


*Slika 20.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 6 (šljiva 1,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )*

DODATAK 21: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 7 (bagrem 4,  $\Phi = 13$  mm)

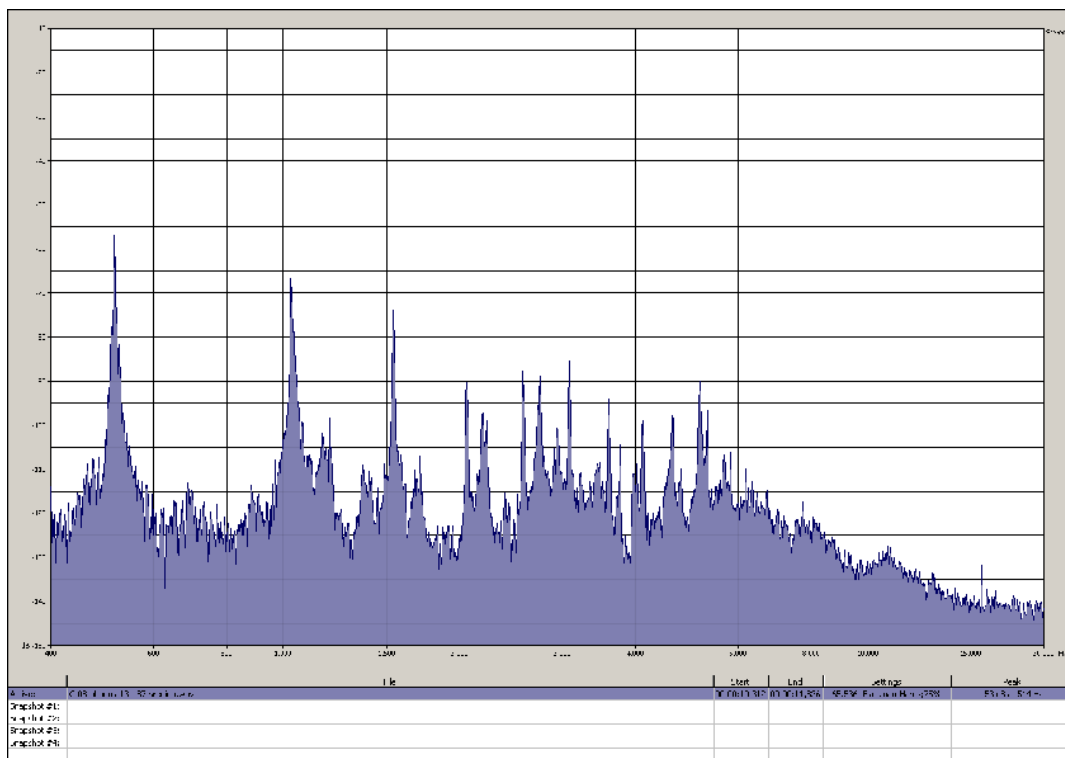


Slika 21.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 7  
(bagrem 4,  $\Phi = 13$  mm)

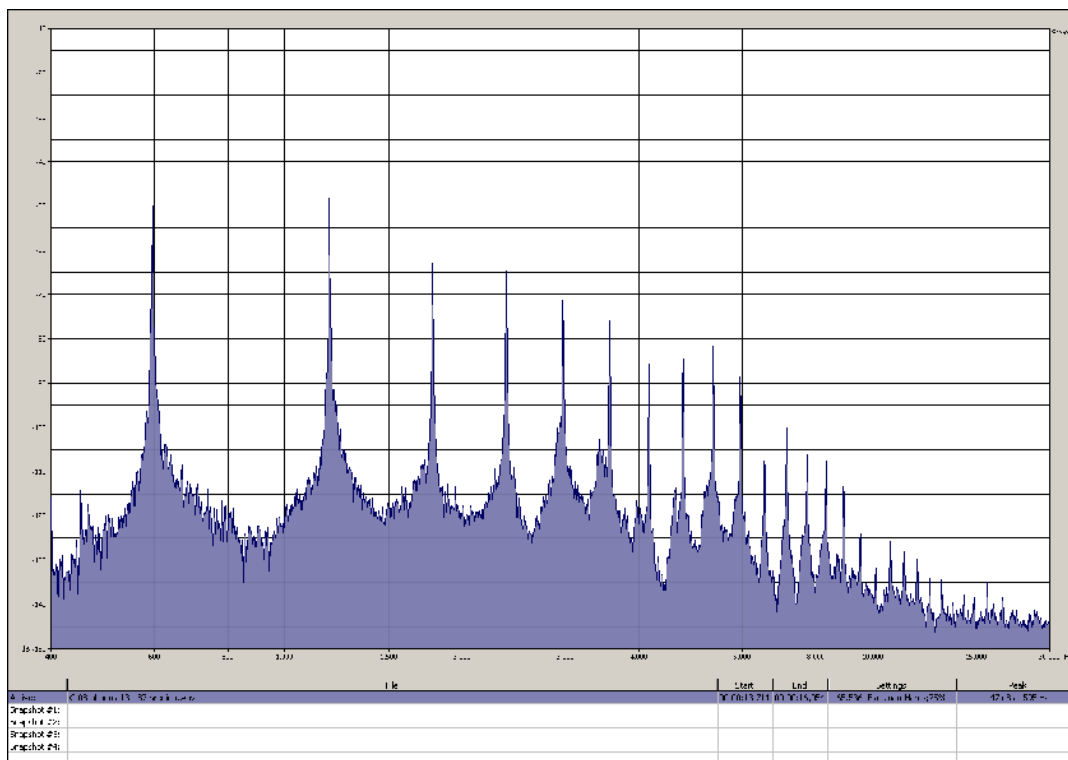


Slika 21.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 7  
(bagrem 4,  $\Phi = 13$  mm)

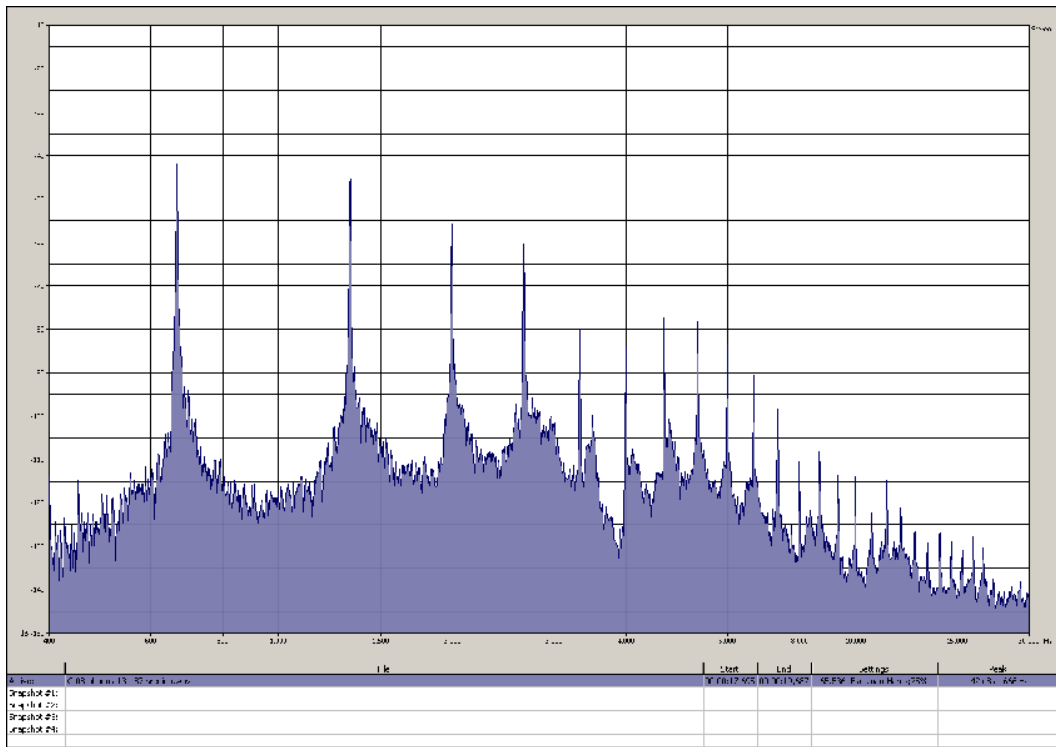
DODATAK 22: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



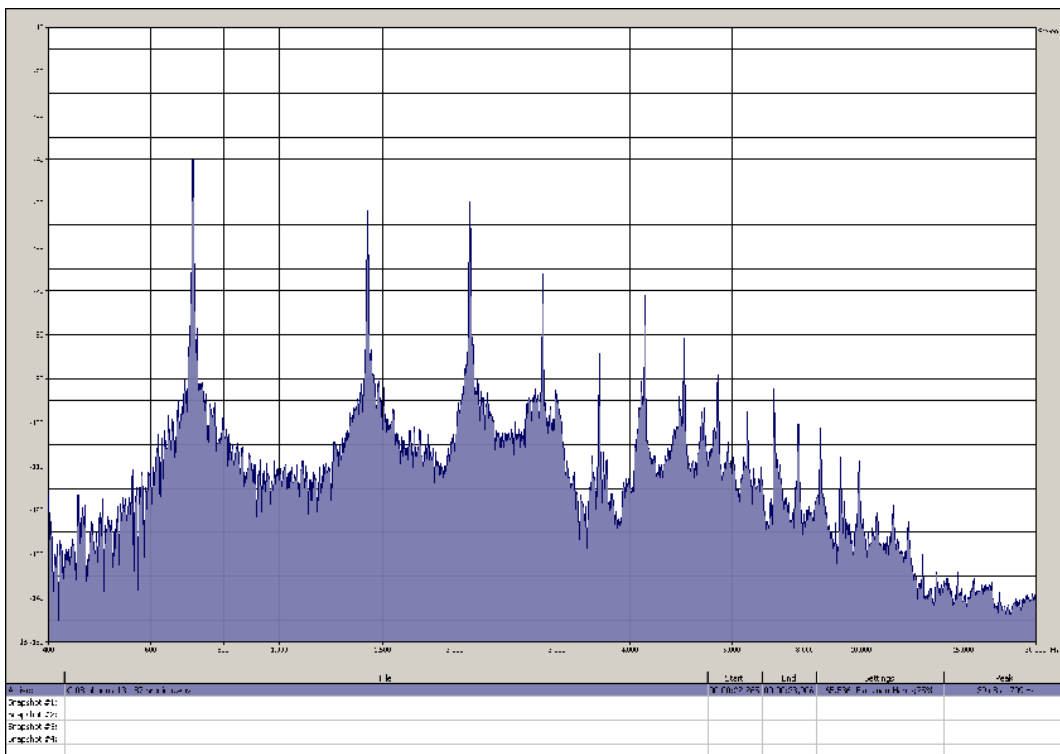
Slika 22.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 8  
(abonos,  $\Phi = 13$  mm)



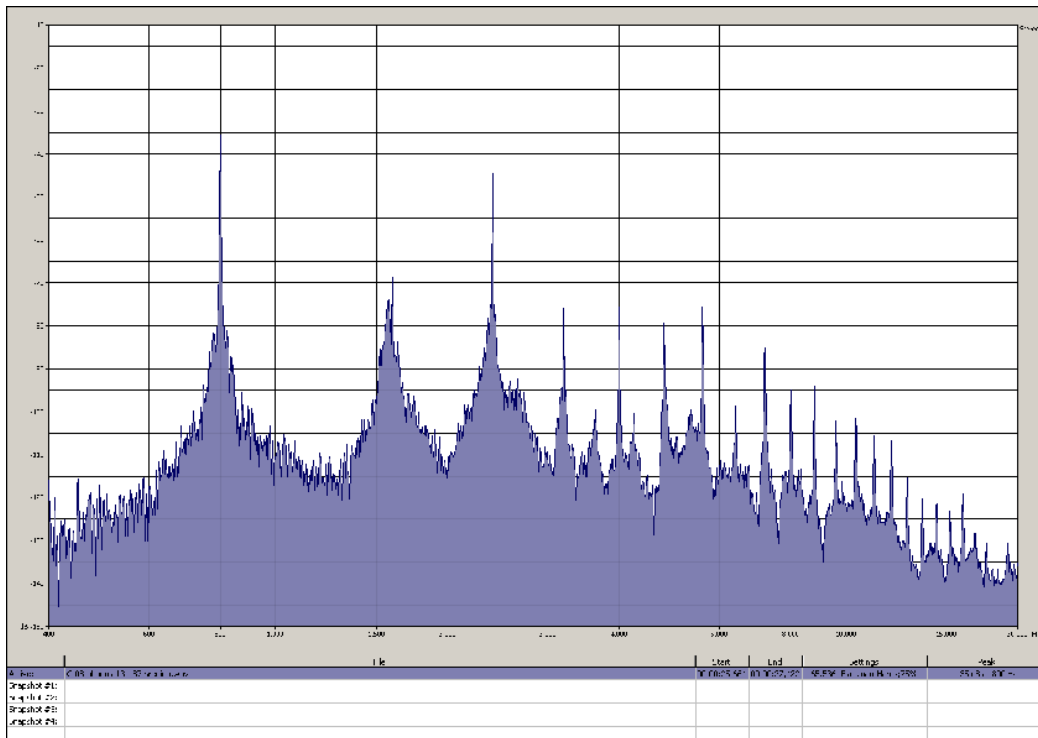
Slika 22.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 8  
(abonos,  $\Phi = 13$  mm)



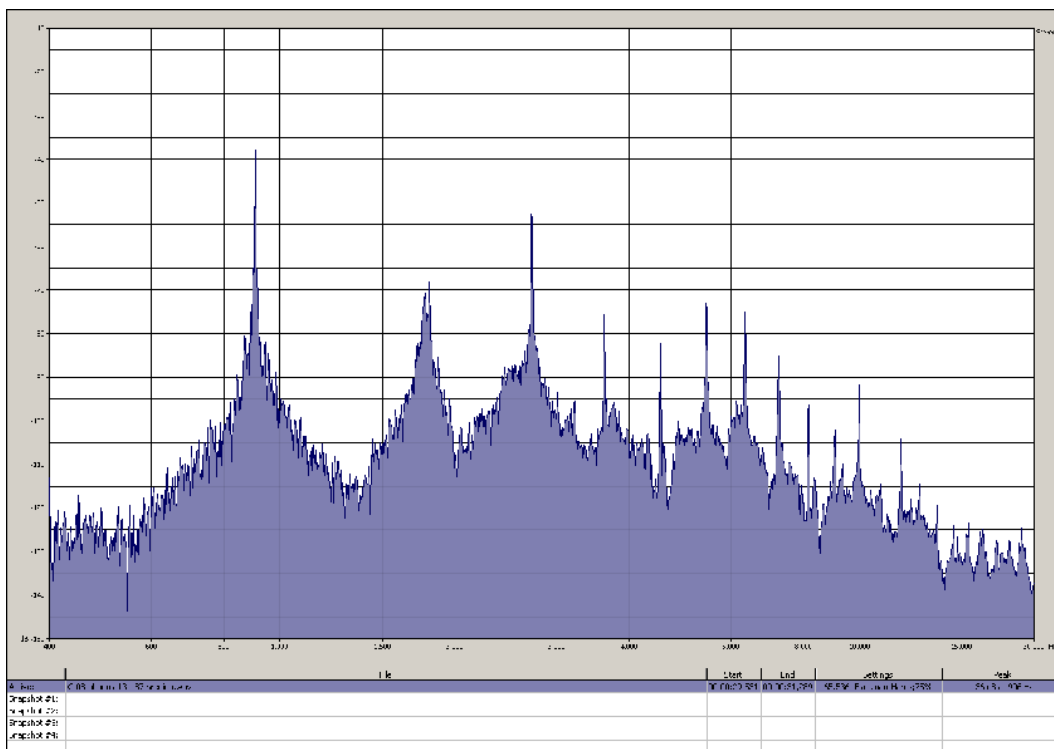
Slika 22.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



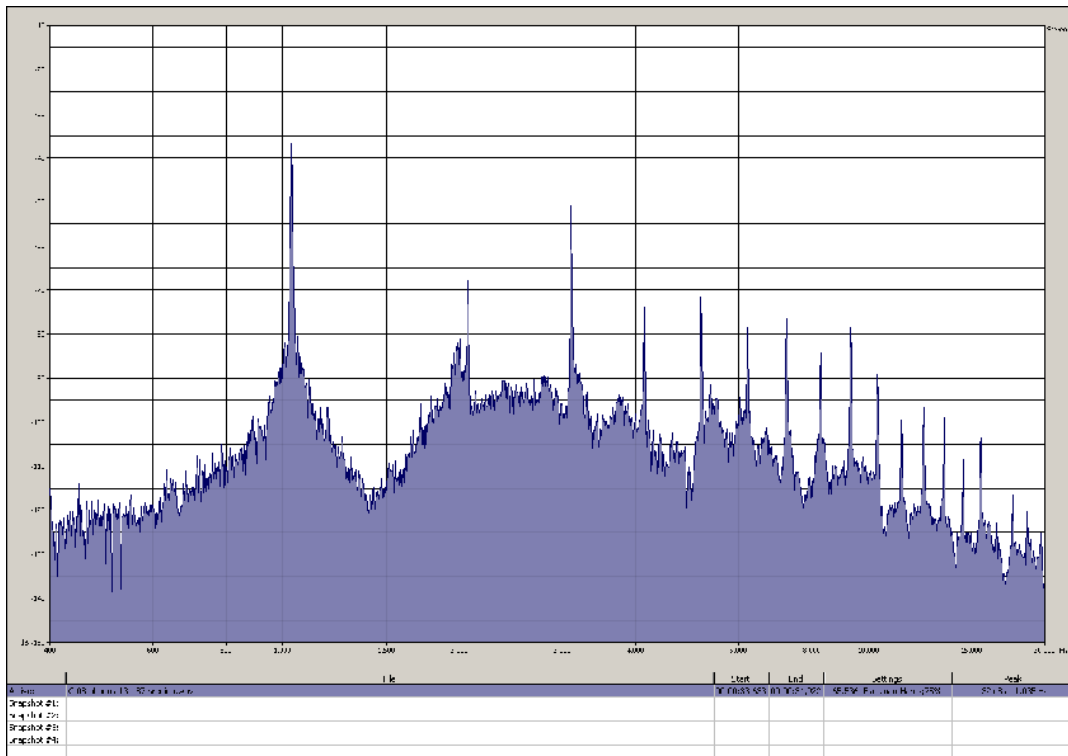
Slika 22.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



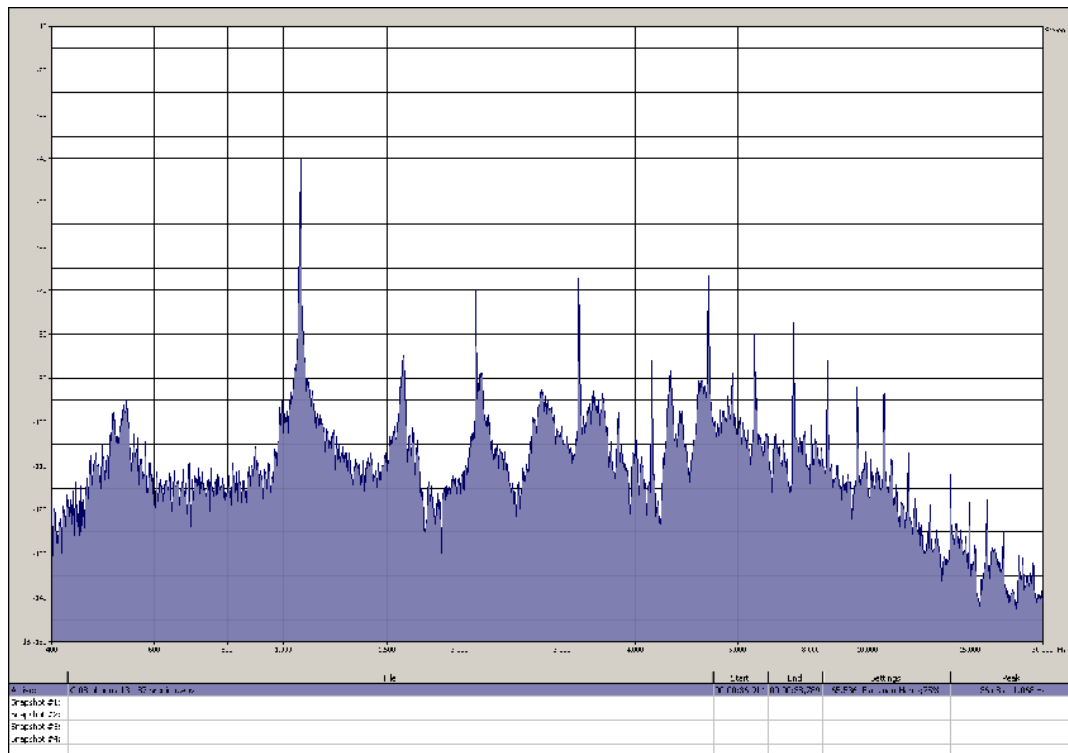
Slika 22.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



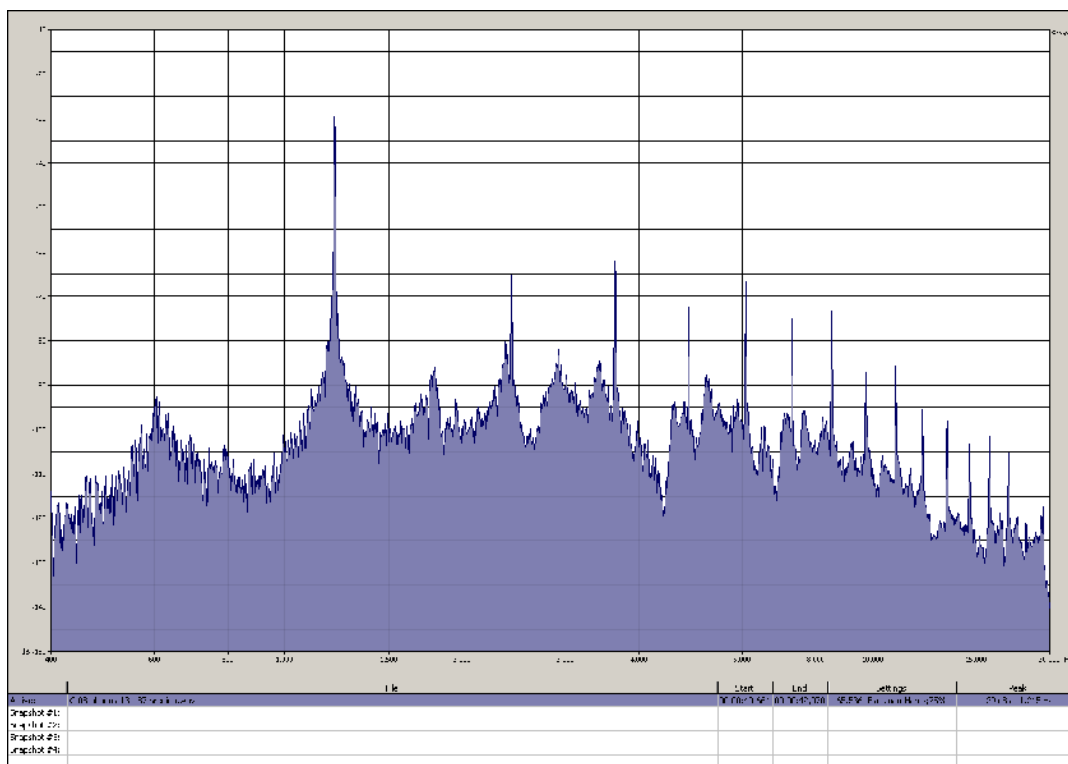
Slika 22.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



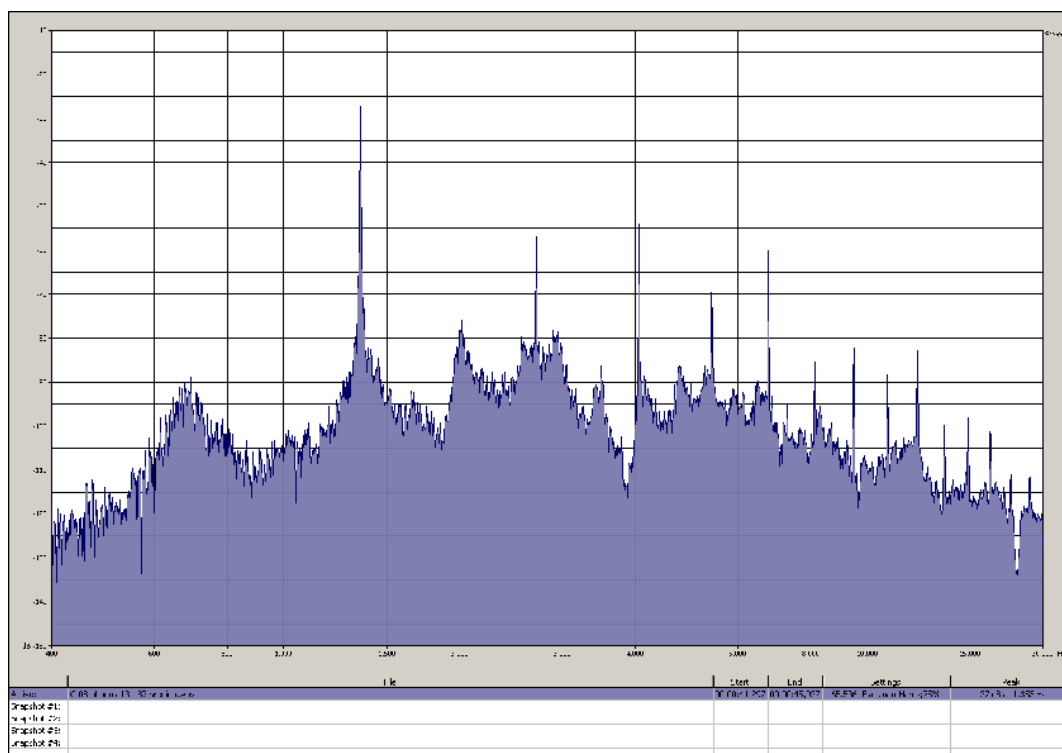
Slika 22.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



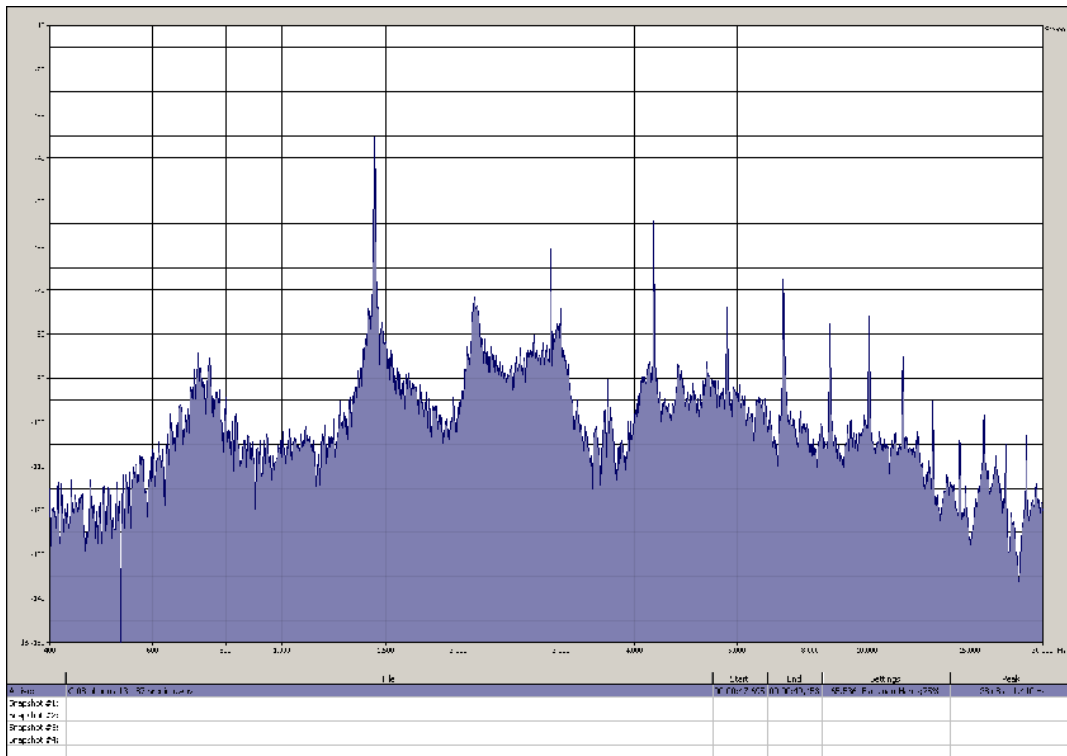
Slika 22.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



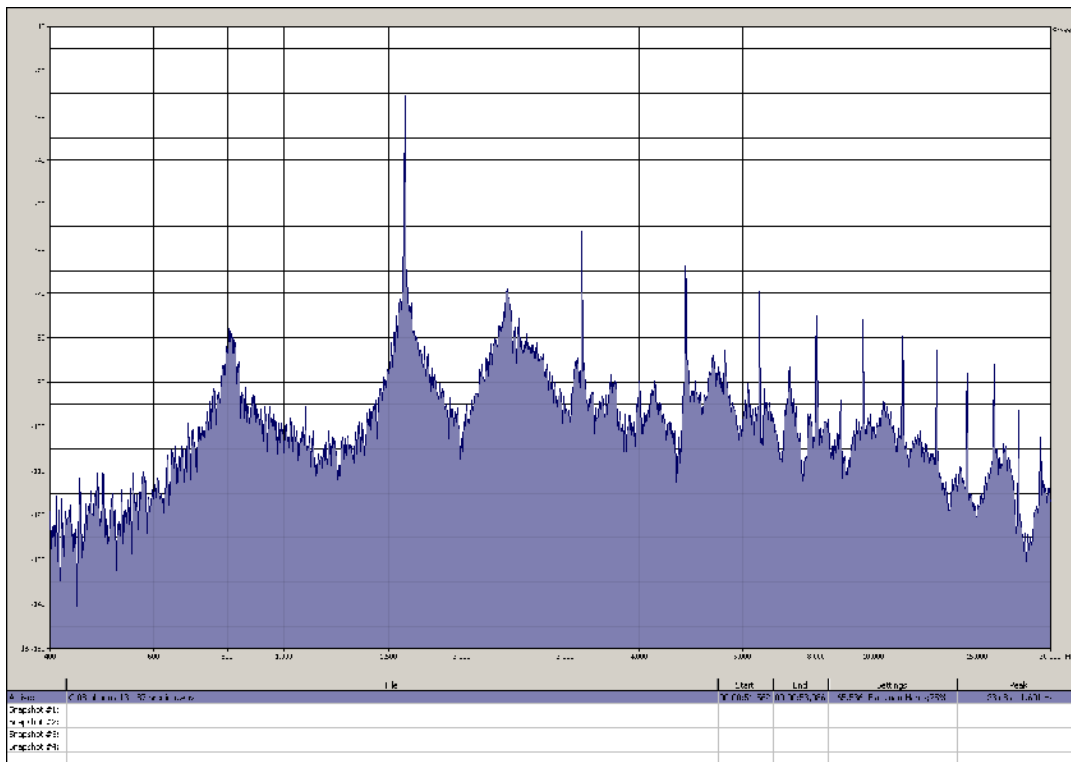
Slika 22.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



Slika 22.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)

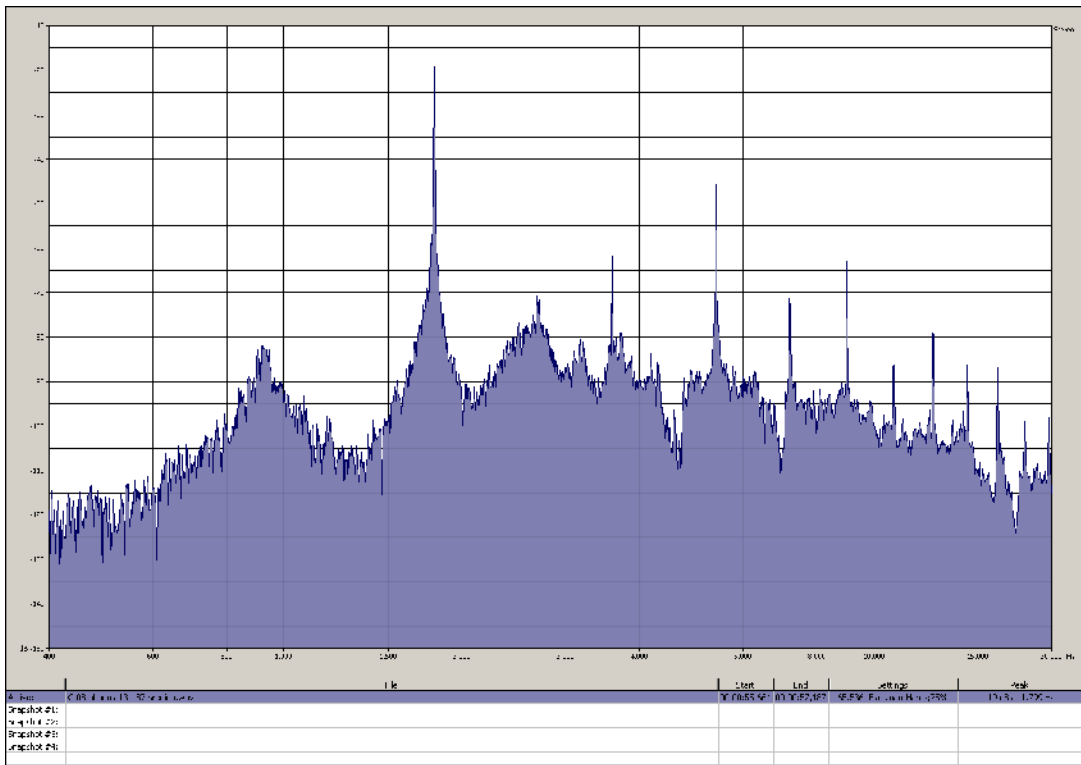


Slika 22.11: Frekvencijski spektar tona  $p^2$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )

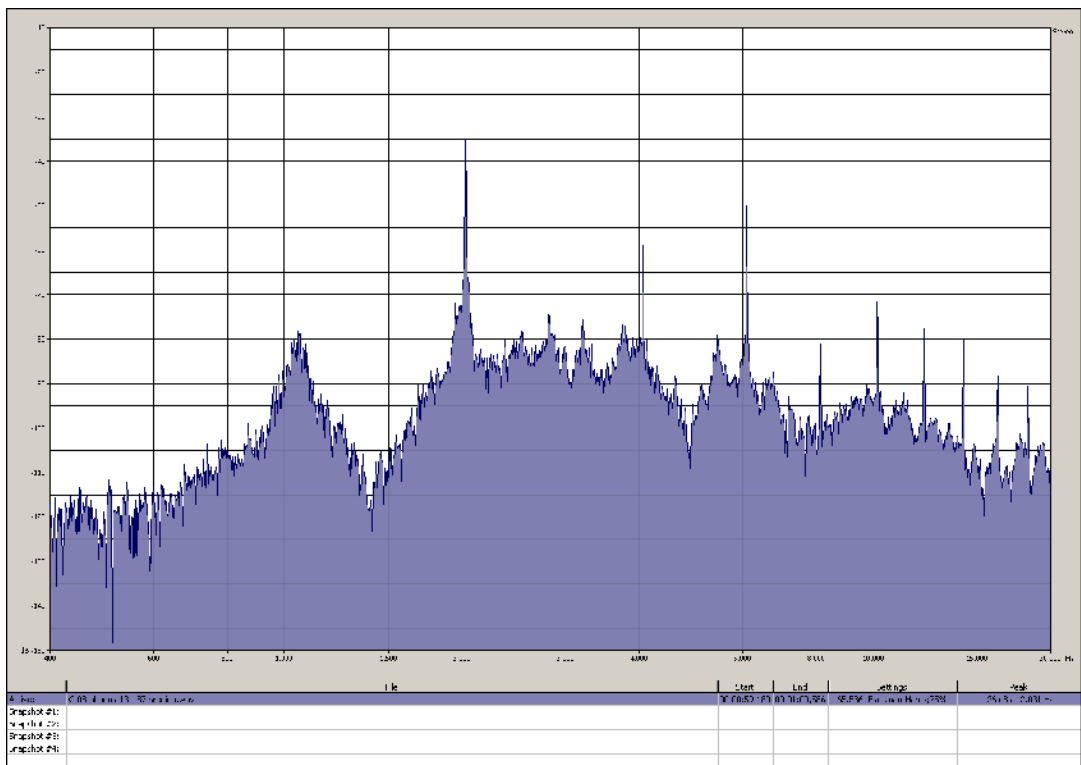


Slika 22.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13 \text{ mm}$ )





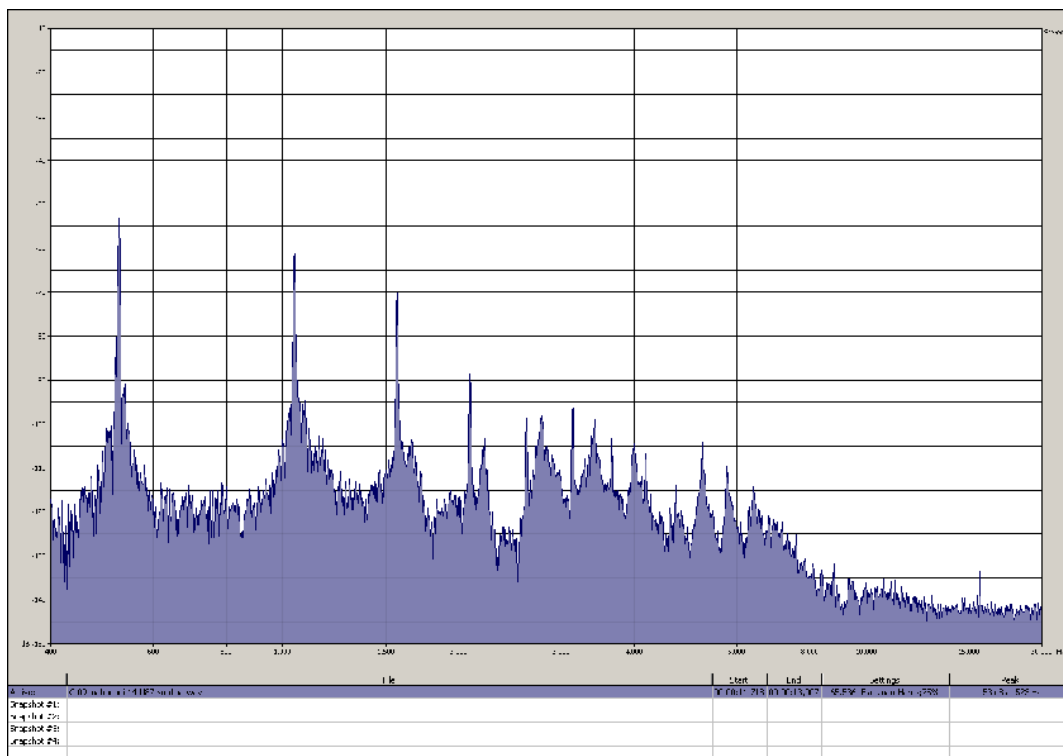
Slika 22.13: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



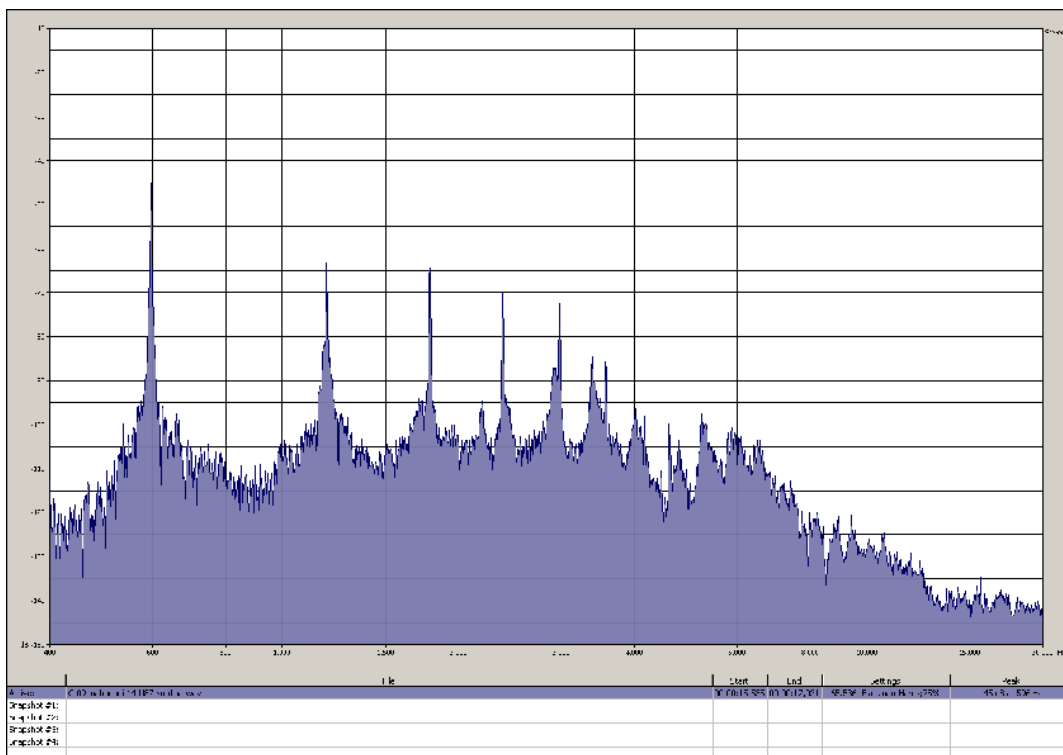
Slika 22.14: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 8 (abonos,  $\Phi = 13$  mm)



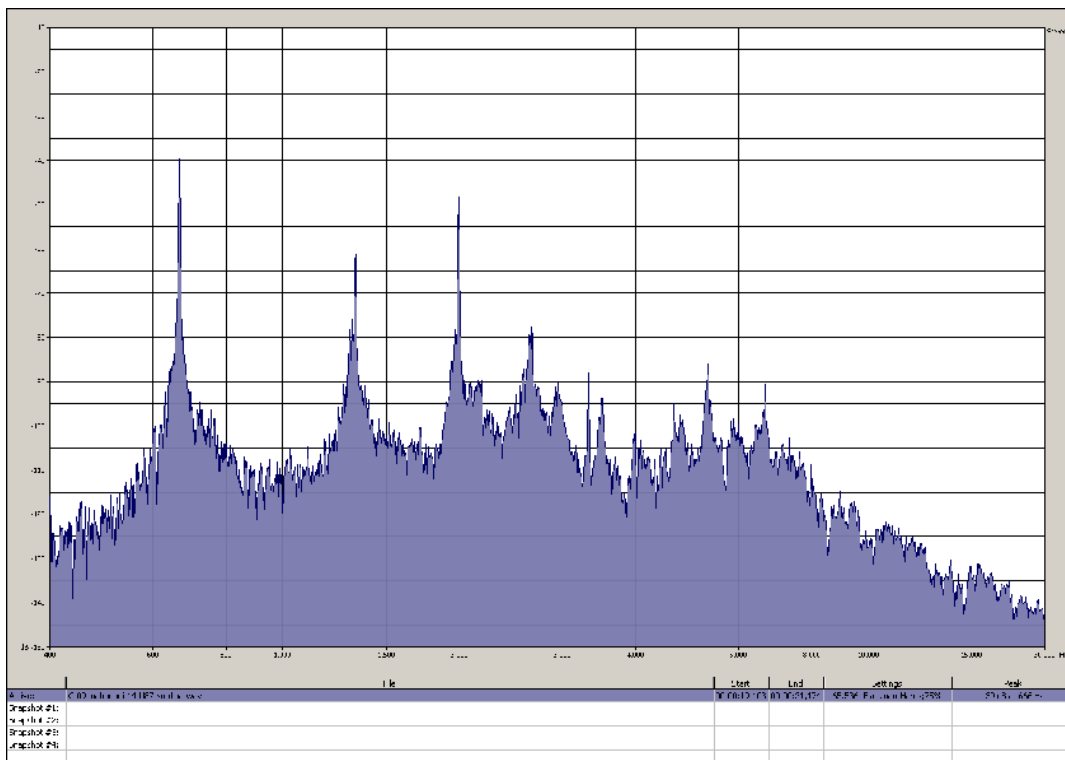
DODATAK 23: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



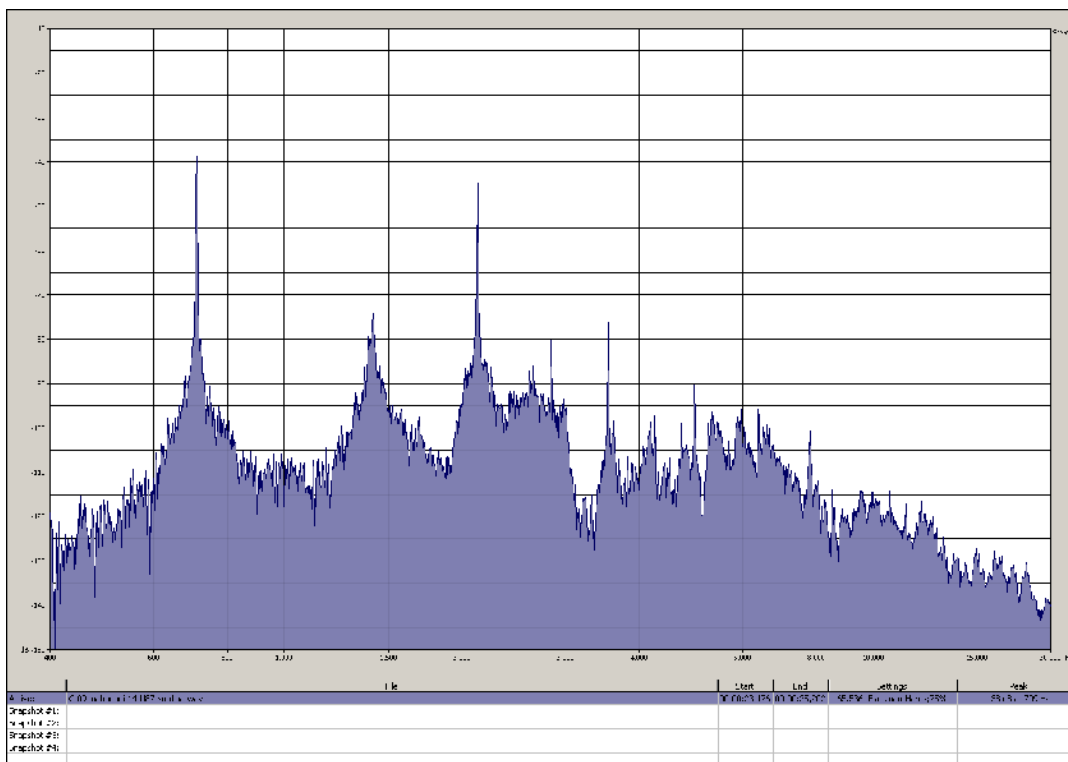
Slika 23.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 9  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



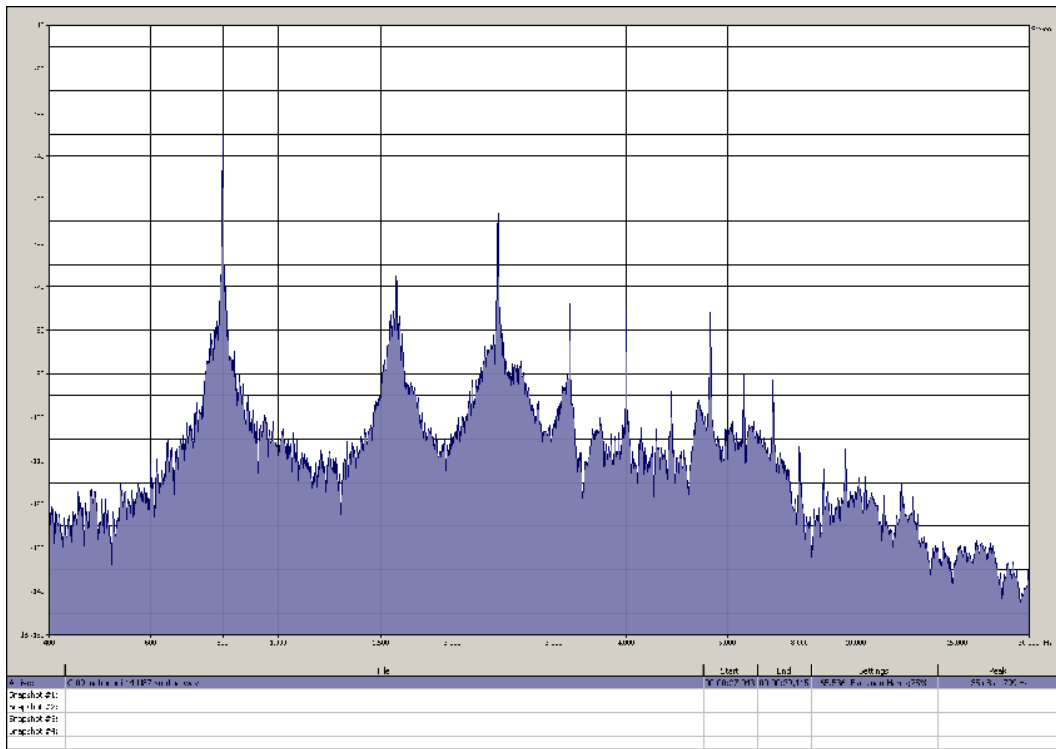
Slika 23.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 9  
(mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



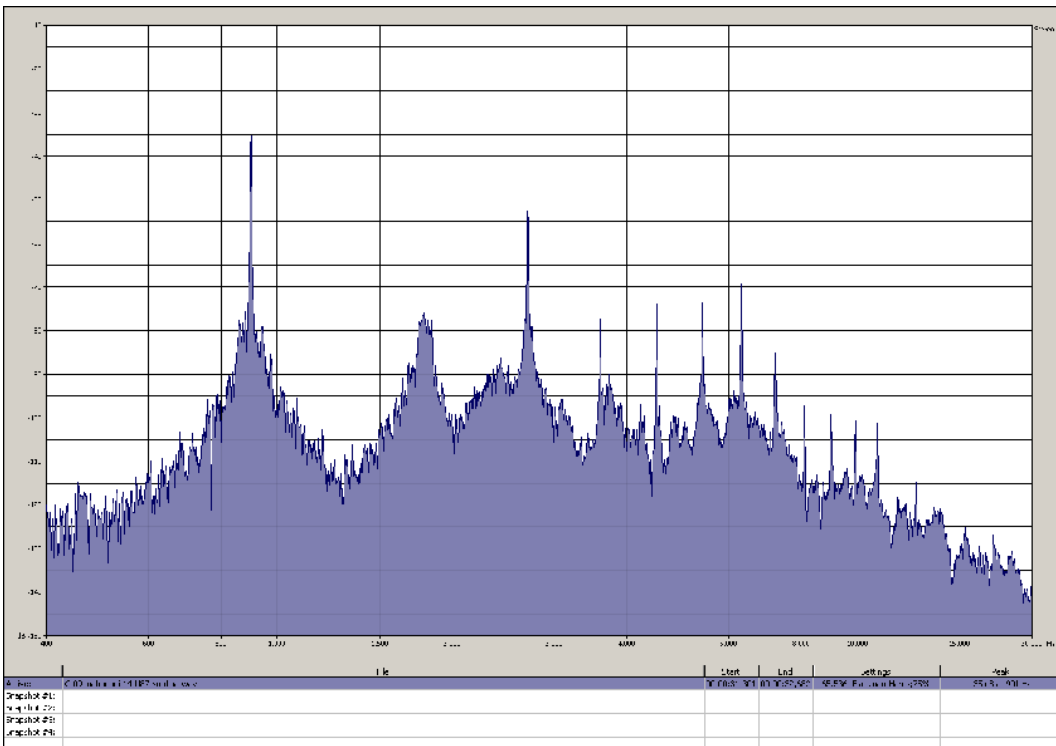
*Slika 23.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*



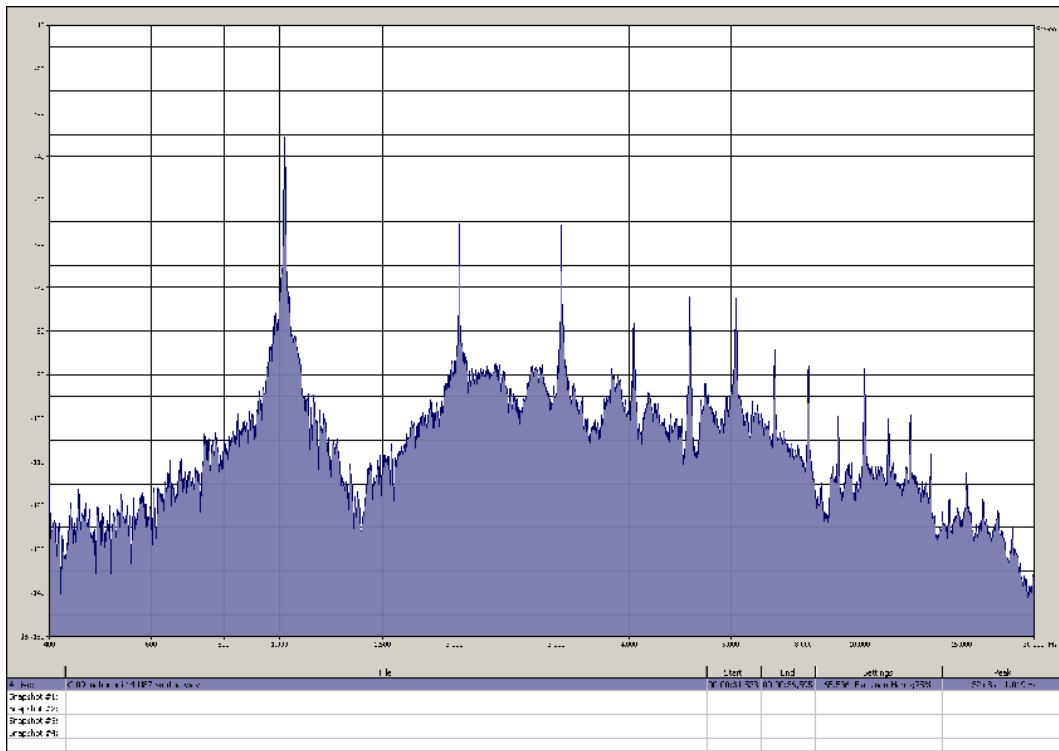
*Slika 23.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*



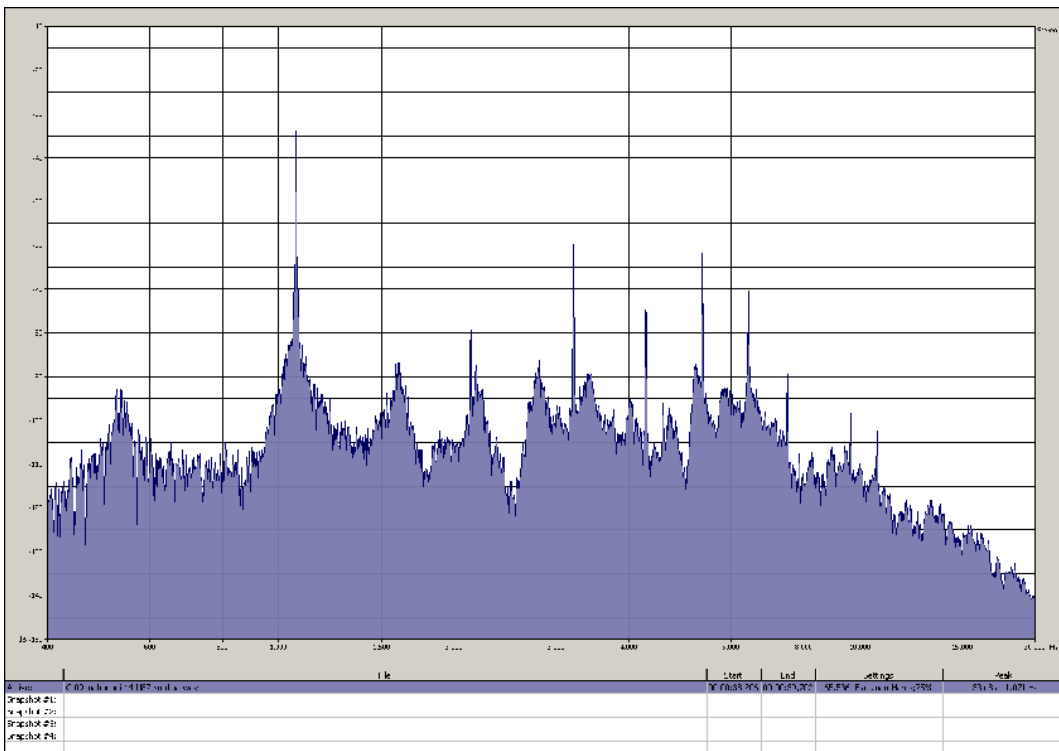
Slika 23.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



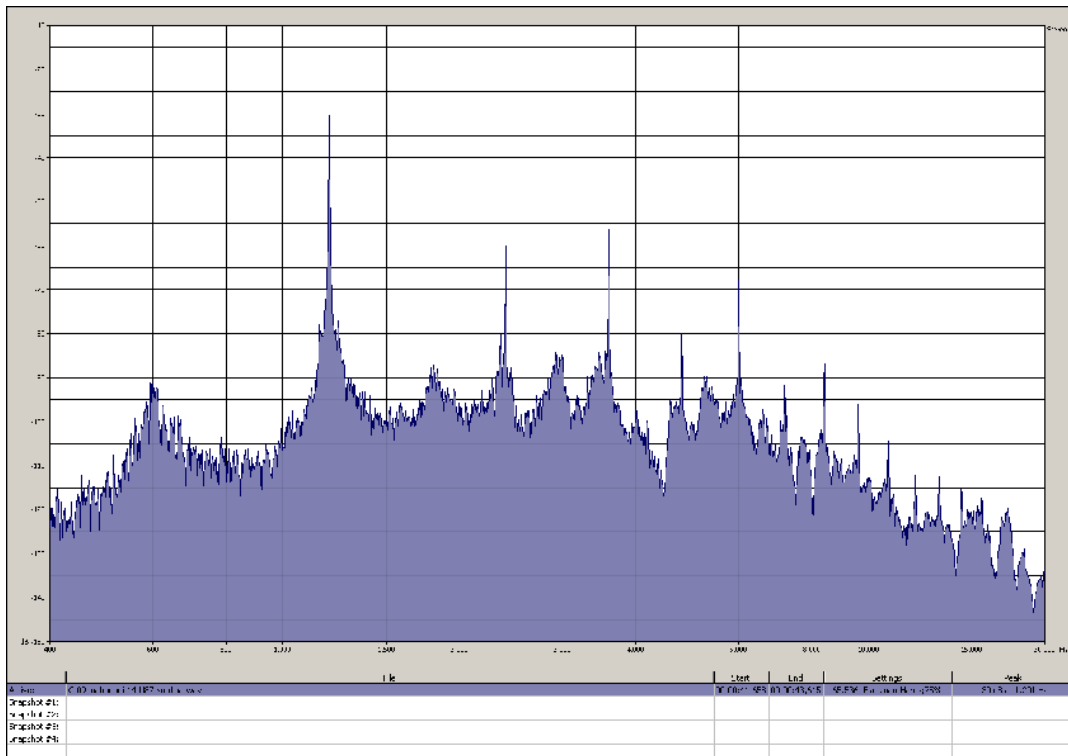
Slika 23.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



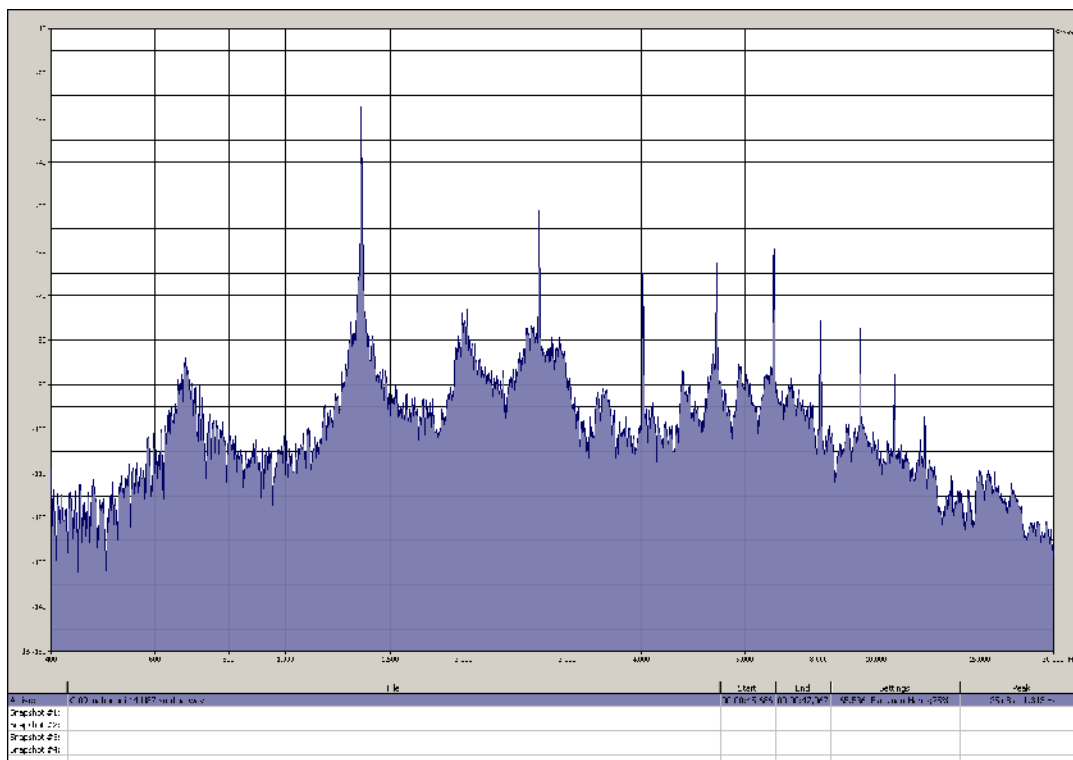
Slika 23.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



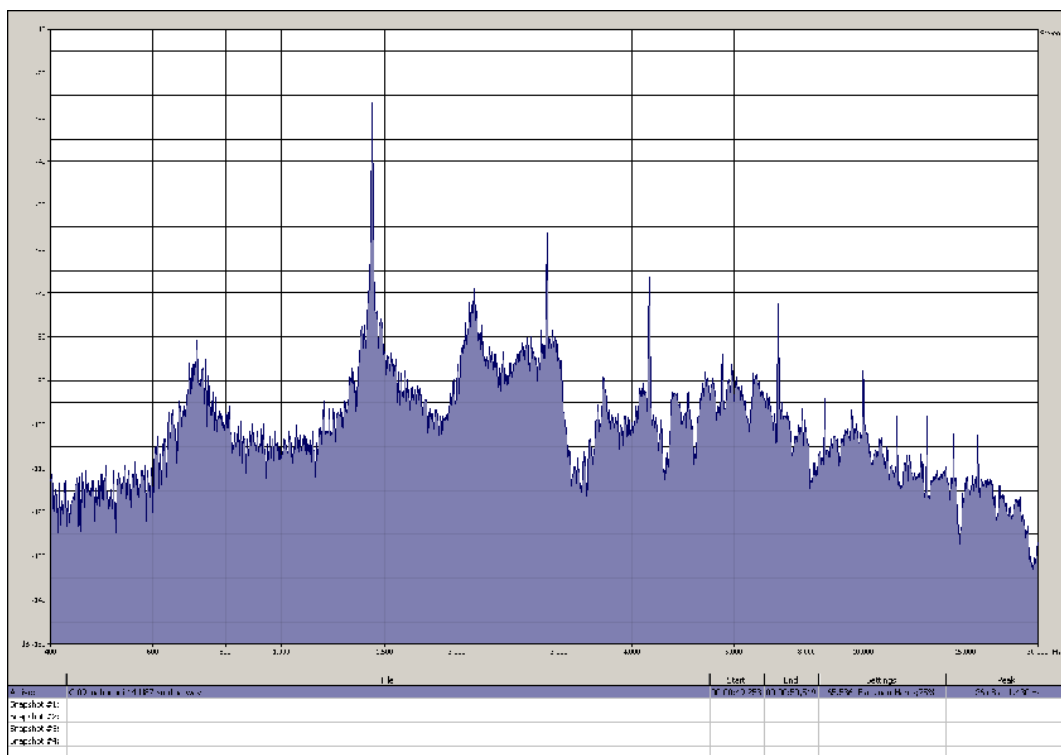
Slika 23.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



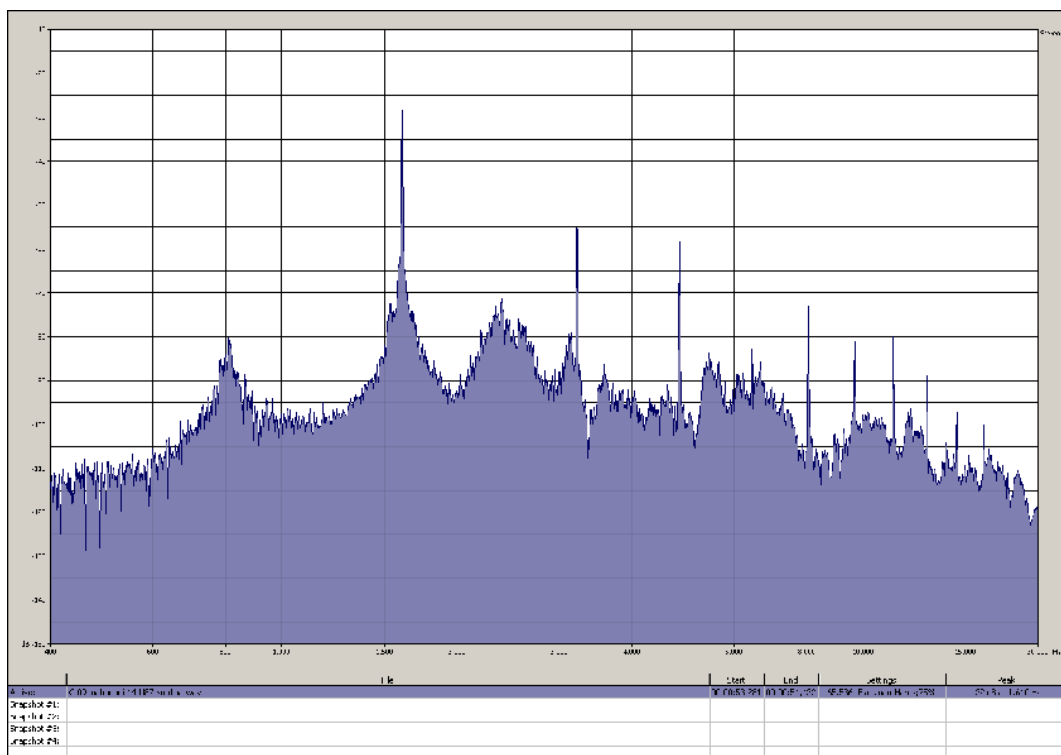
Slika 23.9: Frekvenjski spekter tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 23.10: Frekvenjski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

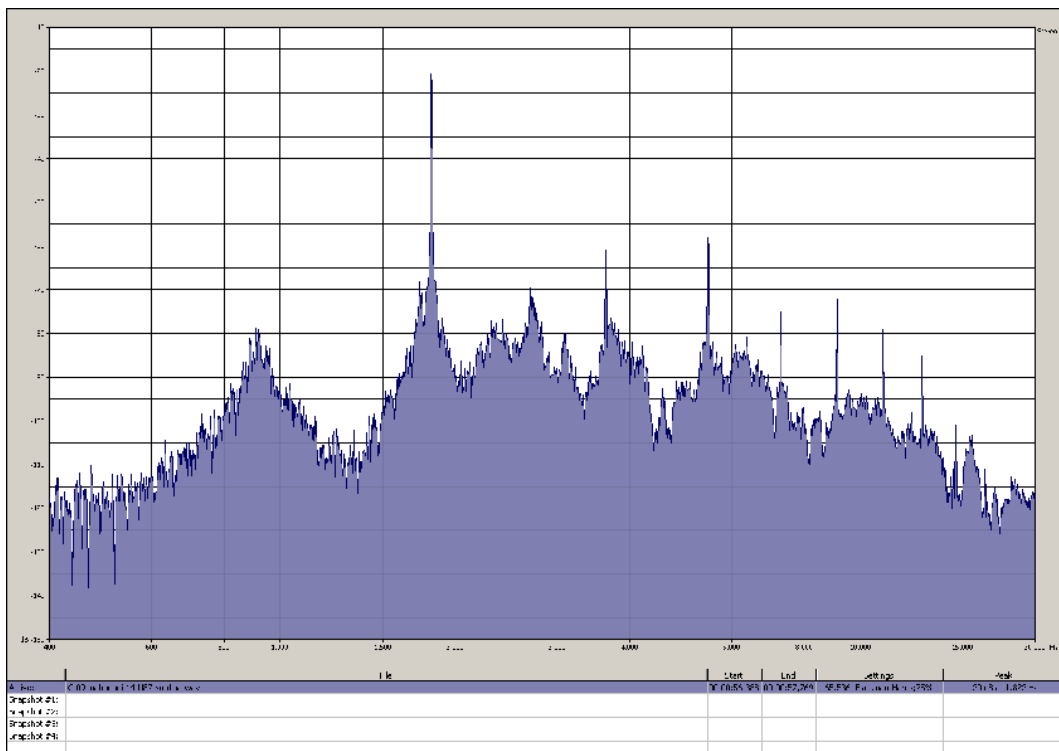


*Slika 23.11: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*

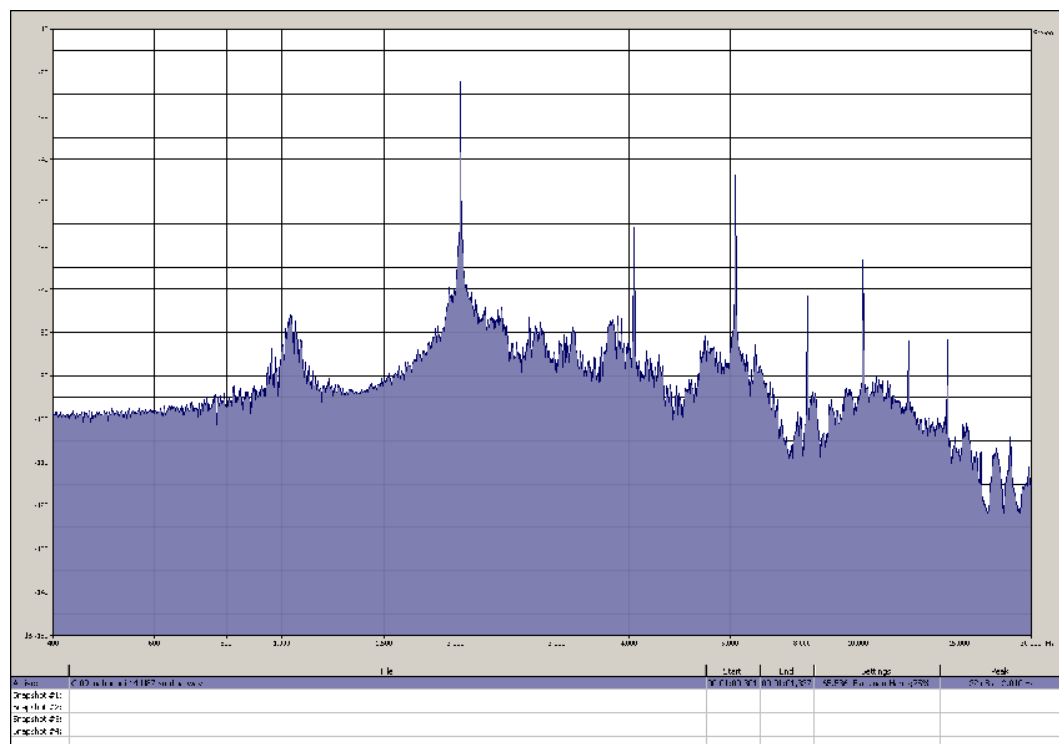


*Slika 23.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*

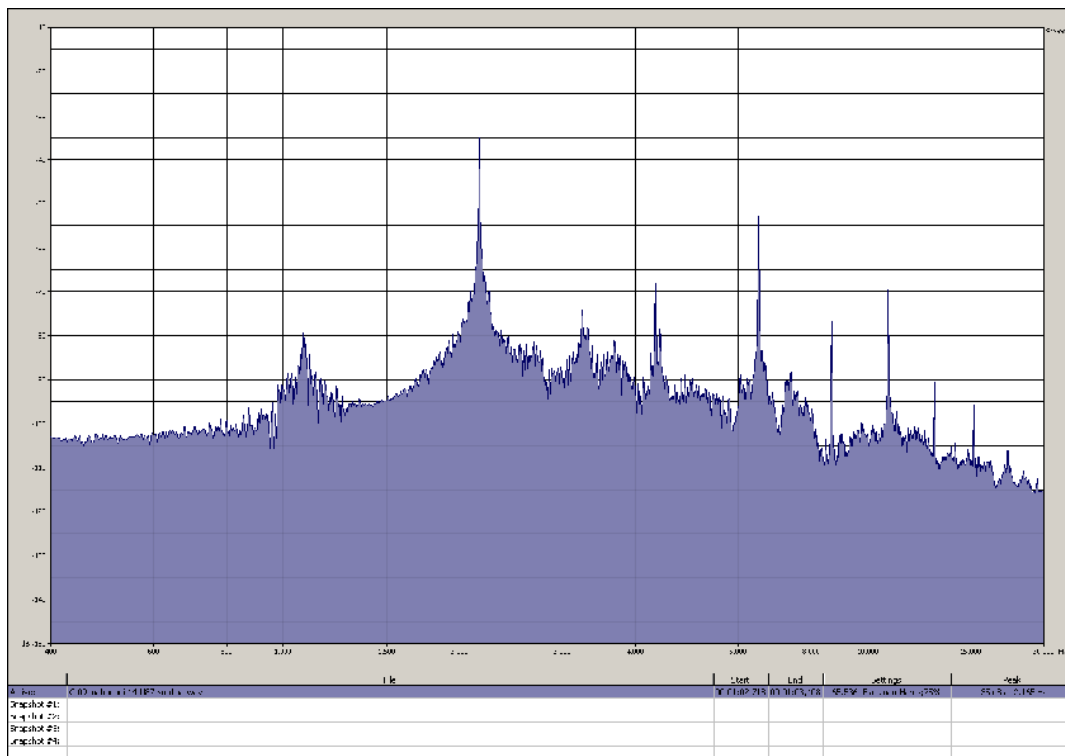




Slika 23.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

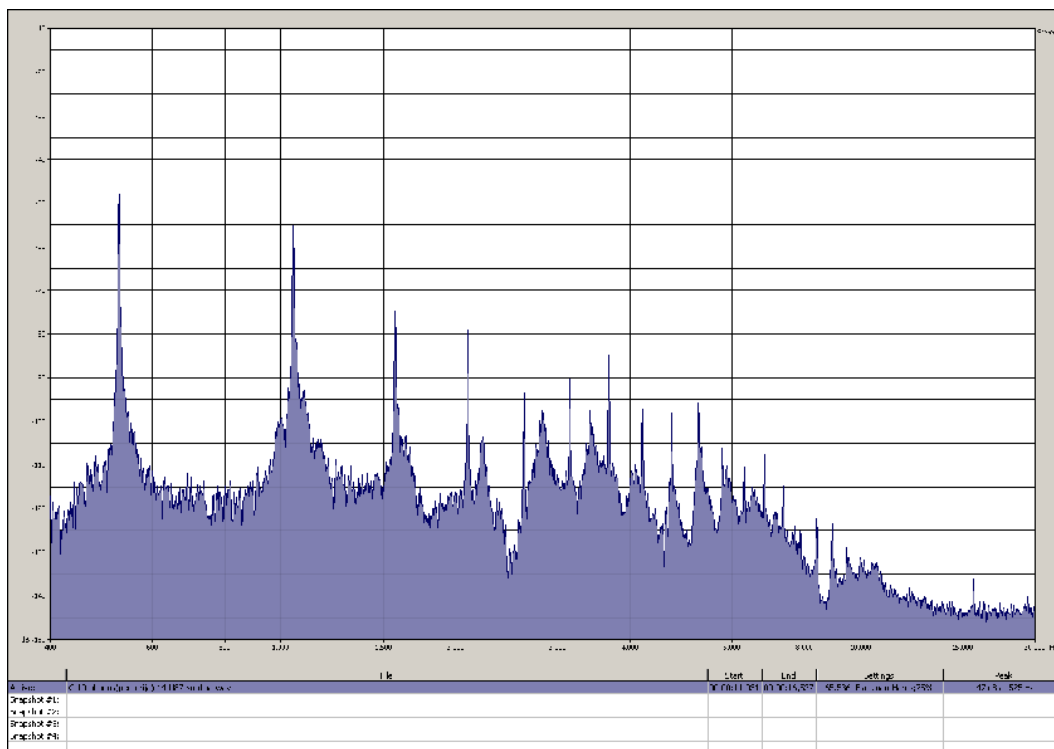


Slika 23.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)

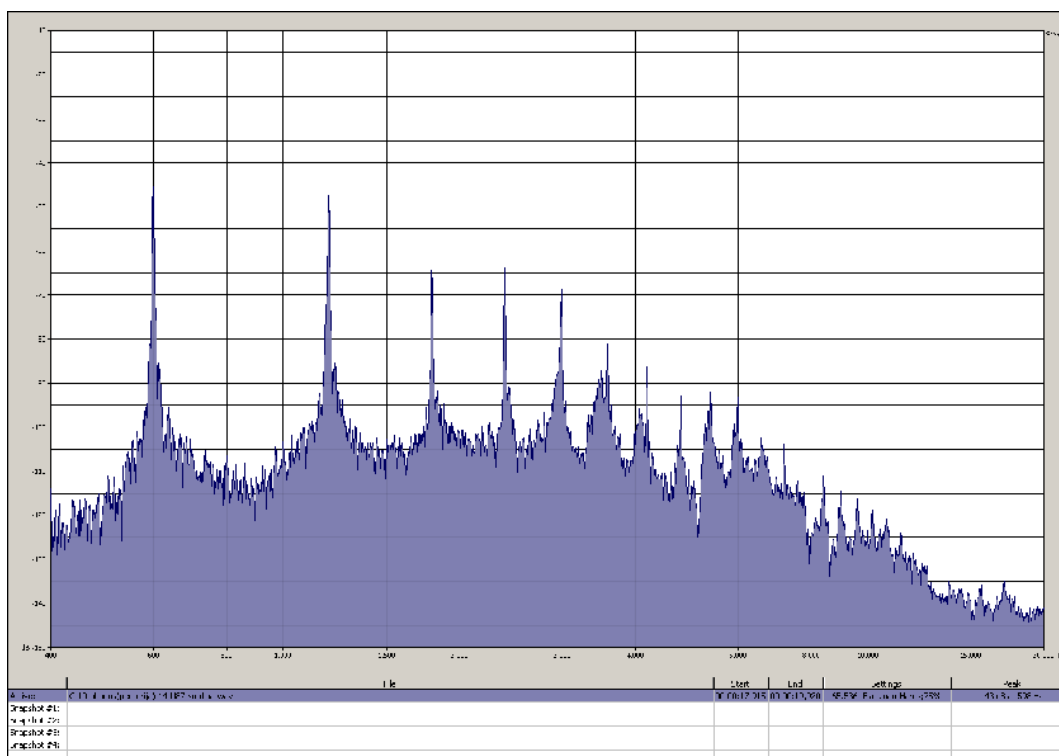


*Slika 23.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 9 (mahagoni,  $\Phi = 14$  mm)*

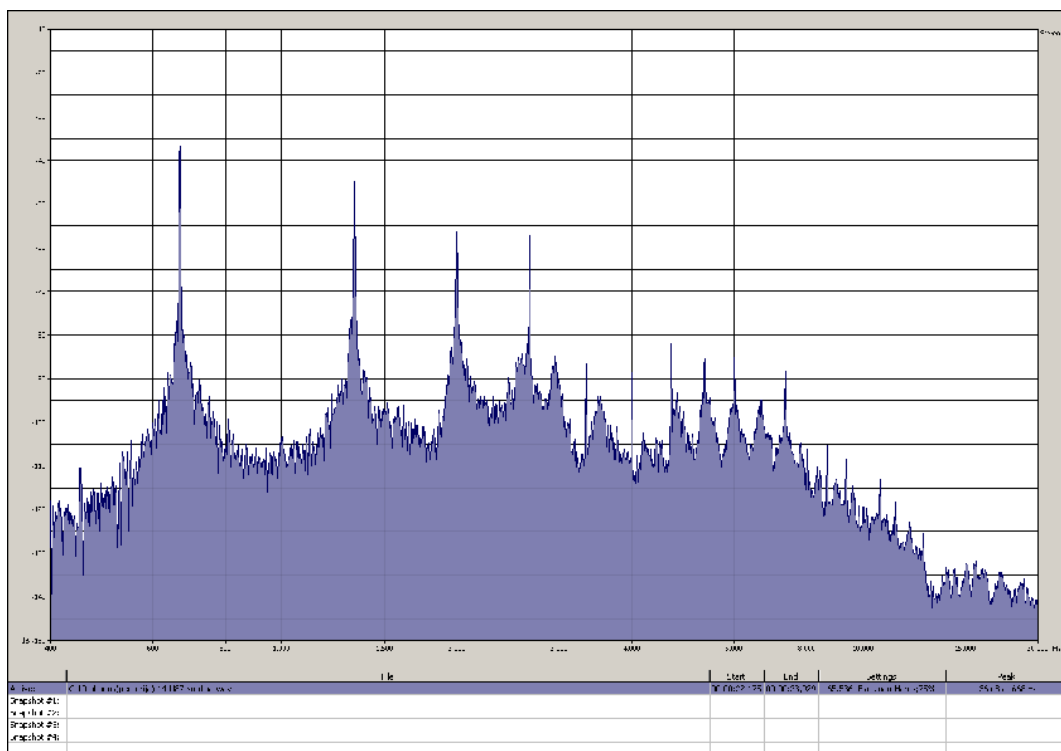
DODATAK 24: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 10 (abonos periferija,  $\Phi = 14$  mm)



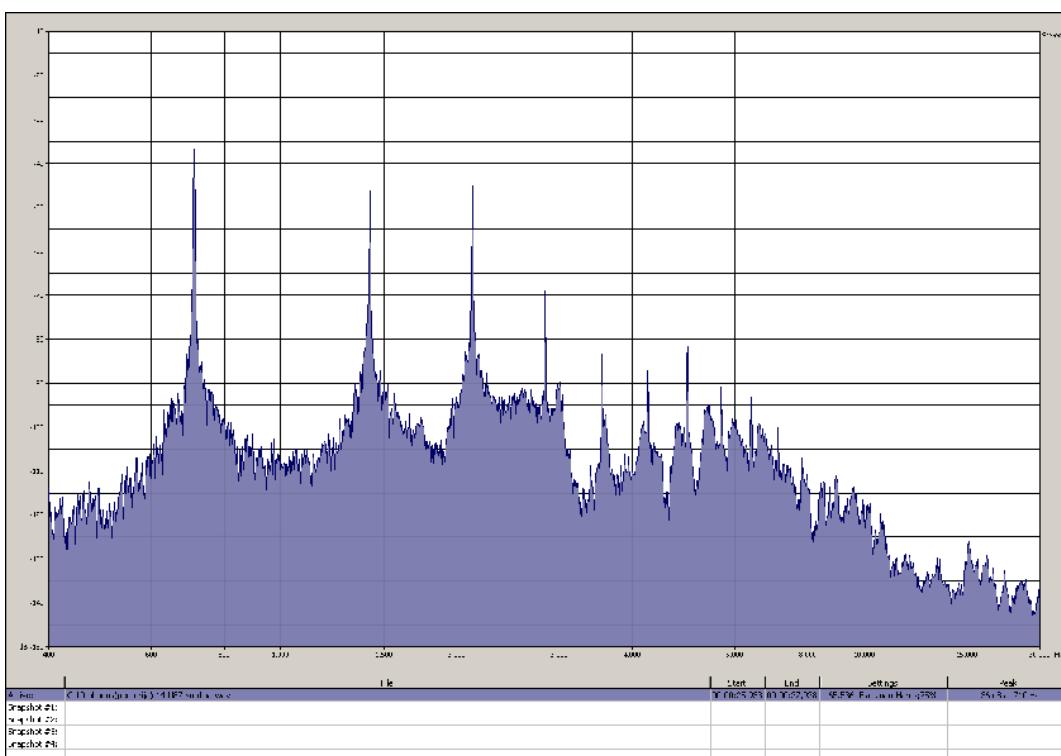
Slika 24.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 10  
(abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)



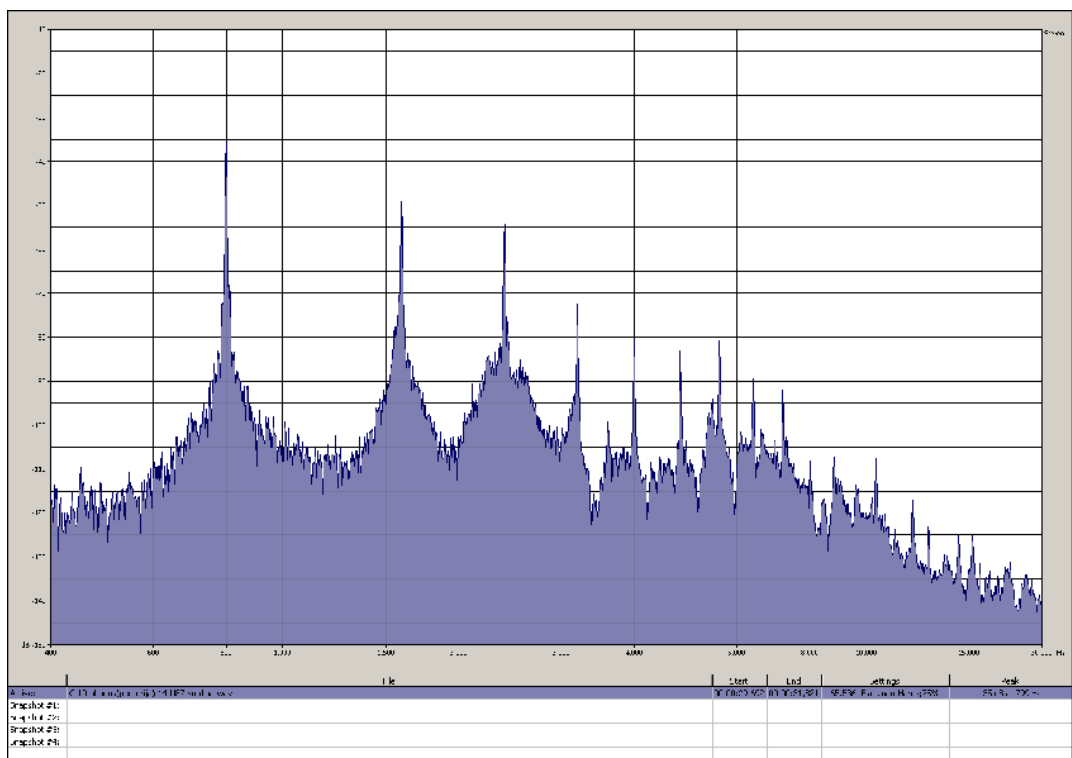
Slika 24.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 10  
(abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)



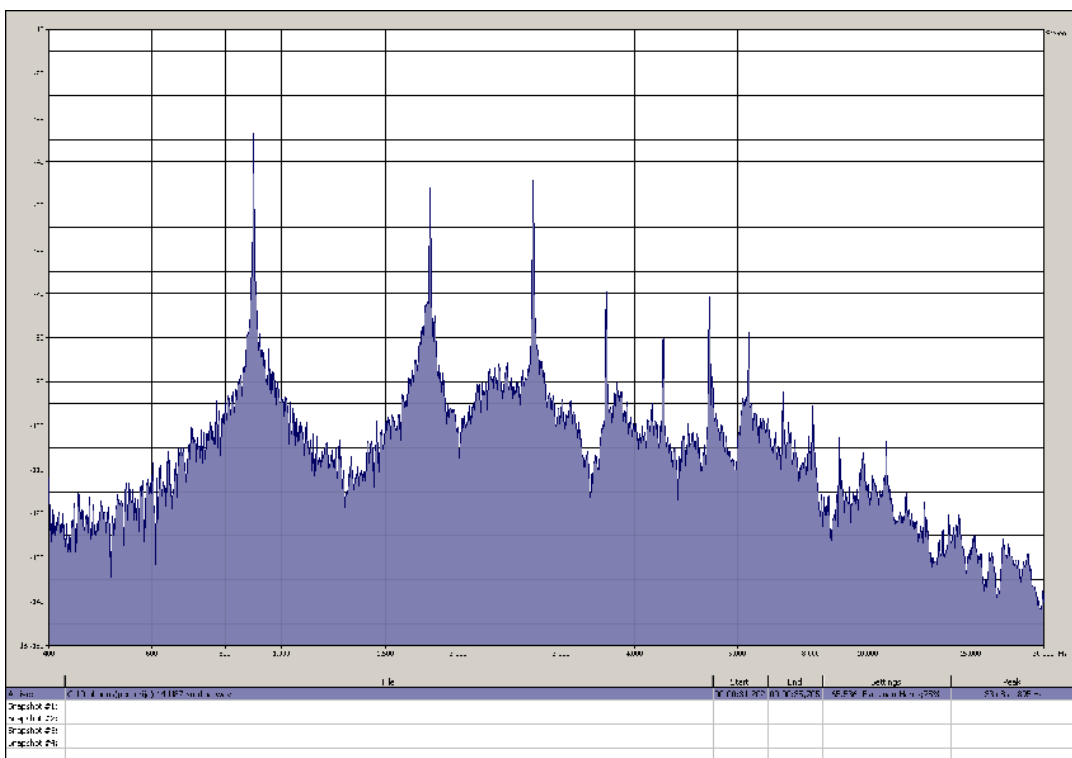
*Slika 24.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)*



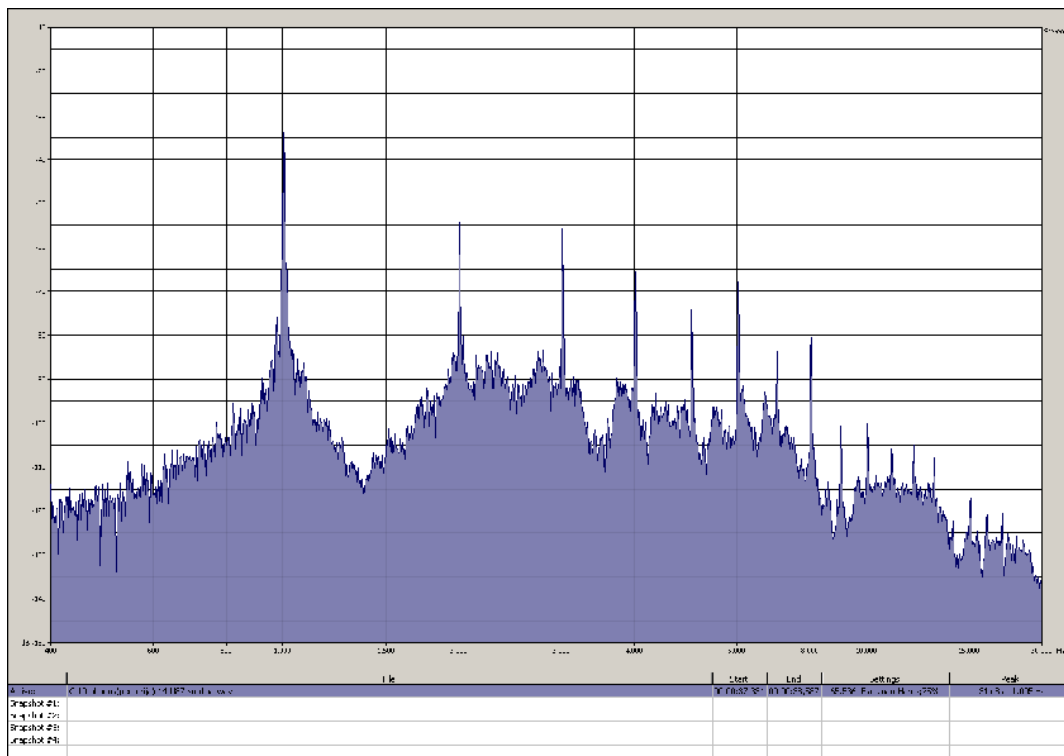
*Slika 24.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)*



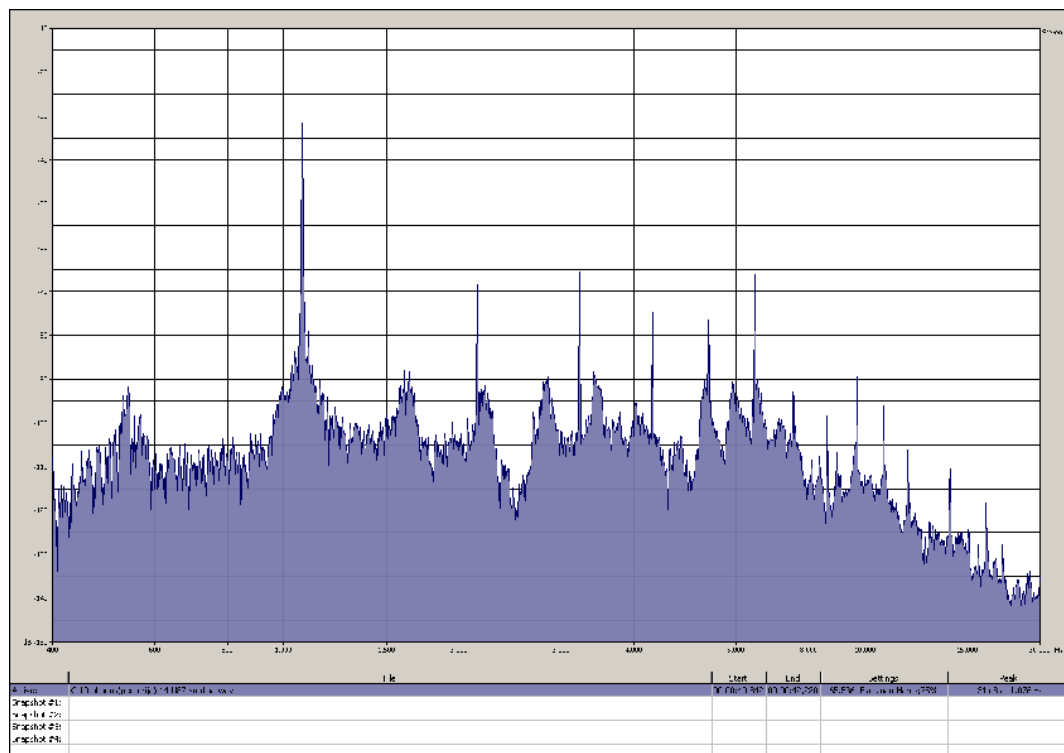
Slika 24.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



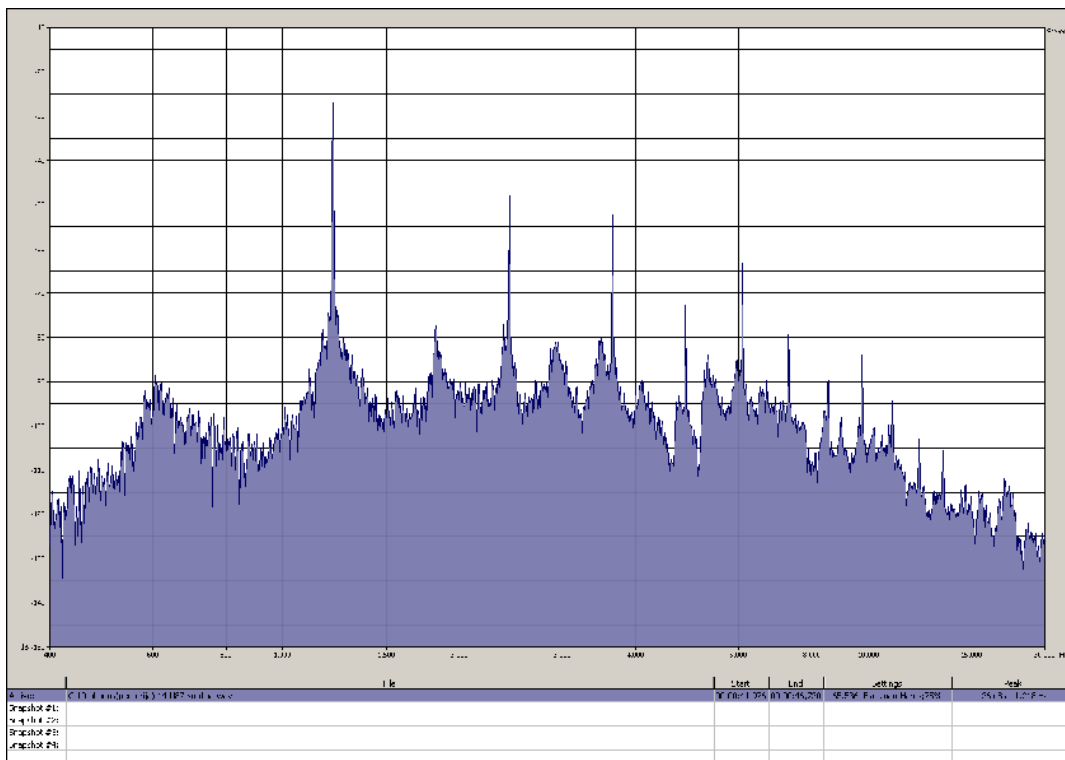
Slika 24.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



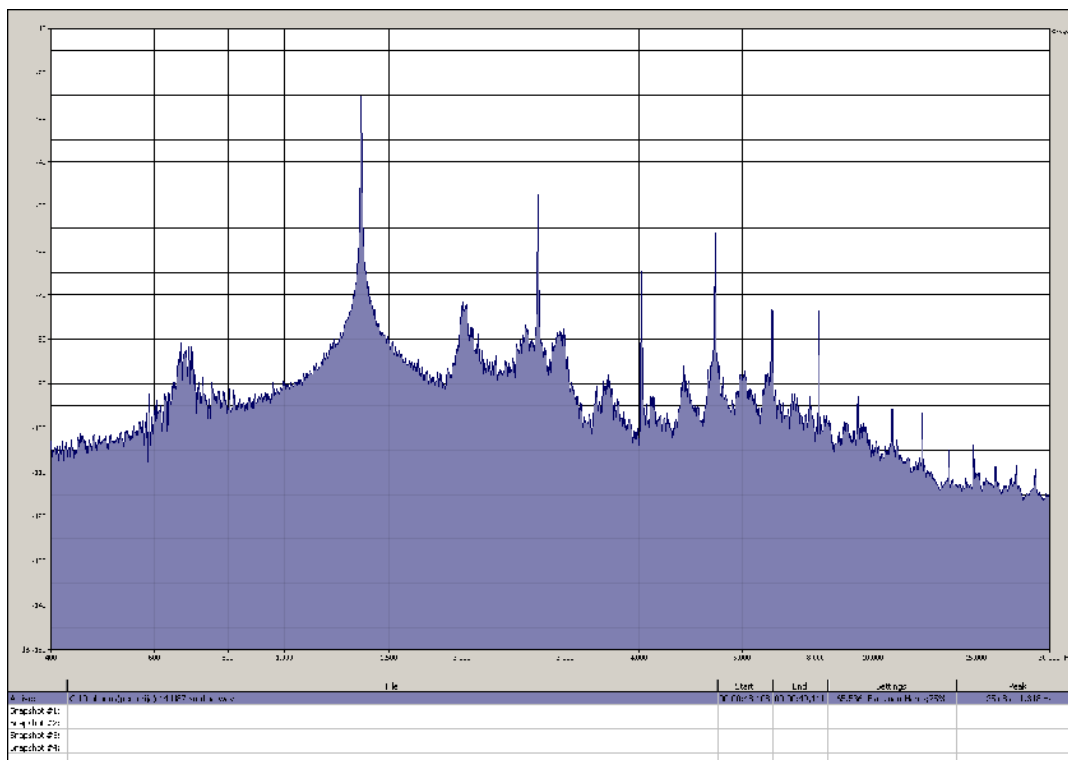
Slika 24.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)



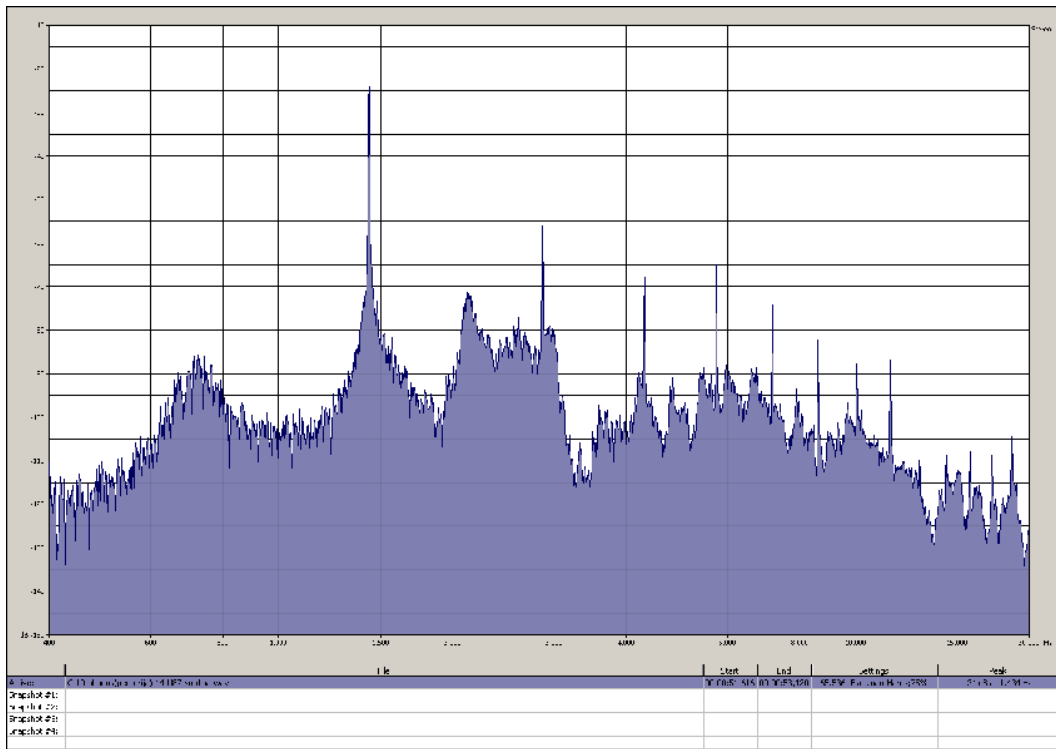
Slika 24.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)



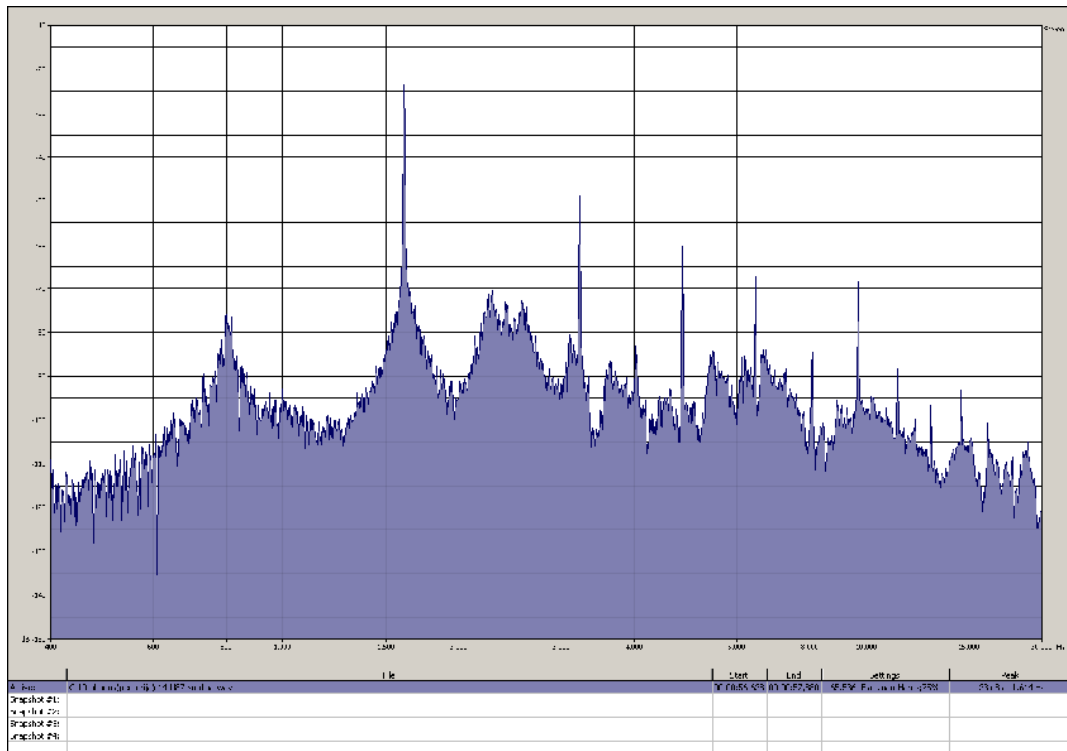
Slika 24.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



Slika 24.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

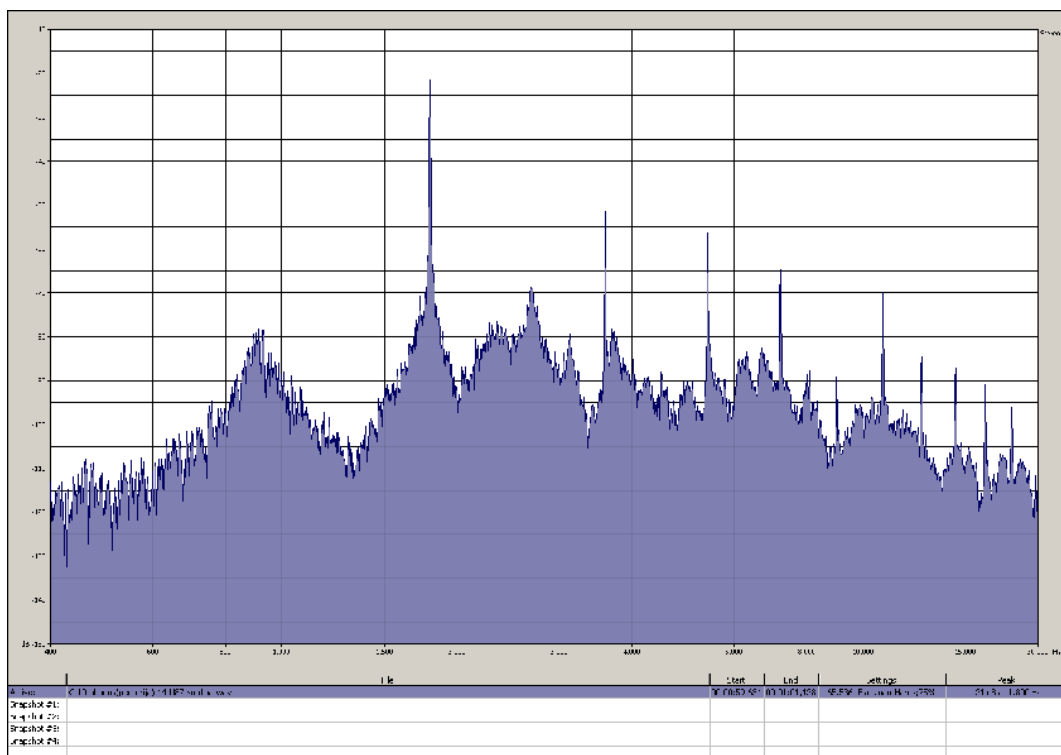


Slika 24.11: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)

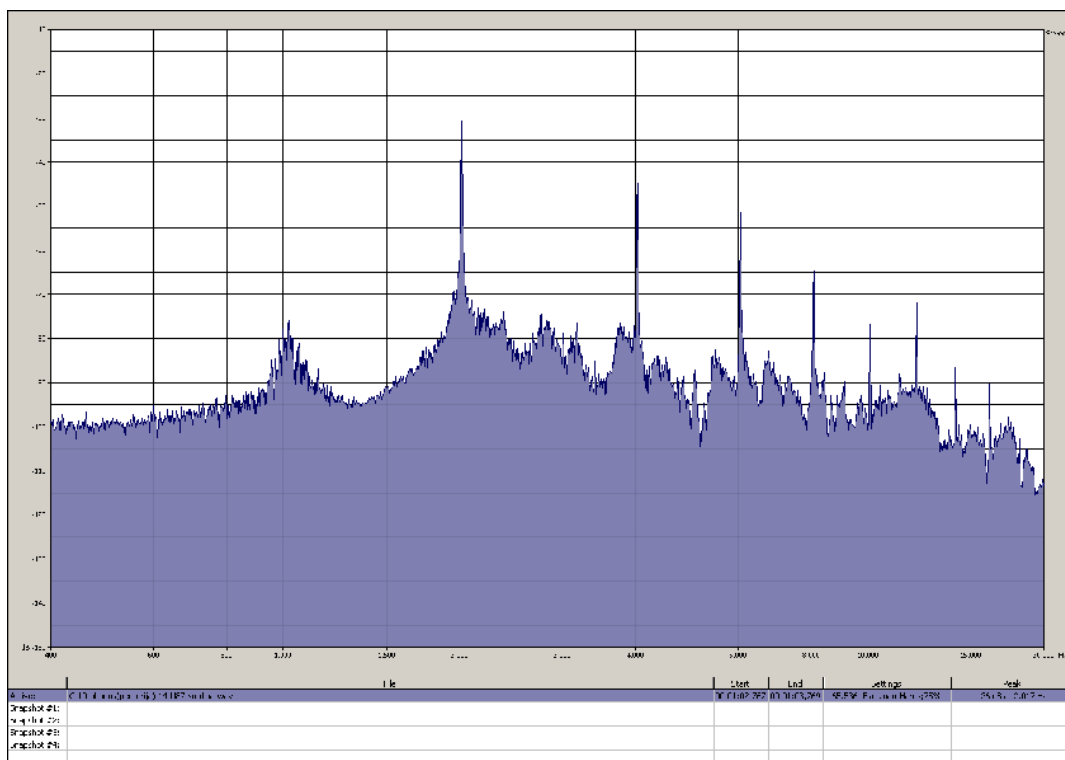


Slika 24.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)

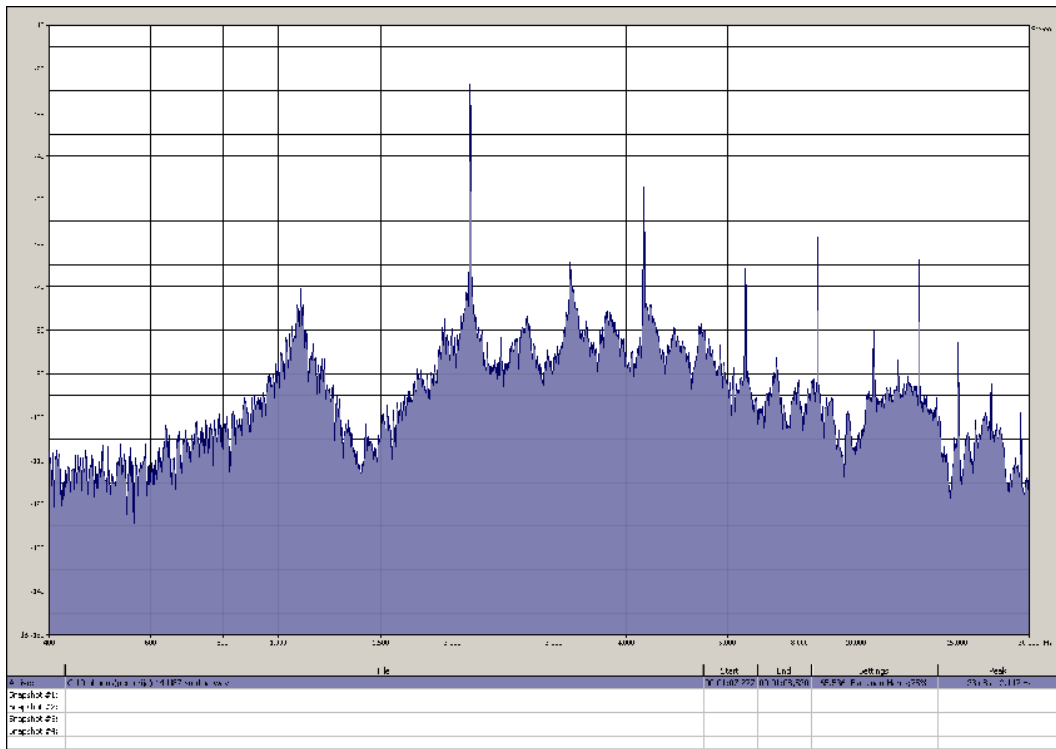




Slika 24.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)

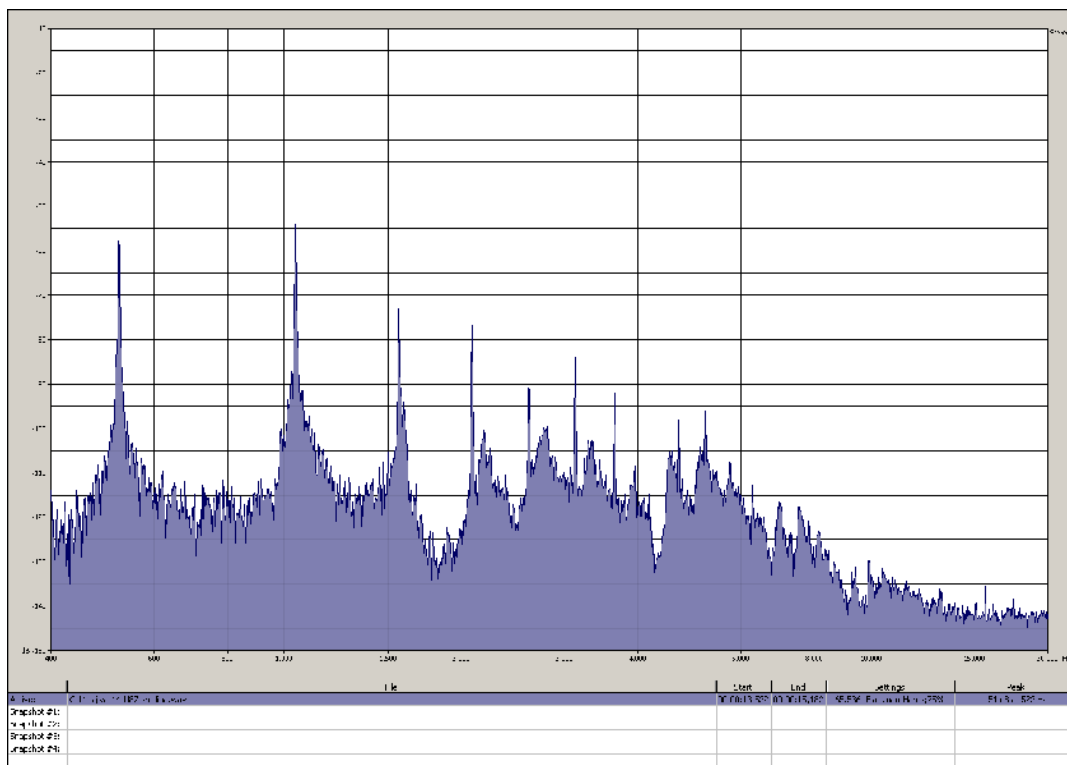


Slika 24.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)

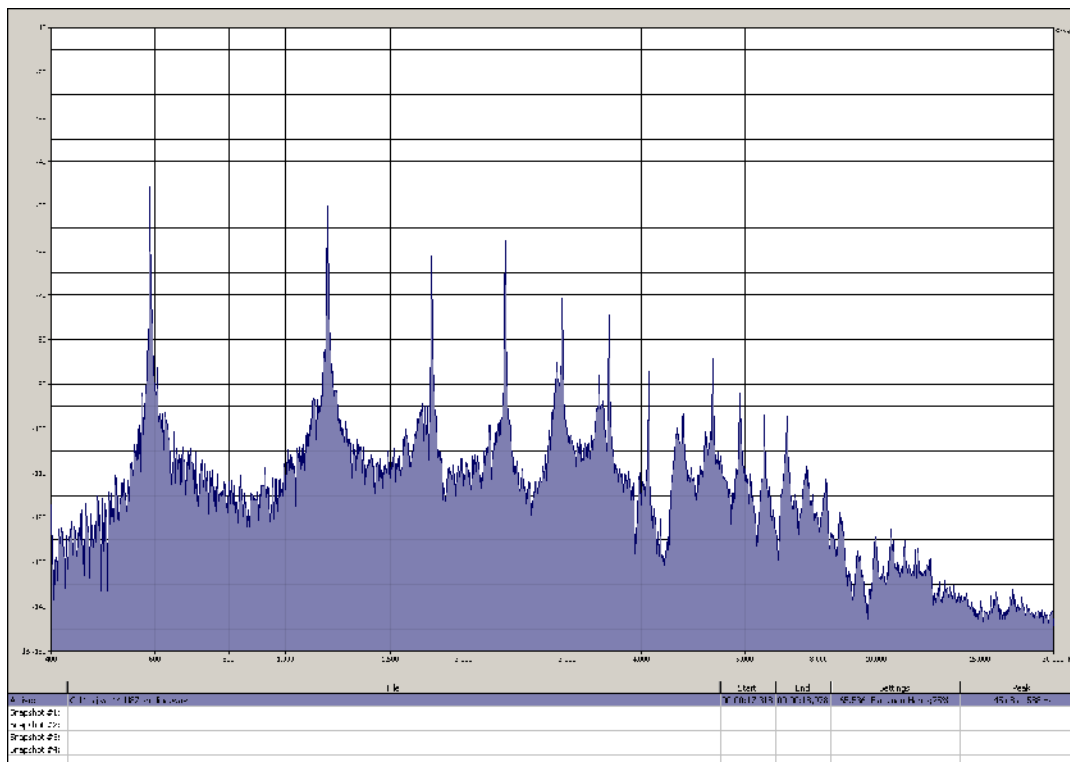


*Slika 24.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 10 (abonos - periferija,  $\Phi = 14$  mm)*

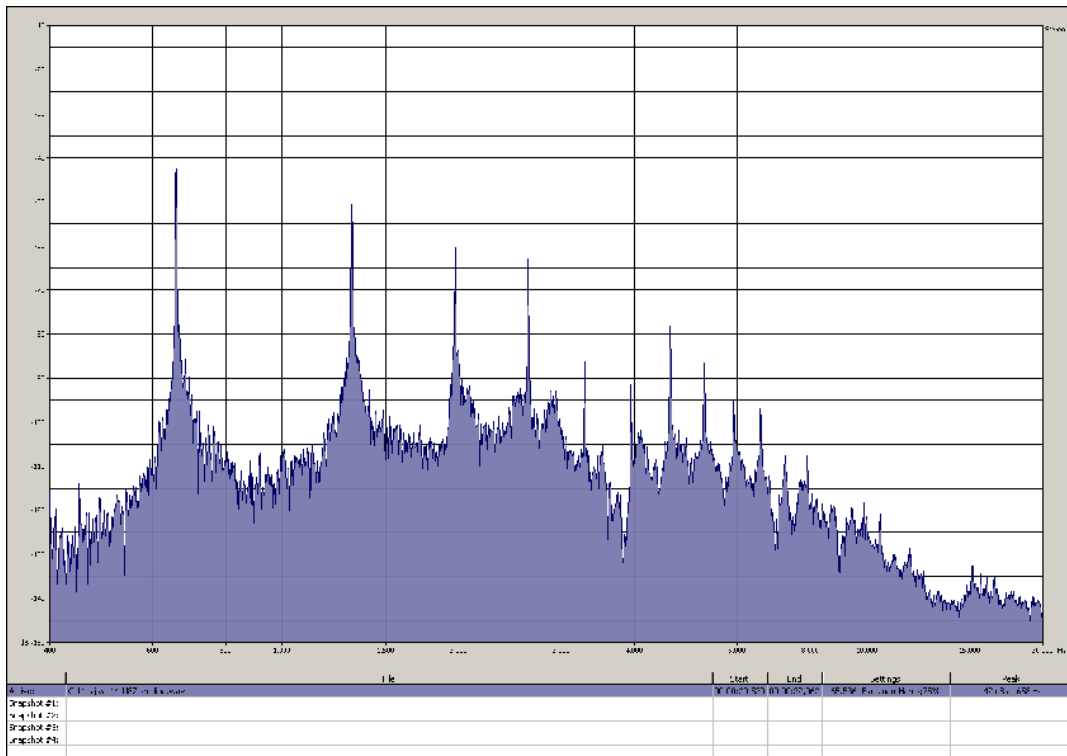
DODATAK 25: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



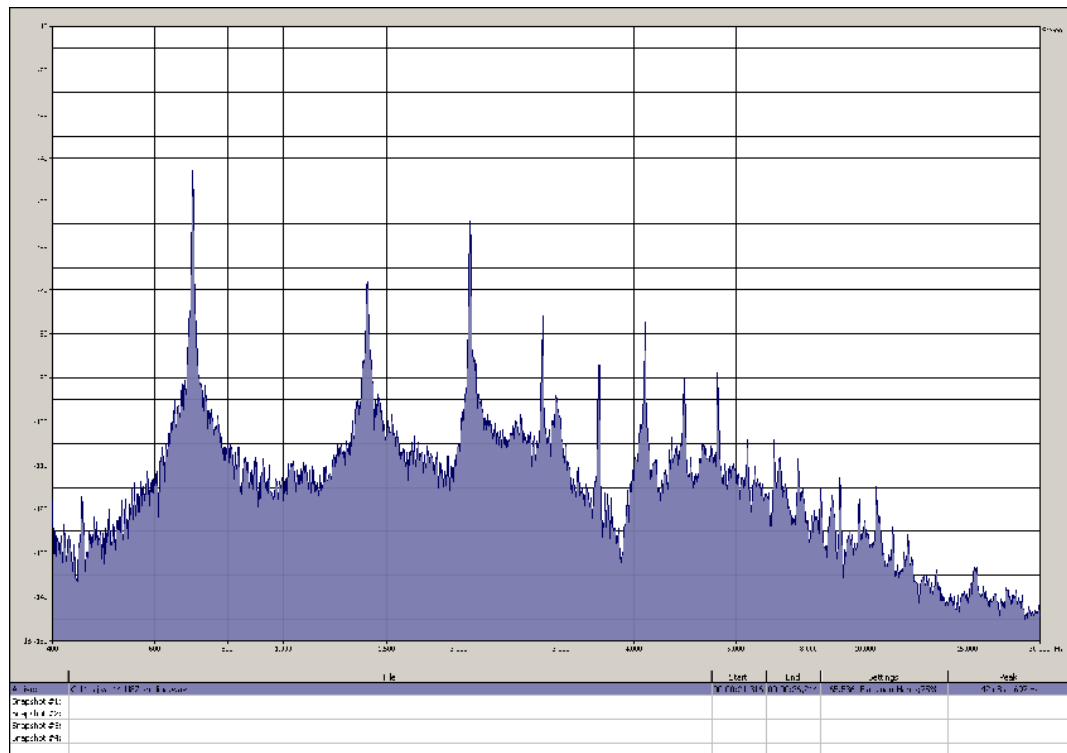
Slika 25.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 11  
(šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



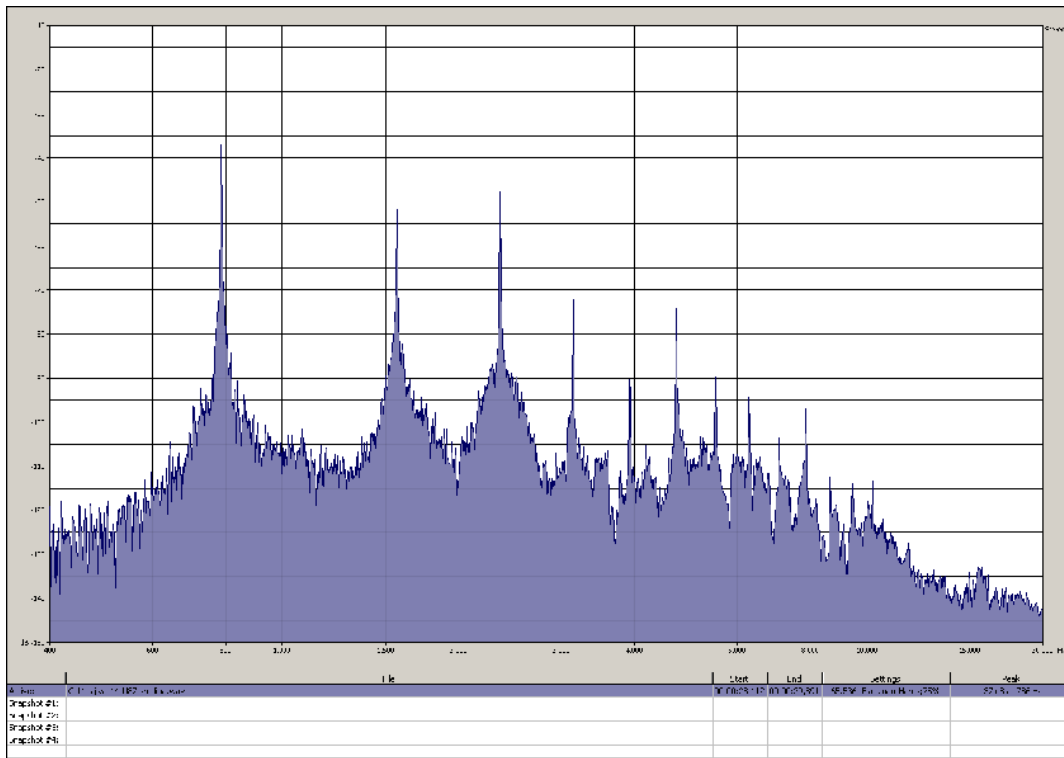
Slika 25.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 11  
(šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



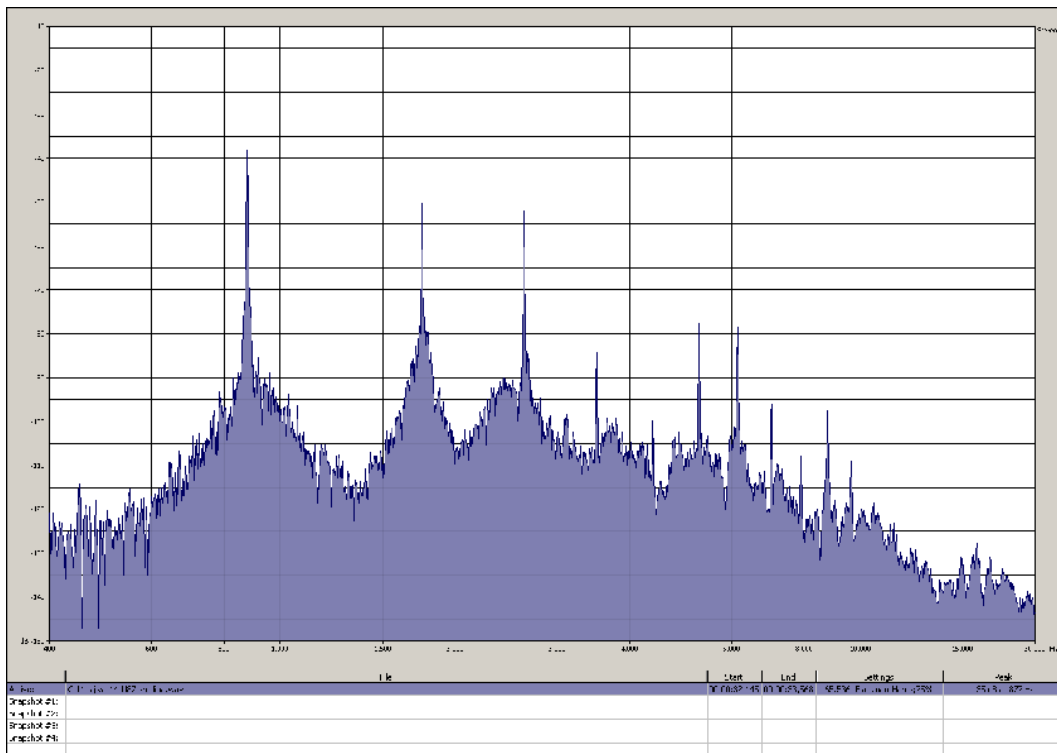
Slika 25.3: Frekvencijski spektar tona  $e'$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



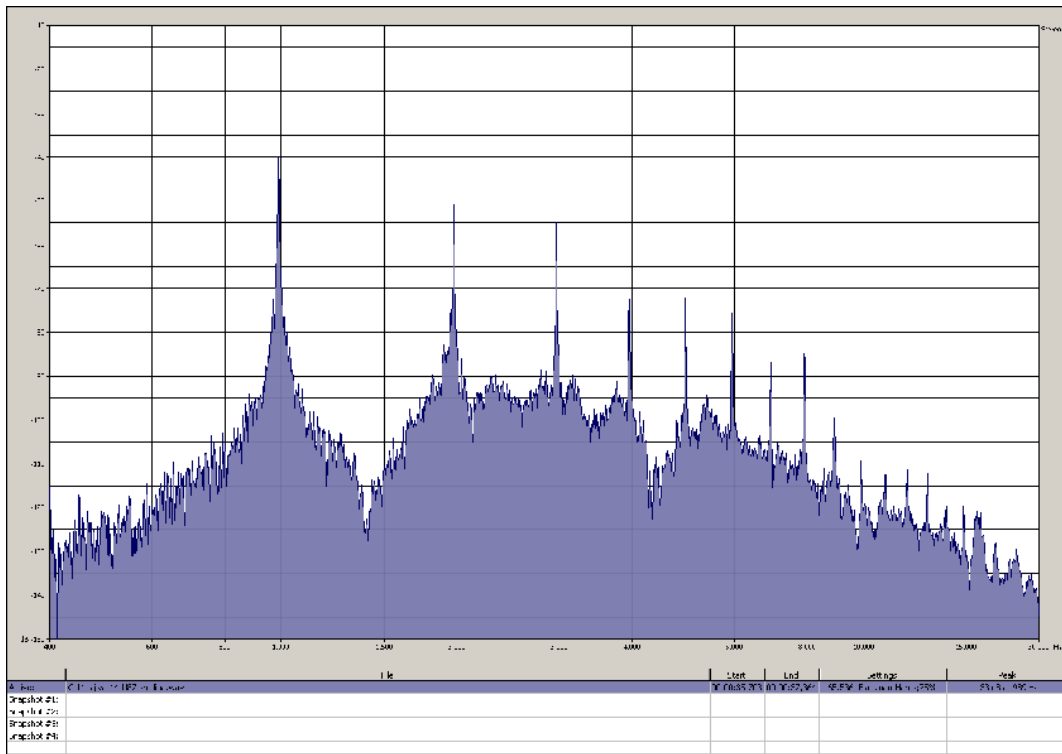
Slika 25.4: Frekvencijski spektar tona  $f'$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



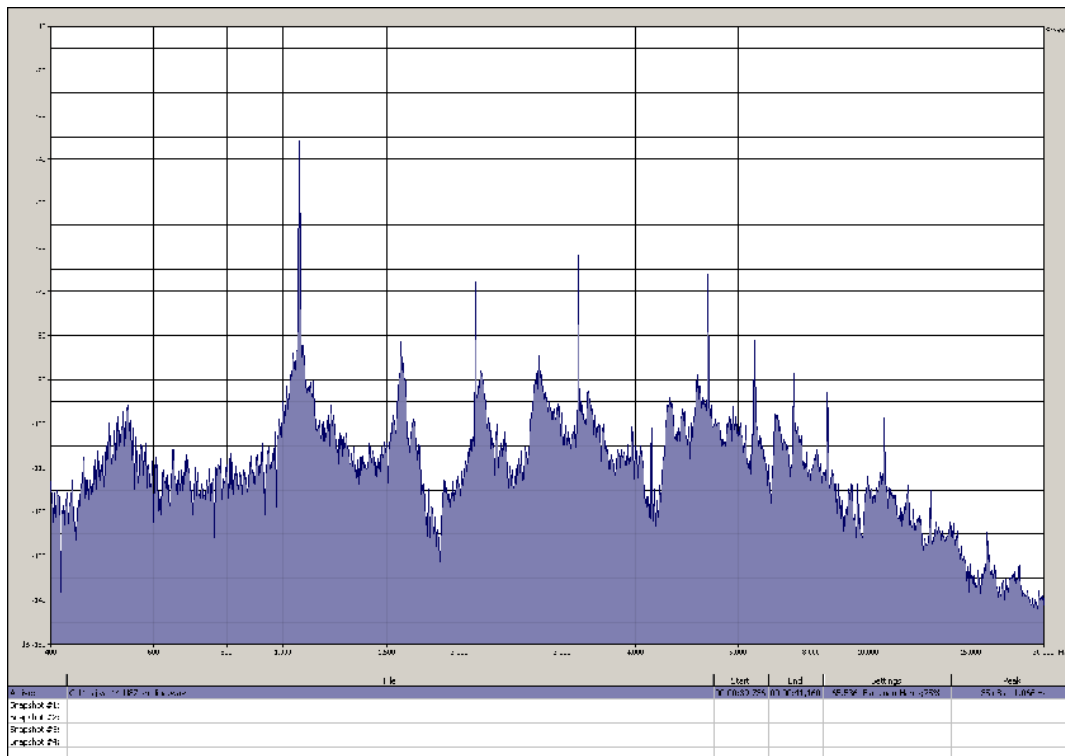
Slika 25.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



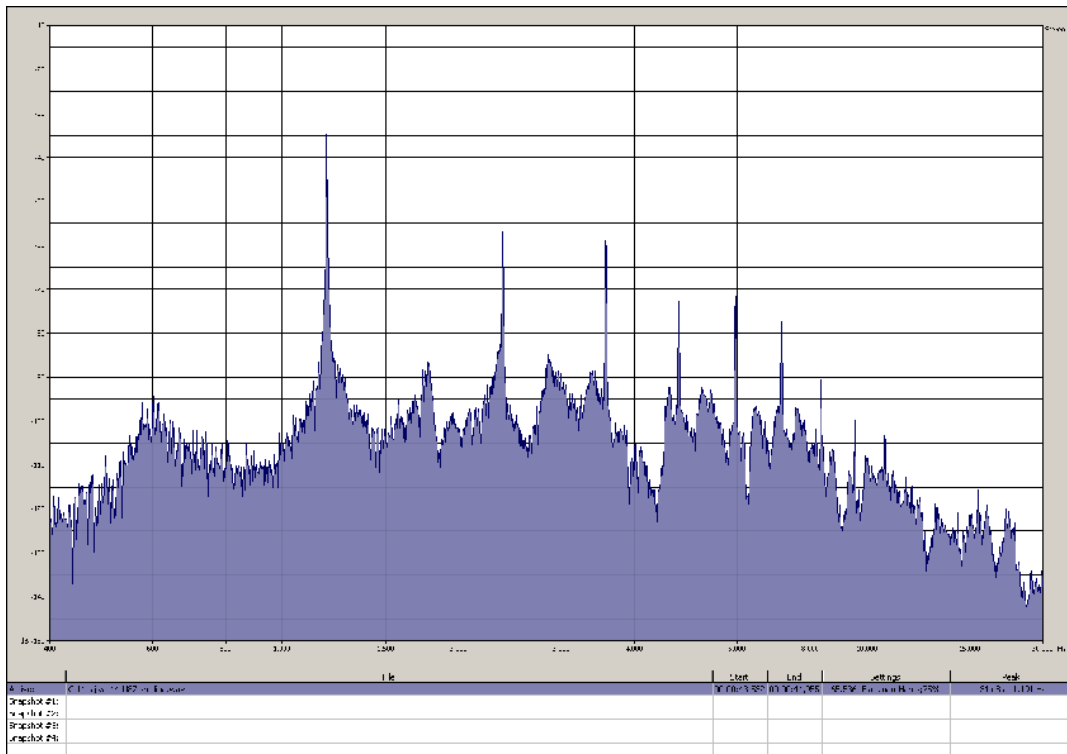
Slika 25.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



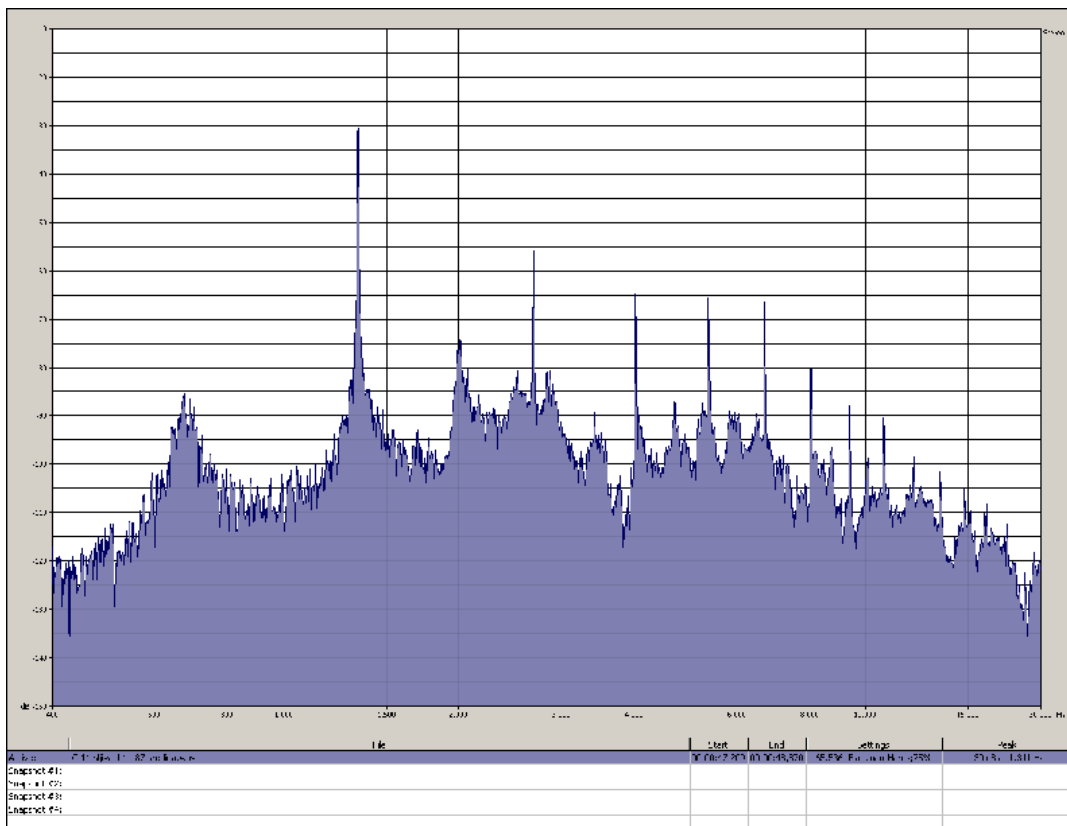
Slika 25.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



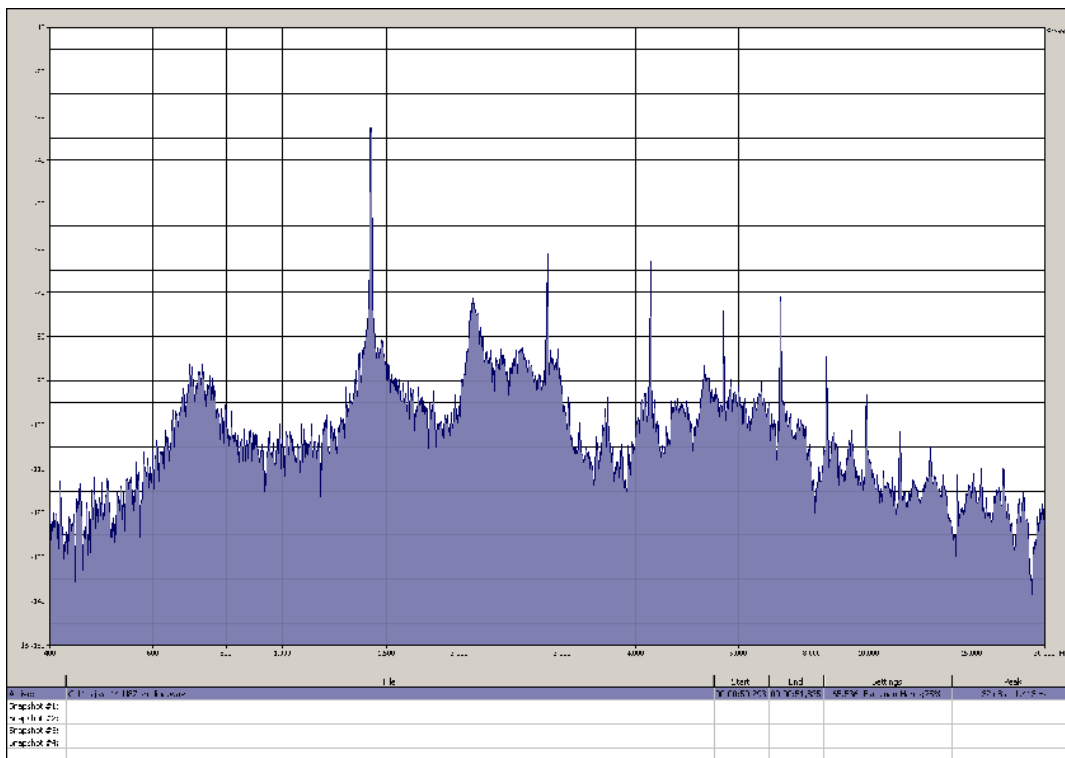
Slika 25.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



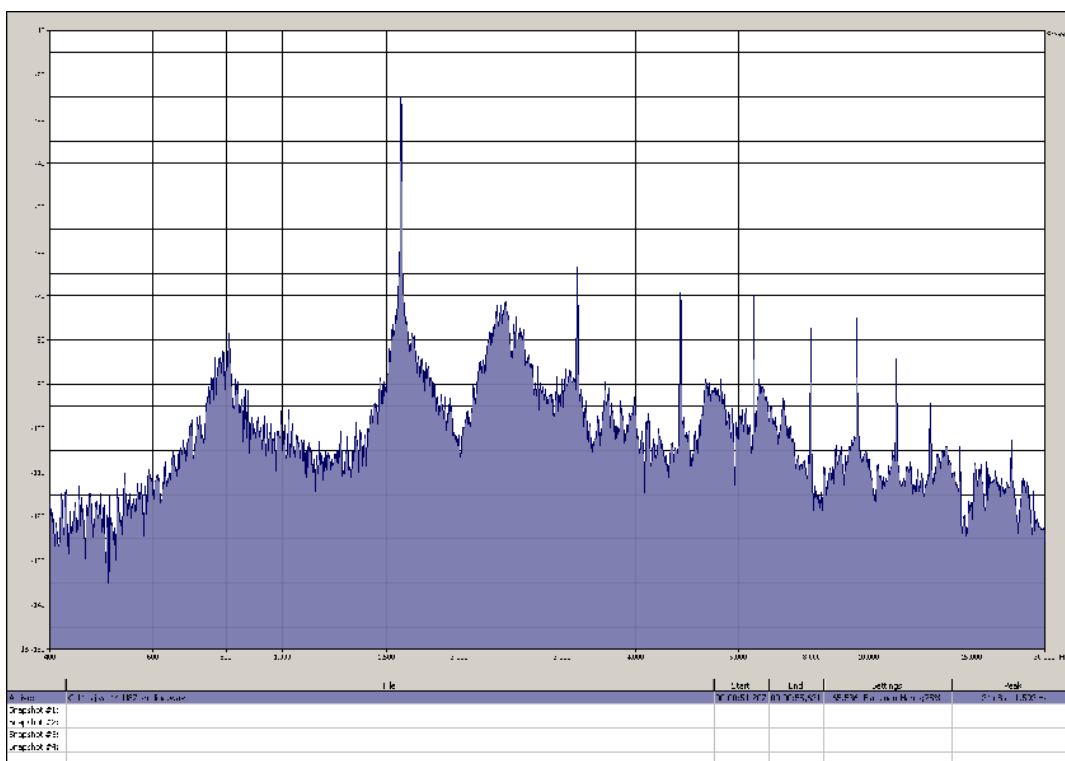
Slika 25.9: Frekvencijski spektr tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 25.10: Frekvencijski spektr tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)

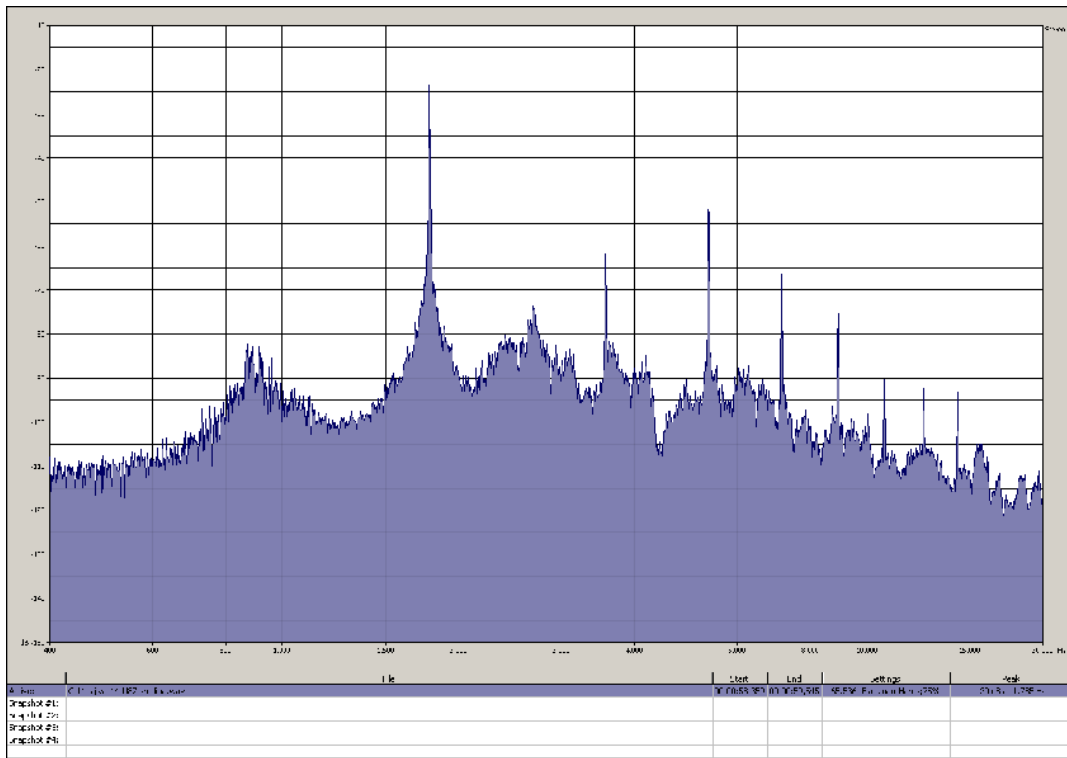


Slika 25.11: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)

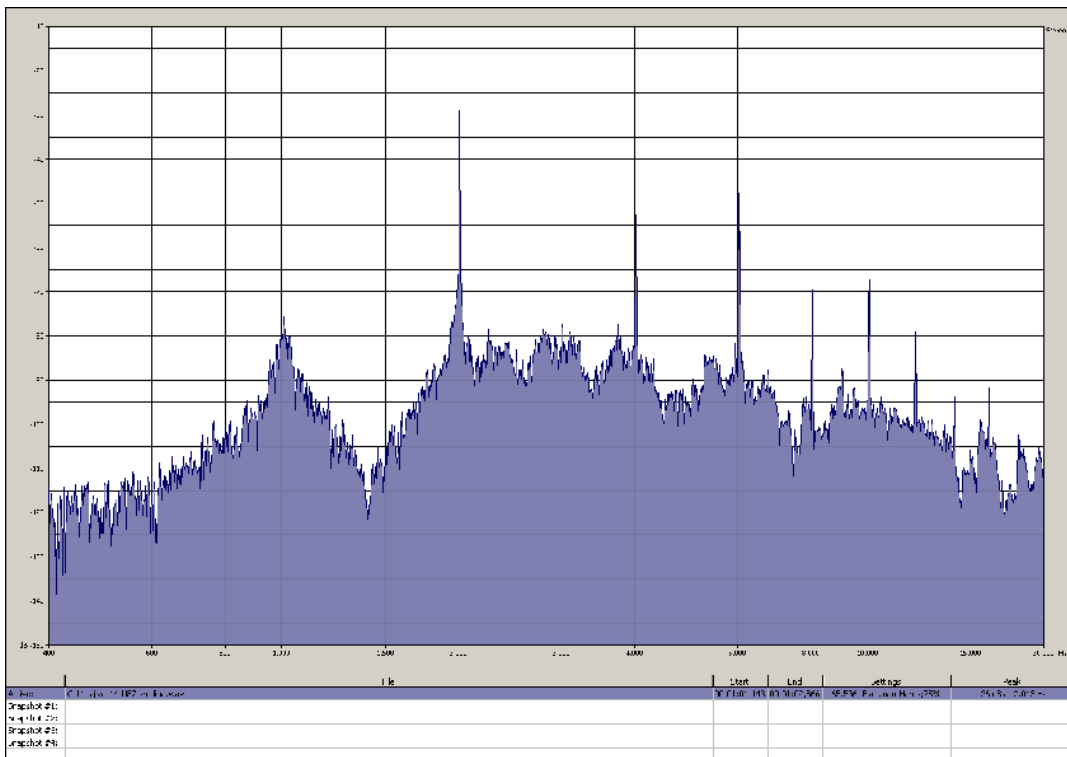


Slika 25.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)

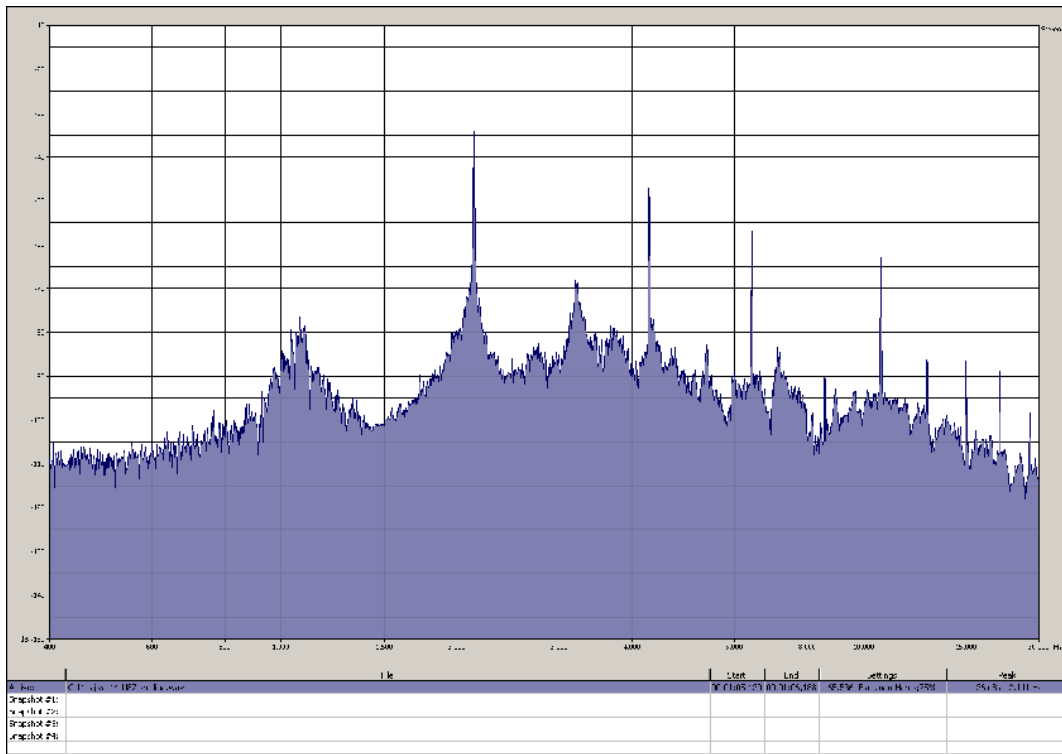




Slika 25.13: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)

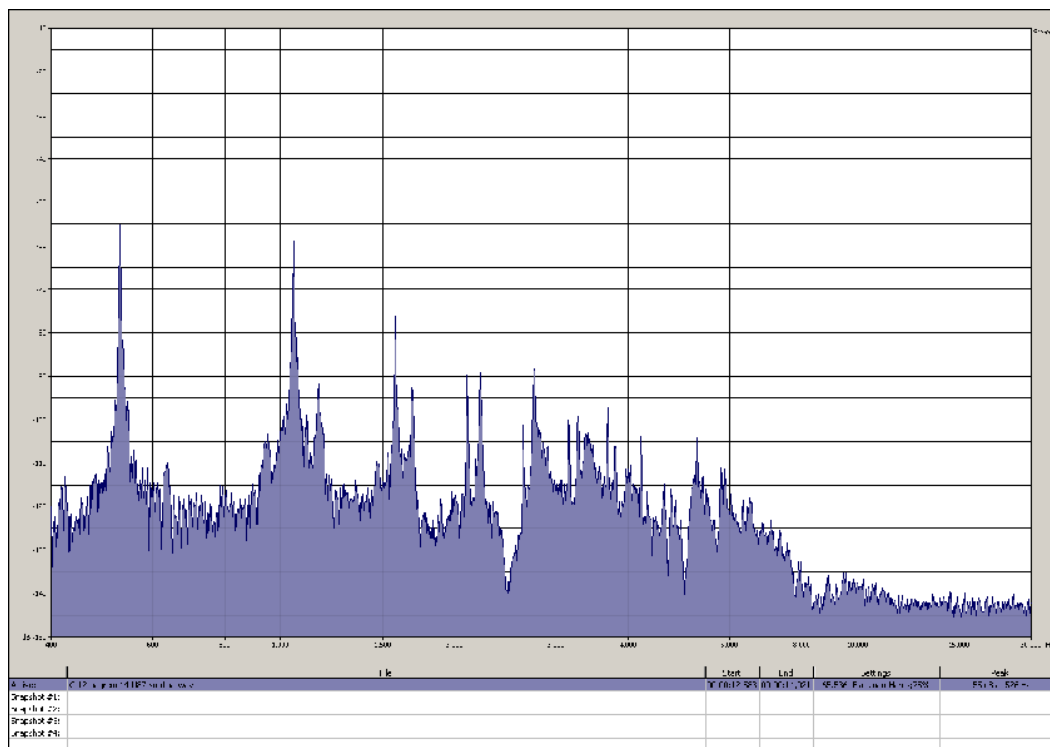


Slika 25.14: Frekvenčni spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14$  mm)

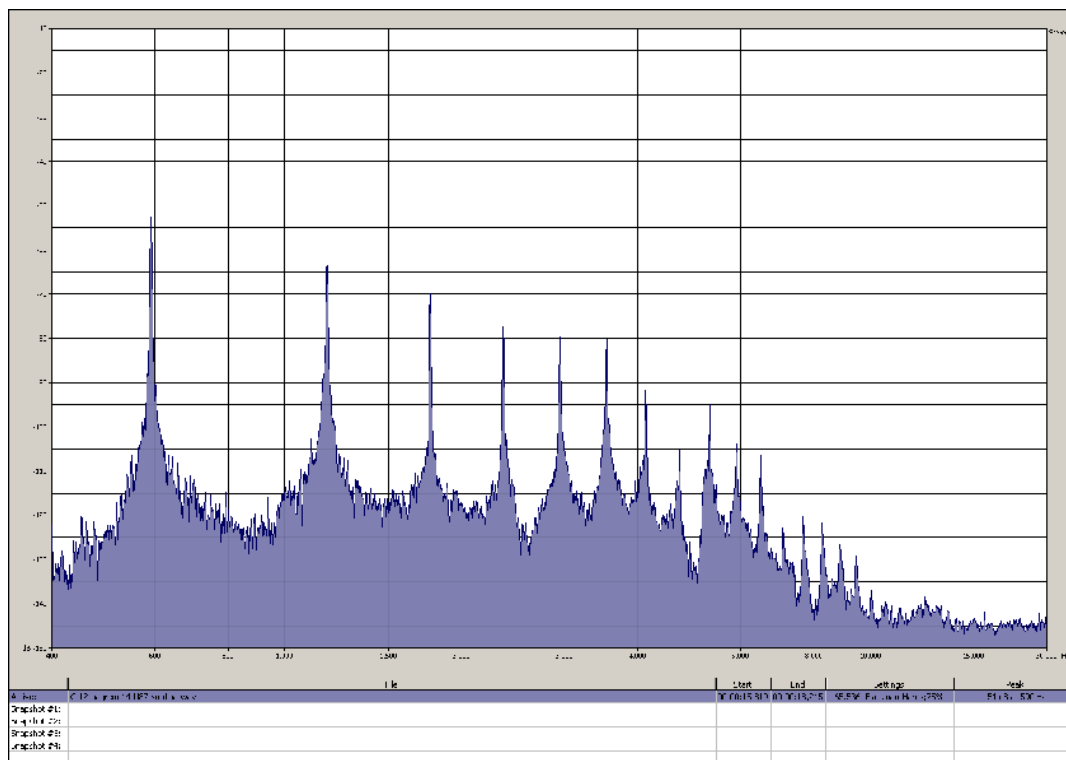


*Slika 25.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 11 (šljiva 2,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )*

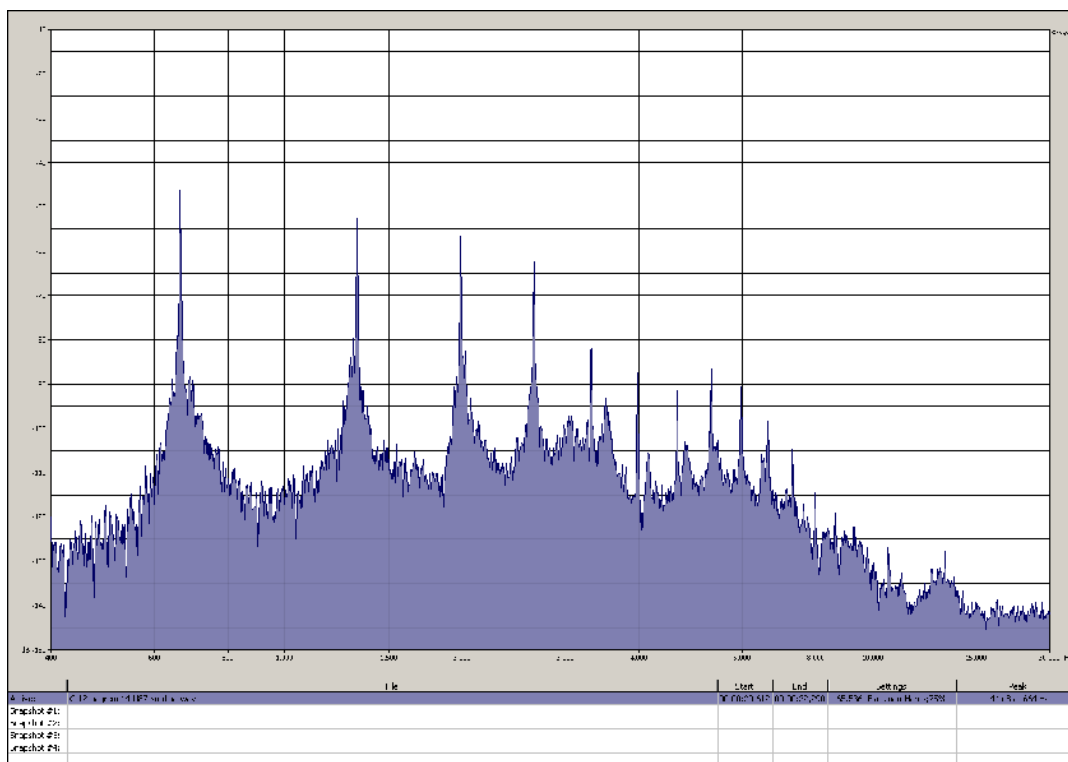
DODATAK 26: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



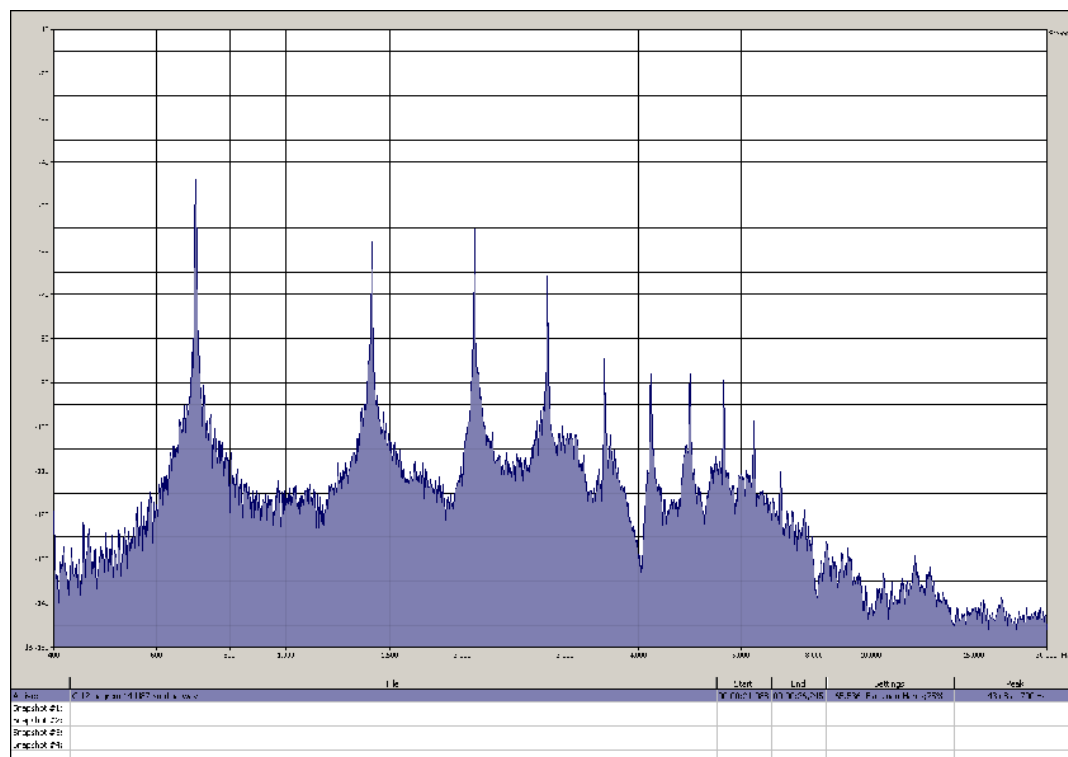
Slika 26.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



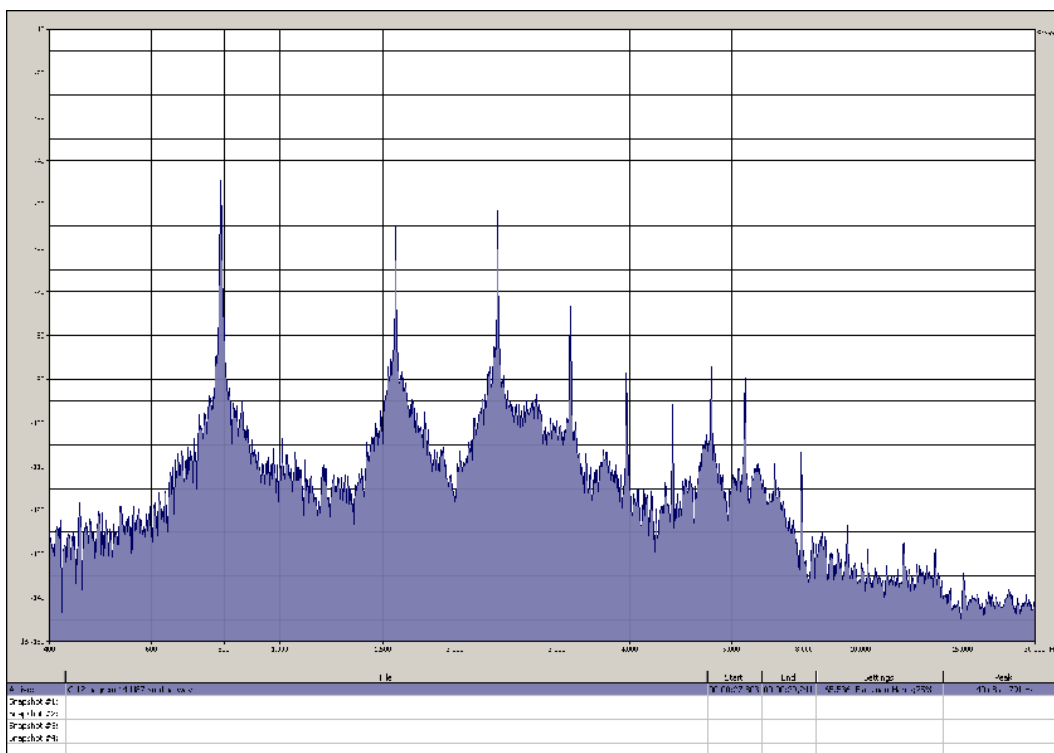
Slika 26.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



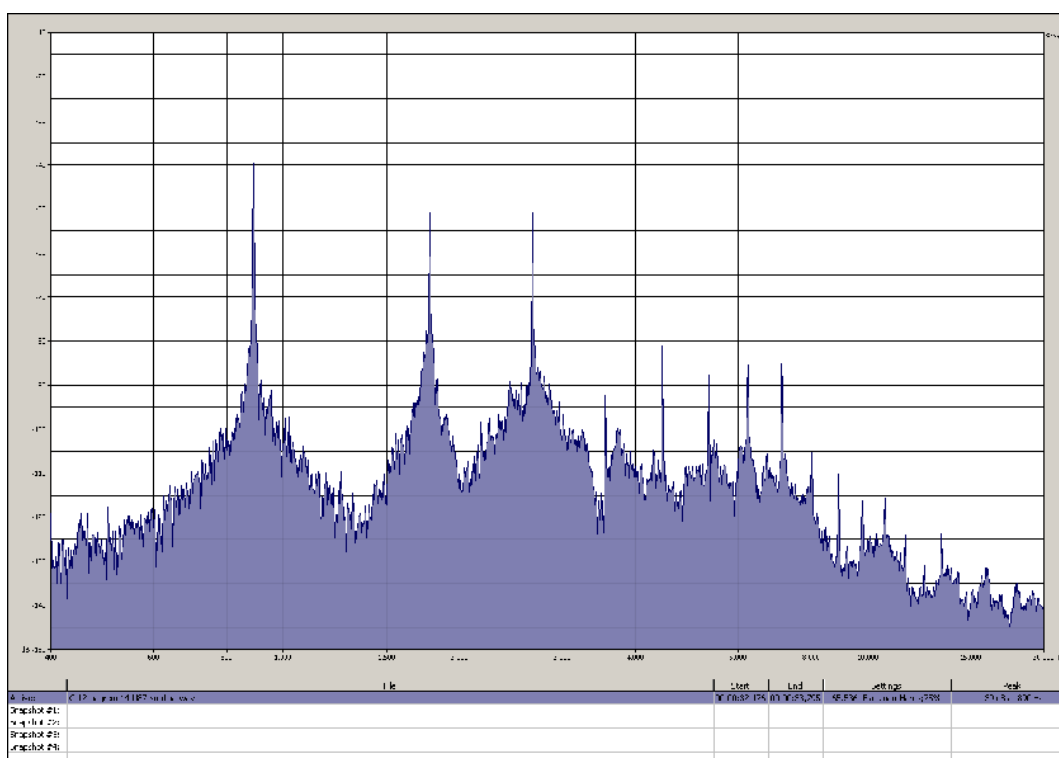
Slika 26.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



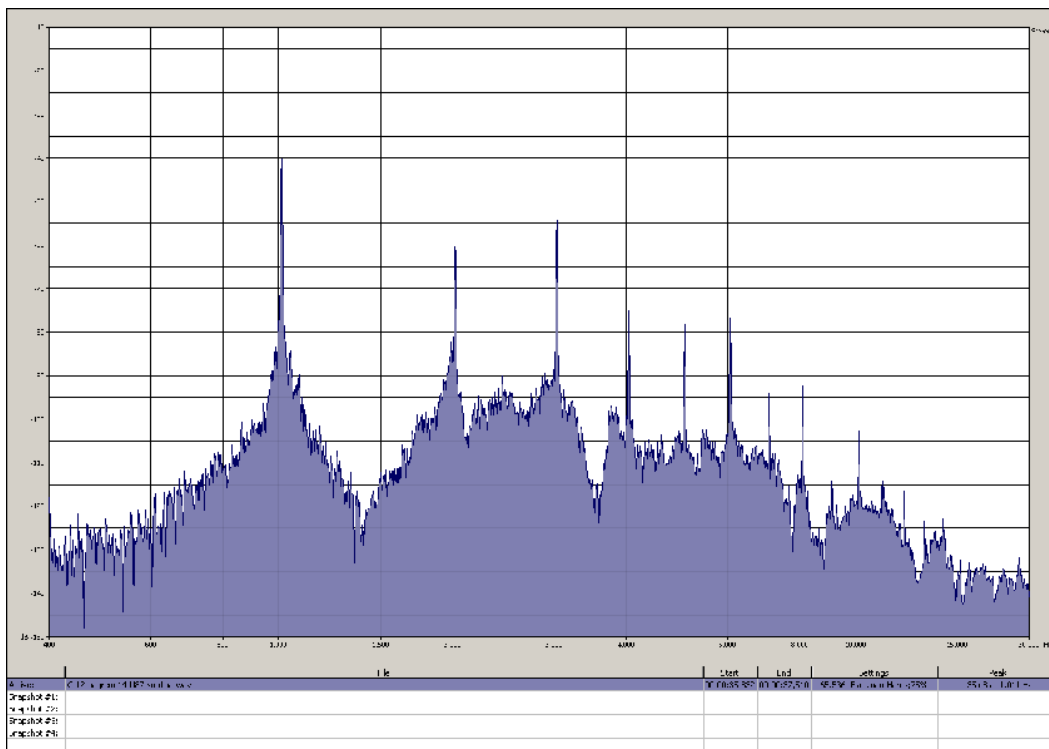
Slika 26.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



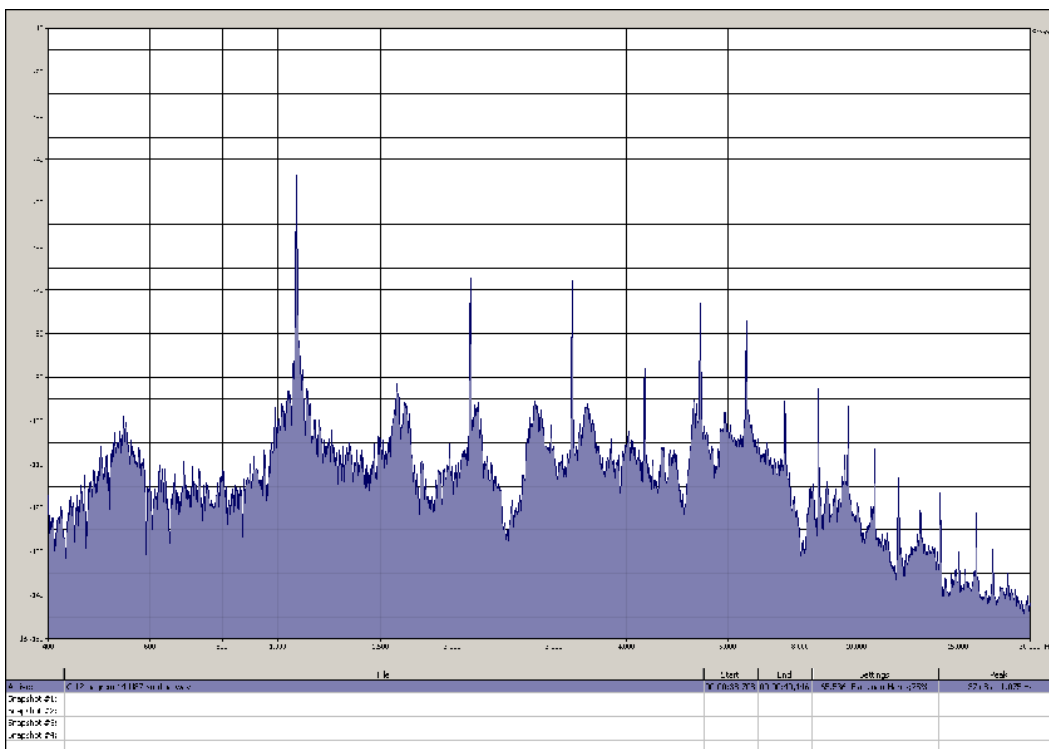
Slika 26.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



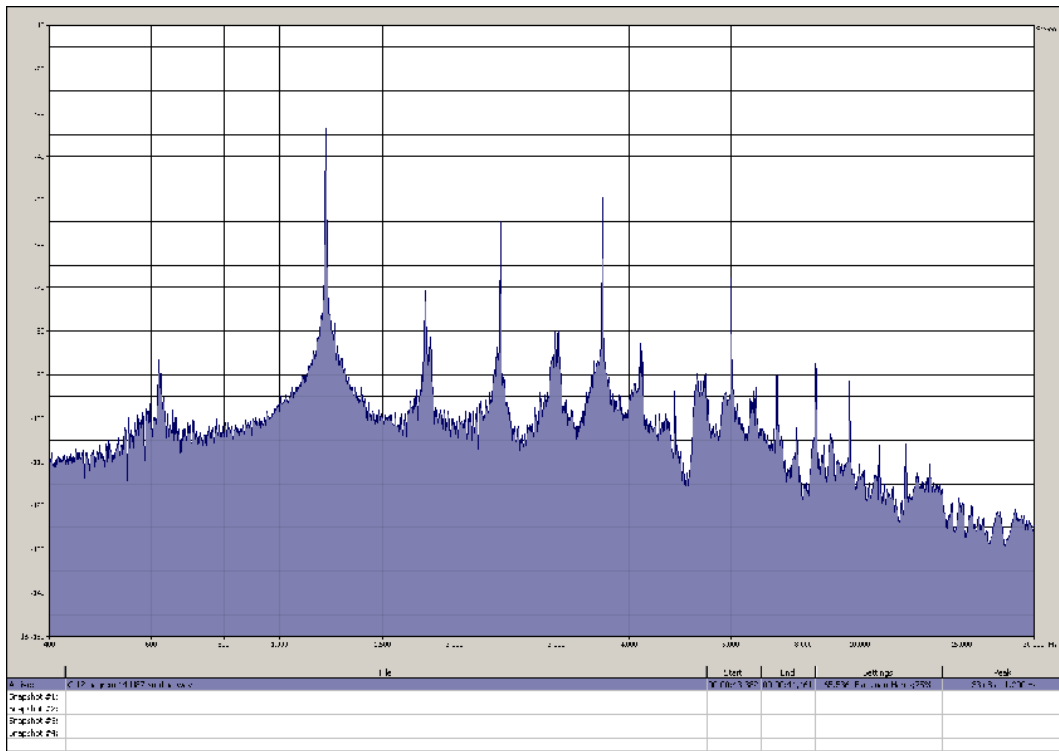
Slika 26.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



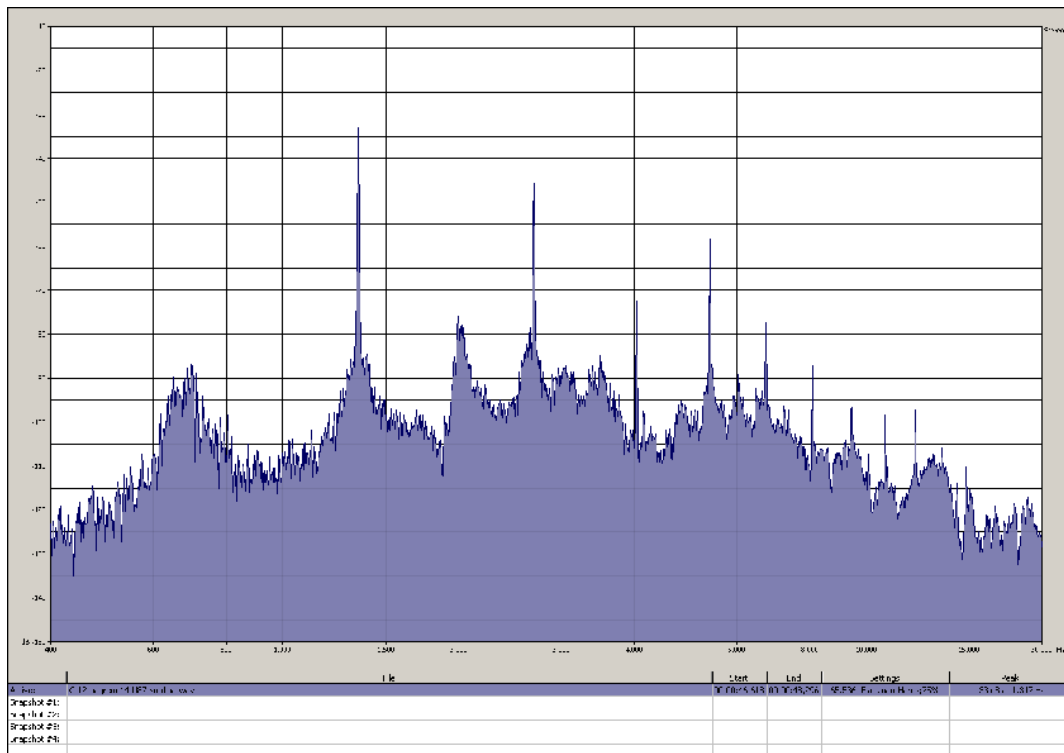
Slika 26.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



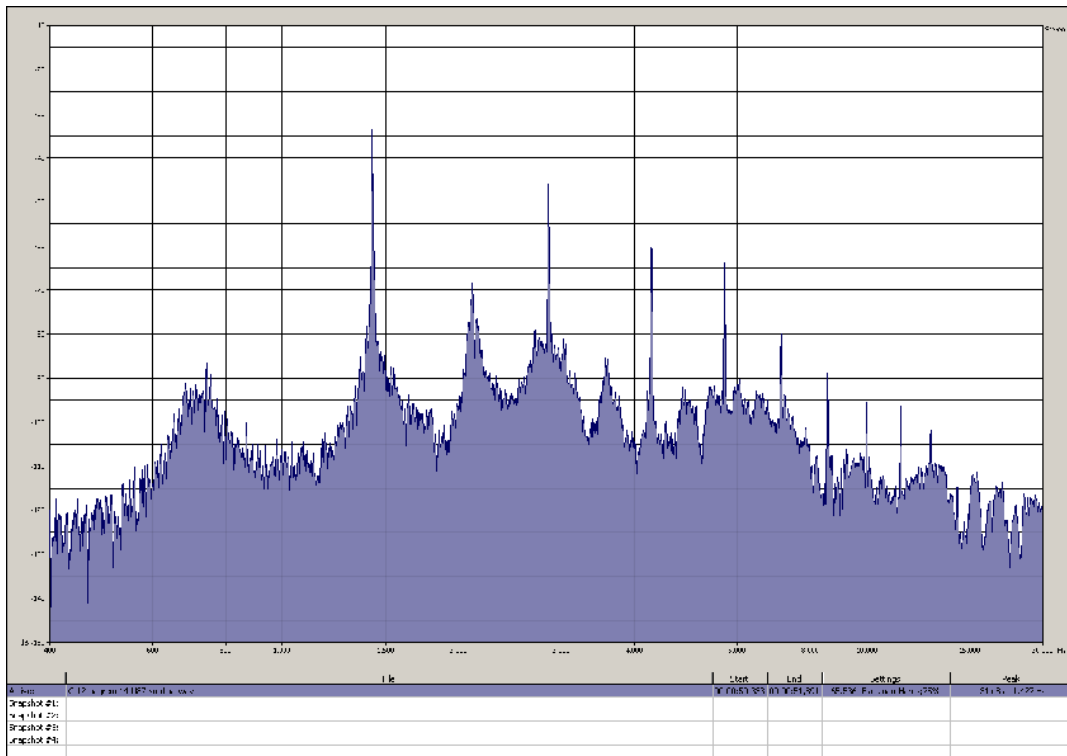
Slika 26.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



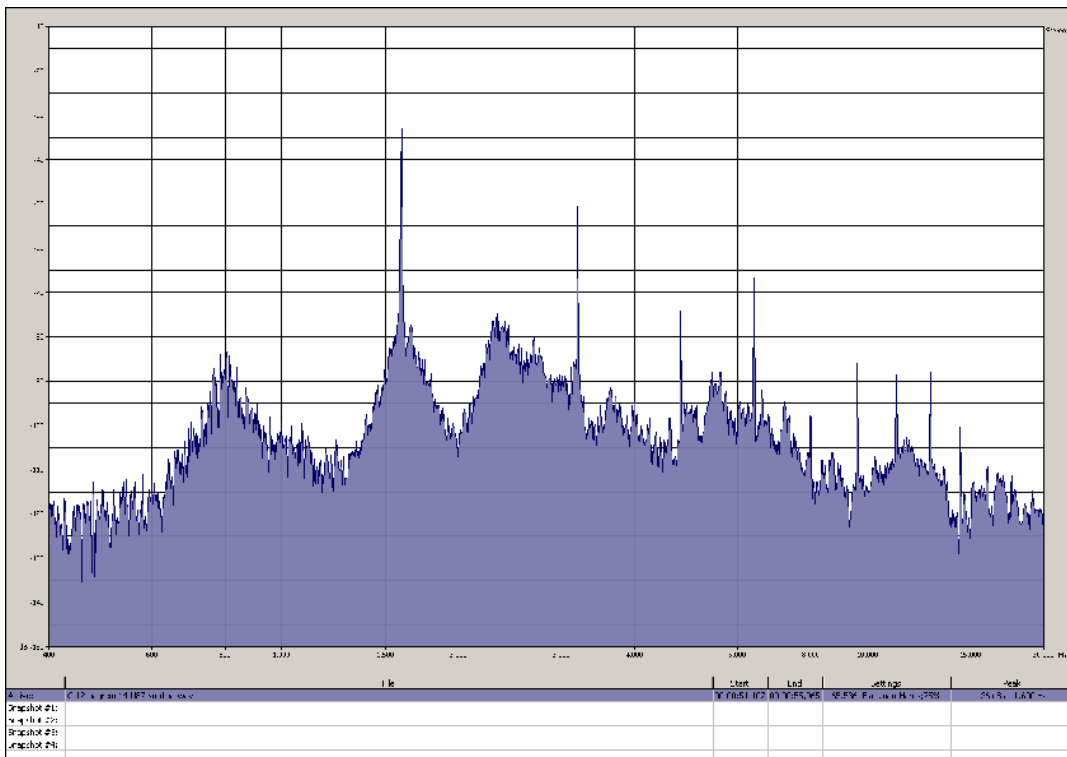
Slika 26.9: Frekvencijski spektar tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 26.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)

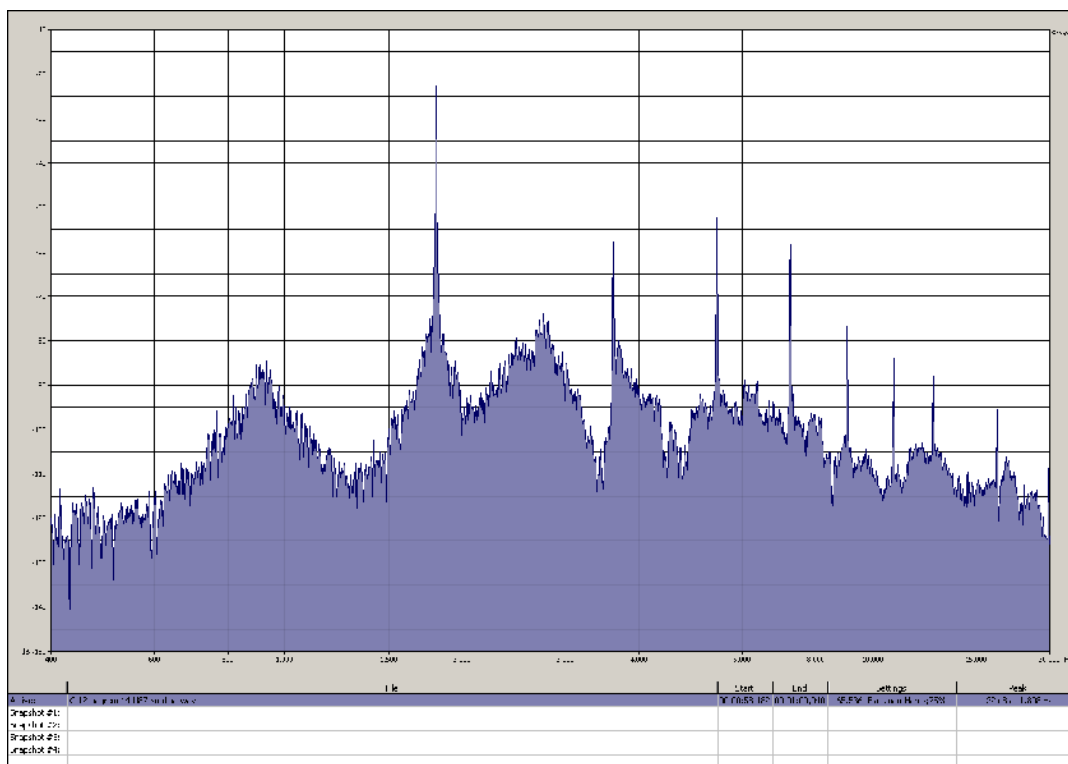


Slika 26.11: Frekvenjski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)

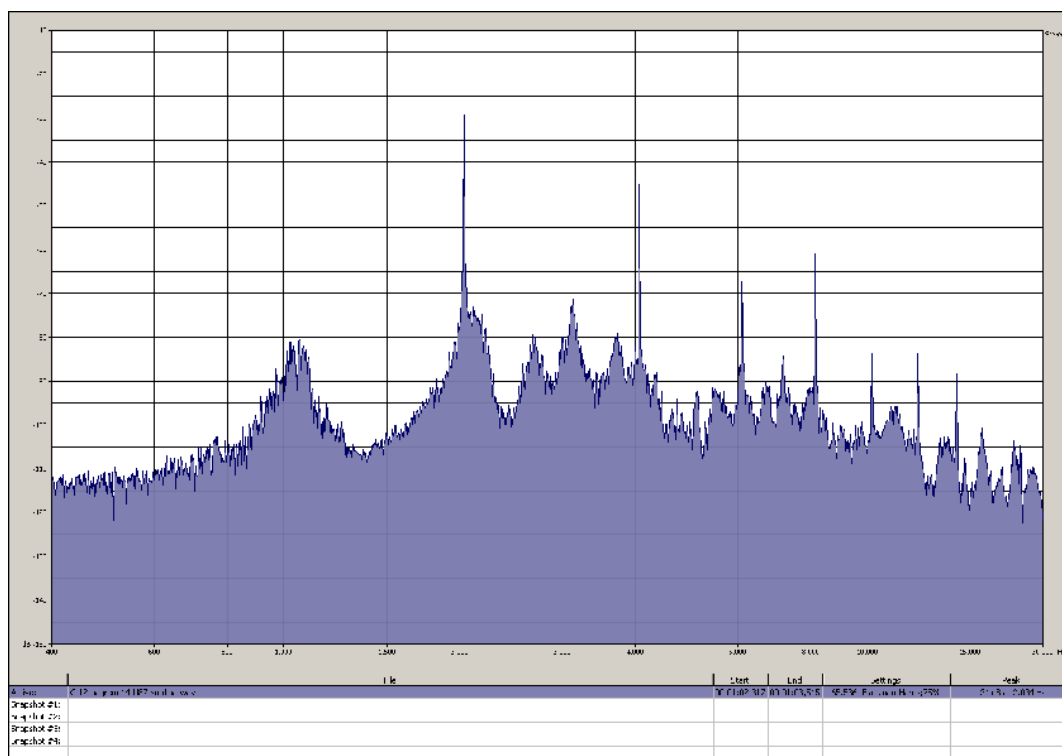


Slika 26.12: Frekvenjski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)

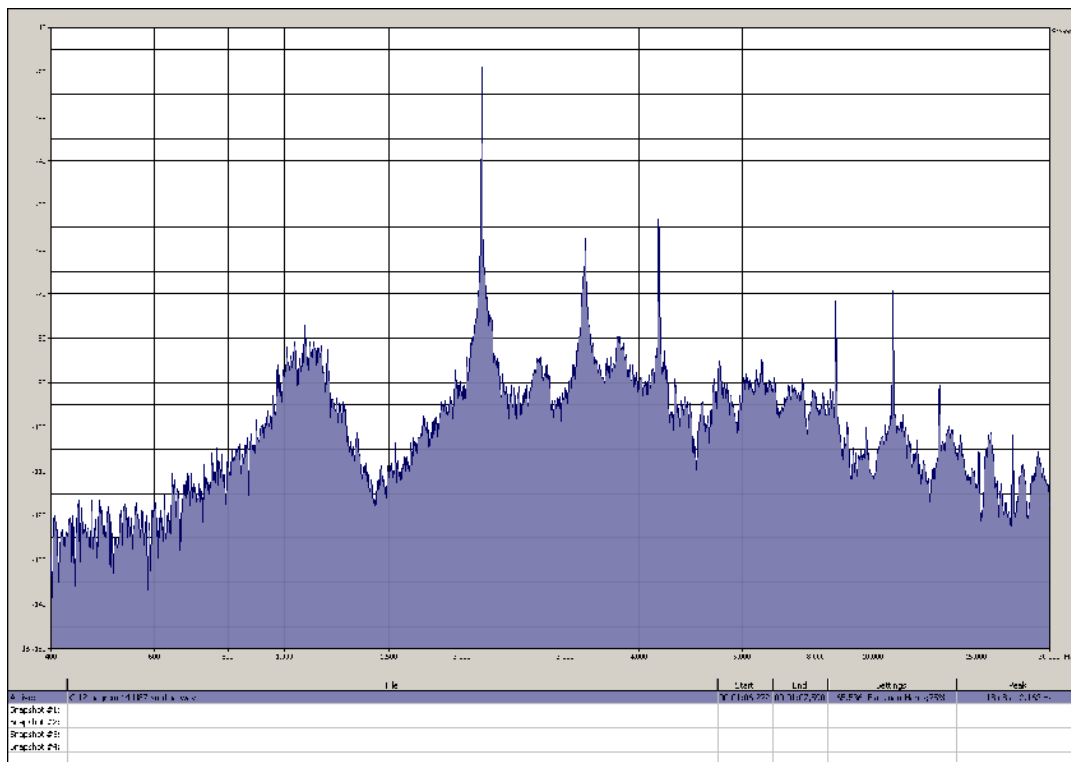




Slika 26.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)

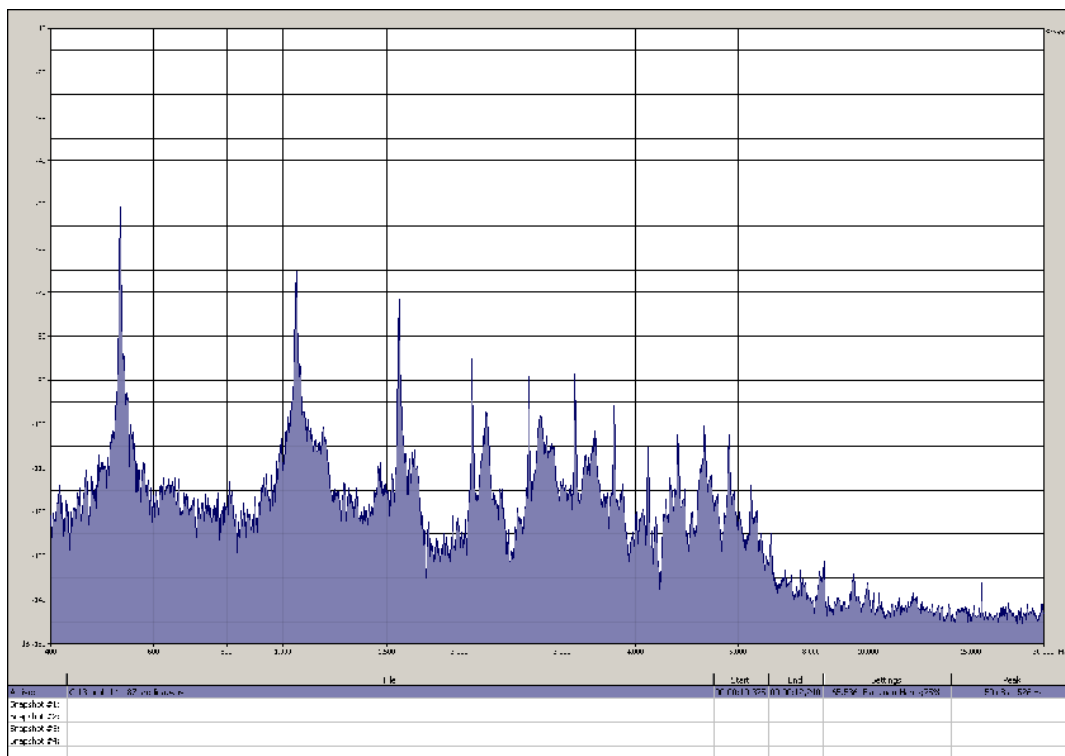


Slika 26.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14$  mm)

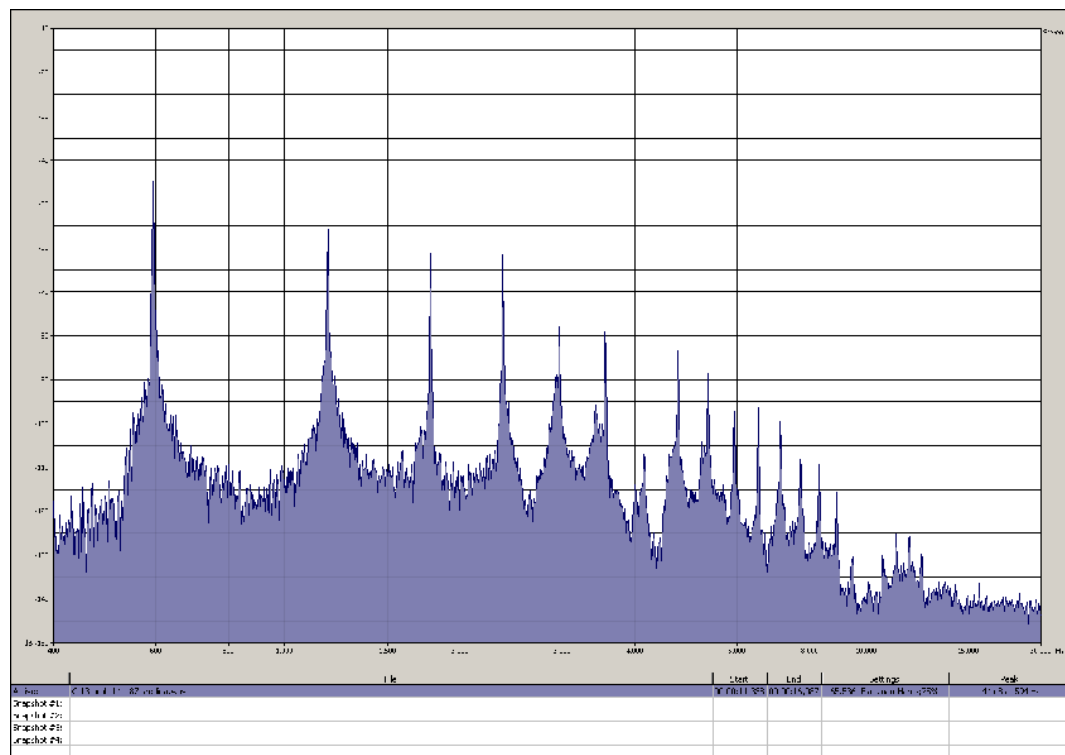


Slika 26.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 12 (bagrem 5,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

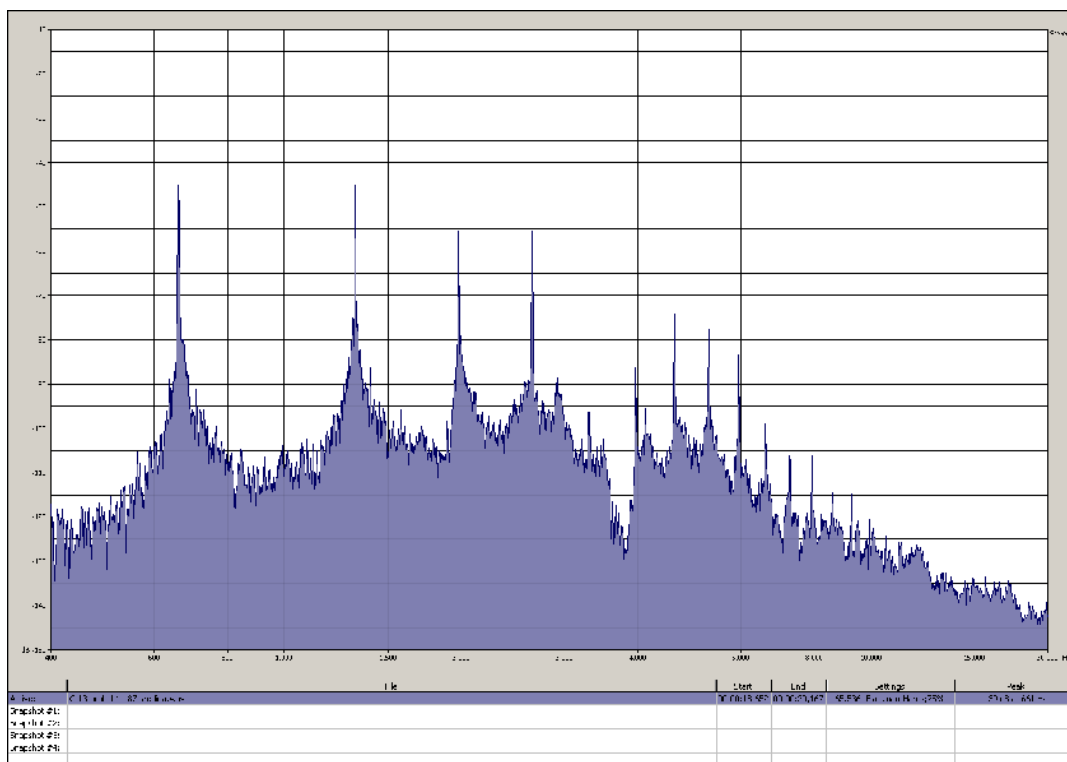
DODATAK 27: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



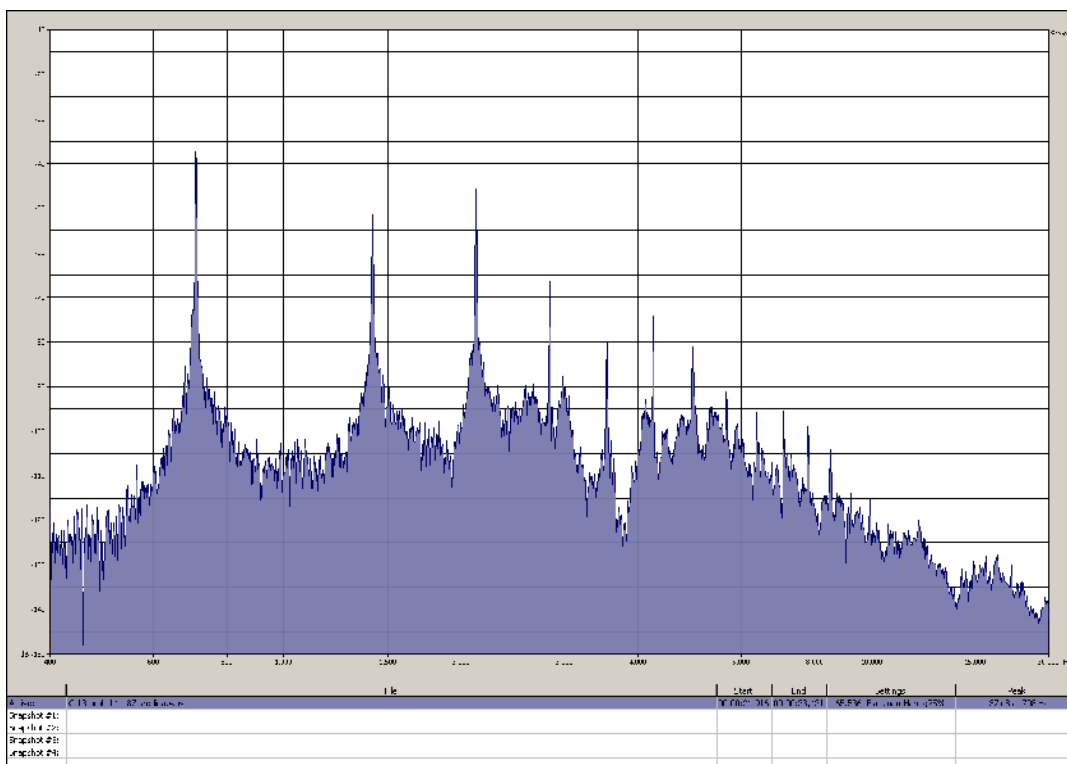
Slika 27.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



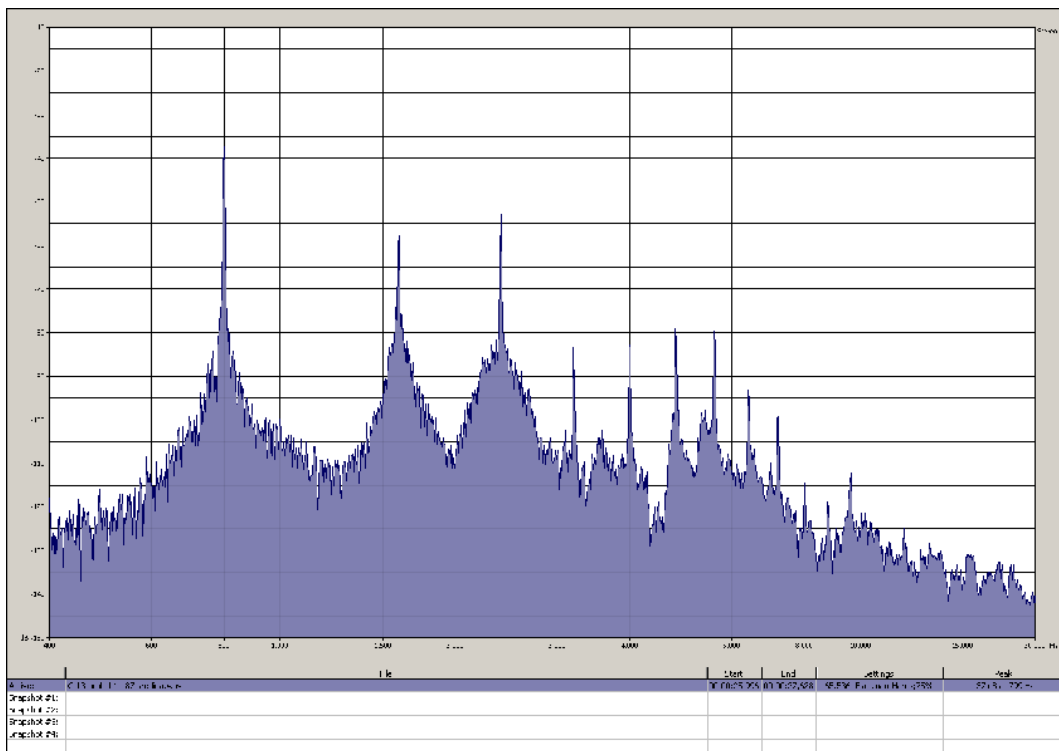
Slika 27.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



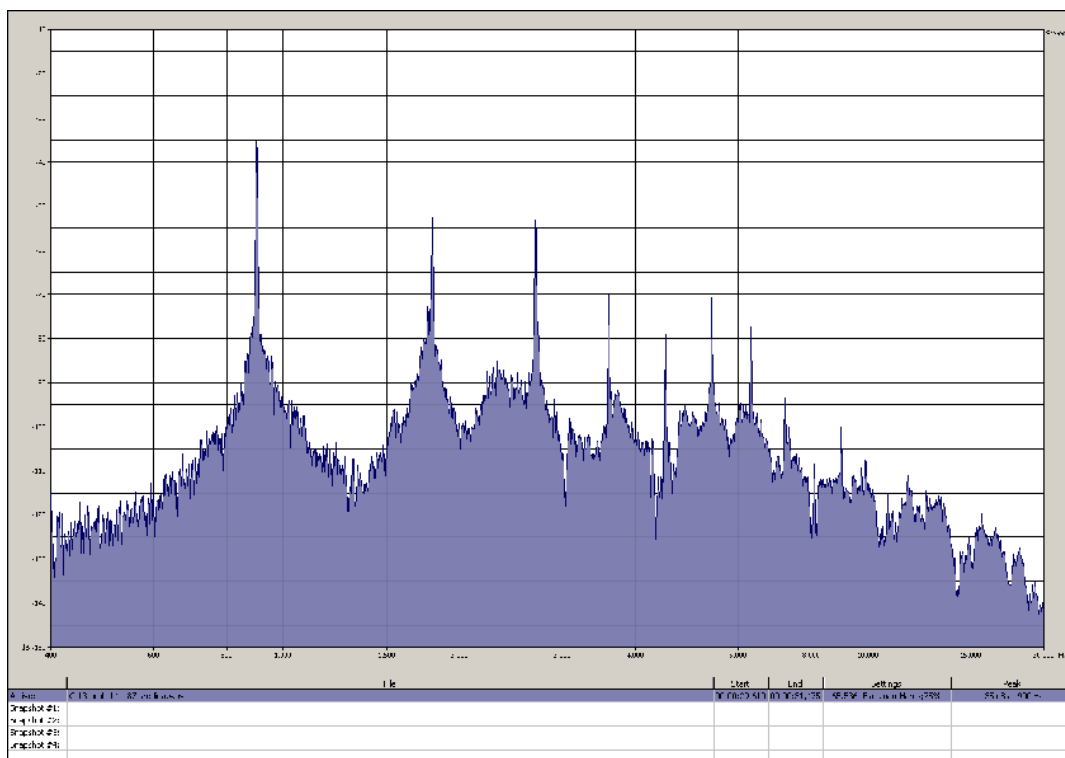
*Slika 27.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)*



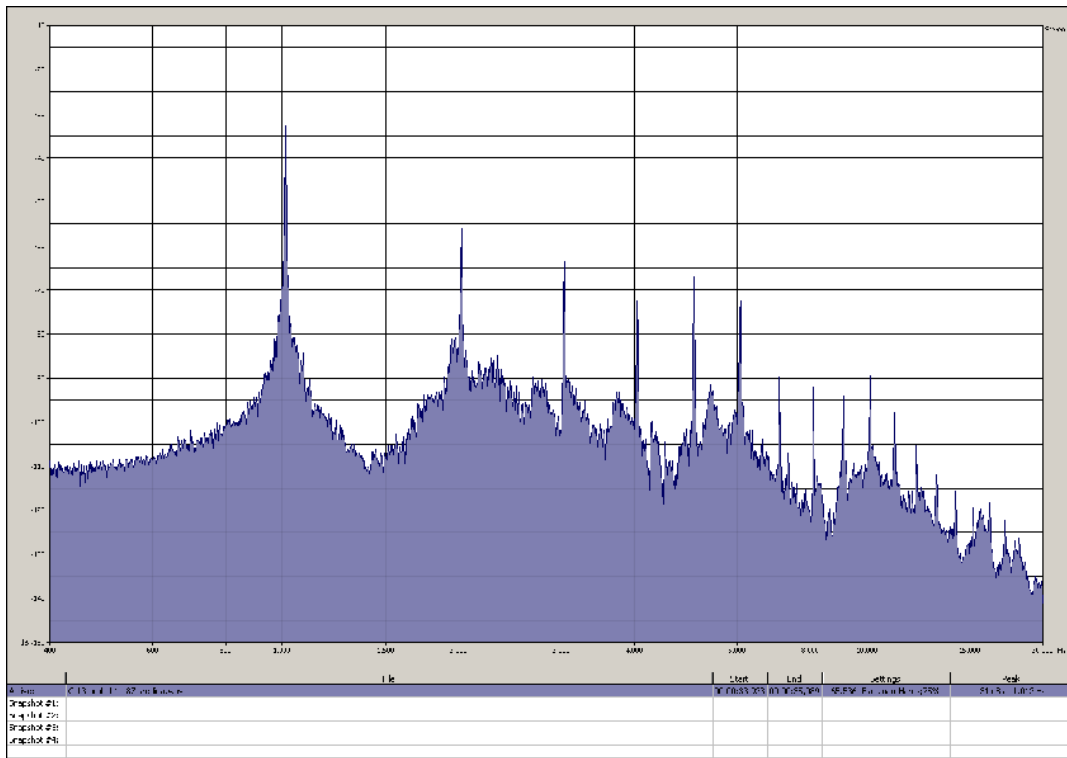
*Slika 27.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)*



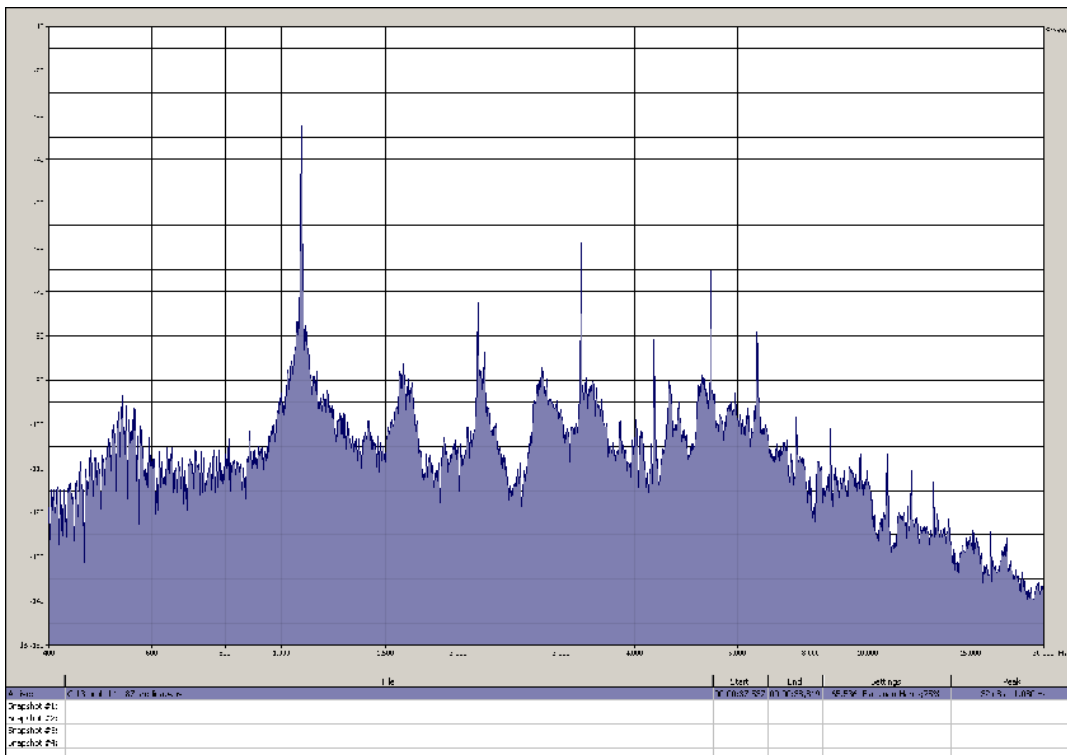
Slika 27.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



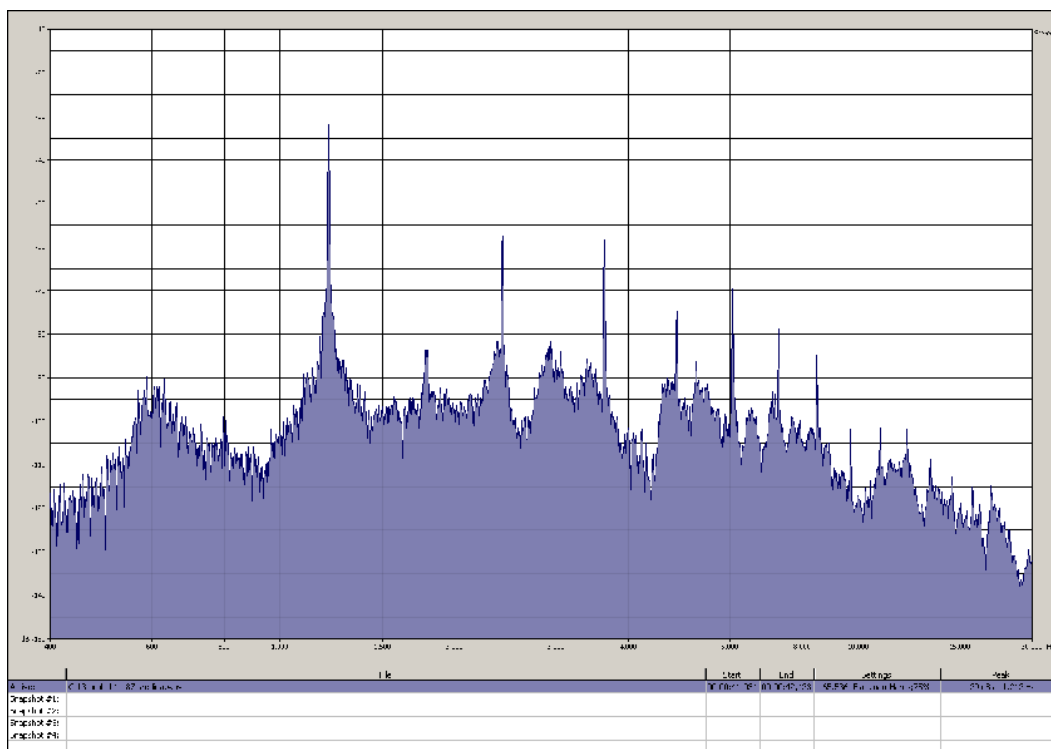
Slika 27.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



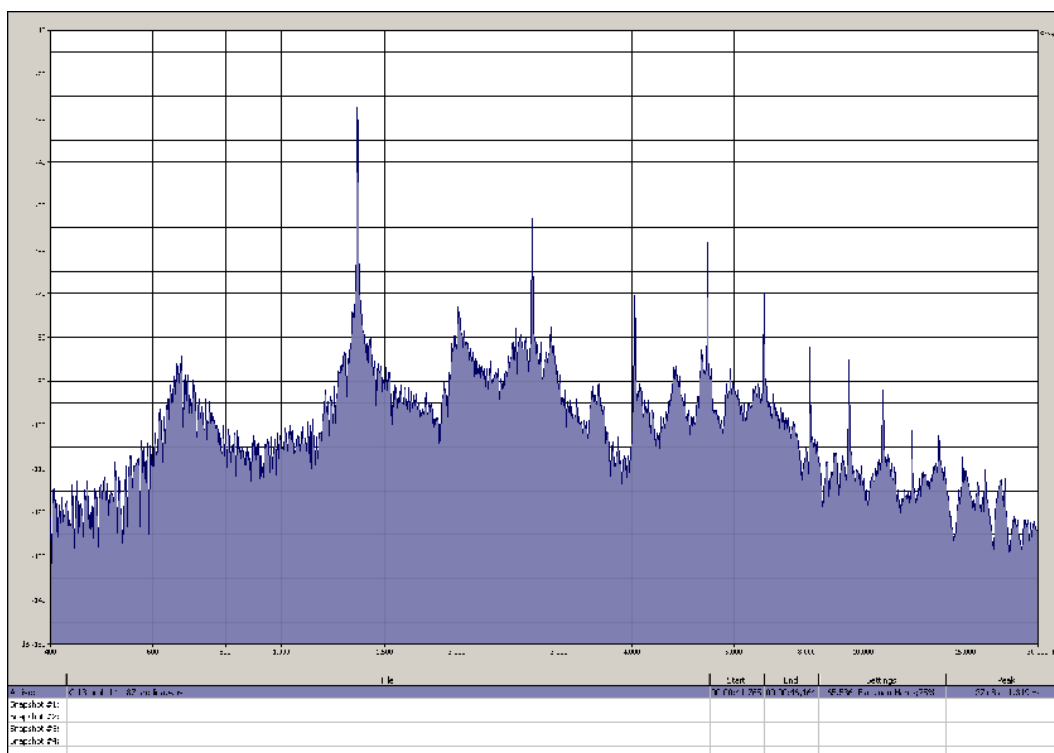
Slika 27.7: Frekvenčni spekter tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



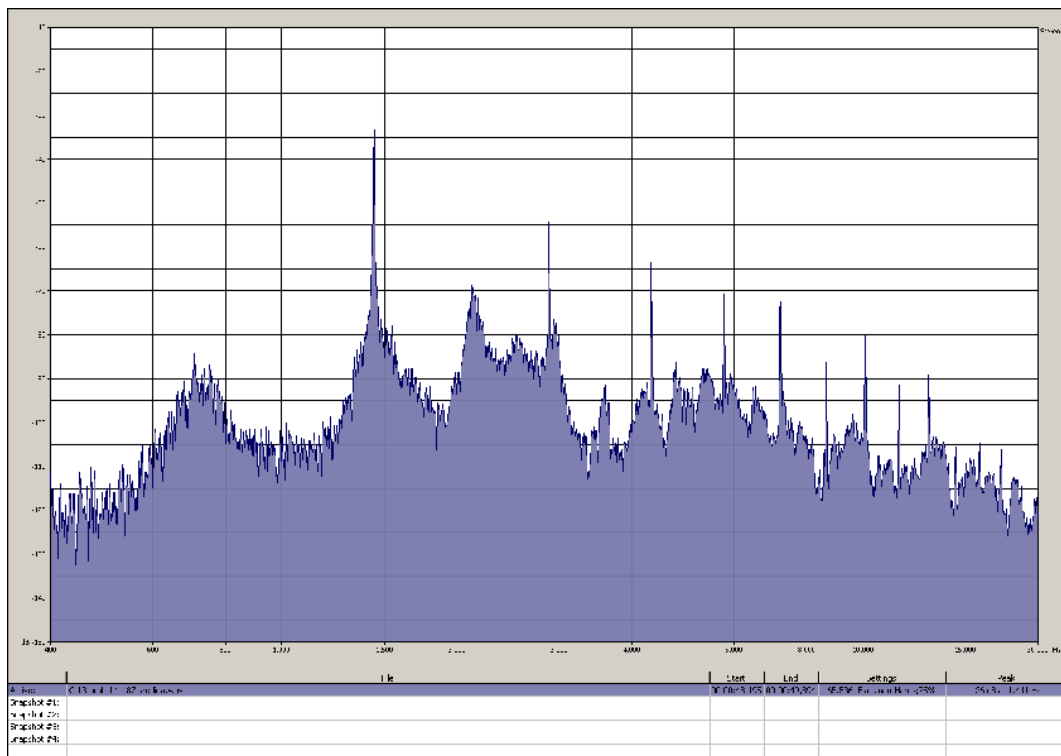
Slika 27.8: Frekvenčni spekter tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



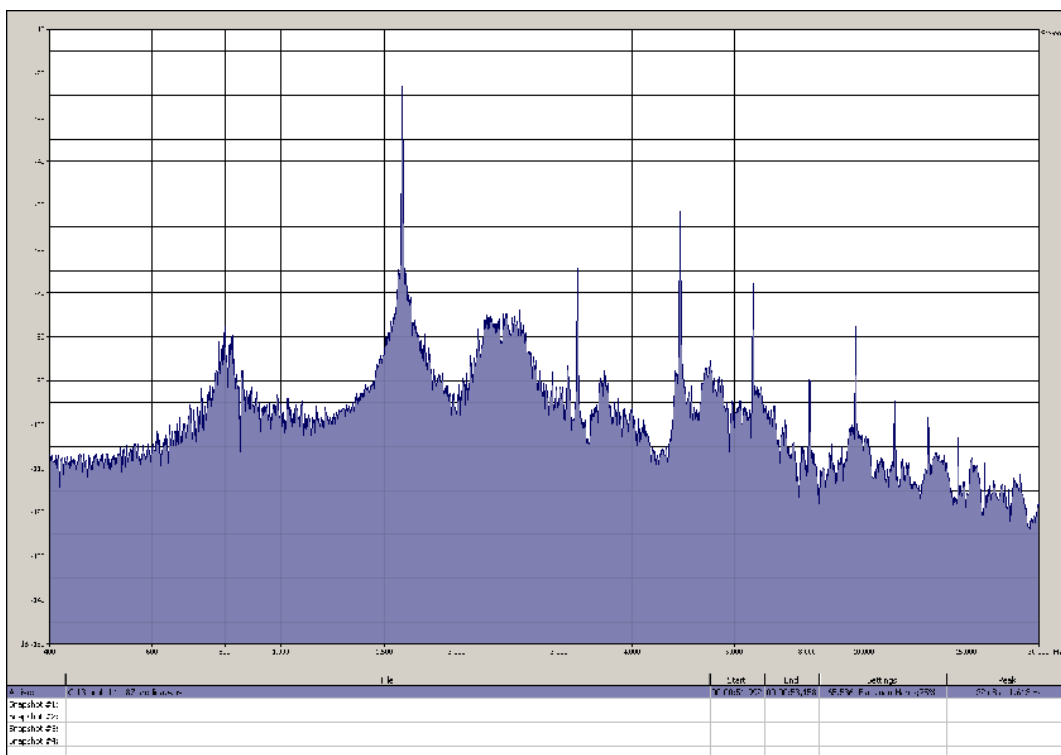
*Slika 27.9: Frekvencijski spektar tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)*



*Slika 27.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)*



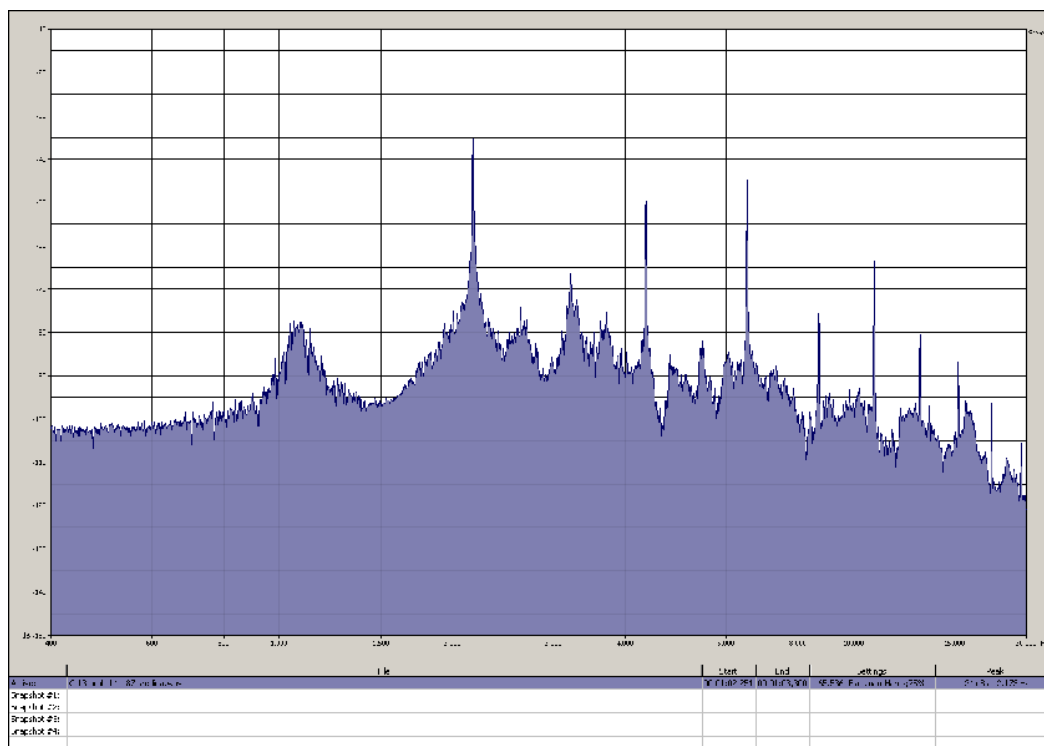
Slika 27.11: Frekvencijski spekter tona  $P^2$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 27.12: Frekvencijski spekter tona  $G^3$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14$  mm)

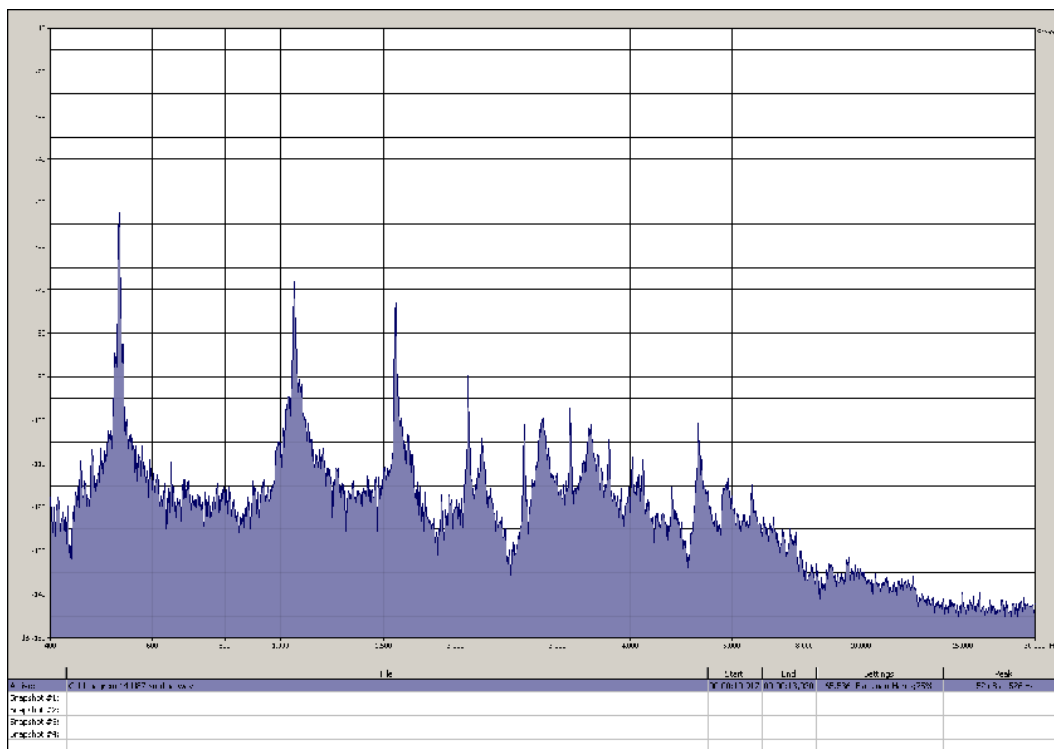




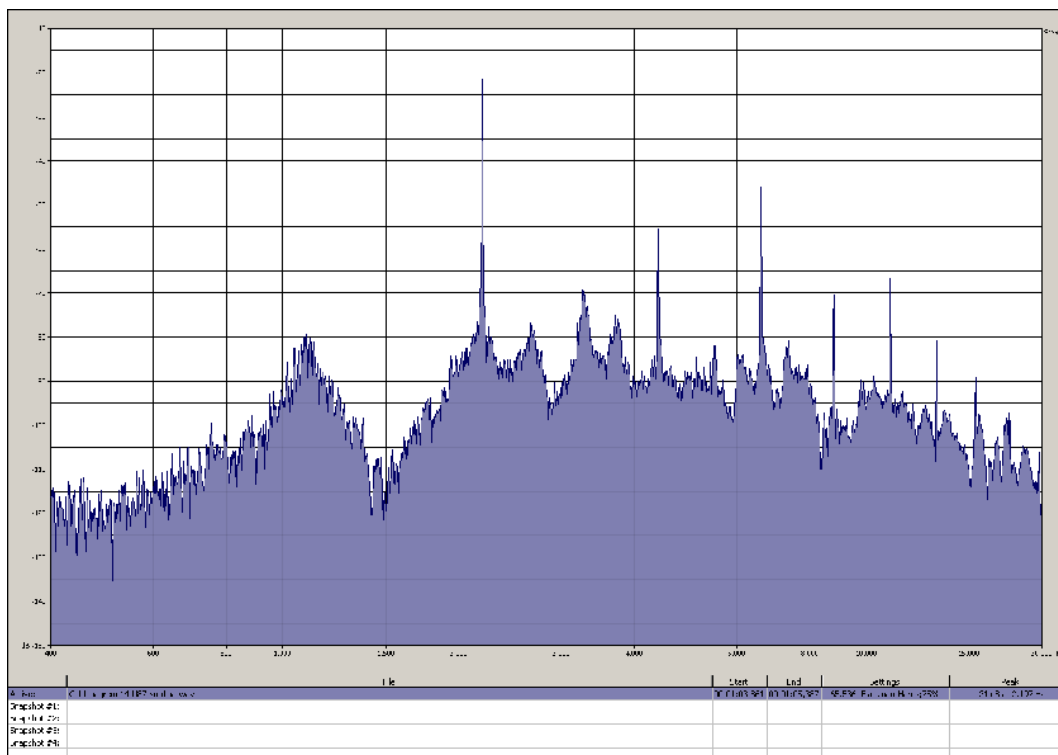


Slika 27.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 13 (orah,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

DODATAK 28: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 14 (bagrem 6,  $\Phi = 14$  mm)

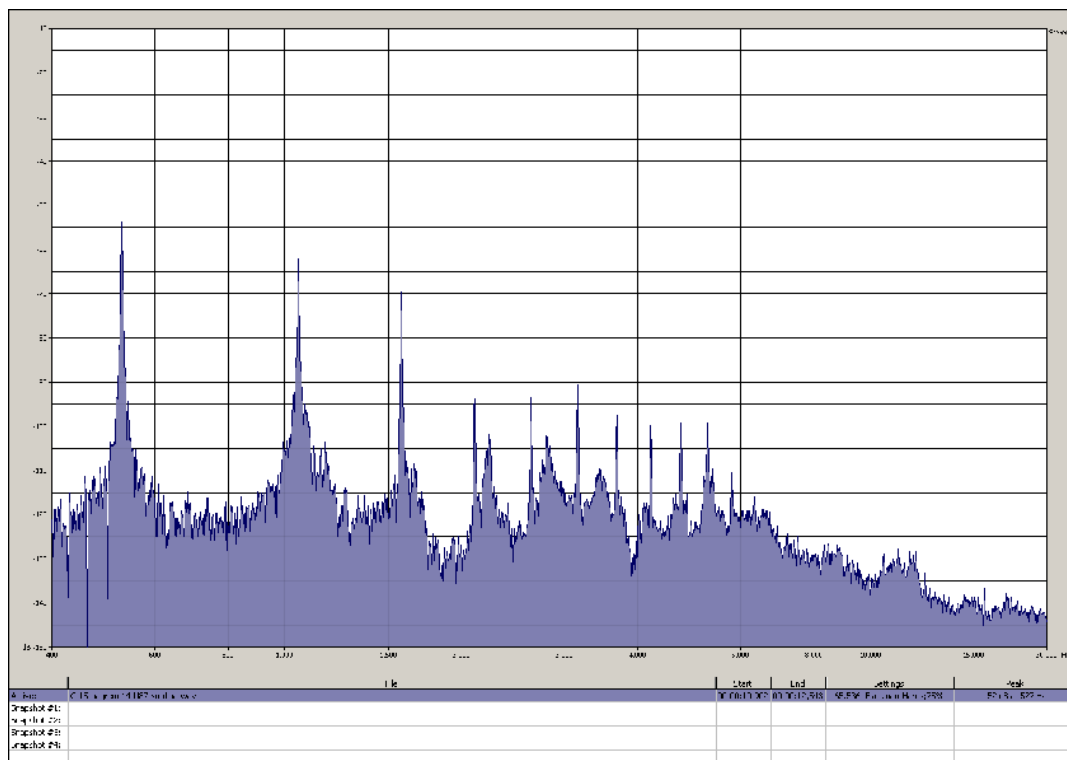


Slika 28.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 14 (bagrem 6,  $\Phi = 14$  mm)

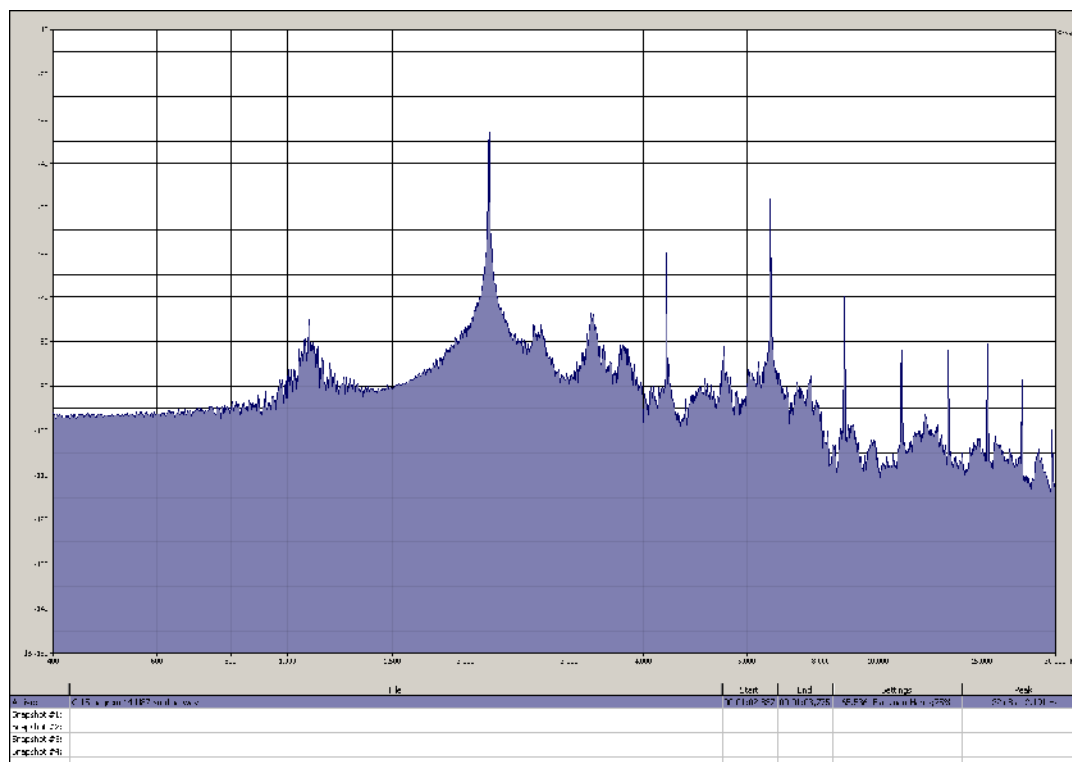


Slika 28.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 14 (bagrem 6,  $\Phi = 14$  mm)

DODATAK 29: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 15 (bagrem 7,  $\Phi = 14$  mm)

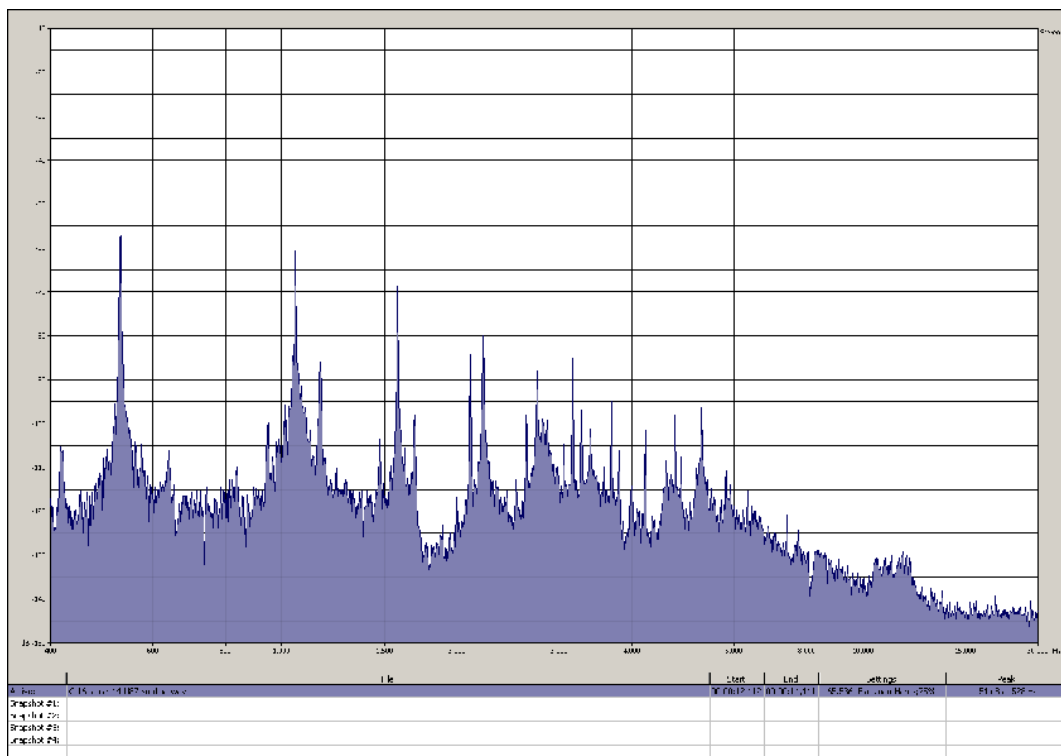


Slika 29.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 15  
(bagrem 7,  $\Phi = 14$  mm)

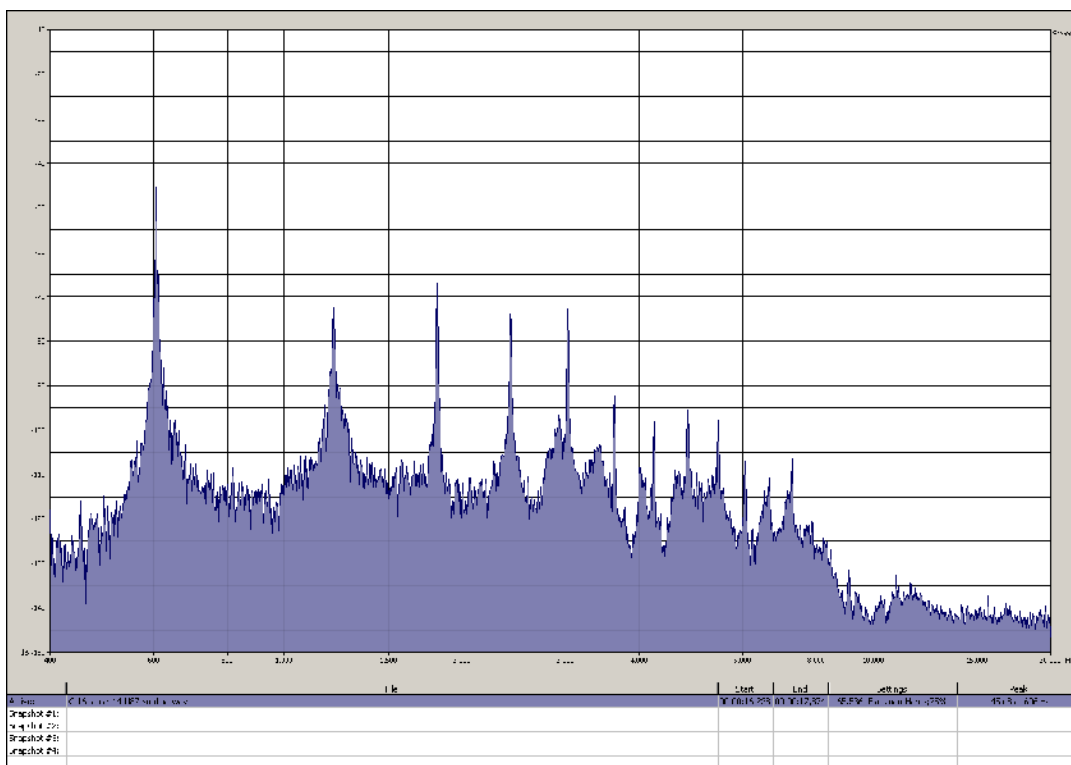


Slika 29.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 15  
(bagrem 7,  $\Phi = 14$  mm)

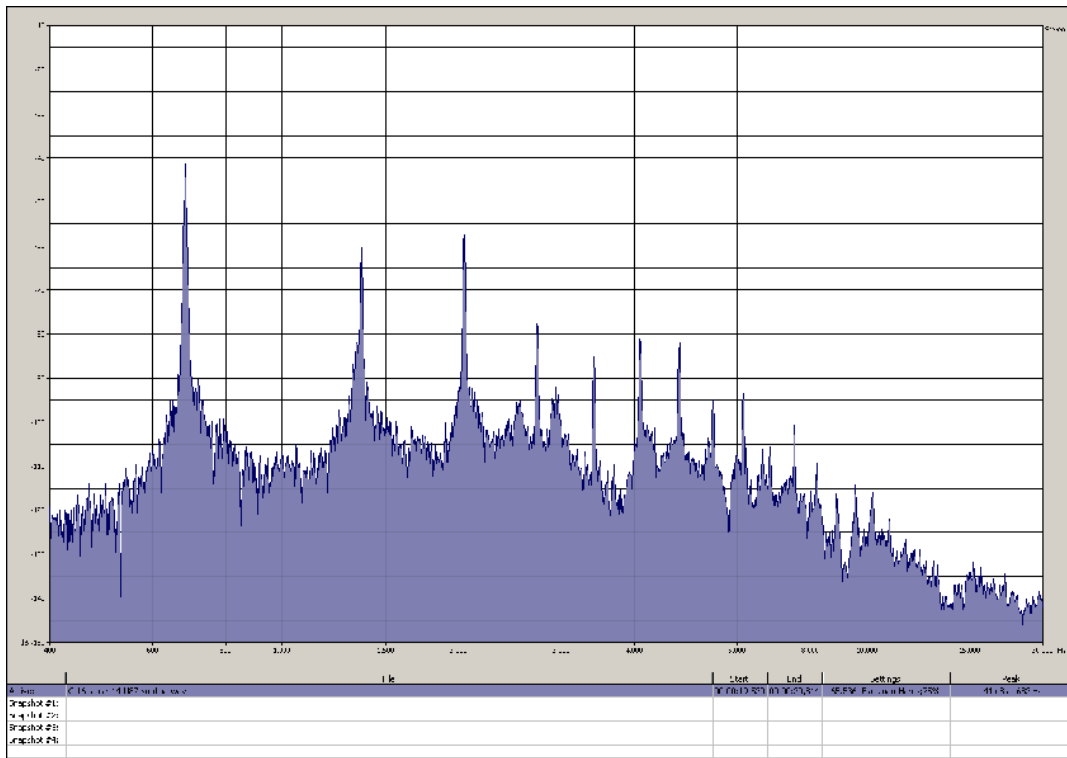
DODATAK 30: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



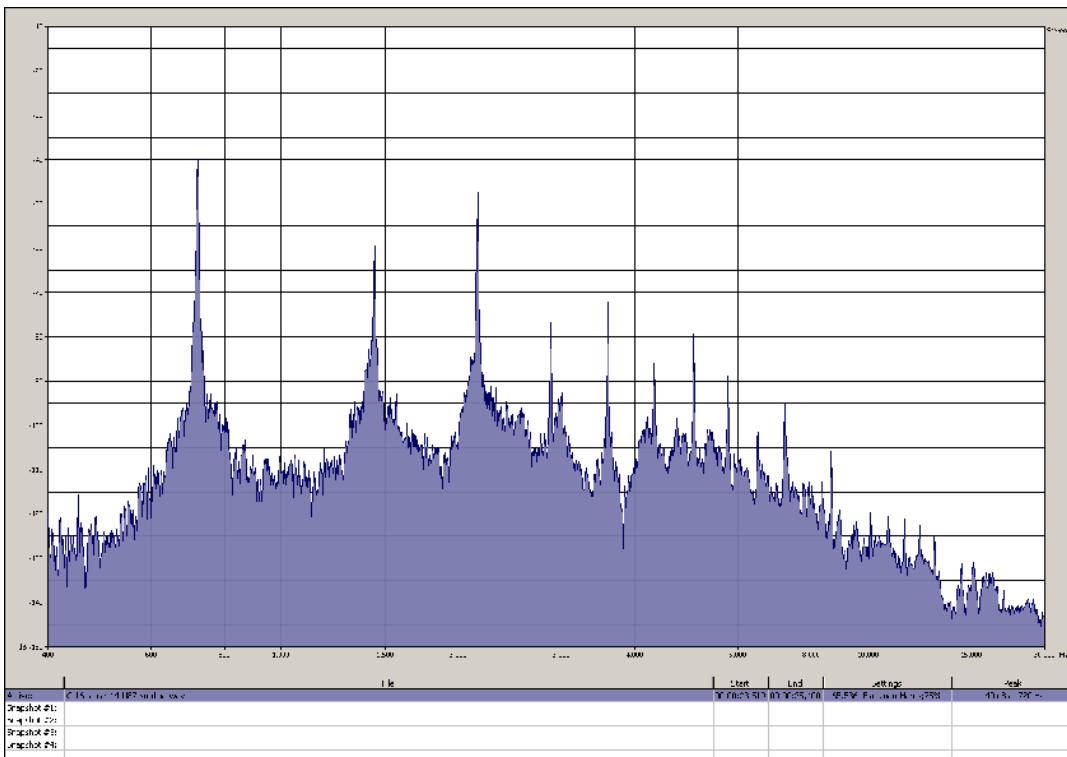
Slika 30.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 16  
(šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



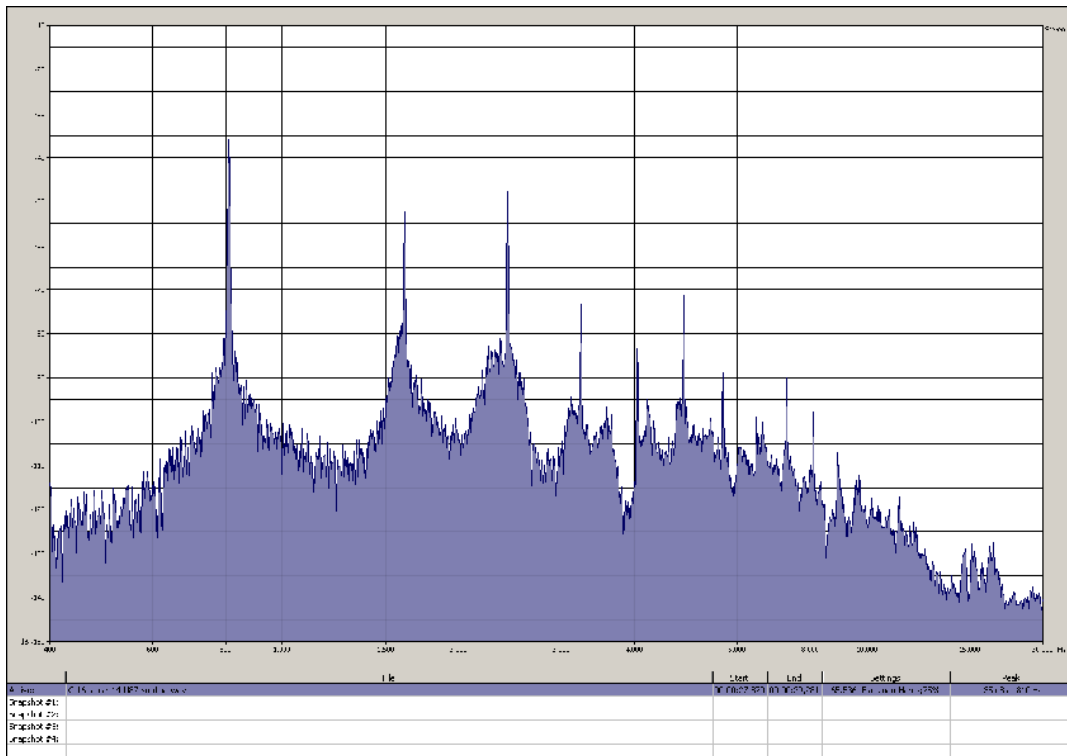
Slika 30.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 16  
(šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



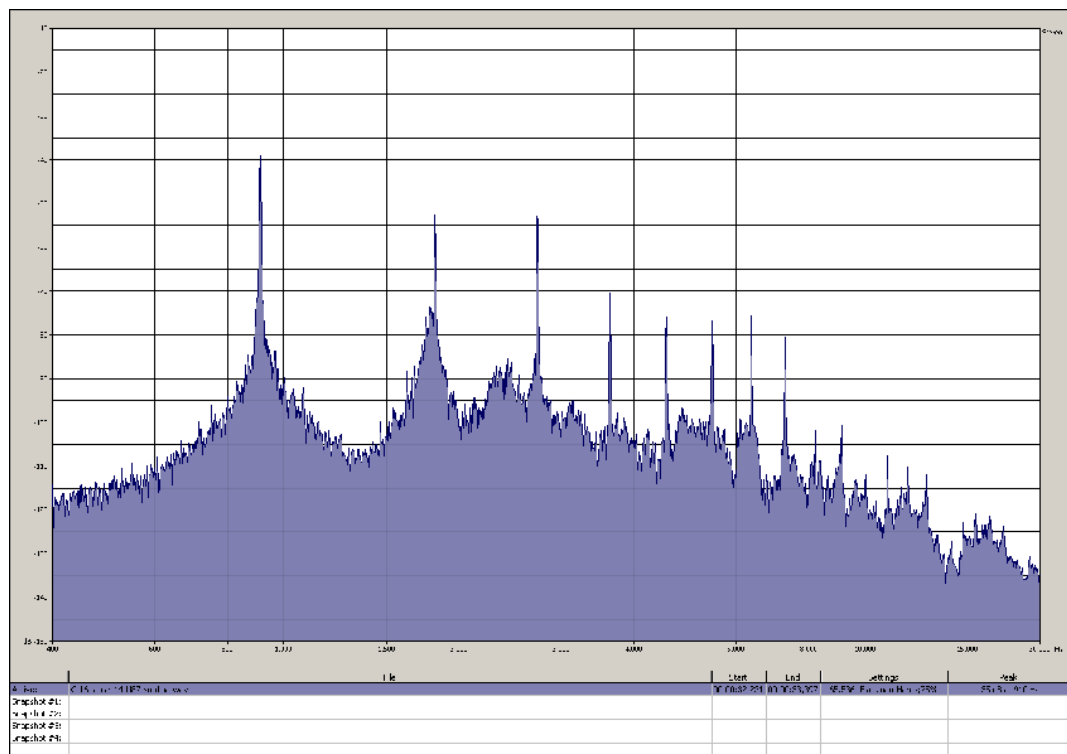
Slika 30.3: Frekvencijski spektar tona  $e'$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



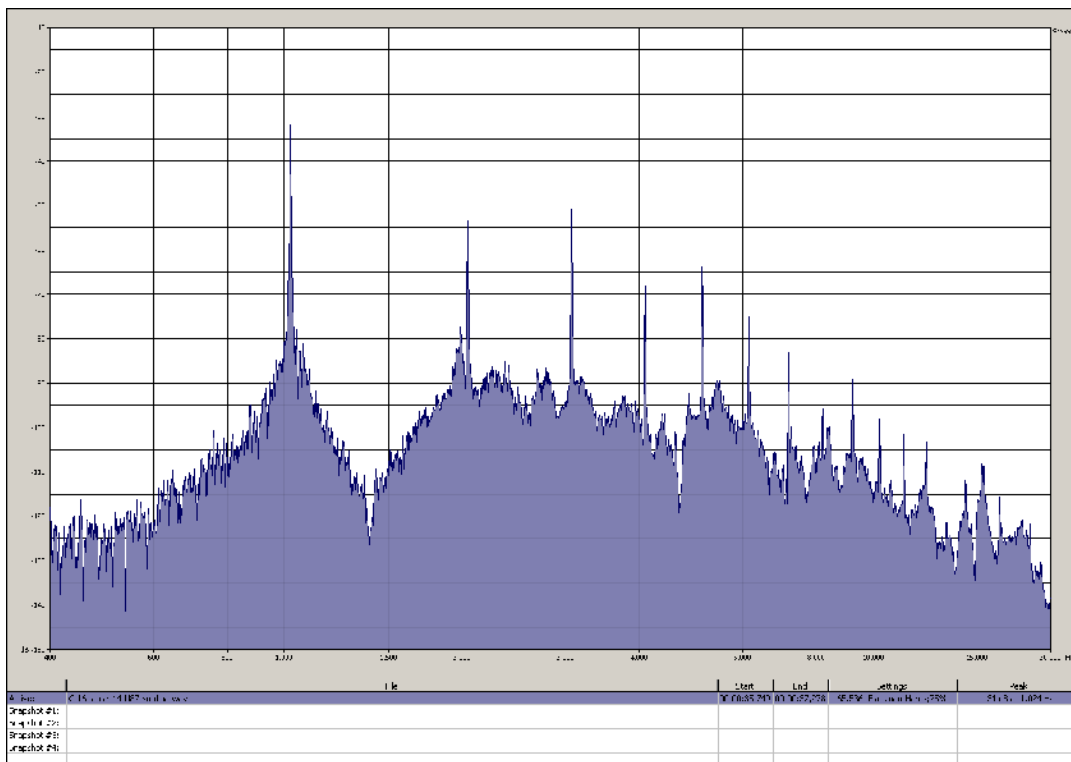
Slika 30.4: Frekvencijski spektar tona  $f'$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



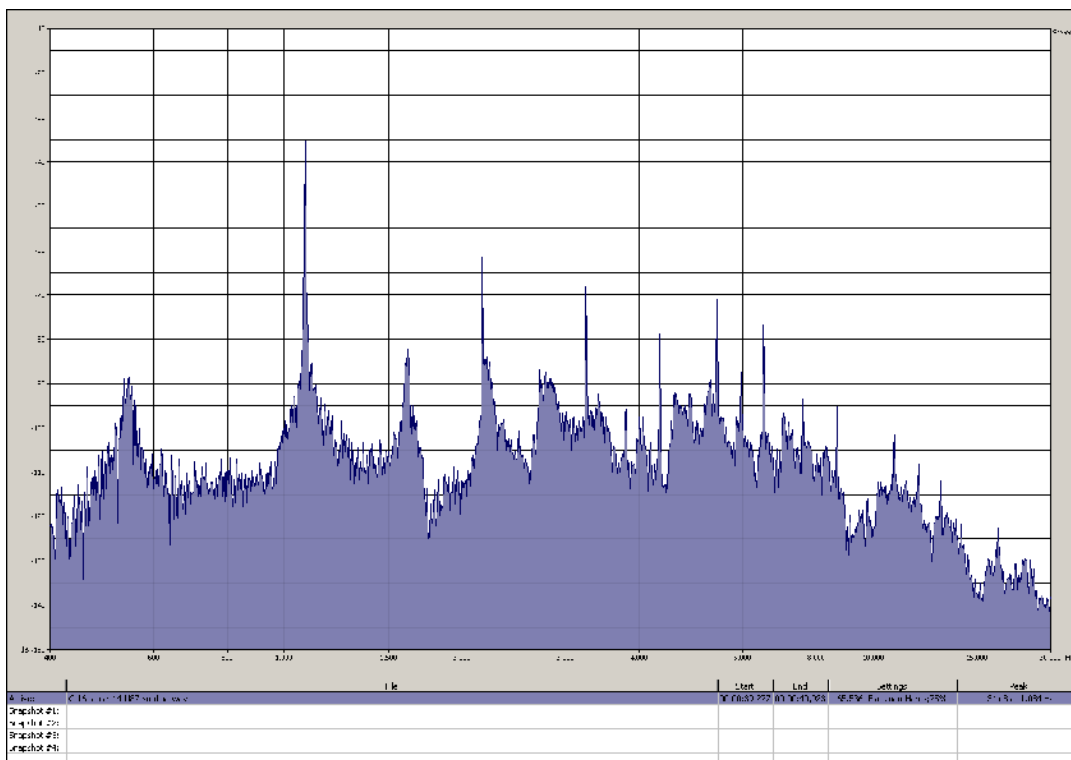
Slika 30.5: Frekvencijski spektar tona  $g'$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 30.6: Frekvencijski spektar tona  $a'$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)

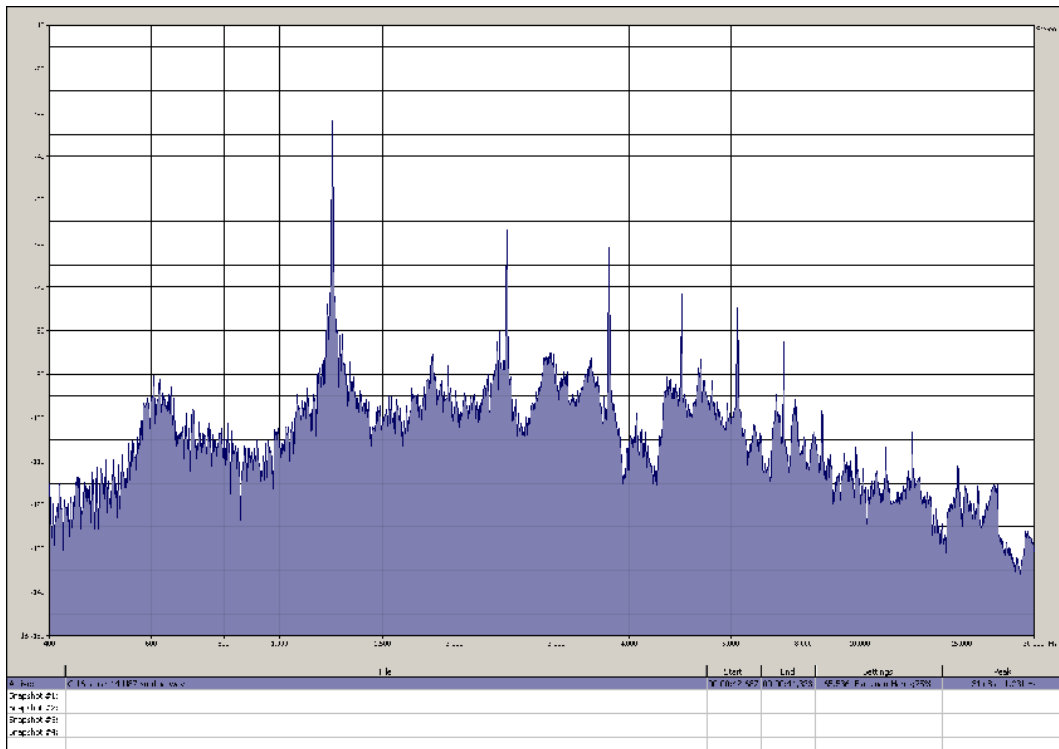


Slika 30.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)

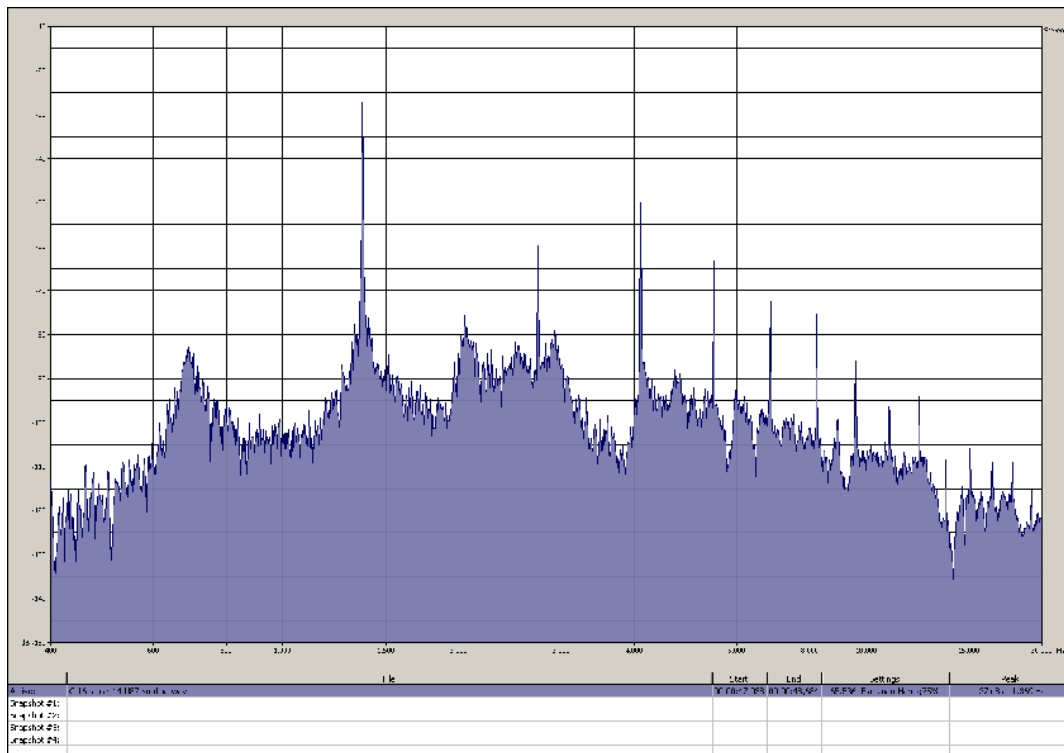


Slika 30.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)

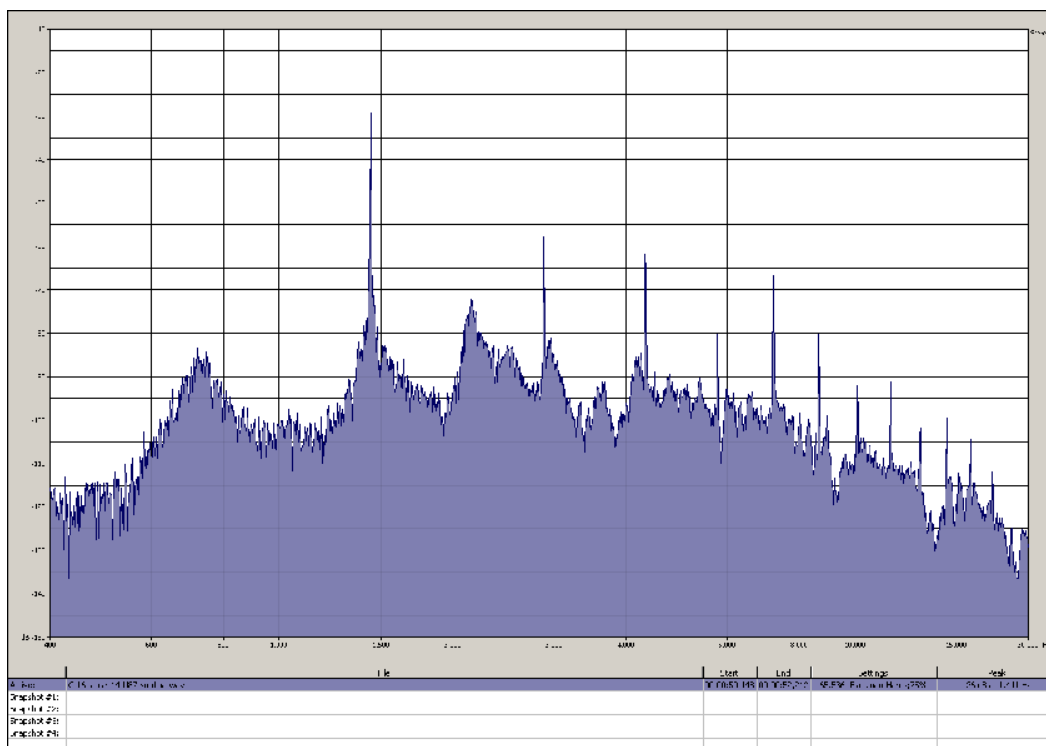




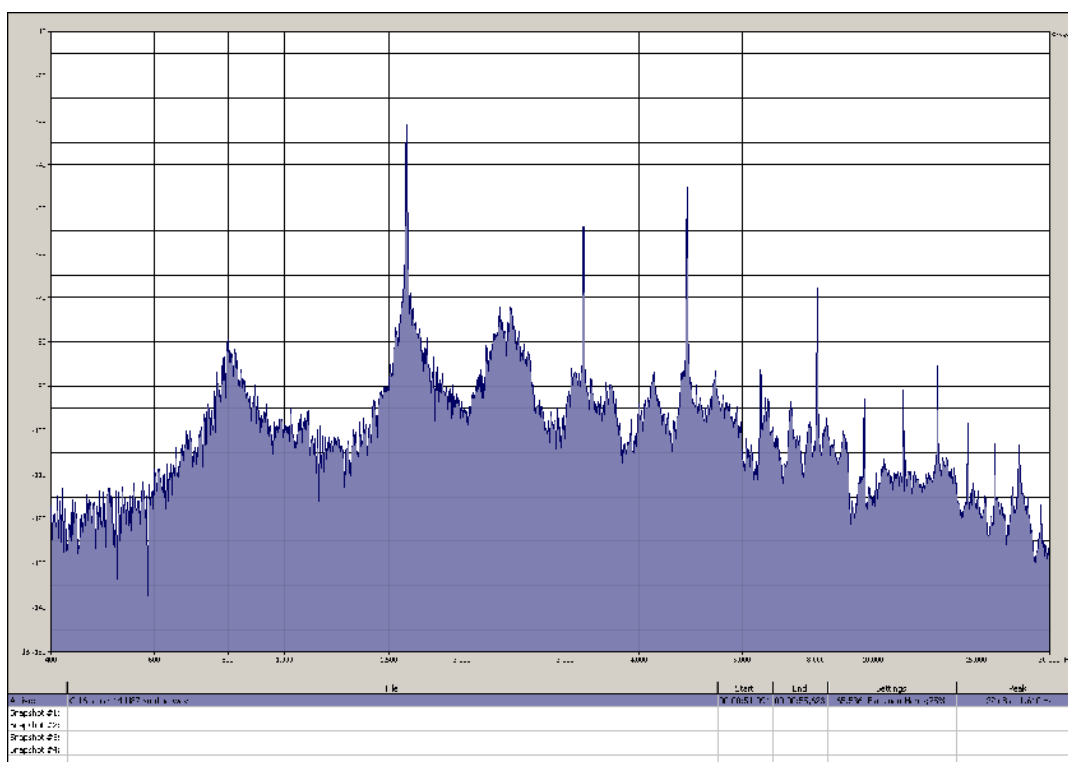
Slika 30.9: Frekvencijski spekter tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



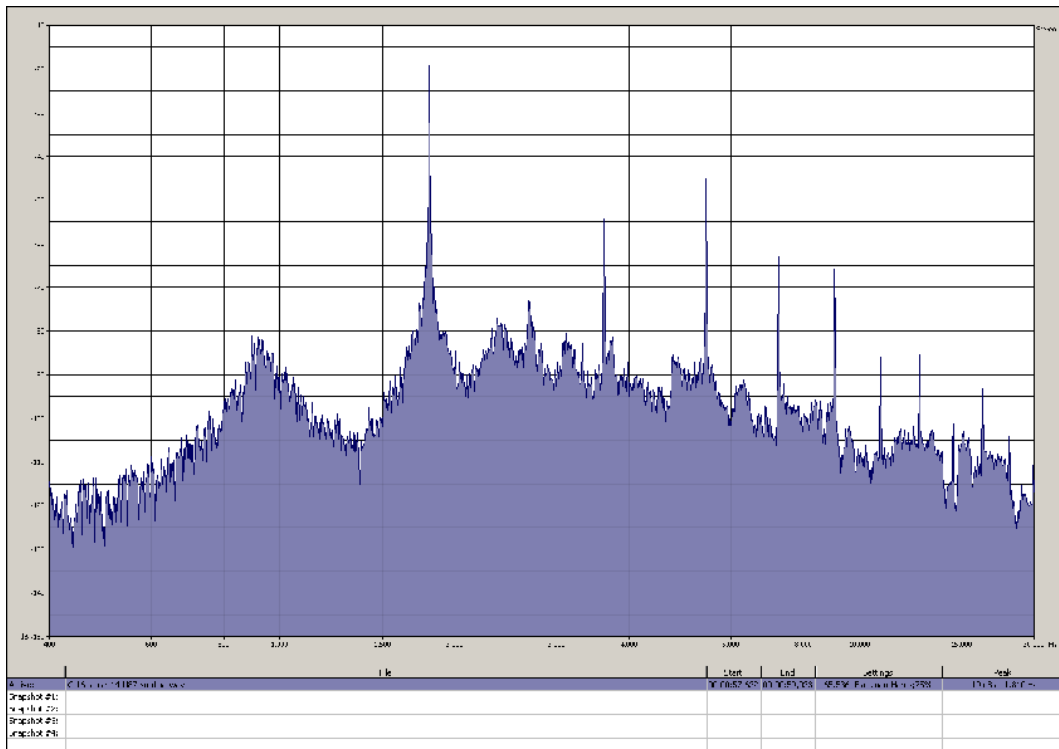
Slika 30.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



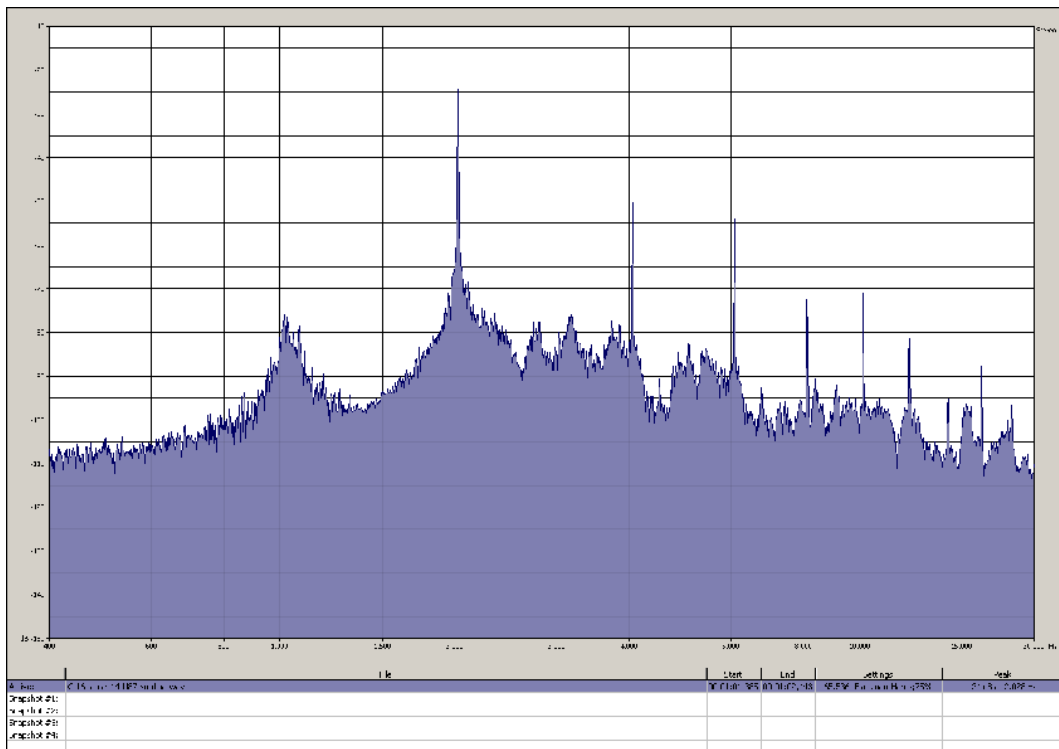
Slika 30.11: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



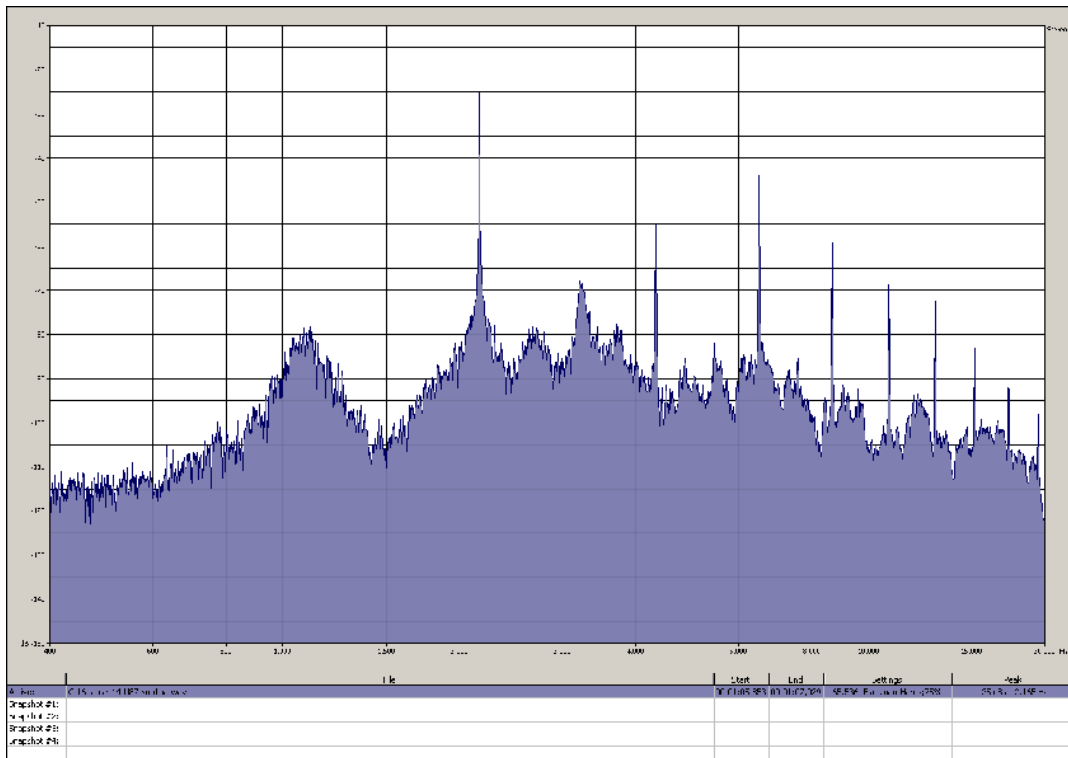
Slika 30.12: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 30.13: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)

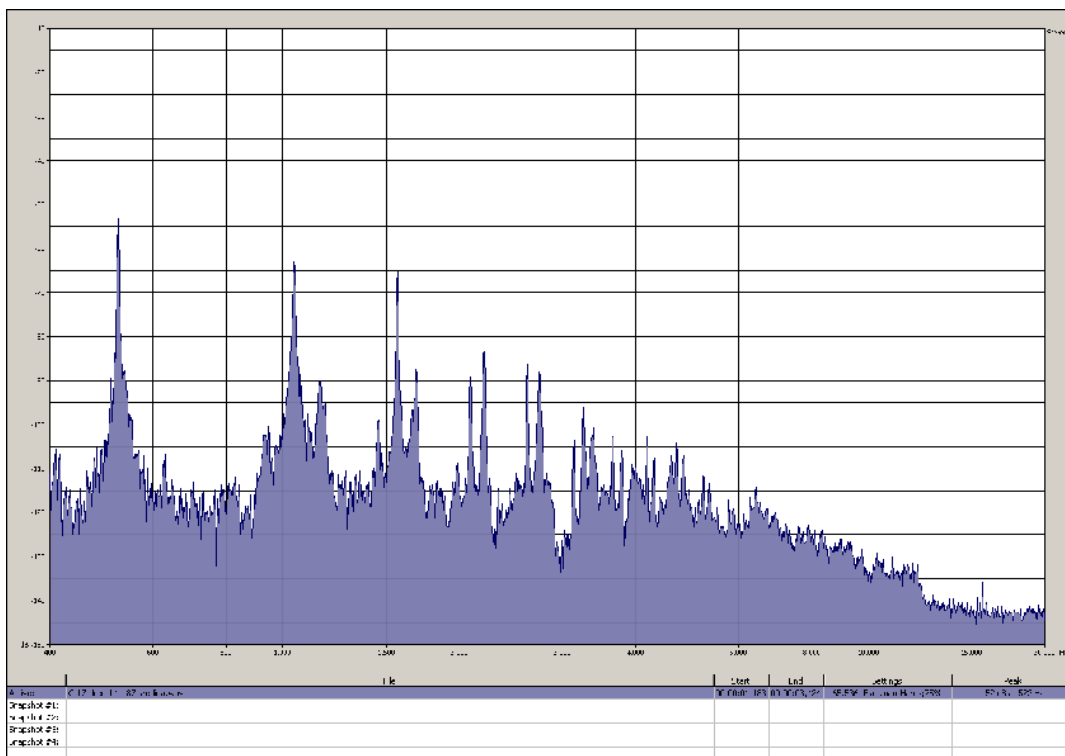


Slika 30.14: Frekvenčni spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)

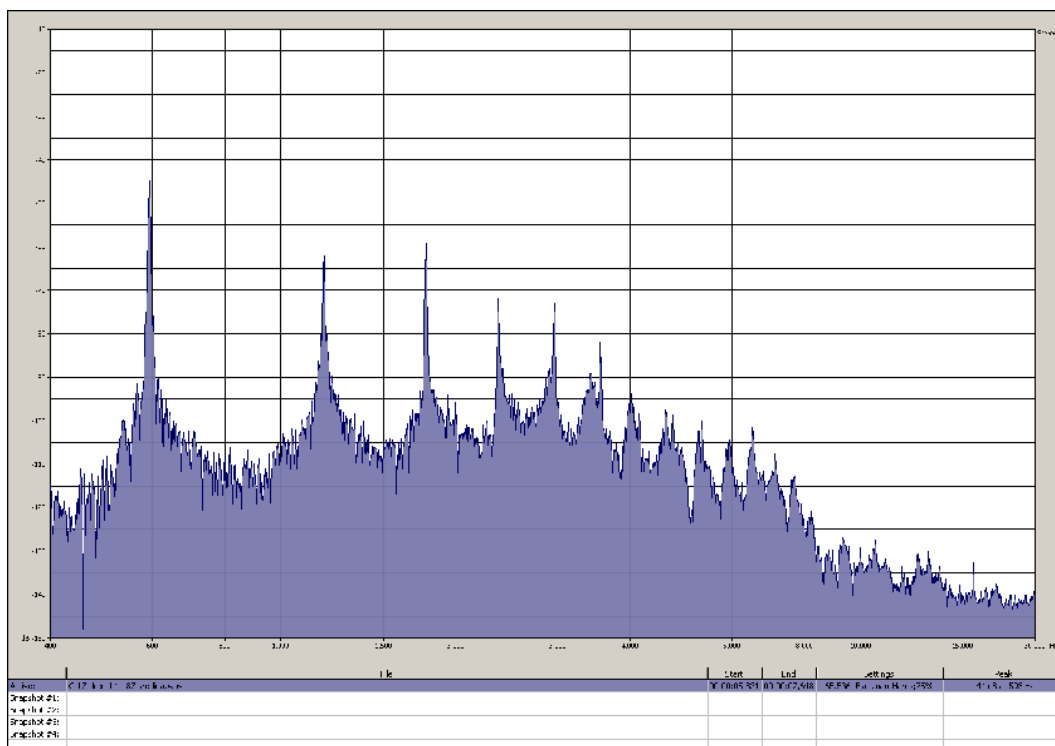


*Slika 30.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 16 (šimšir 2,  $\Phi = 14$  mm)*

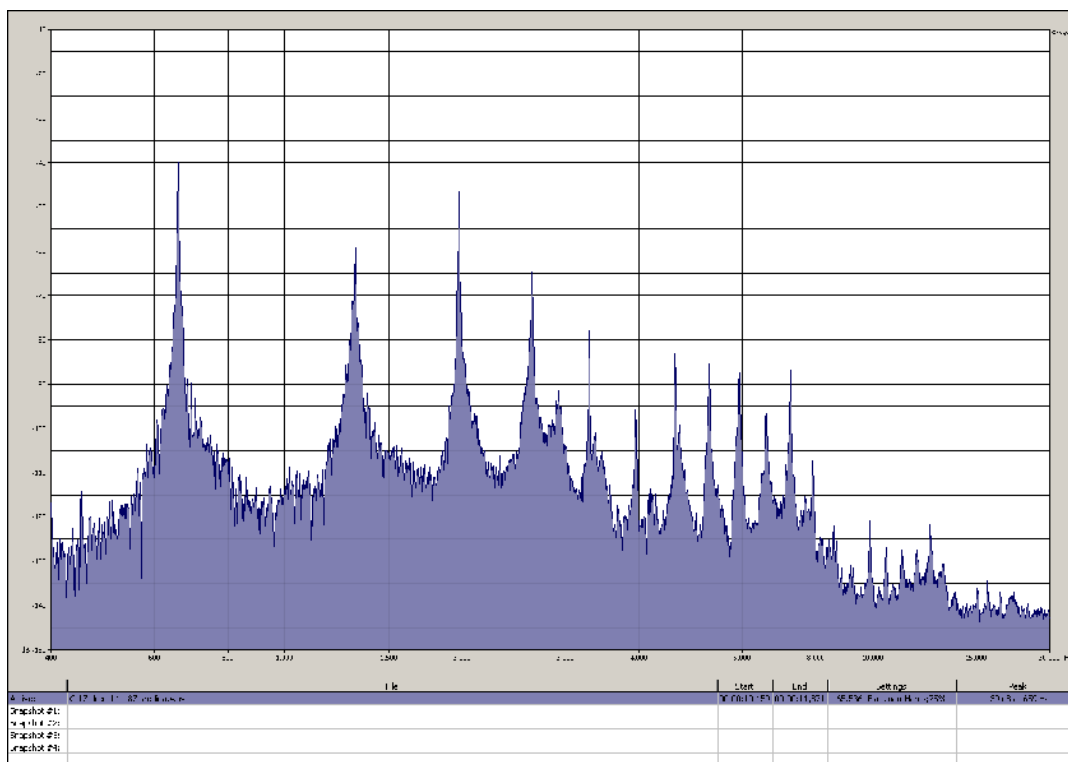
DODATAK 31: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
DVODELNE C FRULE 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



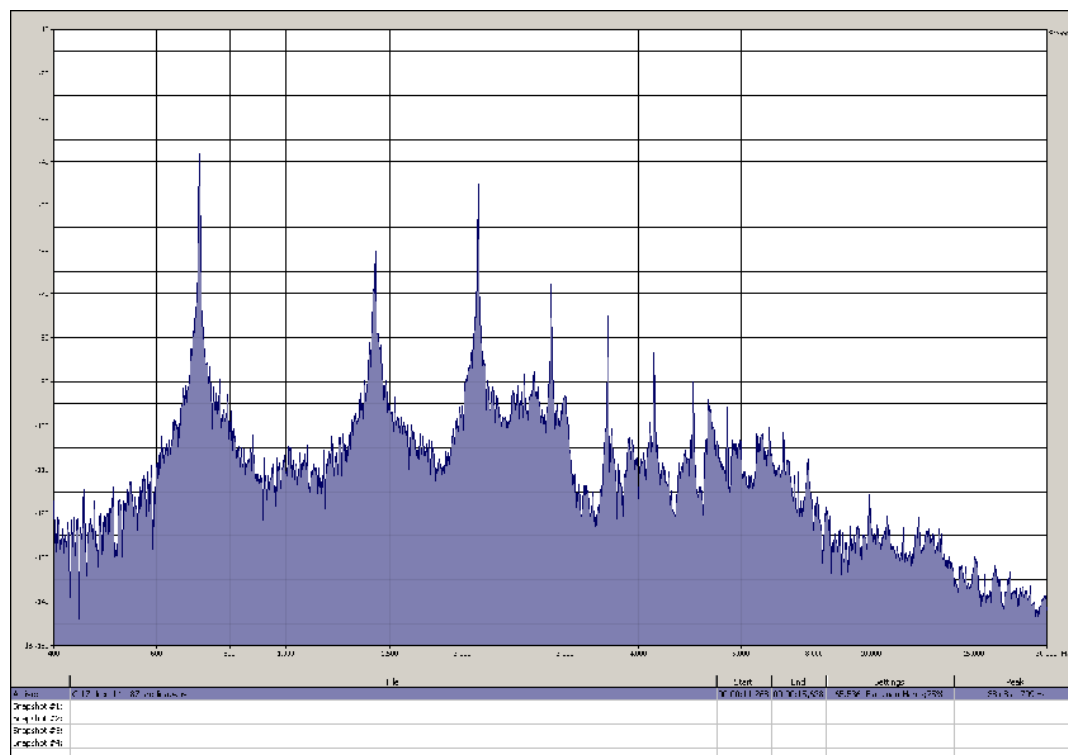
Slika 31.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 17  
(dren,  $\Phi = 14$  mm)



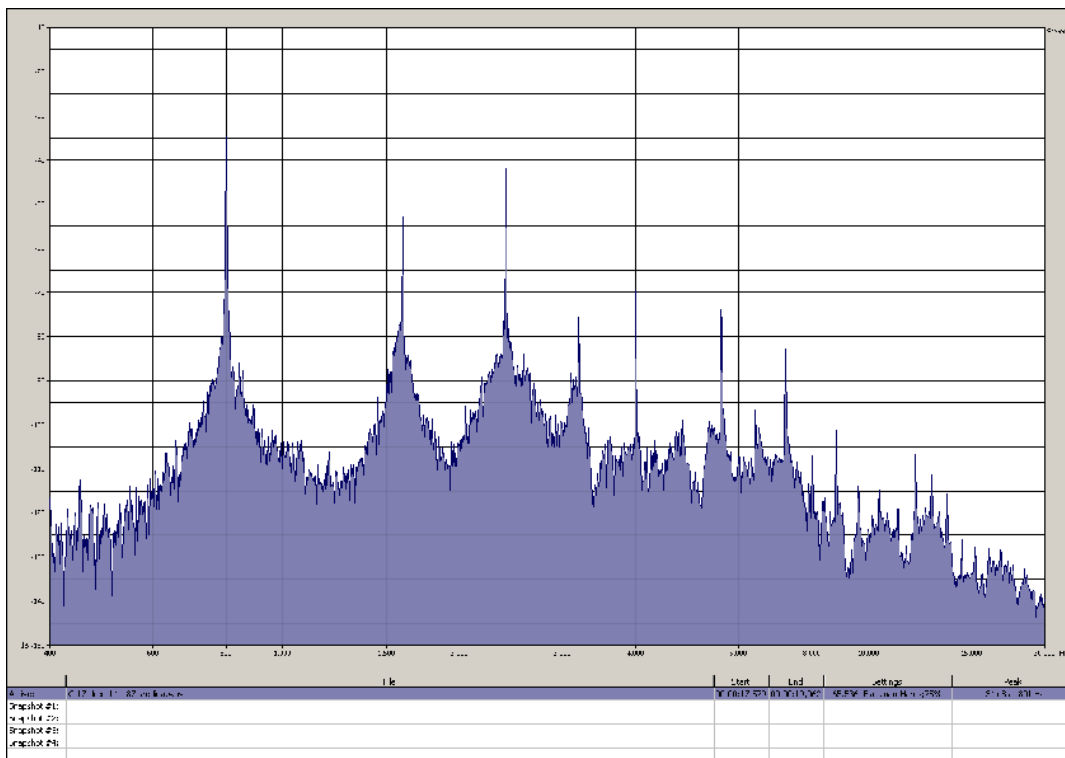
Slika 31.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 17  
(dren,  $\Phi = 14$  mm)



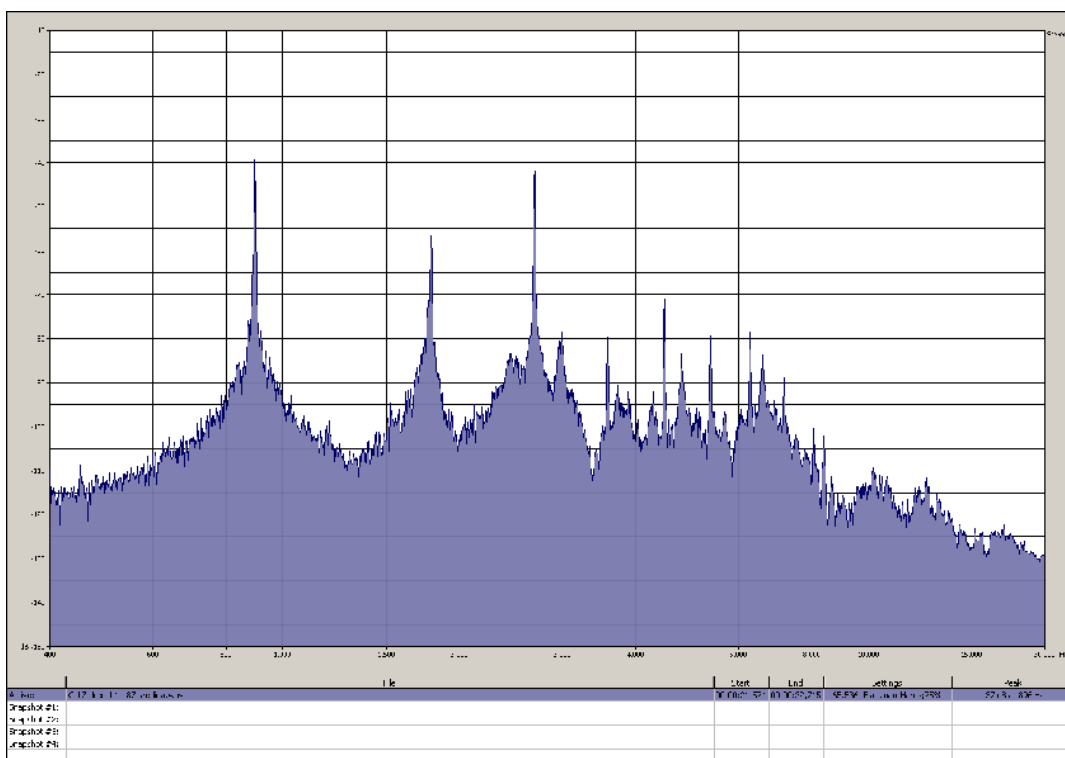
Slika 31.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



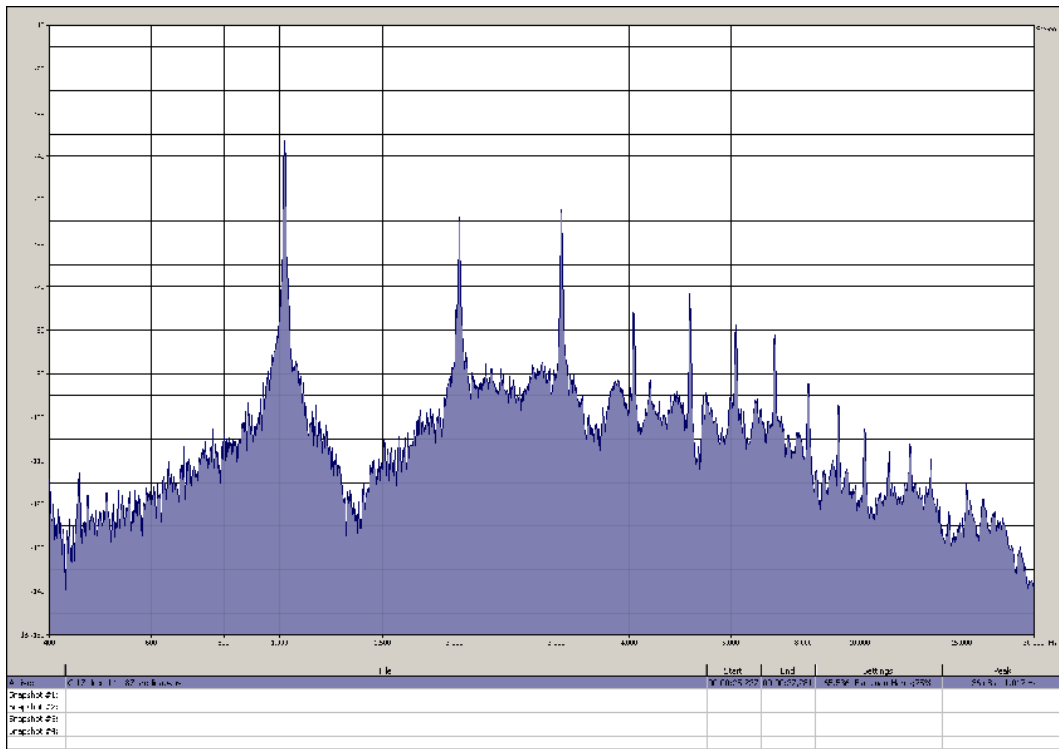
Slika 31.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )



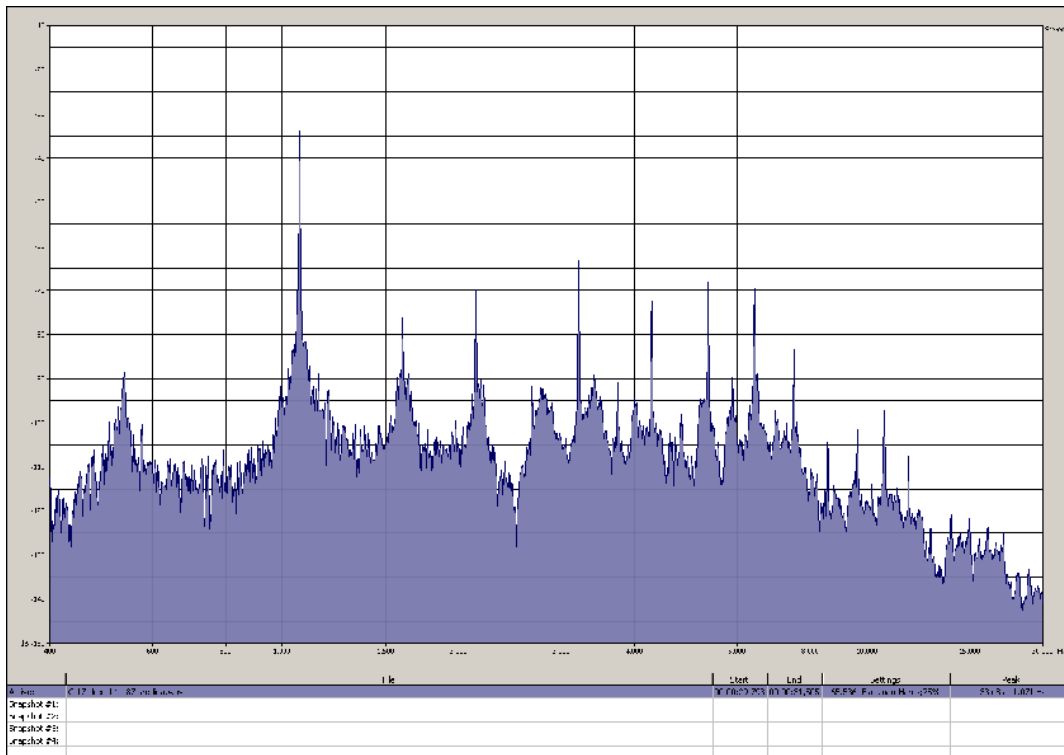
*Slika 31.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)*



*Slika 31.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)*

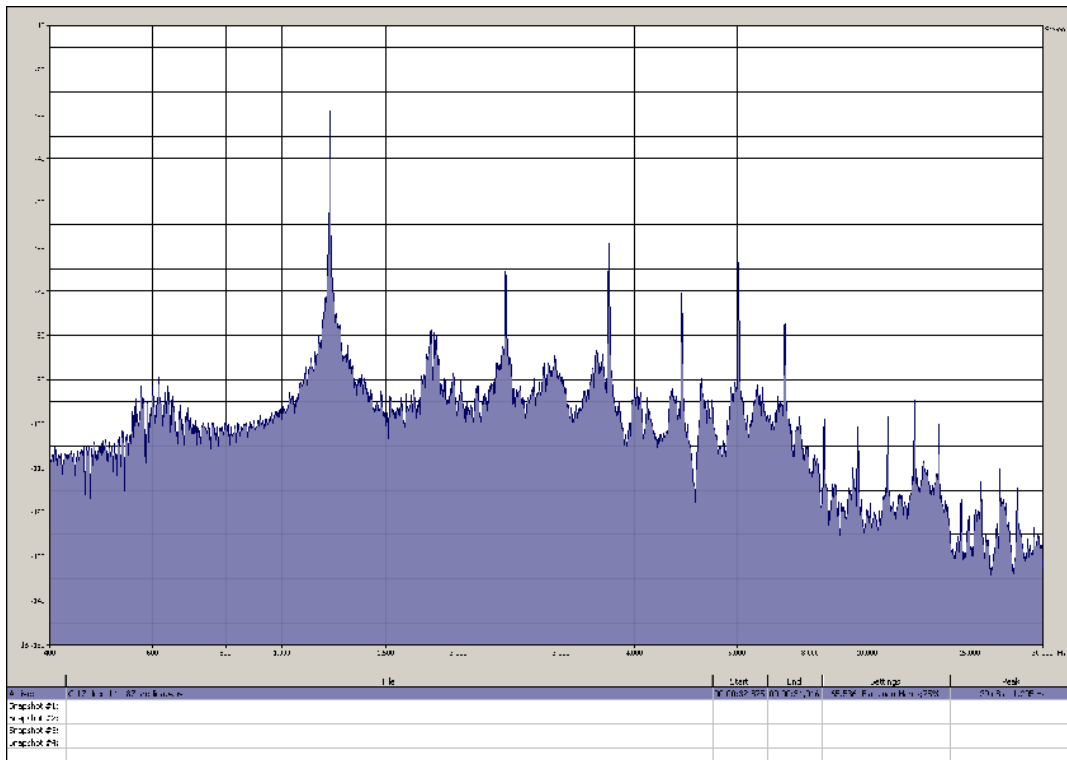


Slika 31.7: Frekvenčni spekter tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

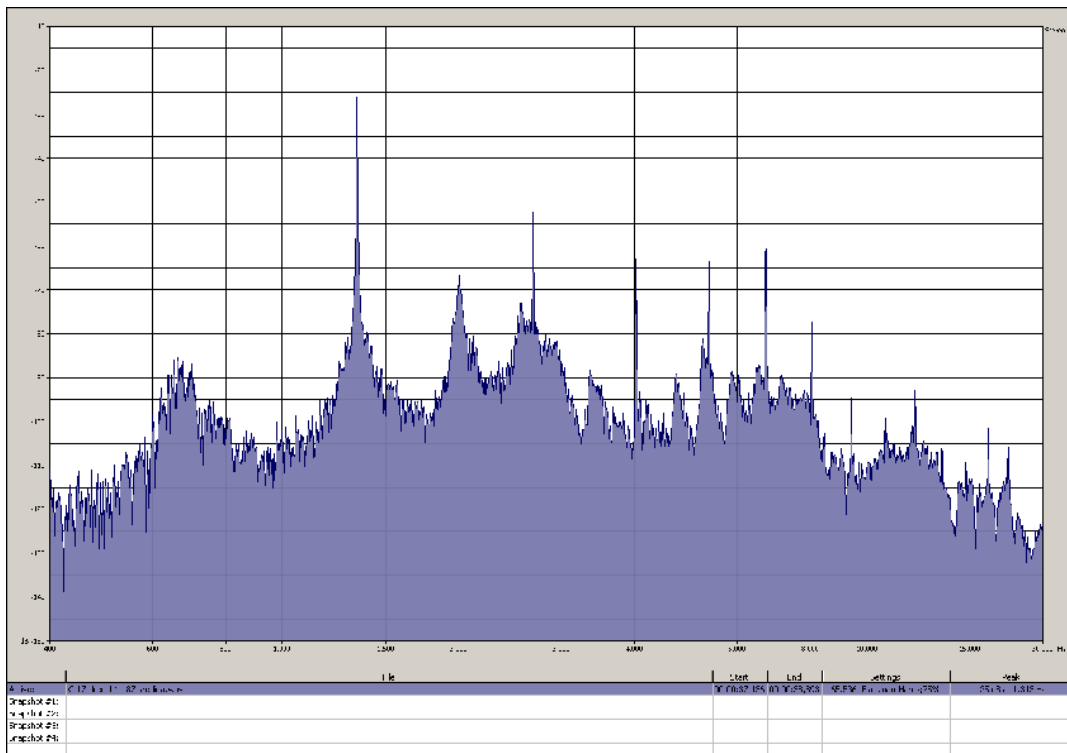


Slika 31.8: Frekvenčni spekter tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ )

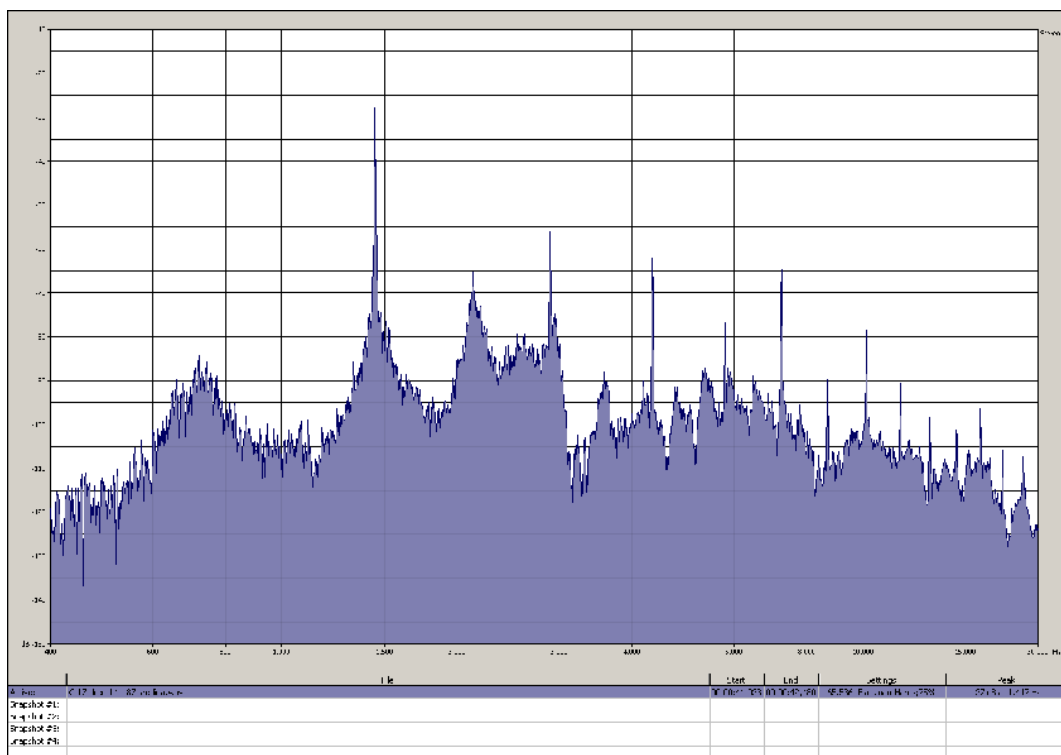




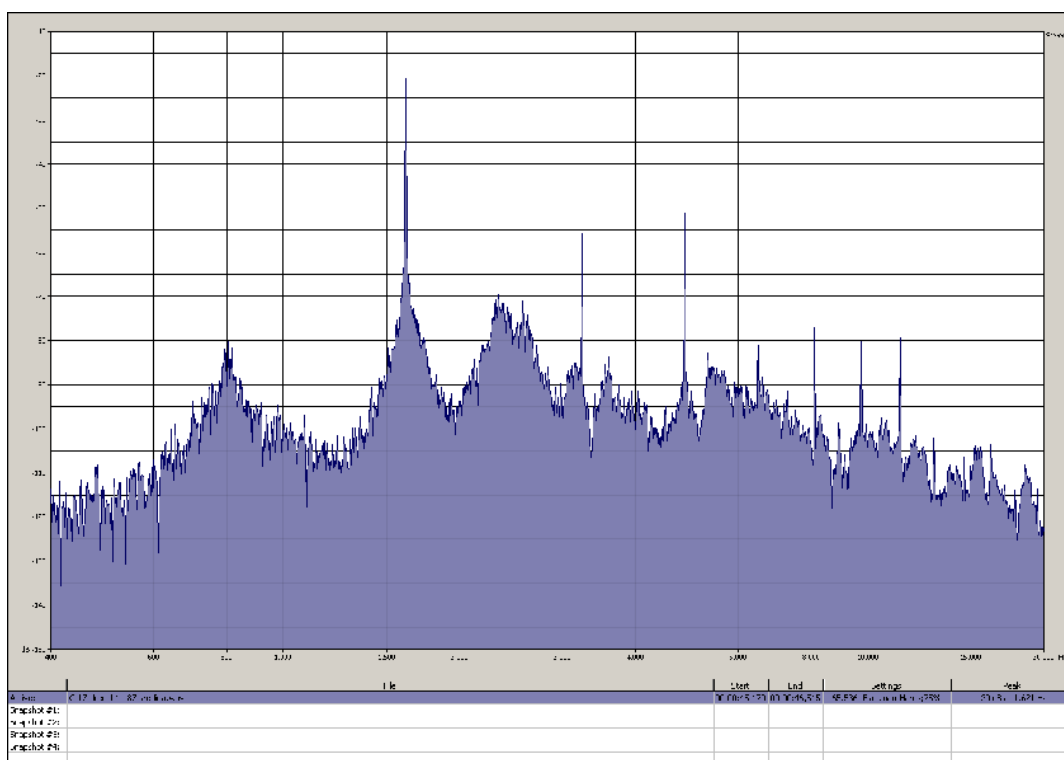
Slika 31.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



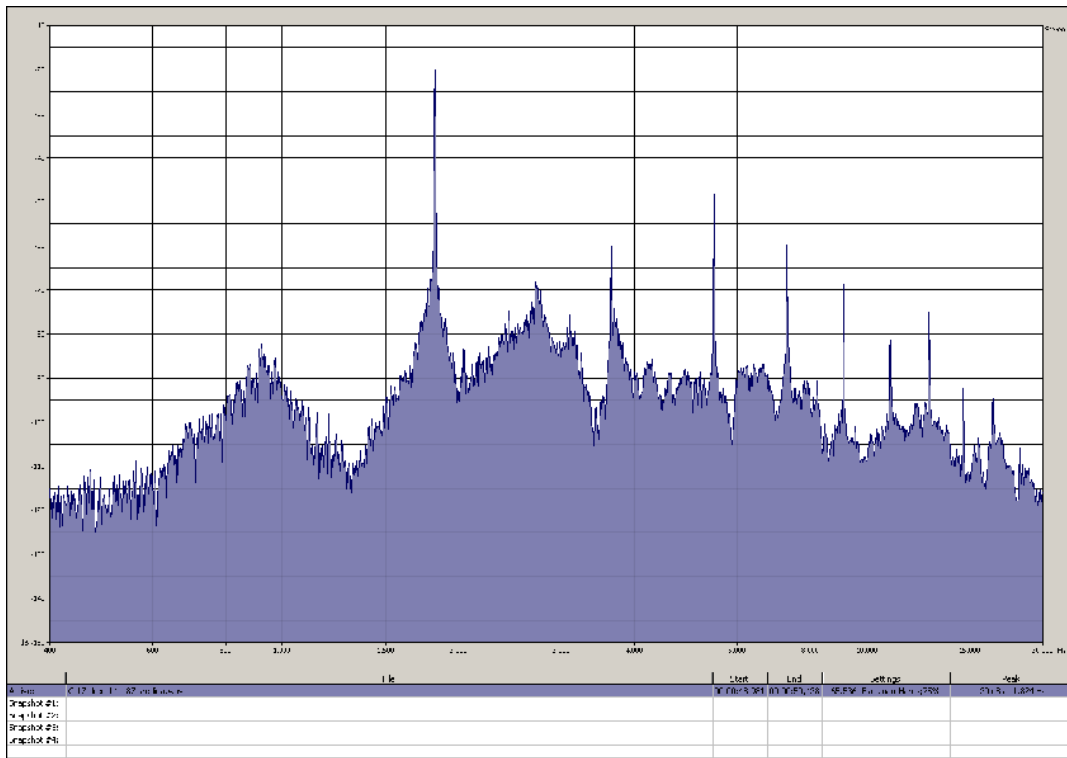
Slika 31.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



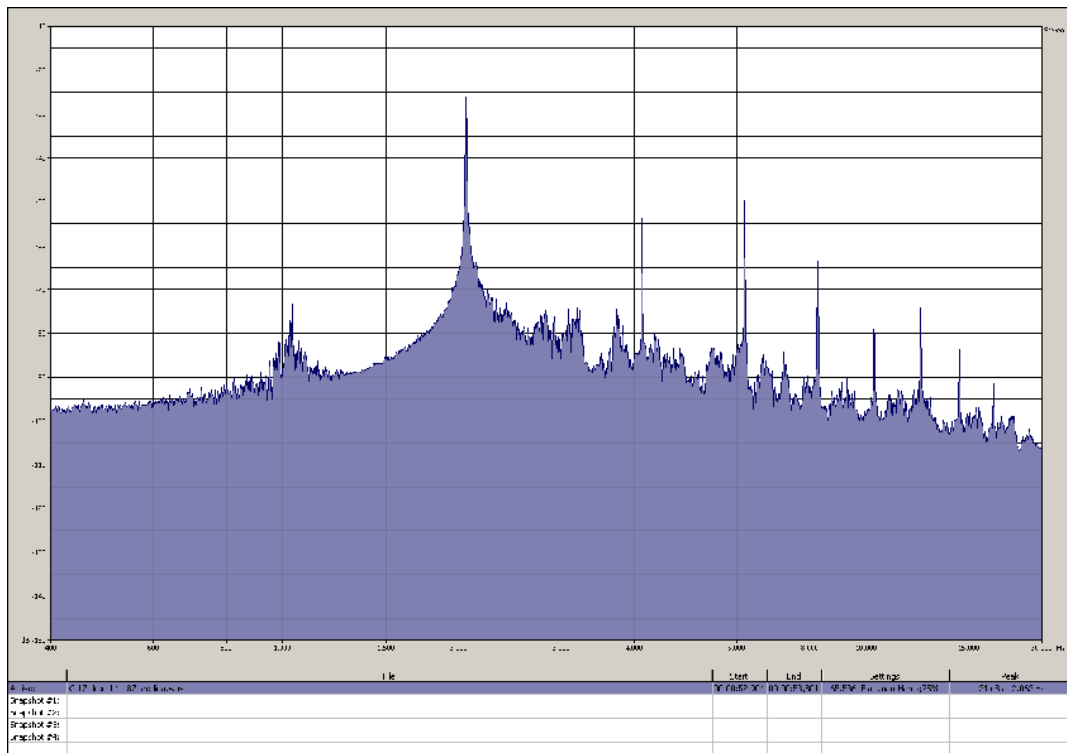
Slika 31.11: Frekvencijski spekter tona  $P^2$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



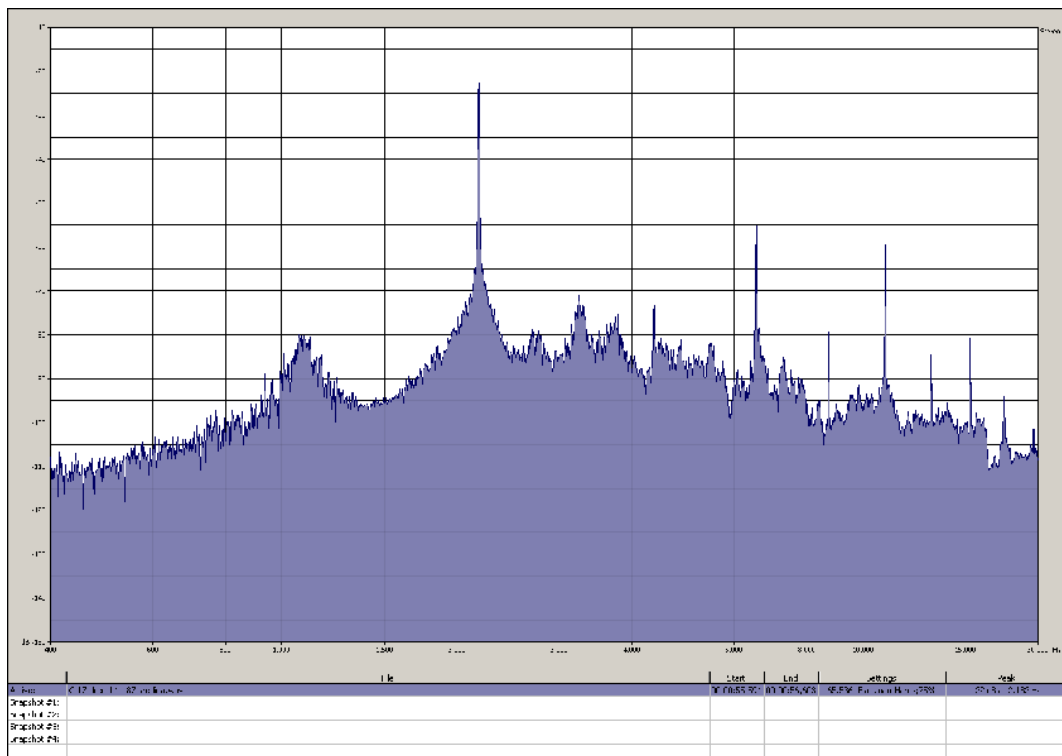
Slika 31.12: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 31.13: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



Slika 31.14: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)



*Slika 31.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 17 (dren,  $\Phi = 14$  mm)*

DODATAK 32: FOTOGRAFIJE DVODELNIH FRULA ČIJI JE ZVUK SNIMLJEN



*Slika 32.1: C frula 1, bagrem 1,  $\Phi = 13\text{ mm}$*



*Slika 32.2: C frula 2, bagrem 2,  $\Phi = 13\text{ mm}$*



*Slika 32.3: C frula 3, bagrem 3,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.4: C frula 4, šimšir 1,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.5: C frula 5, tisa,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.6: C frula 6, šljiva 1,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.7: C frula 7, bagrem 4,  $\Phi = 13\text{ mm}$*



*Slika 32.8: C frula 8, abonos,  $\Phi = 13\text{ mm}$*





*Slika 32.9: C frula 9, mahagoni,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.10: C frula 10, abonos - periferija,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.11: C frula 11, šljiva 2,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.12: C frula 12, bagrem 5,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.13: C frula 13, orah,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.14: C frula 14, bagrem 6,  $\Phi = 13$  mm*



*Slika 32.15: C frula 15, bagrem 7,  $\Phi = 13$  mm*

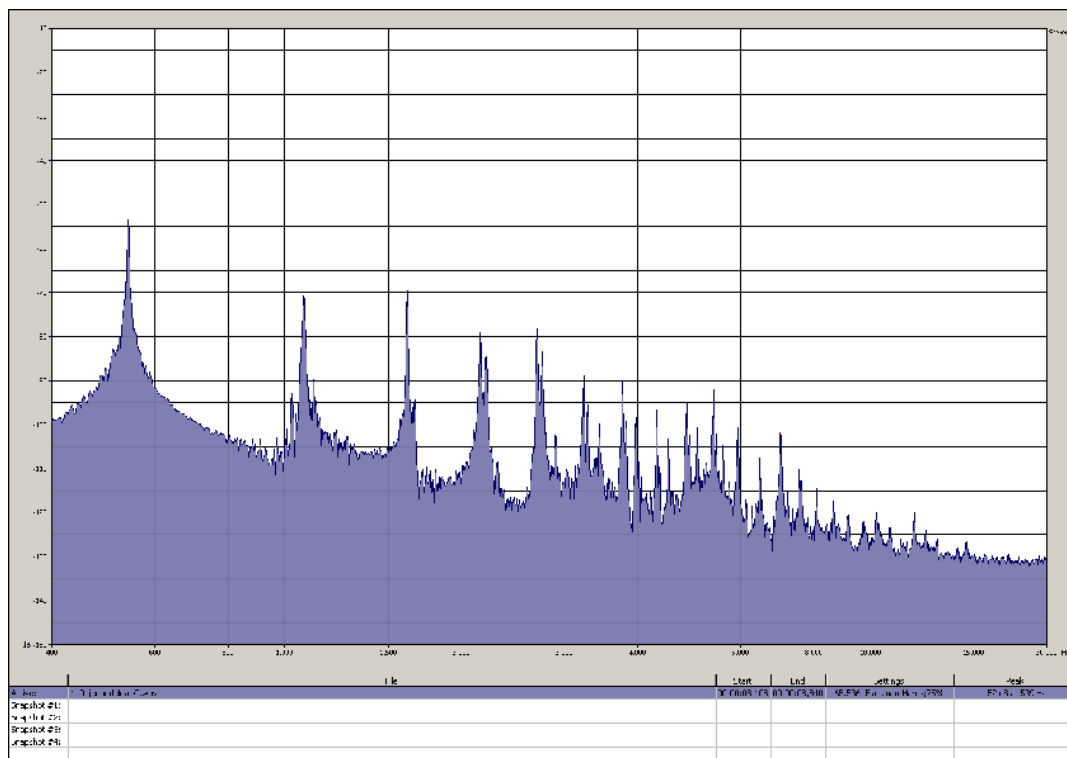


*Slika 32.16: C frula 16, šimšir 2,  $\Phi = 13$  mm*

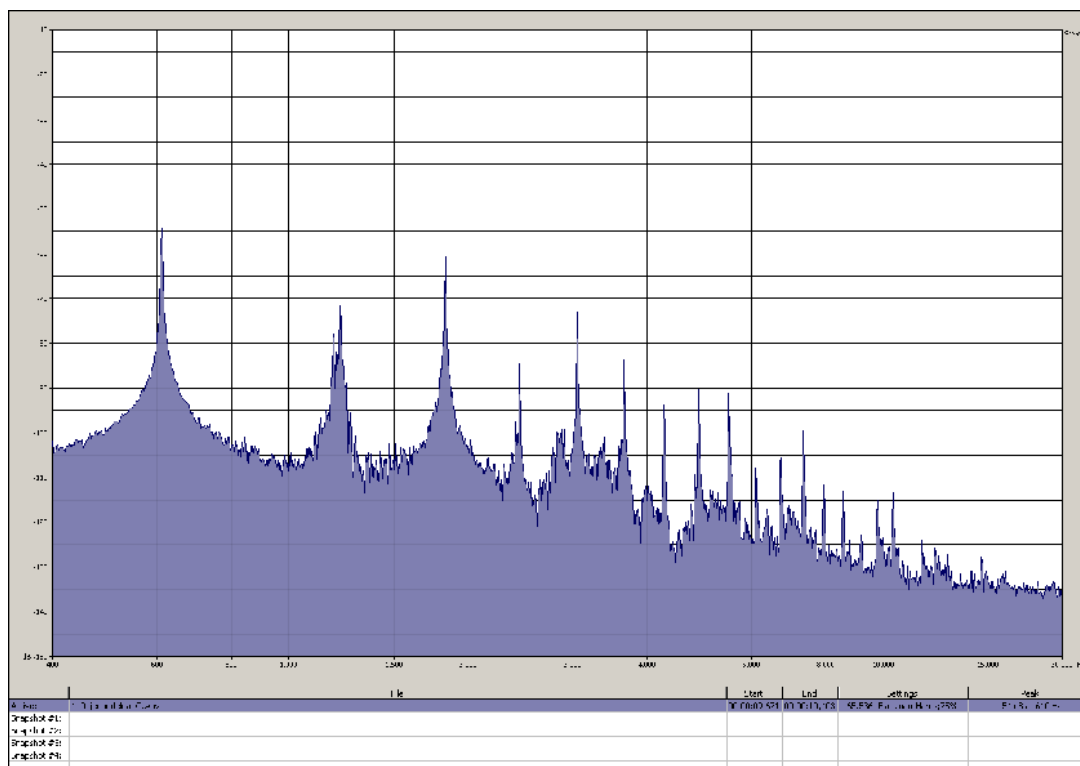


*Slika 32.17: C frula 17, dren,  $\Phi = 13$  mm*

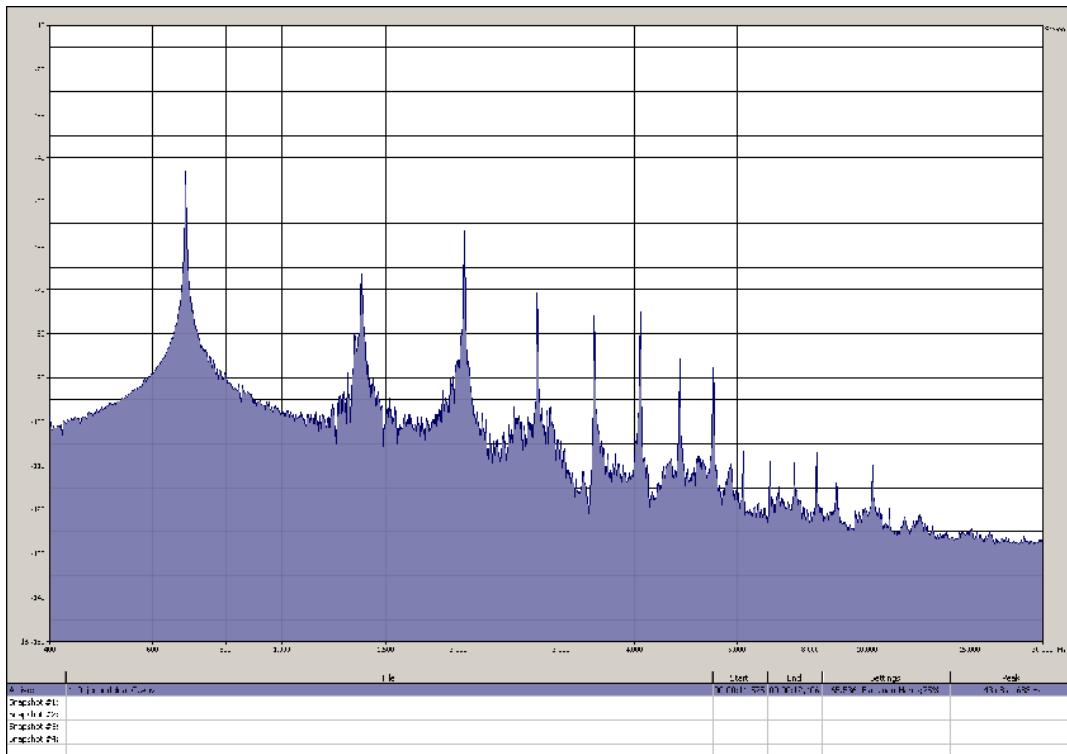
DODATAK 33: FREKVENCIJSKI SPEKTAR JEDNODELNE C FRULE  
(bagrem,  $\Phi = 14$  mm) BEZ PRIGUŠIVAČA



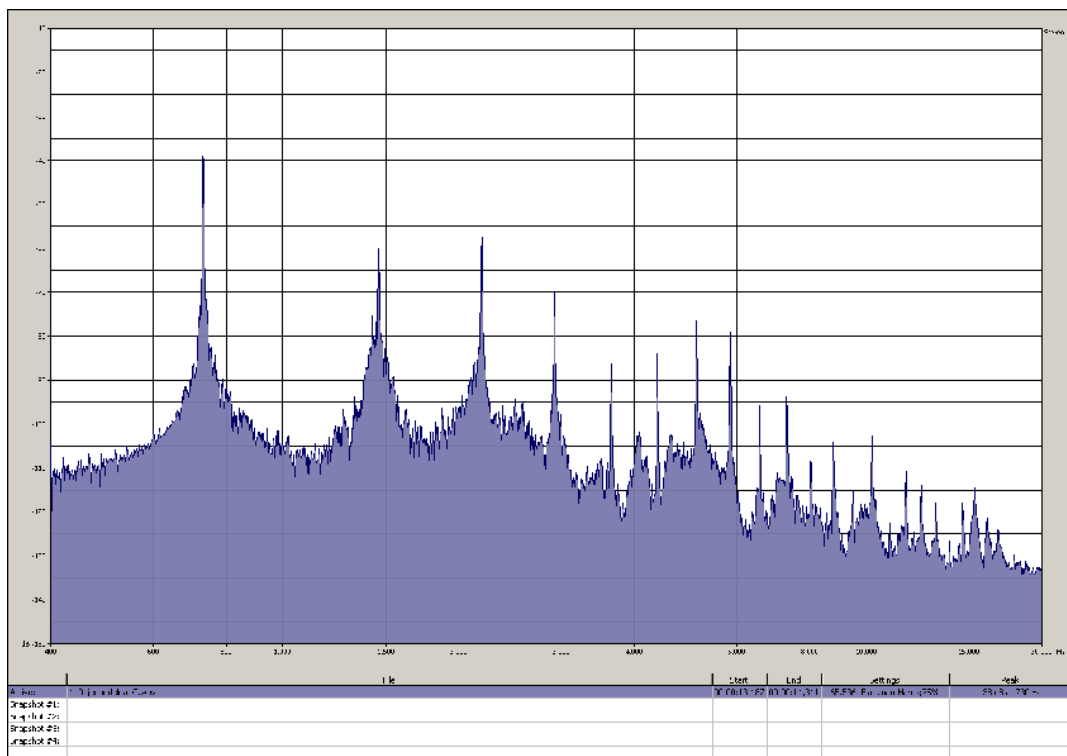
Slika 33.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



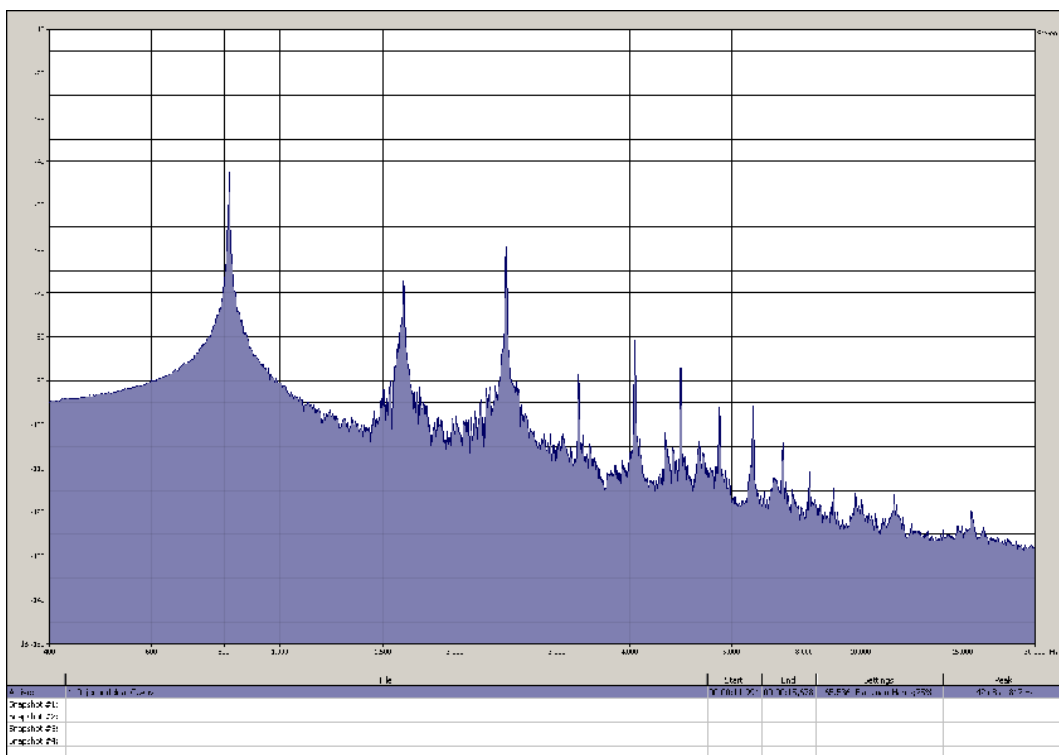
Slika 33.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



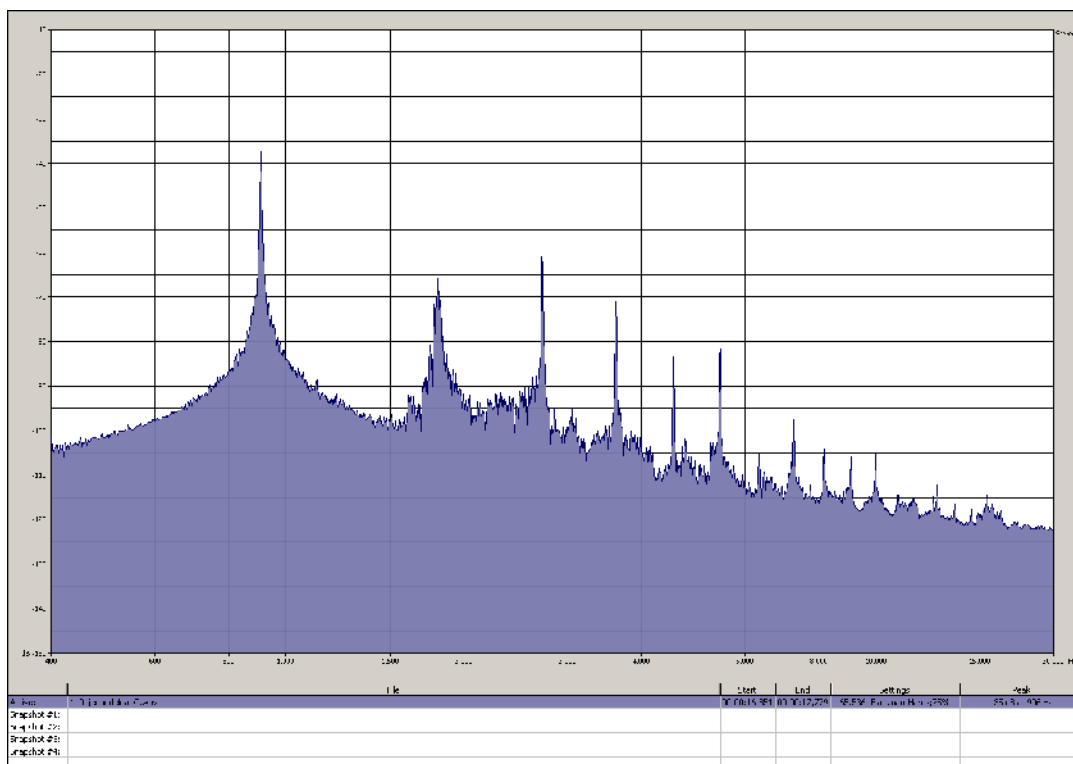
Slika 33.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



Slika 33.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

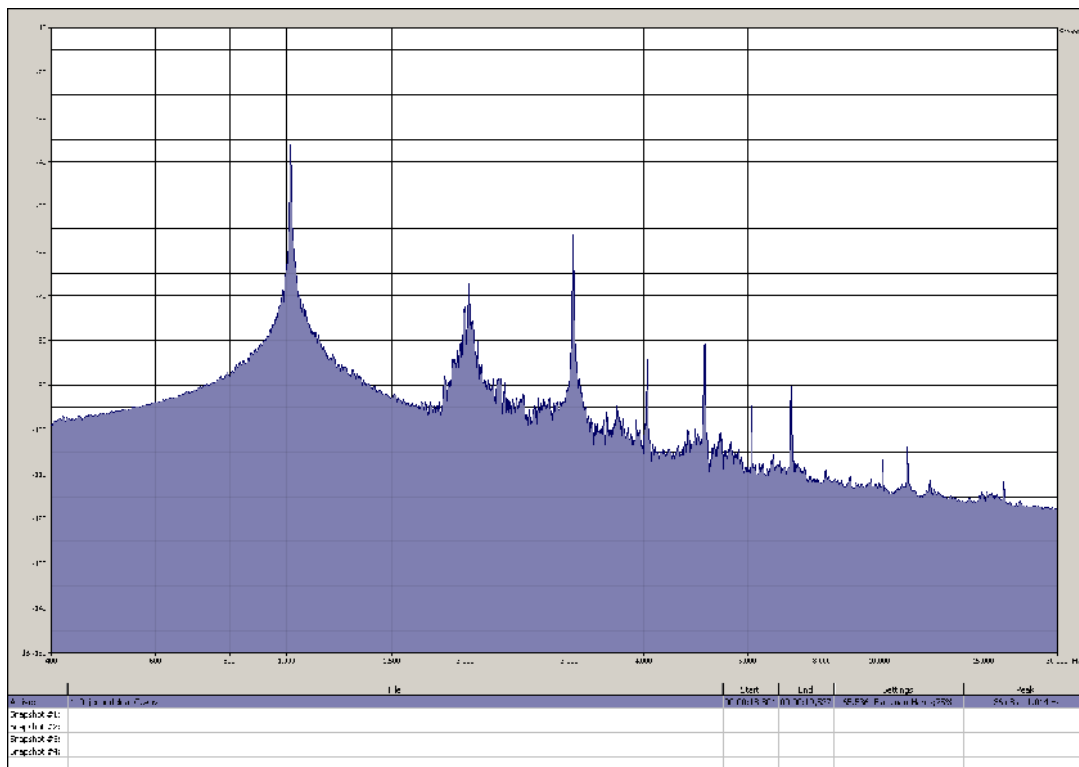


Slika 33.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

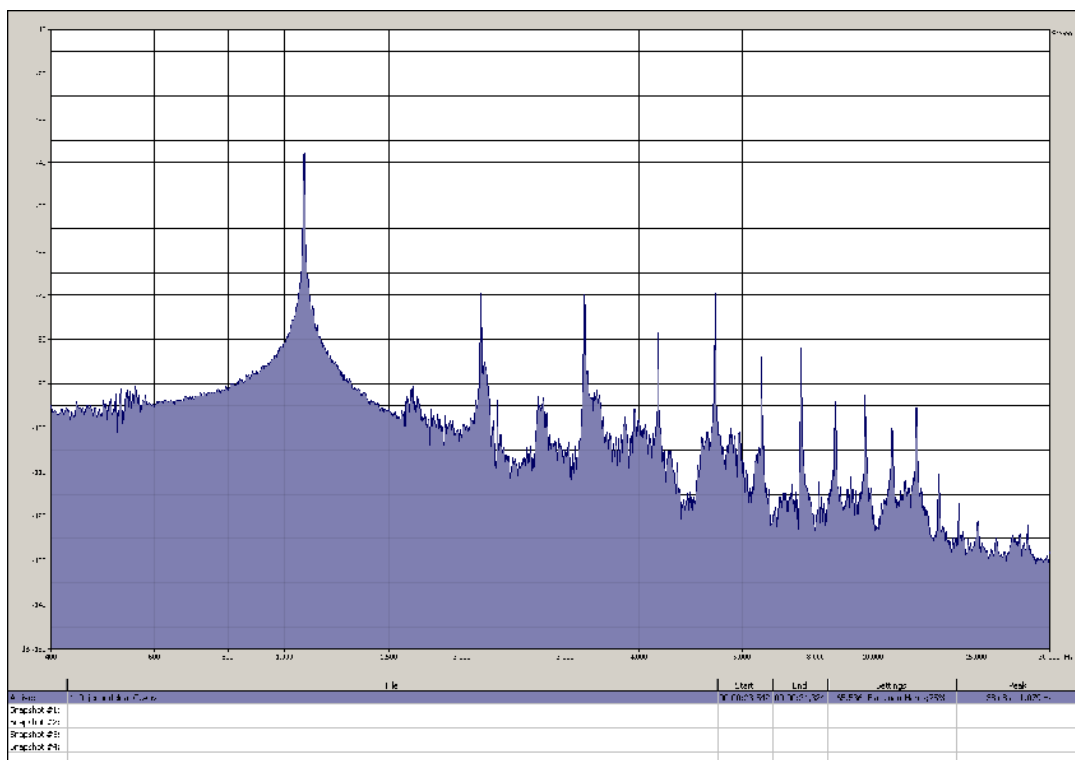


Slika 33.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

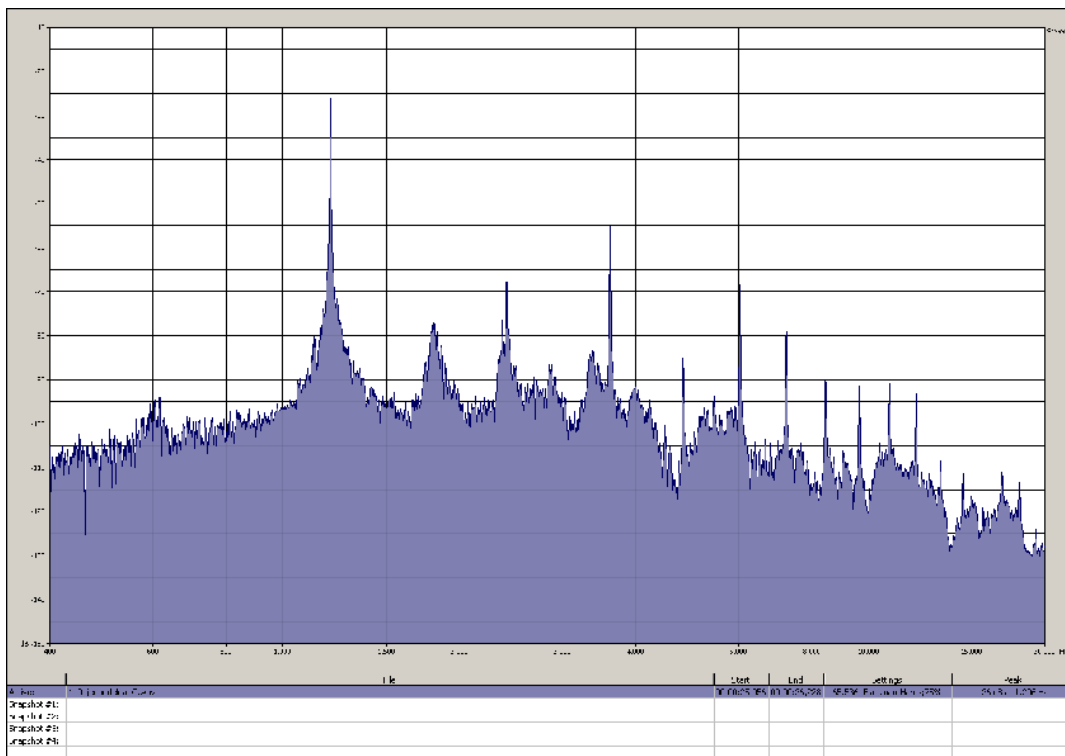




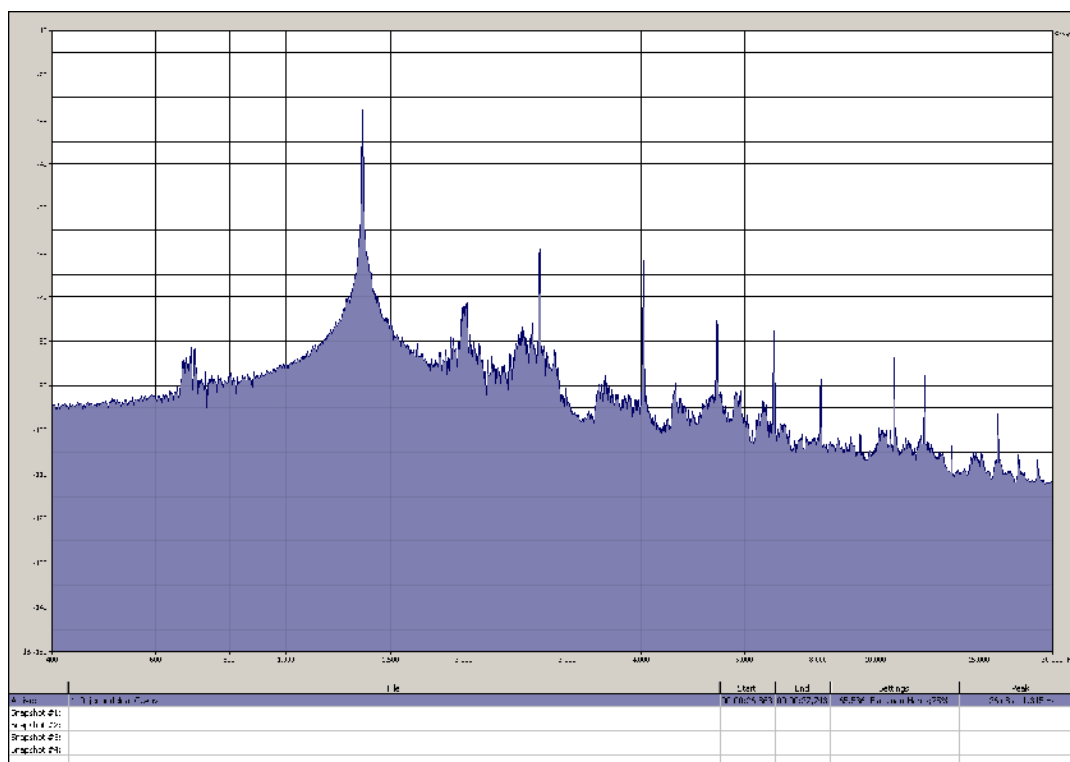
Slika 33.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



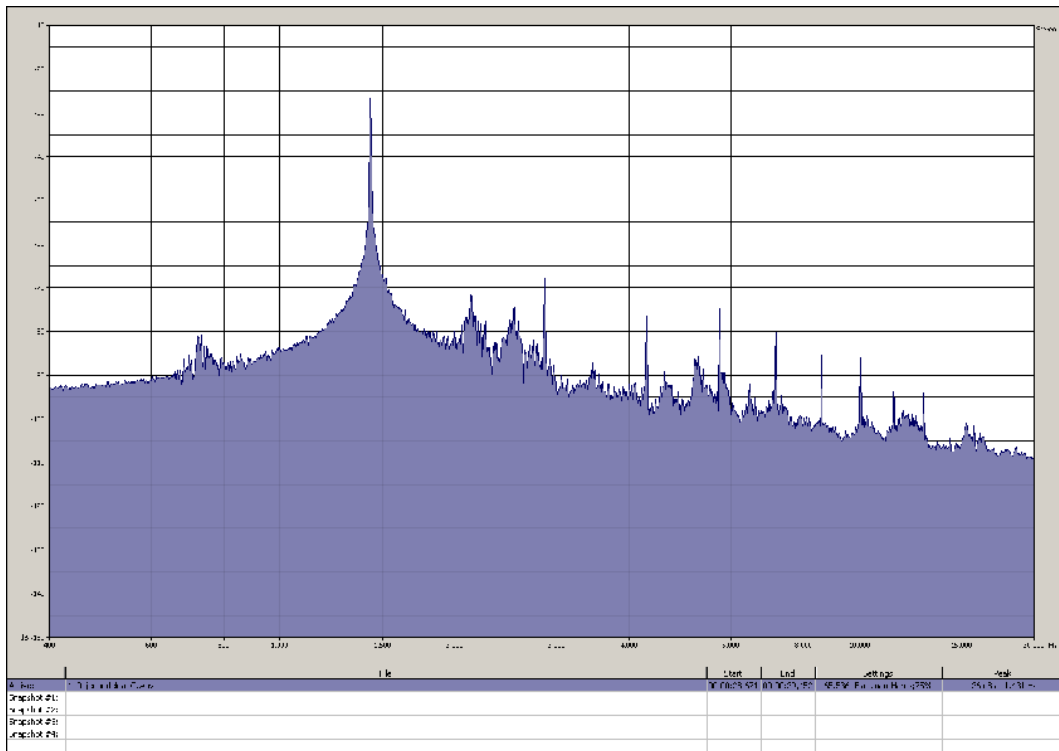
Slika 33.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



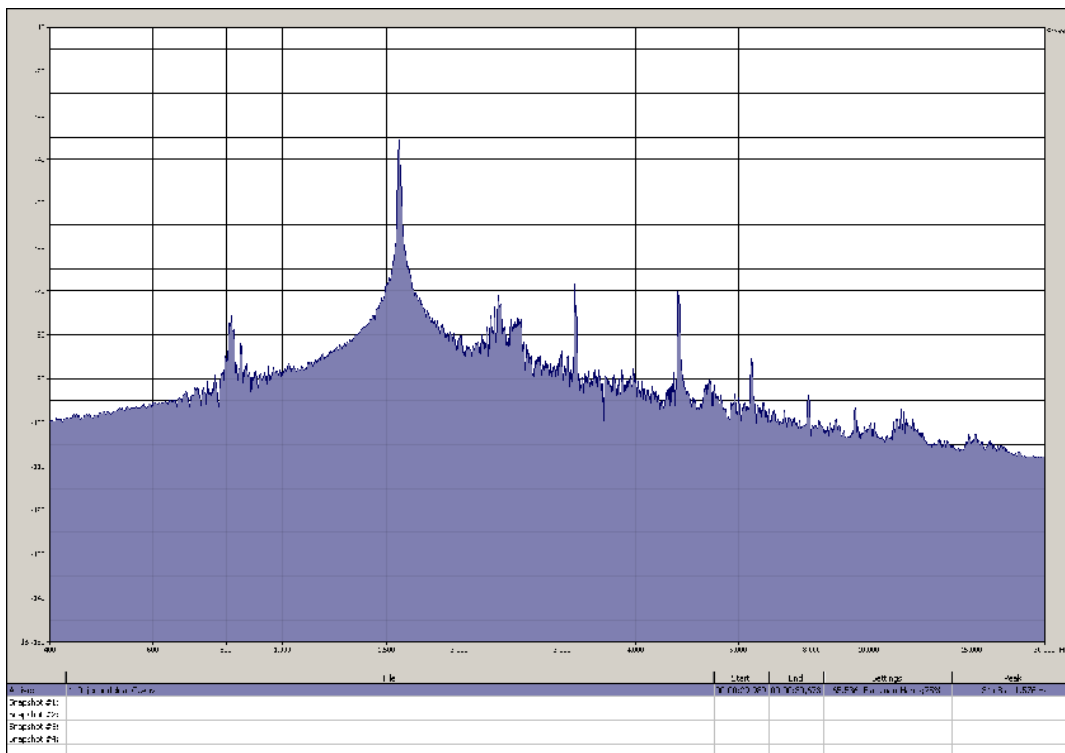
Slika 33.9: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



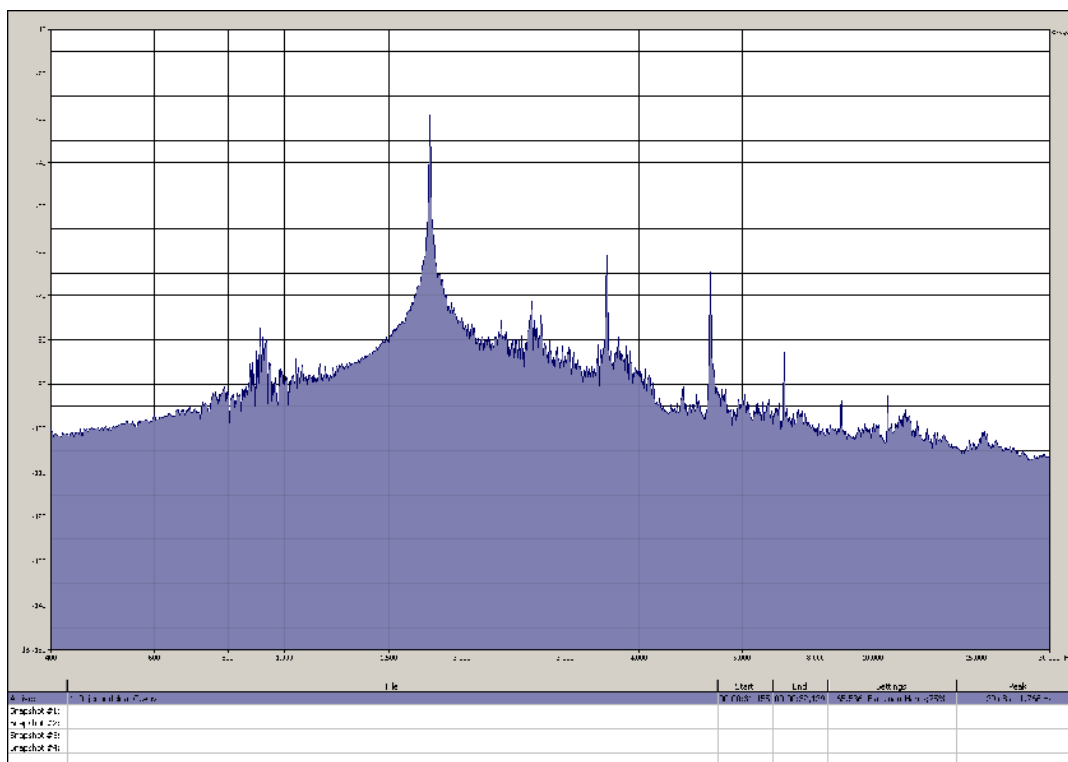
Slika 33.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



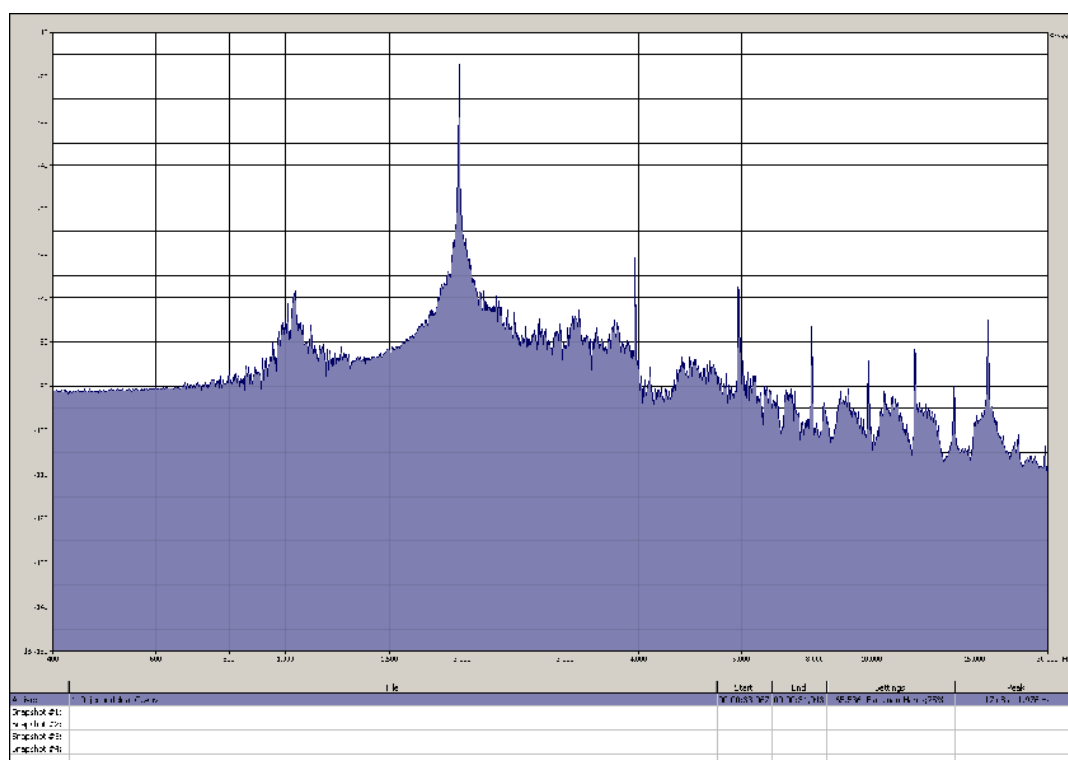
Slika 33.11: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na jednodeloj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



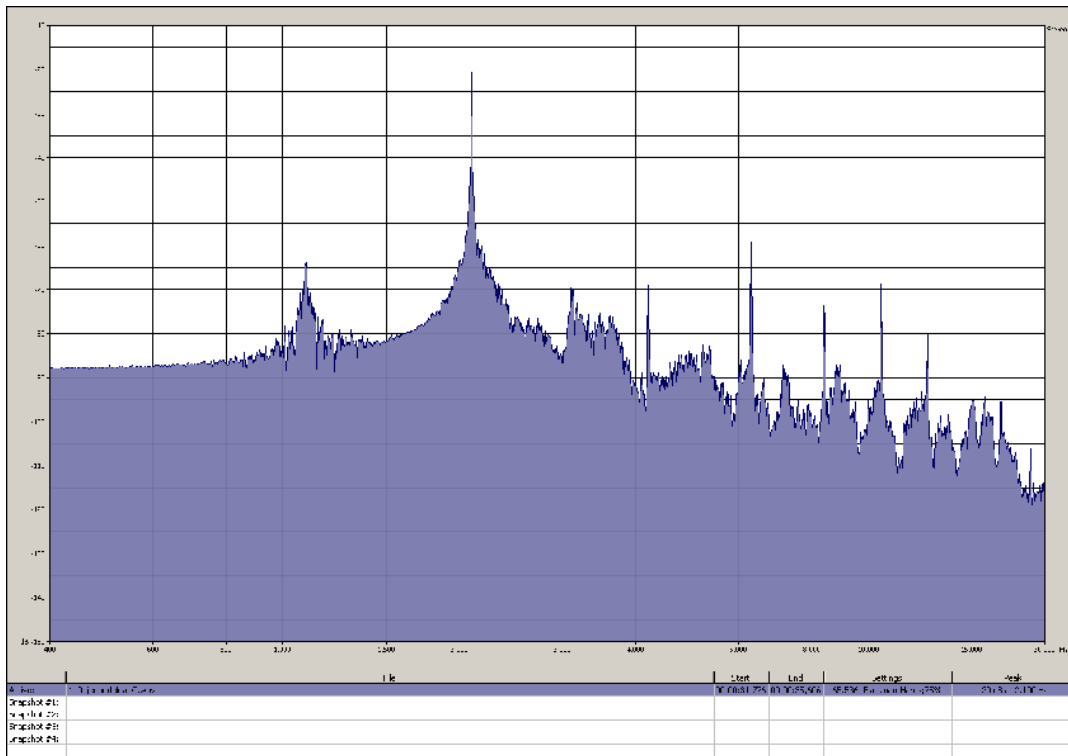
Slika 33.12: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na jednodeloj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača



Slika 33.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

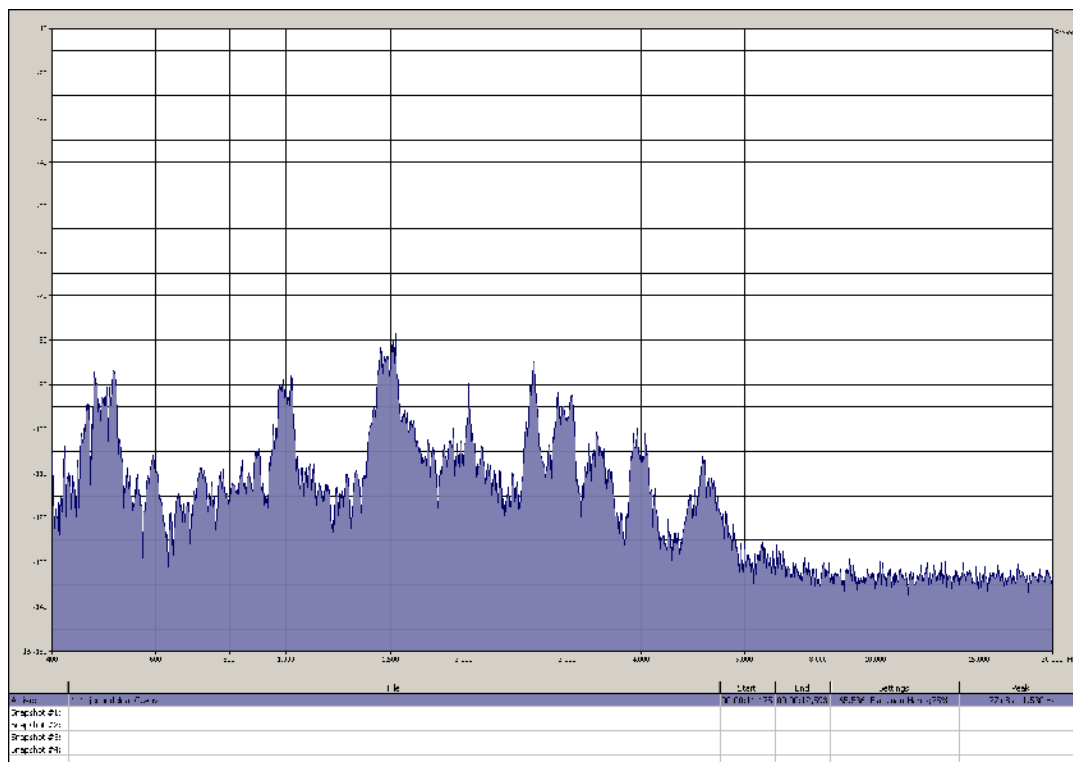


Slika 33.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

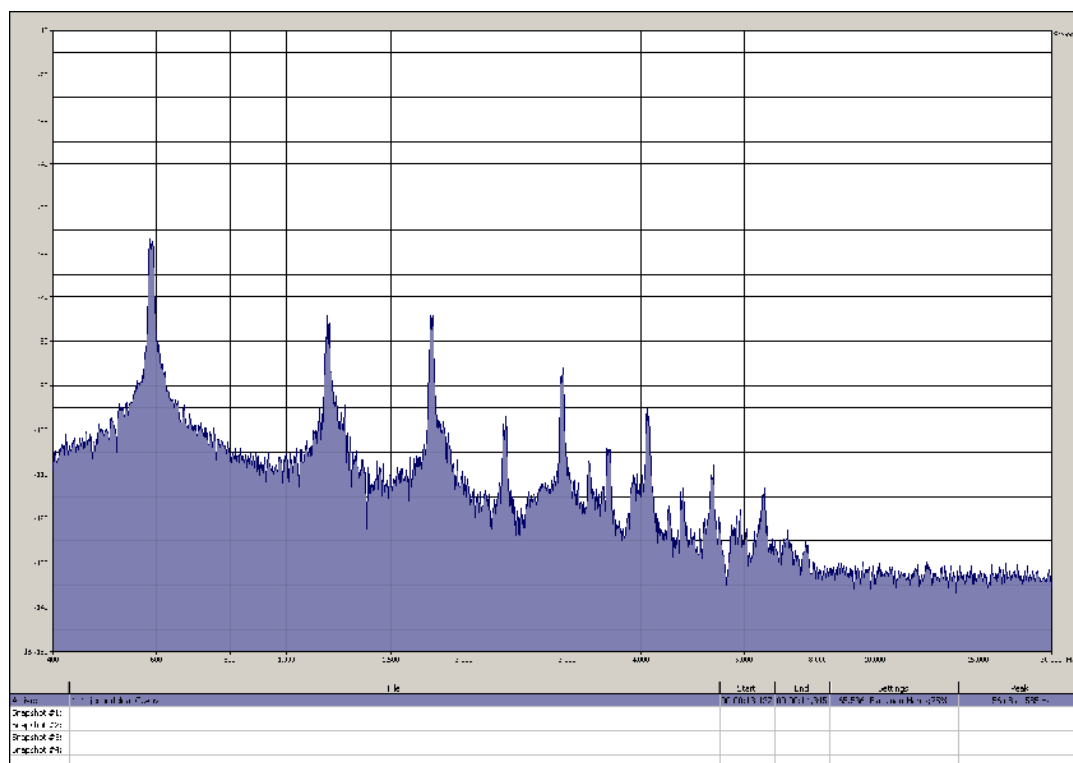


Slika 33.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) bez prigušivača

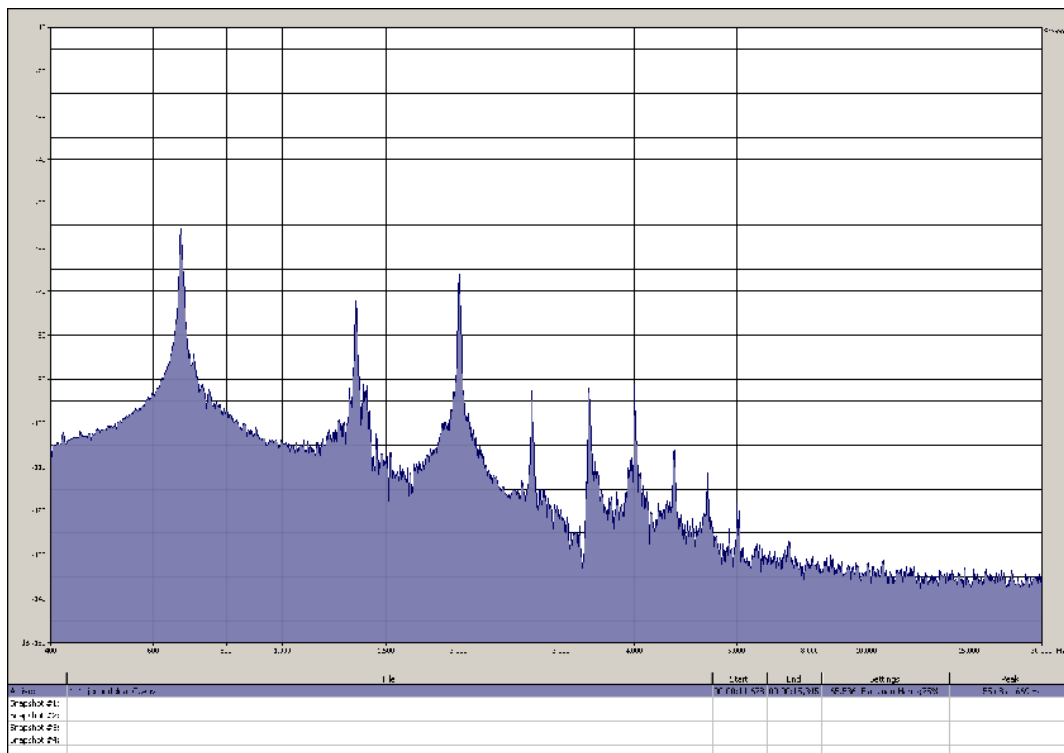
DODATAK 34: FREKVENCIJSKI SPEKTAR JEDNODELNE C FRULE  
 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) SA PRIGUŠIVAČEM 1 (gusto tkano  
 pamučno platno)



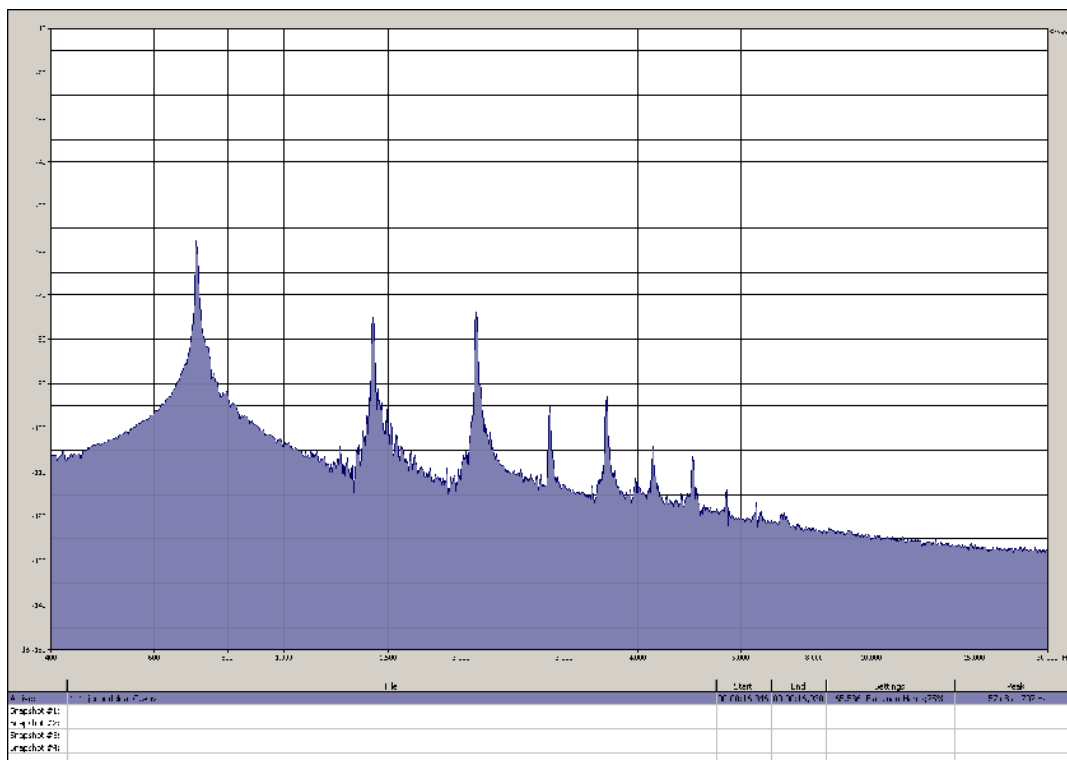
Slika 34.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli  
 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



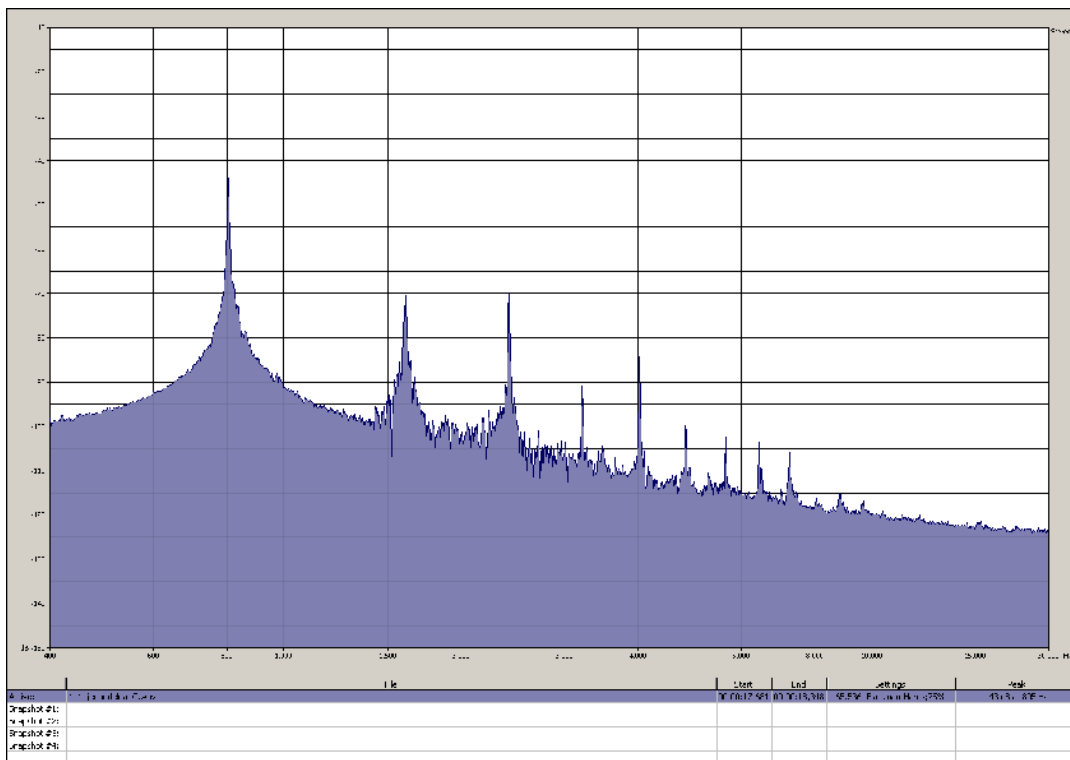
Slika 34.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli  
 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



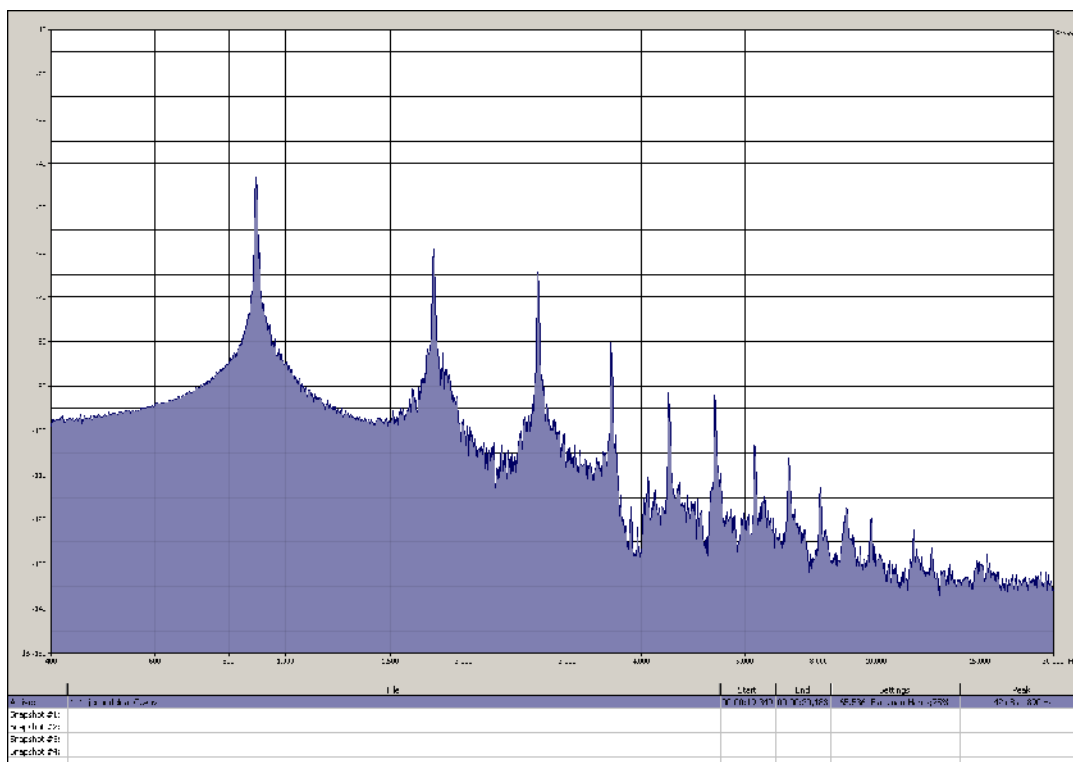
Slika 34.3: Frekvenjski spekter tona  $e^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



Slika 34.4: Frekvenjski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1

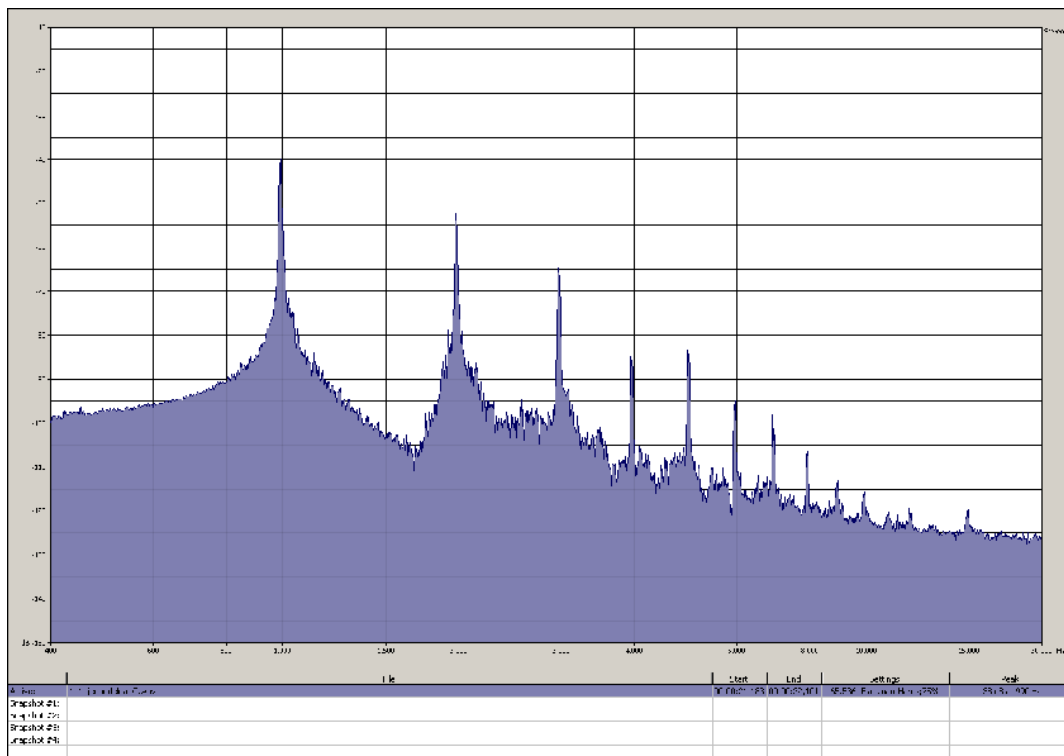


Slika 34.5: Frekvenčni spekter tona  $g^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1

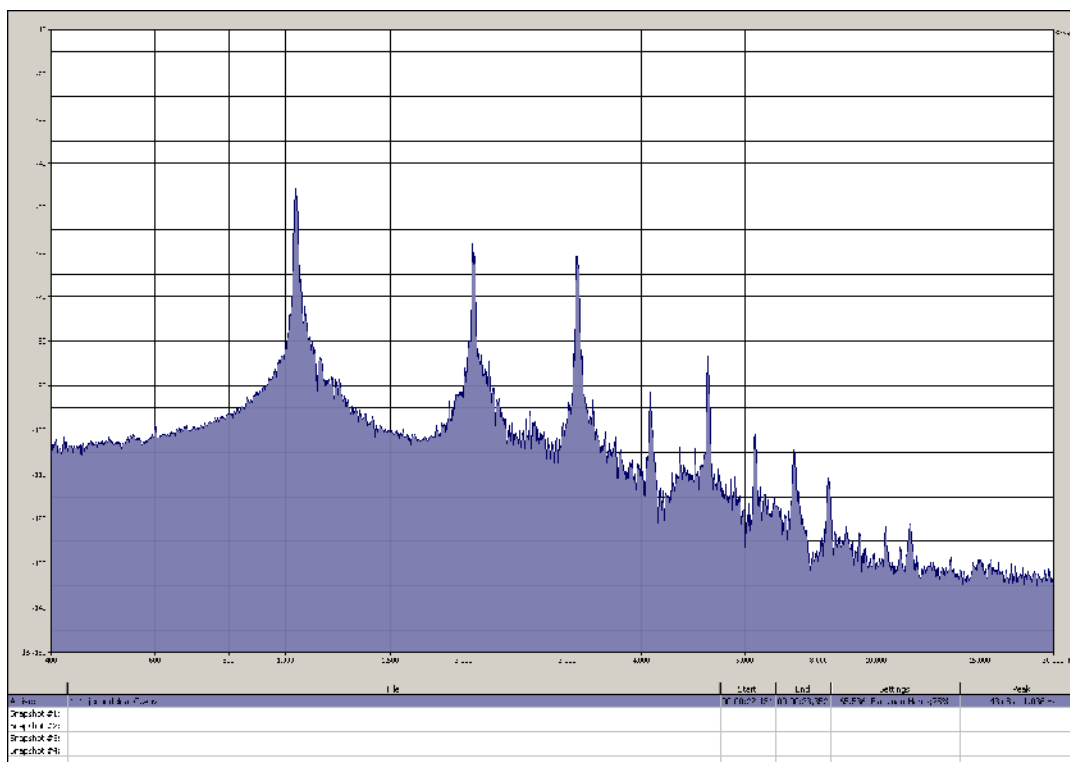


Slika 34.6: Frekvenčni spekter tona  $a^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1

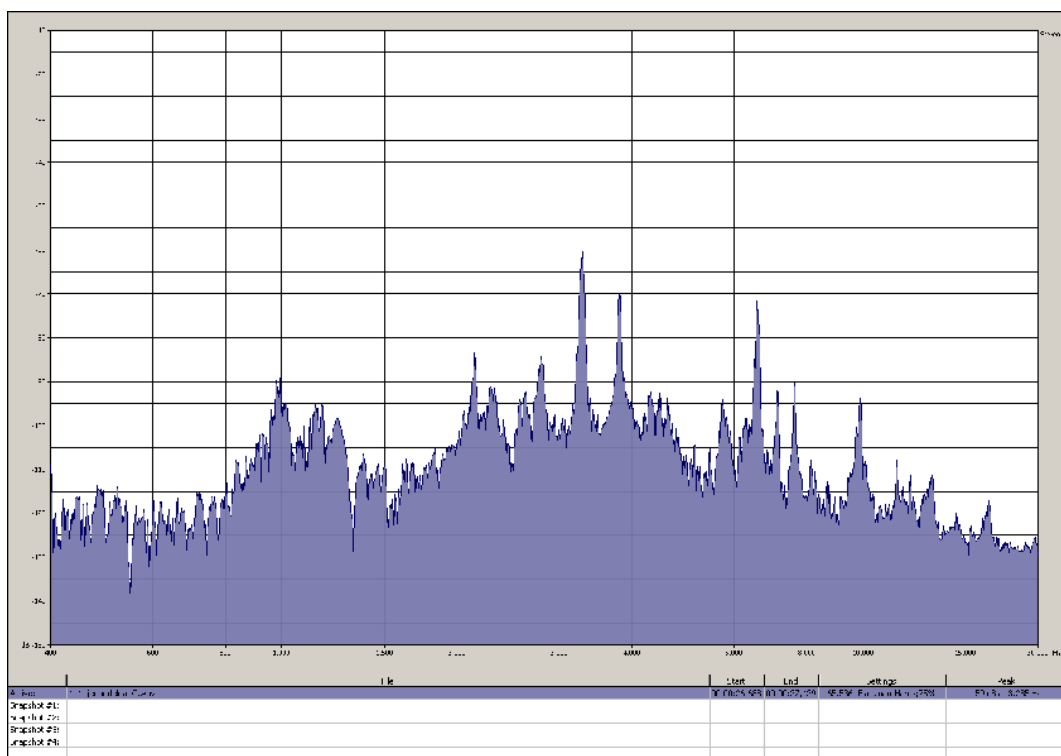




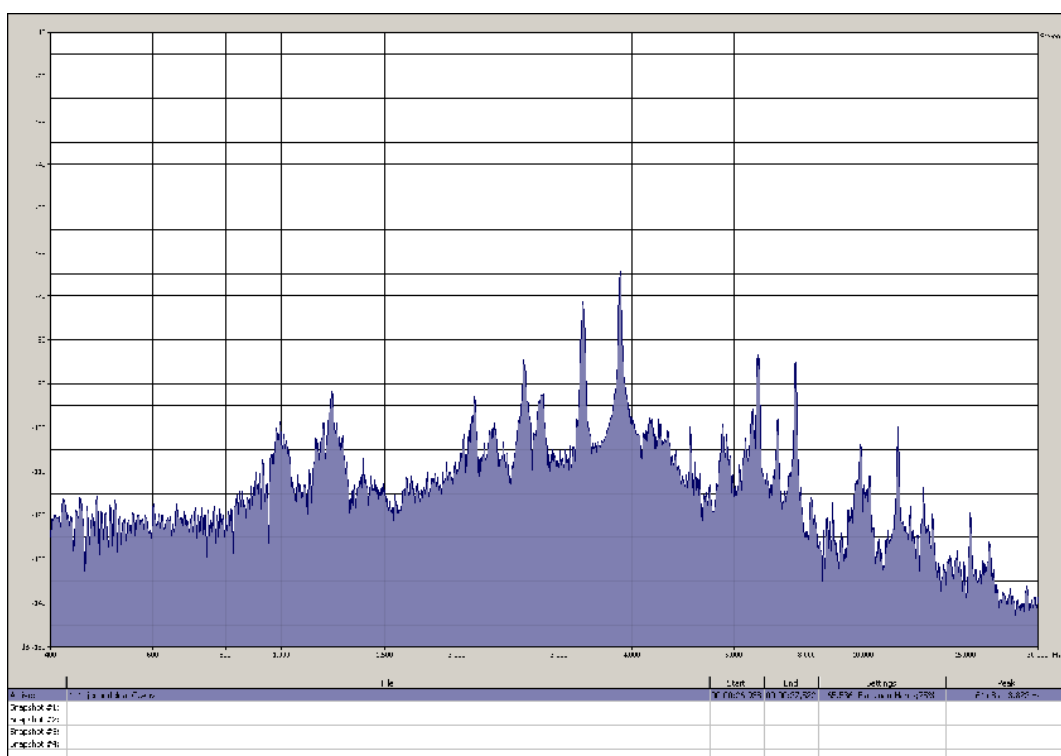
Slika 34.7: Frekvencijski spekter tona  $h^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



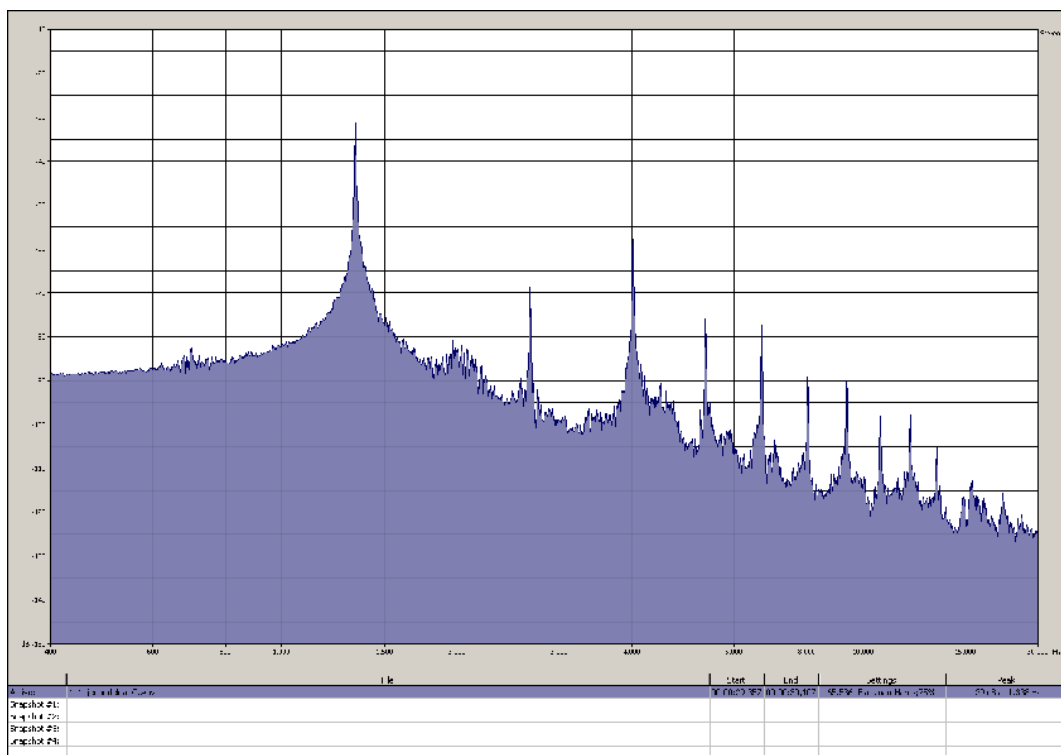
Slika 34.8: Frekvencijski spekter tona  $c^3$ , odsviranog u donjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



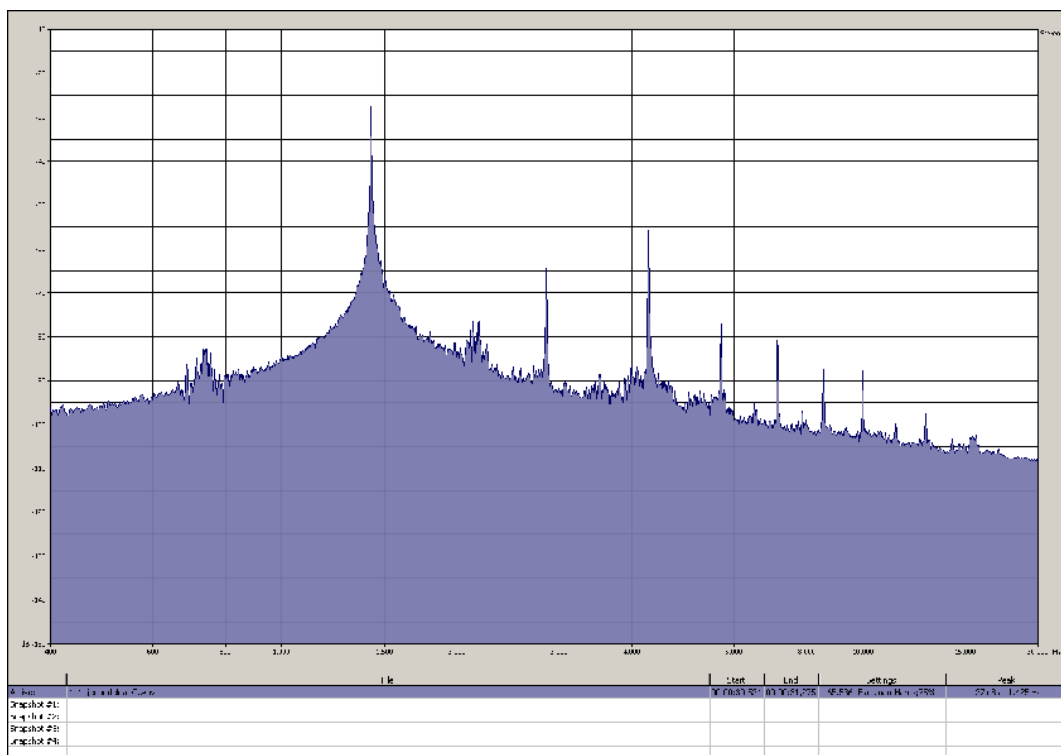
Slika 34.9: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u gornjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



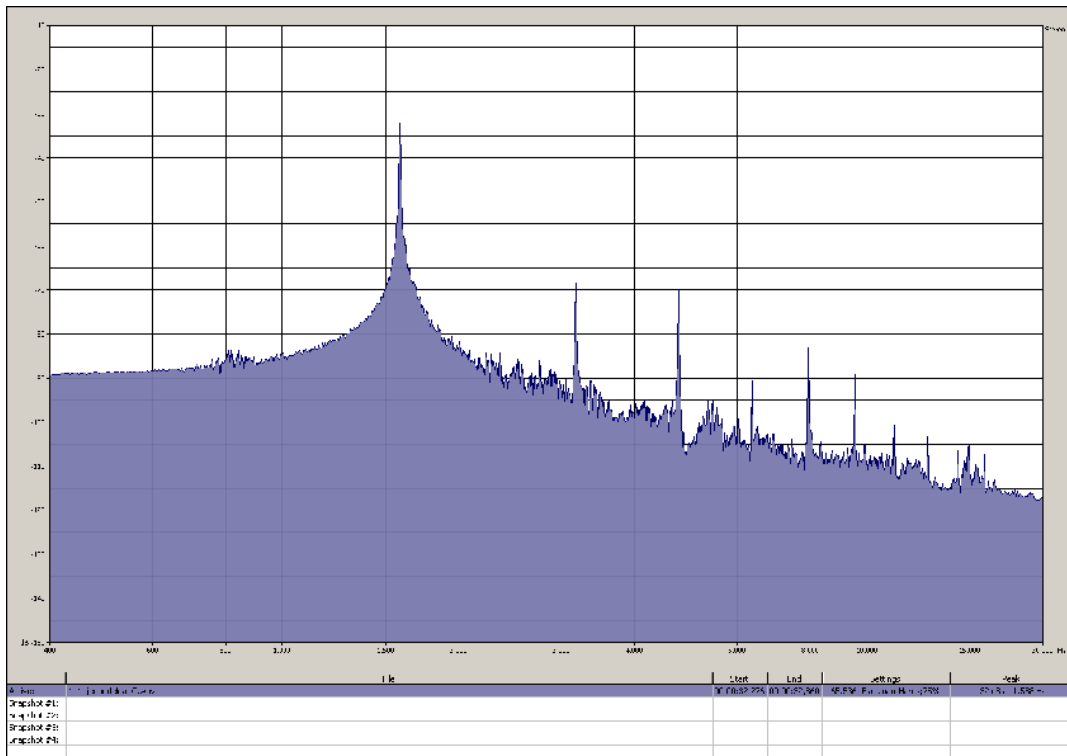
Slika 34.10: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



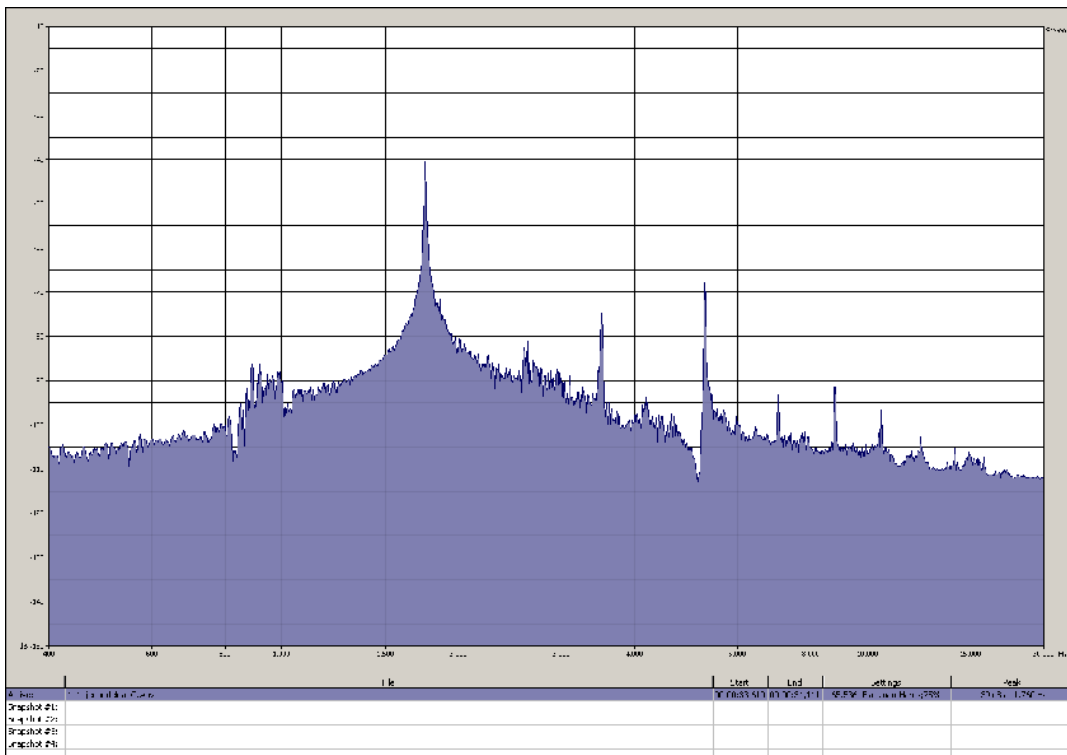
Slika 34.11: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



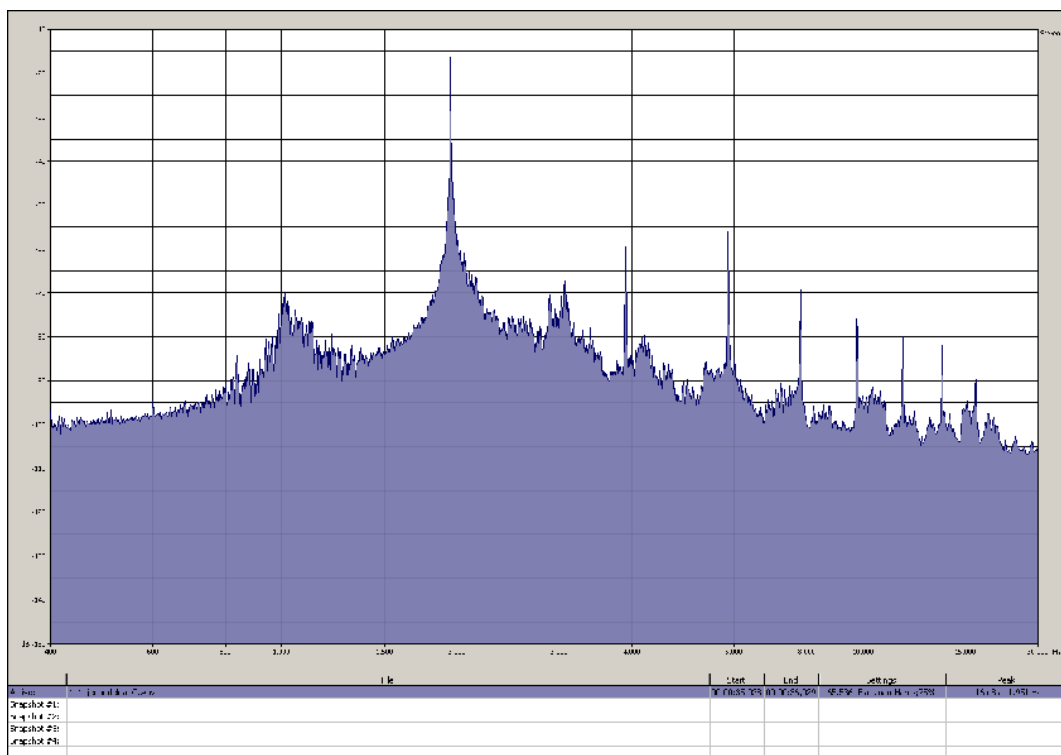
Slika 34.12: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1



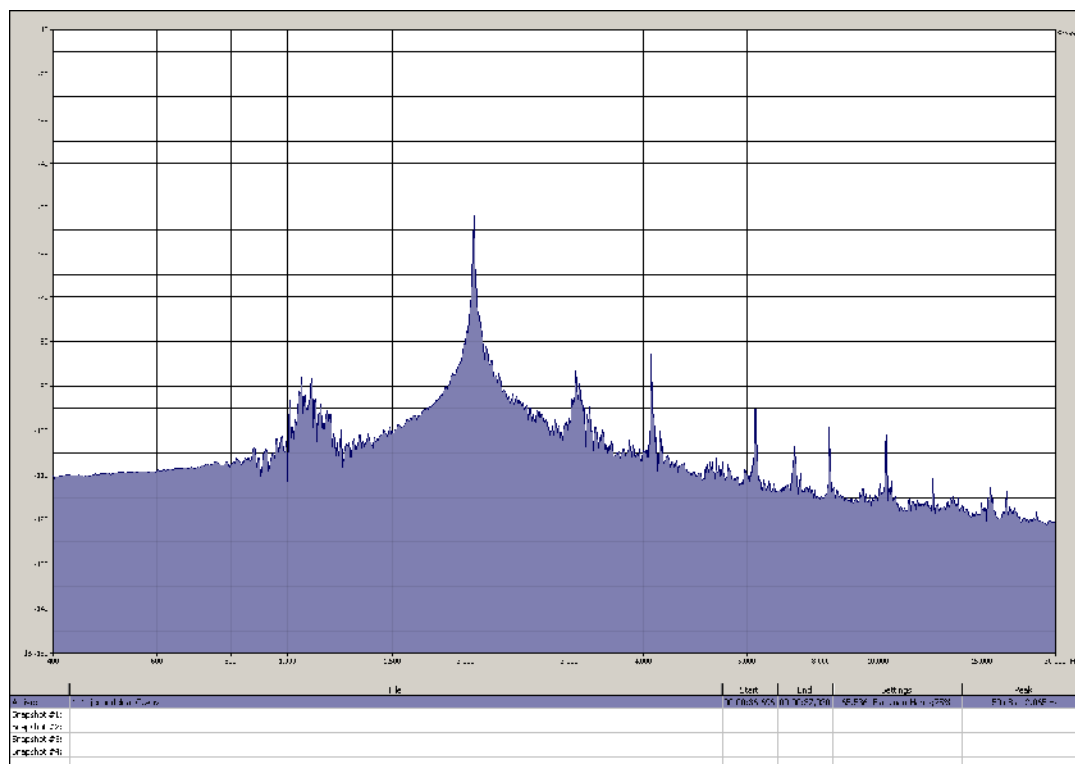
Slika 34.13: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ) sa prigušivačem 1



Slika 34.14: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ) sa prigušivačem 1

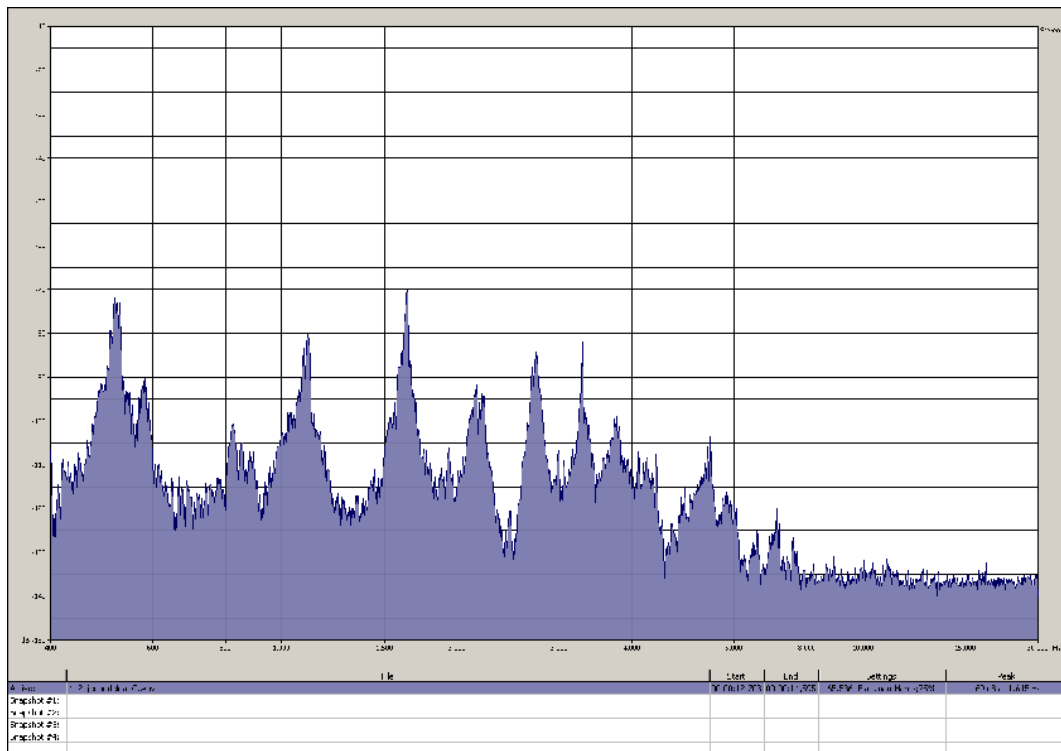


Slika 34.15: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1

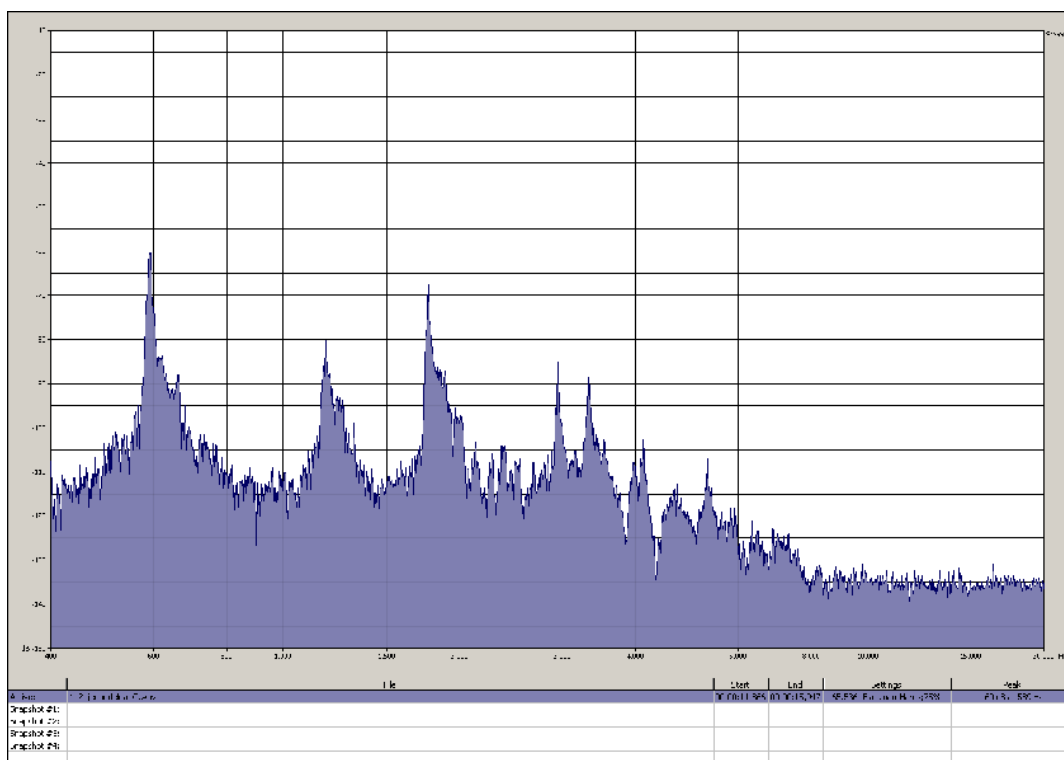


Slika 34.16: Frekvencijski spekter tona  $c^4$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 1

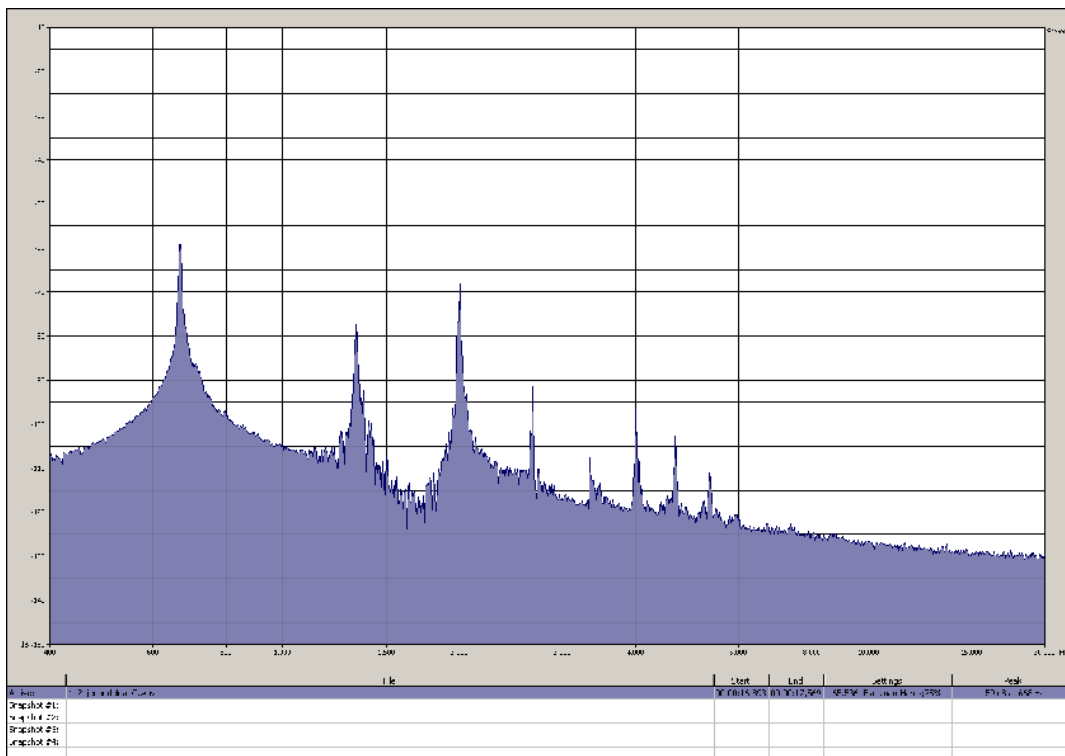
DODATAK 35: FREKVENCIJSKI SPEKTAR JEDNODELNE C FRULE  
 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) SA PRIGUŠIVAČEM 2 (srednje gusto  
 tkano laneno platno)



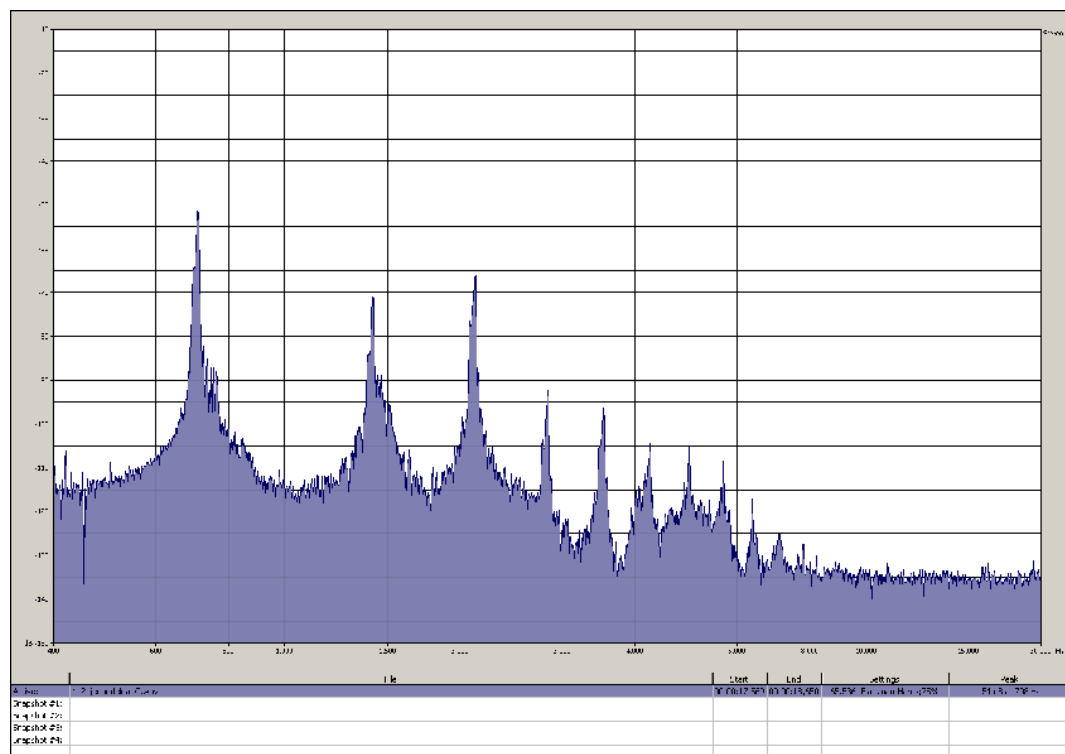
Slika 35.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



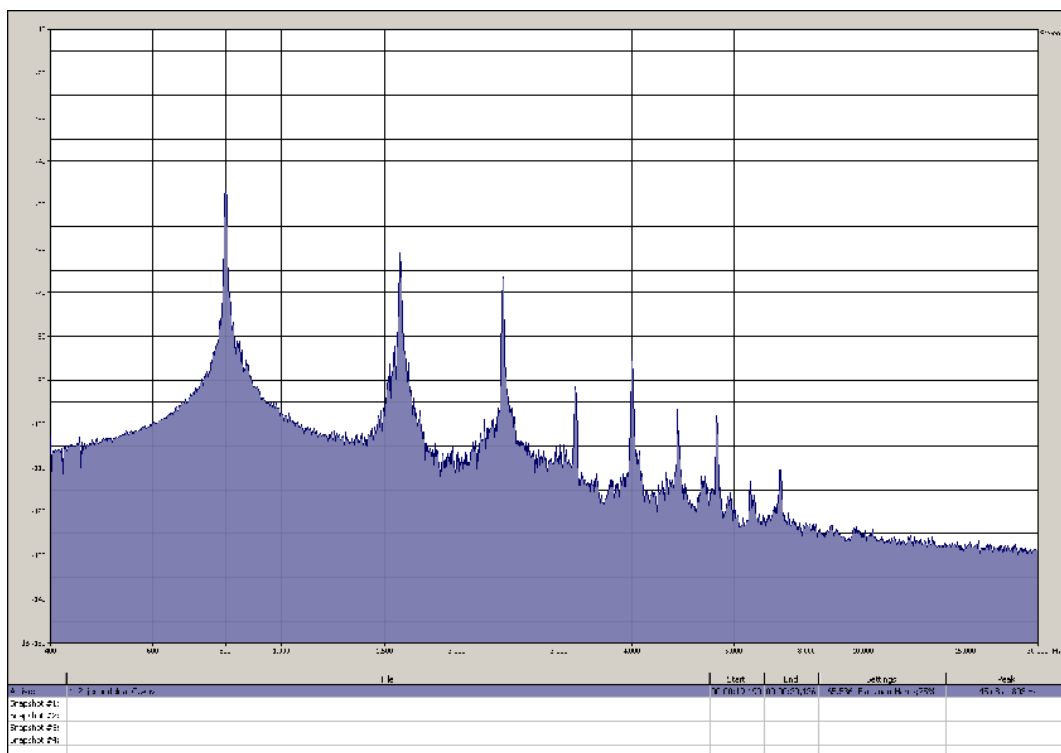
Slika 35.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



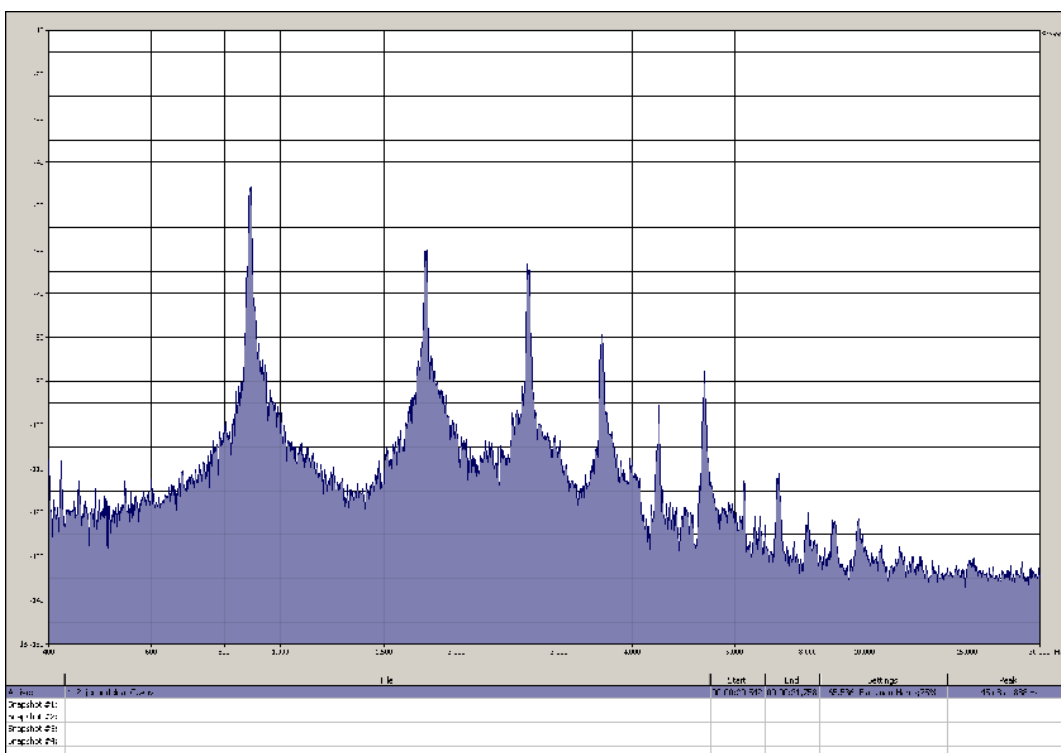
Slika 35.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ) sa prigušivačem 2



Slika 35.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14 \text{ mm}$ ) sa prigušivačem 2

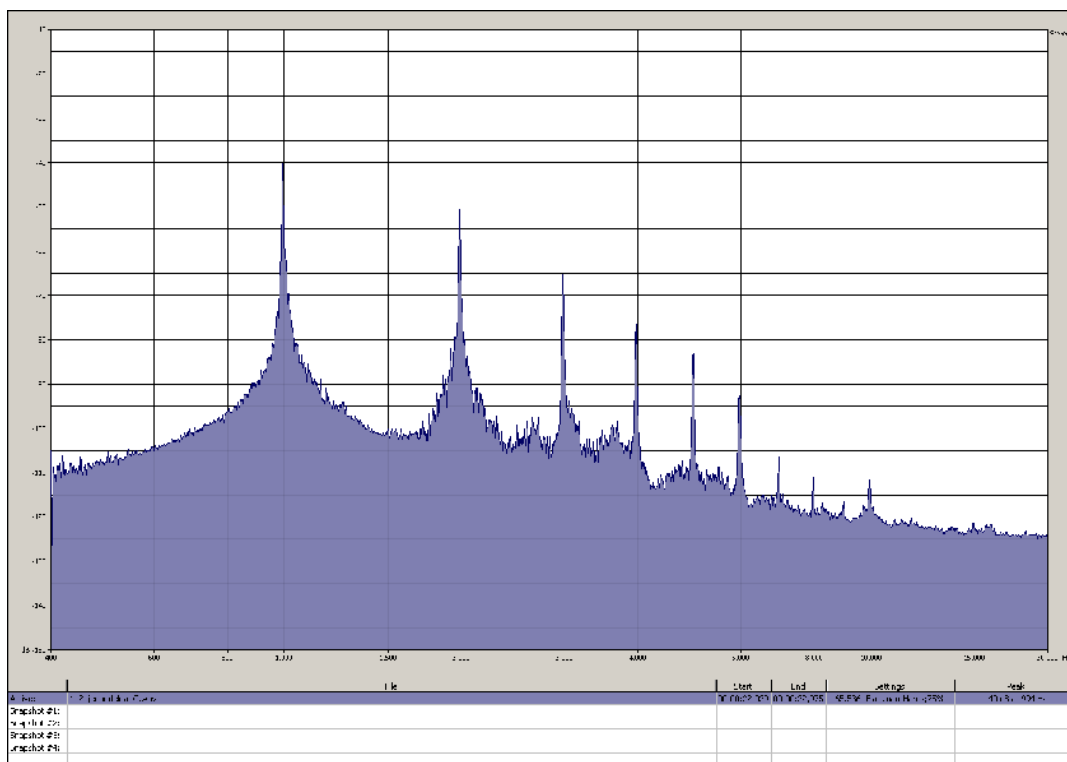


Slika 35.5: Frekvencijski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2

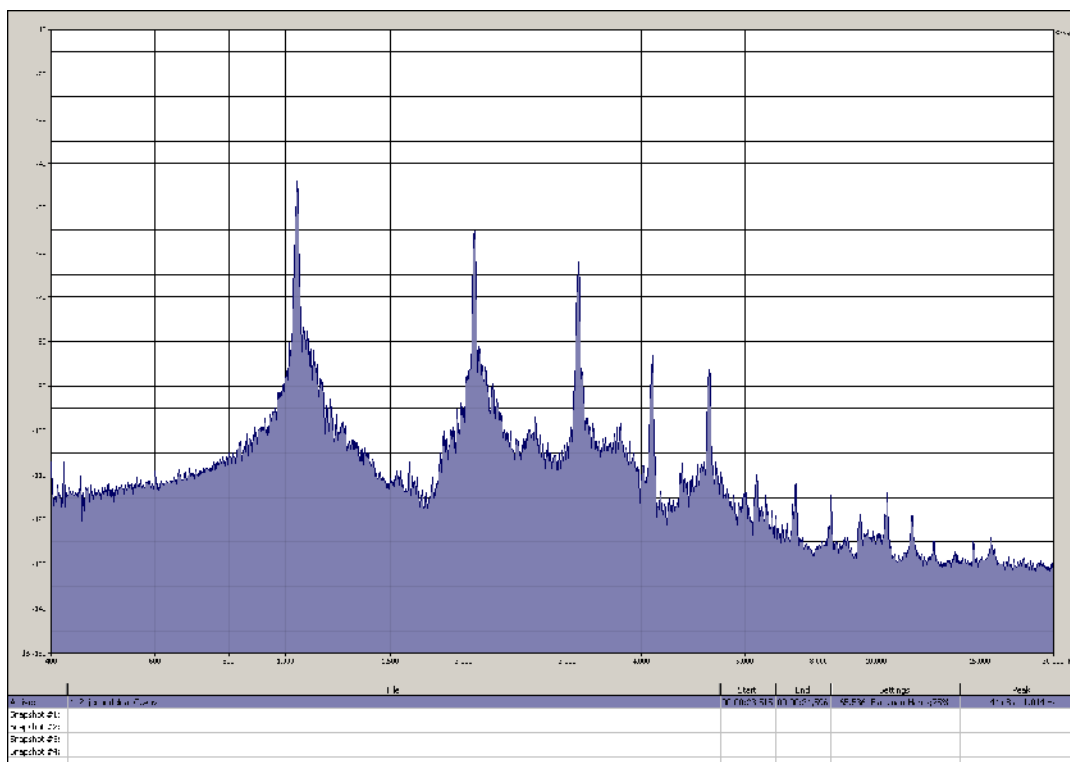


Slika 35.6: Frekvencijski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2

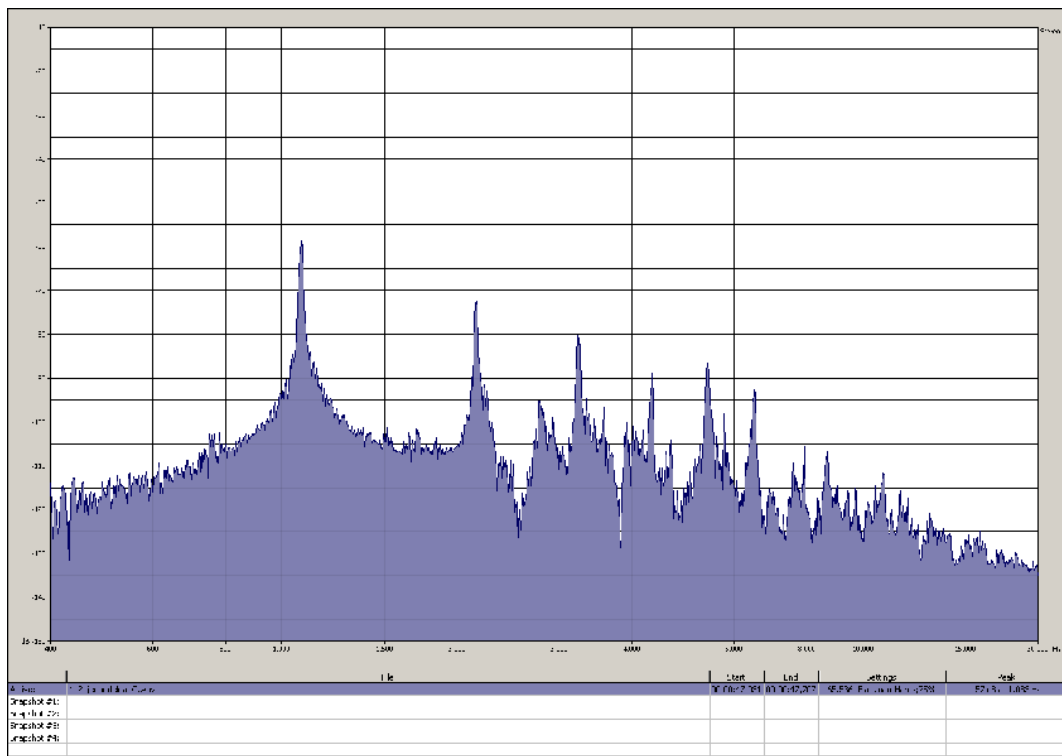




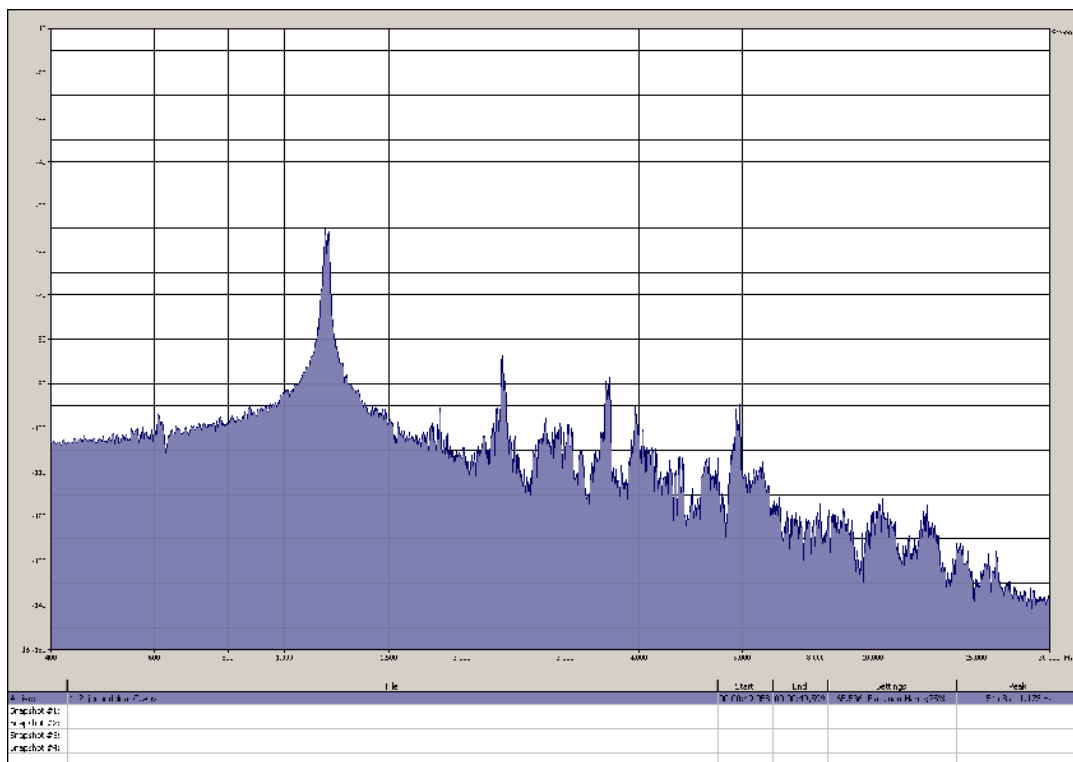
Slika 35.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



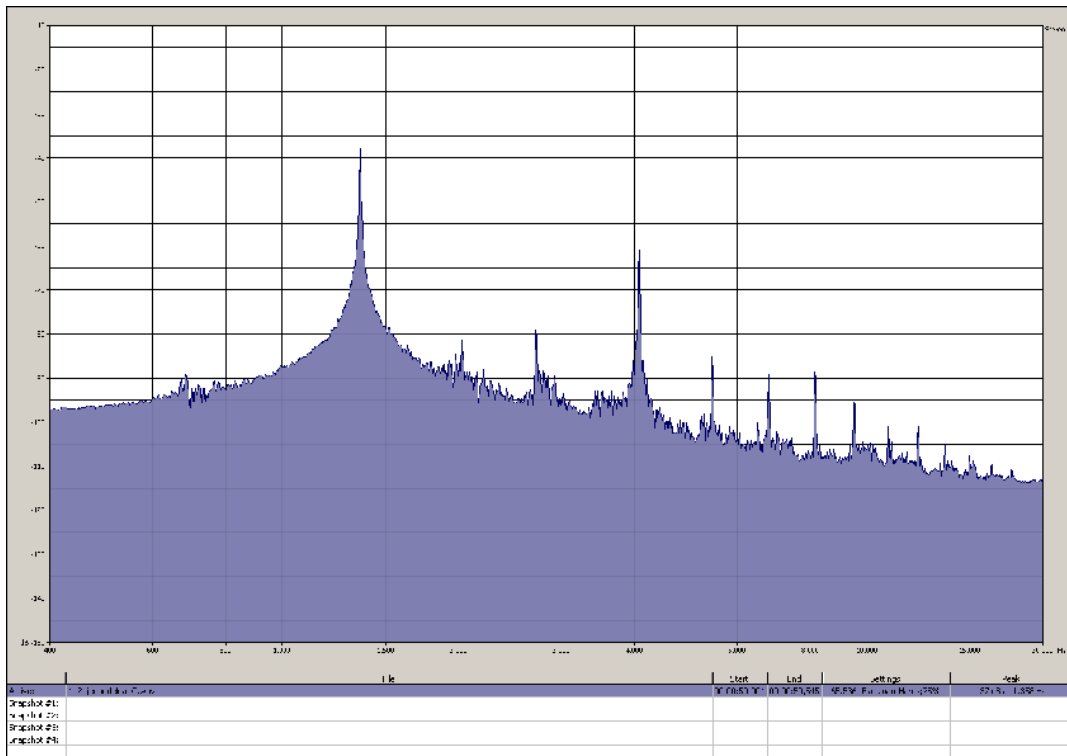
Slika 35.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u donjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



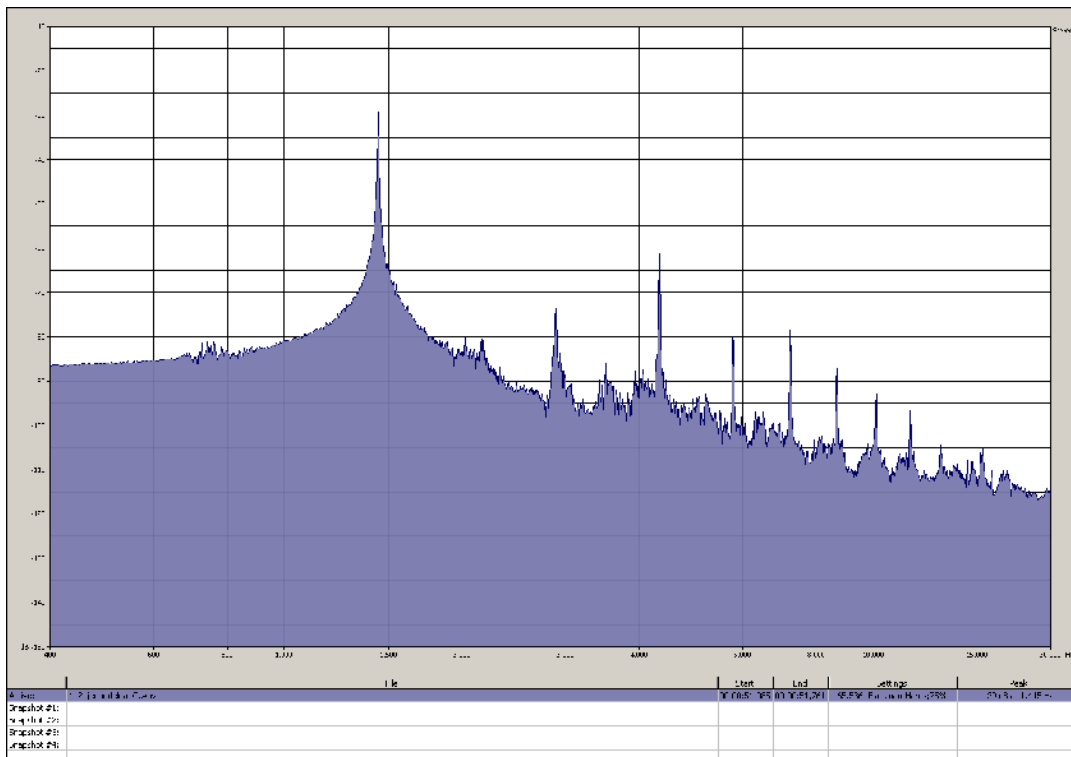
Slika 35.9: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u gornjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



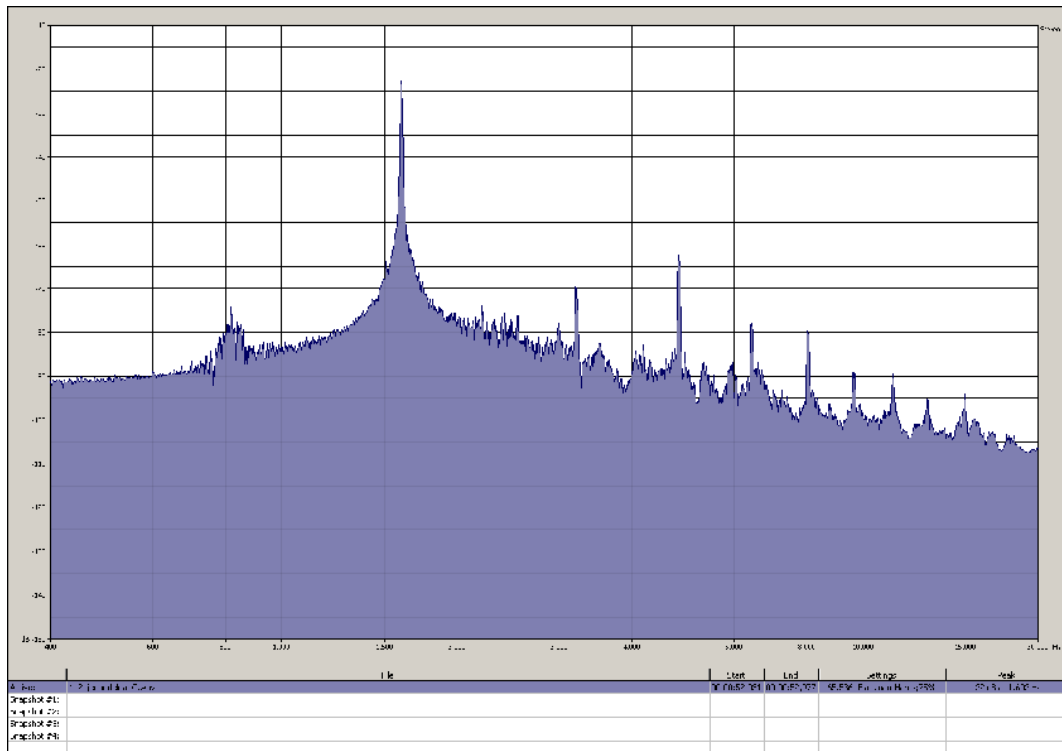
Slika 35.10: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



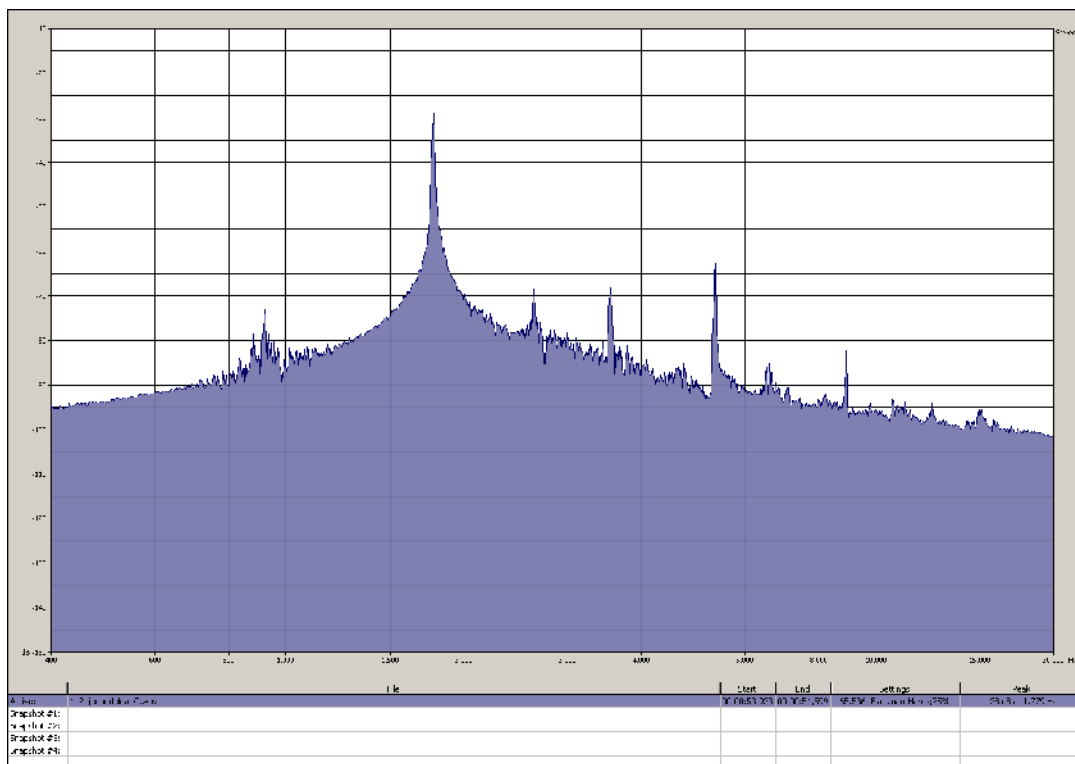
Slika 35.11: Frekvenčni spekter tona  $e^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



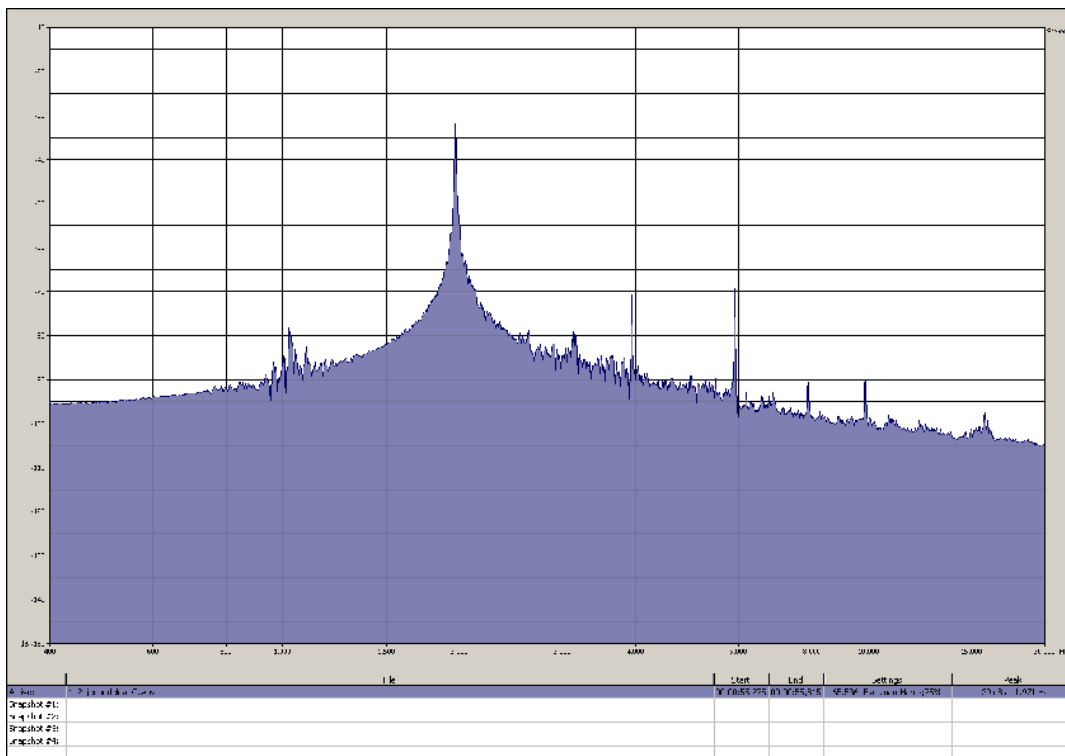
Slika 35.12: Frekvenčni spekter tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



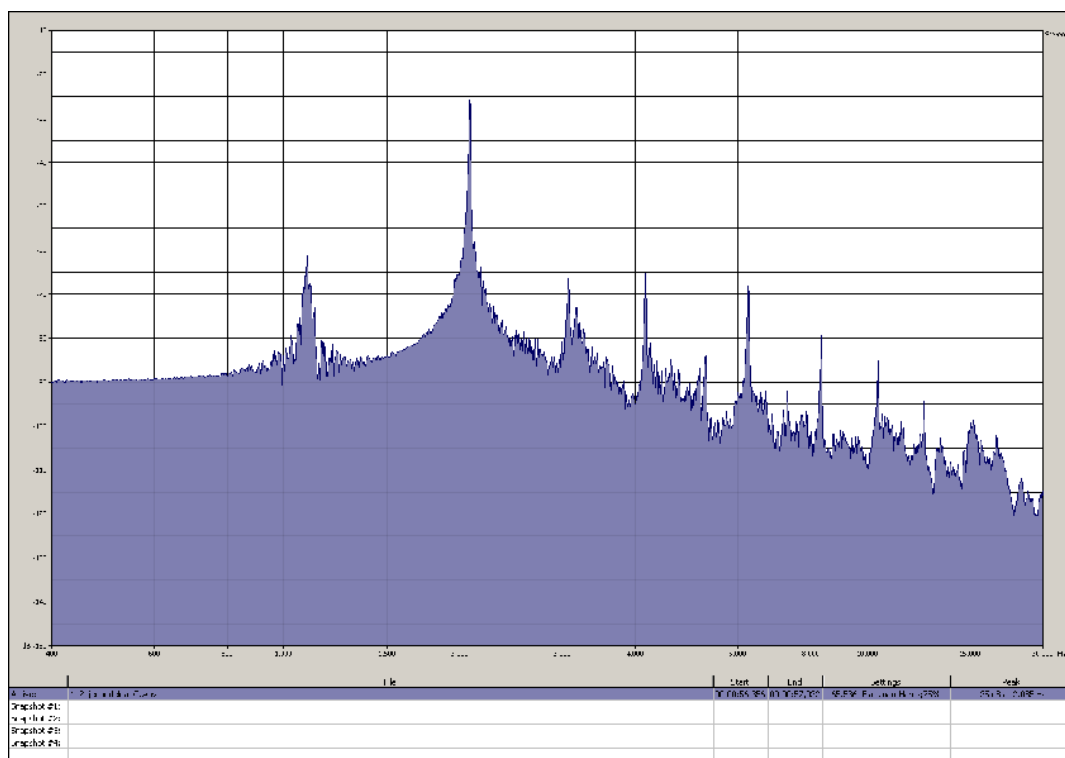
Slika 35.13: Frekvencijski spekter tona  $g^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2



Slika 35.14: Frekvencijski spekter tona  $a^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2

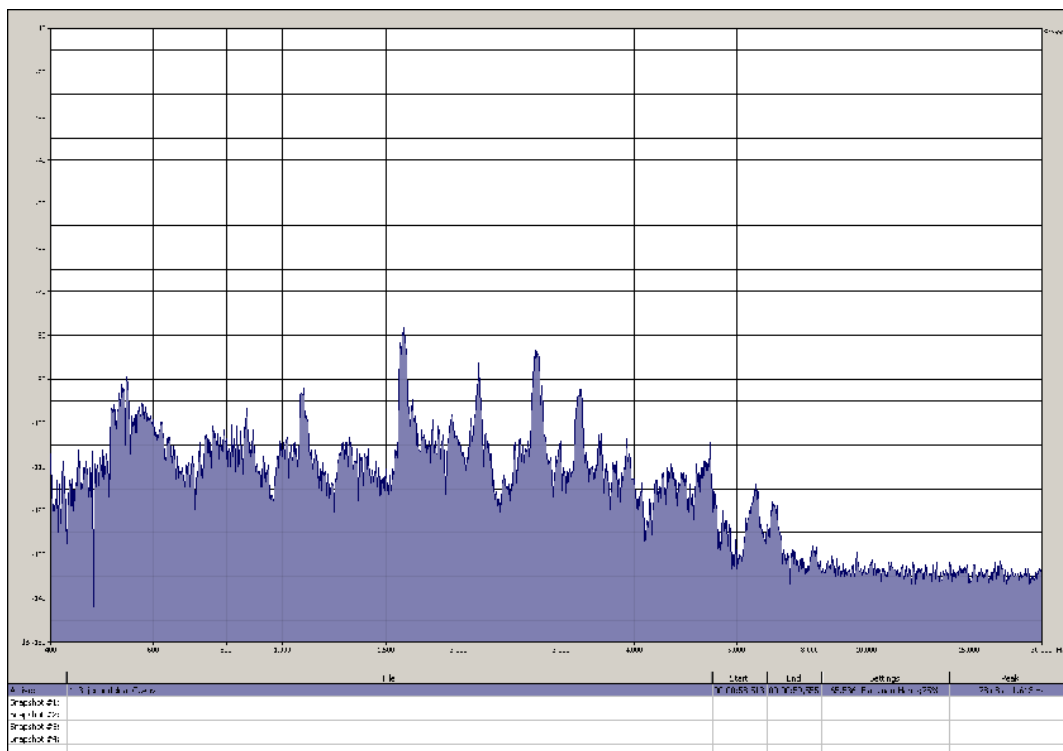


Slika 35.15: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2

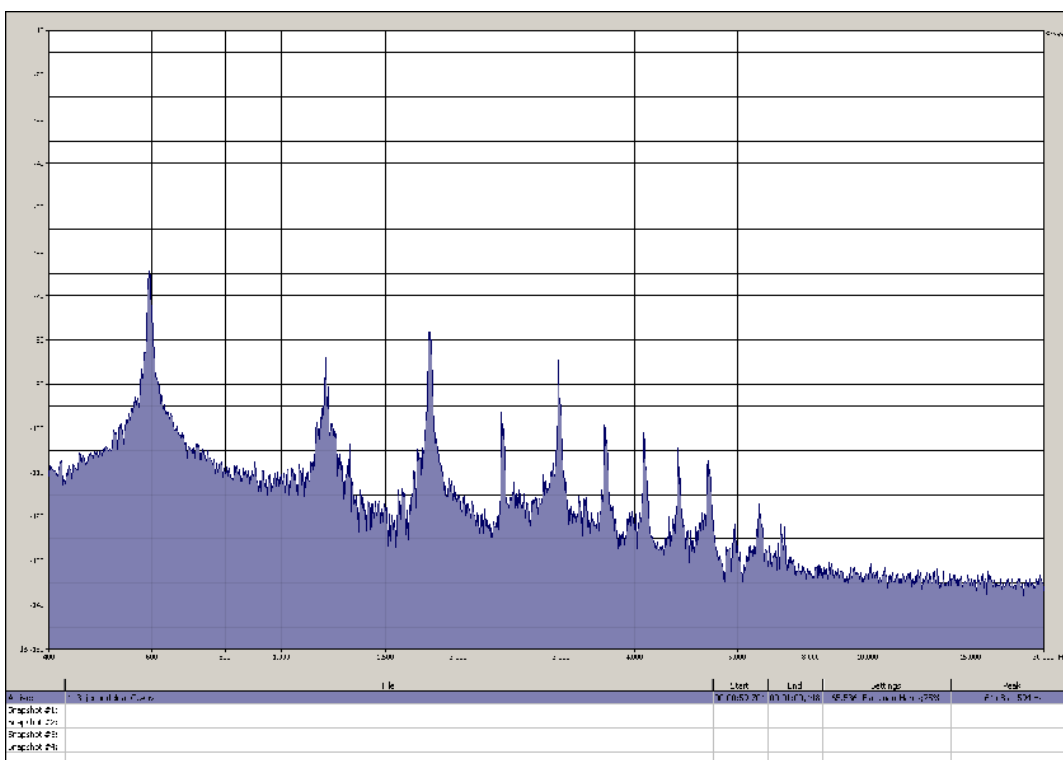


Slika 35.16: Frekvencijski spekter tona  $c^4$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 2

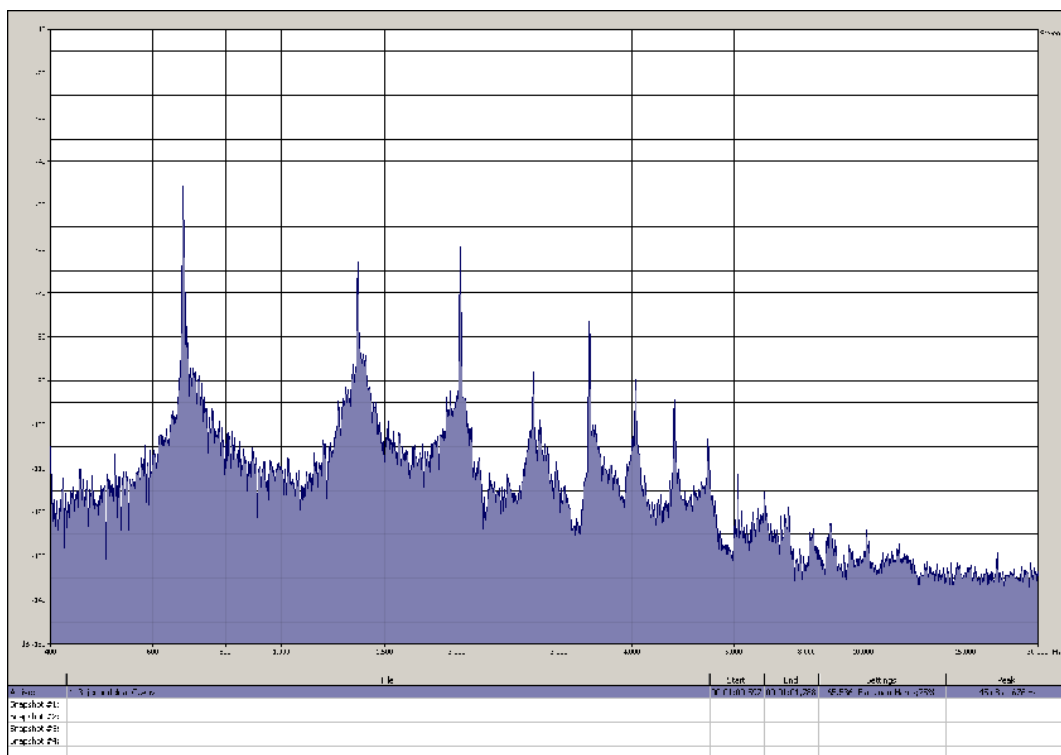
DODATAK 36: FREKVENCIJSKI SPEKTAR JEDNODELNE C FRULE  
 (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) SA PRIGUŠIVAČEM 3 (gusto tkano  
 papirno platno)



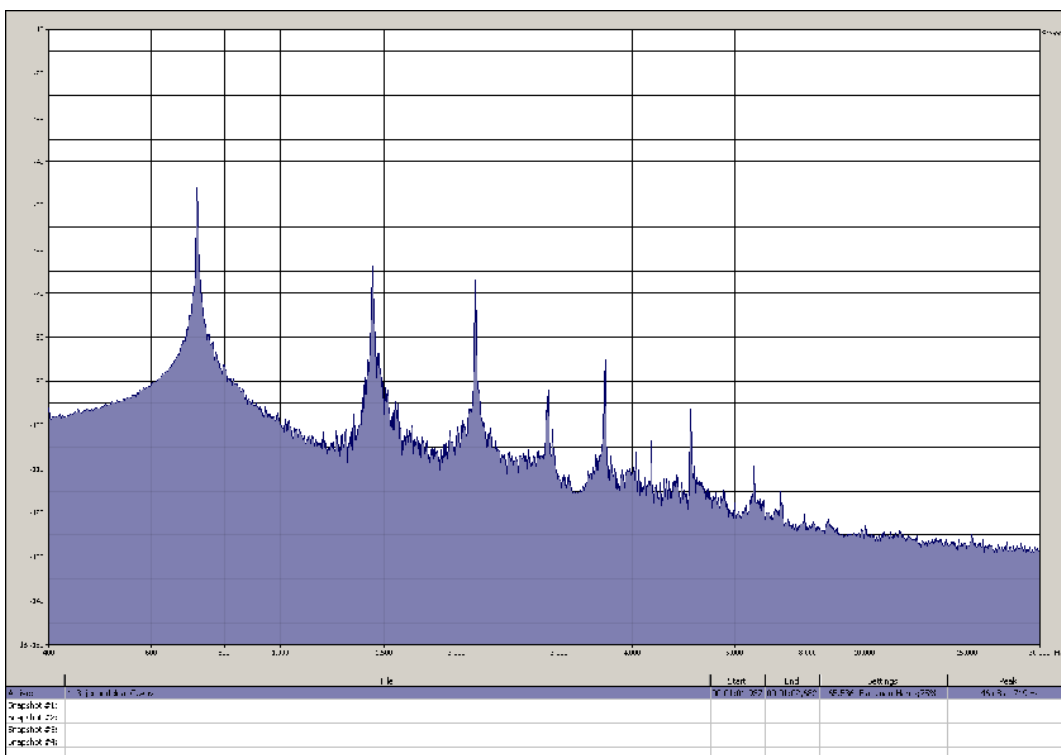
Slika 36.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



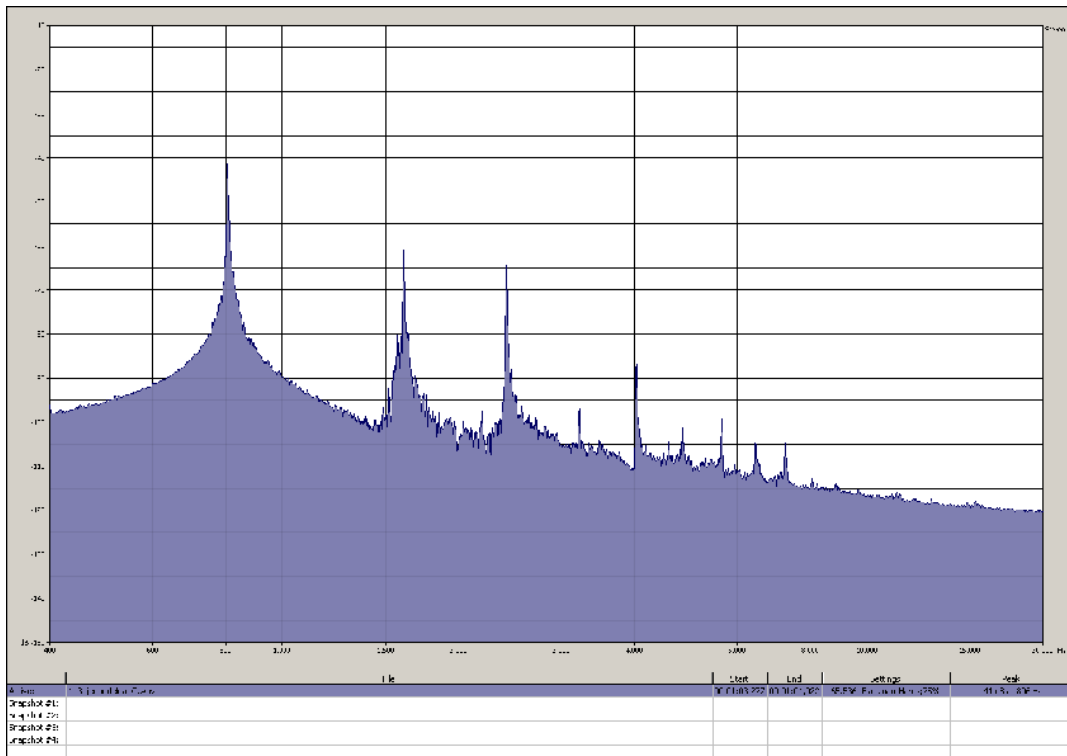
Slika 36.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



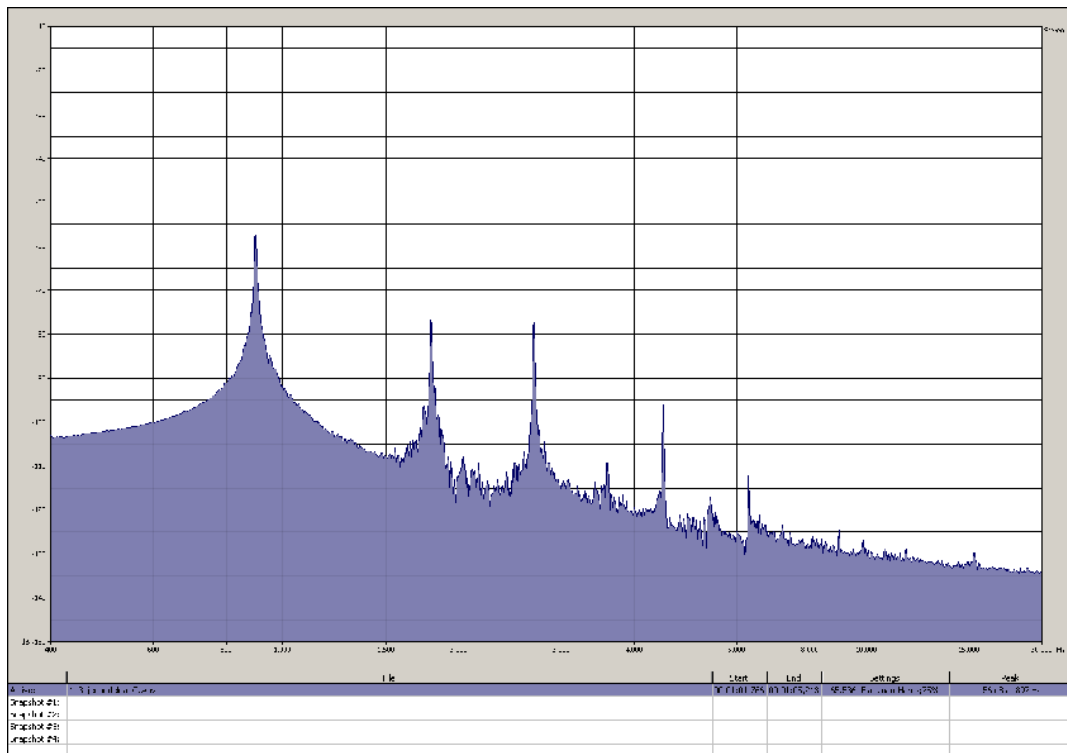
Slika 36.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



Slika 36.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

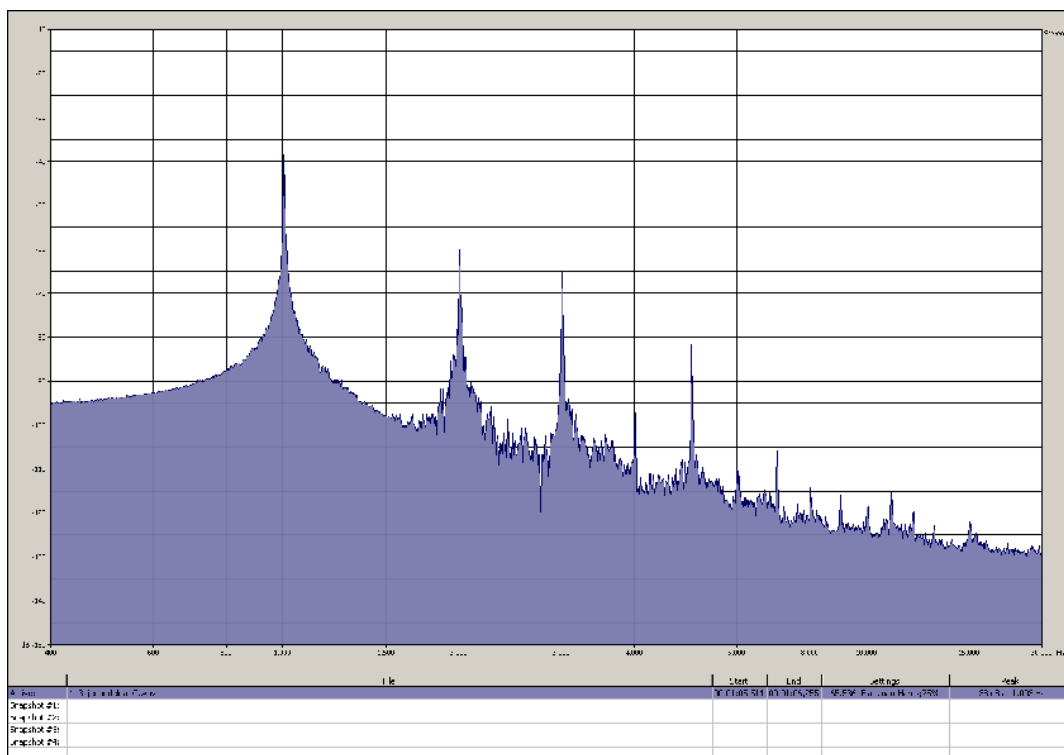


Slika 36.5: Frekvenjski spekter tona  $g^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

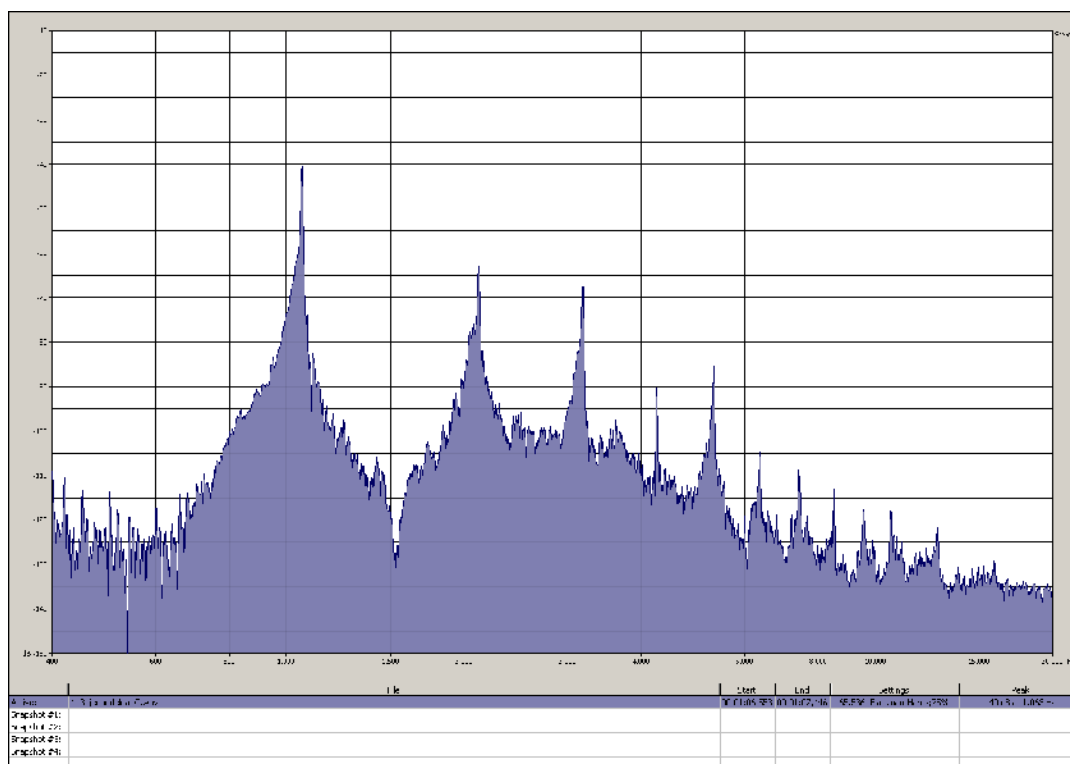


Slika 36.6: Frekvenjski spekter tona  $a^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

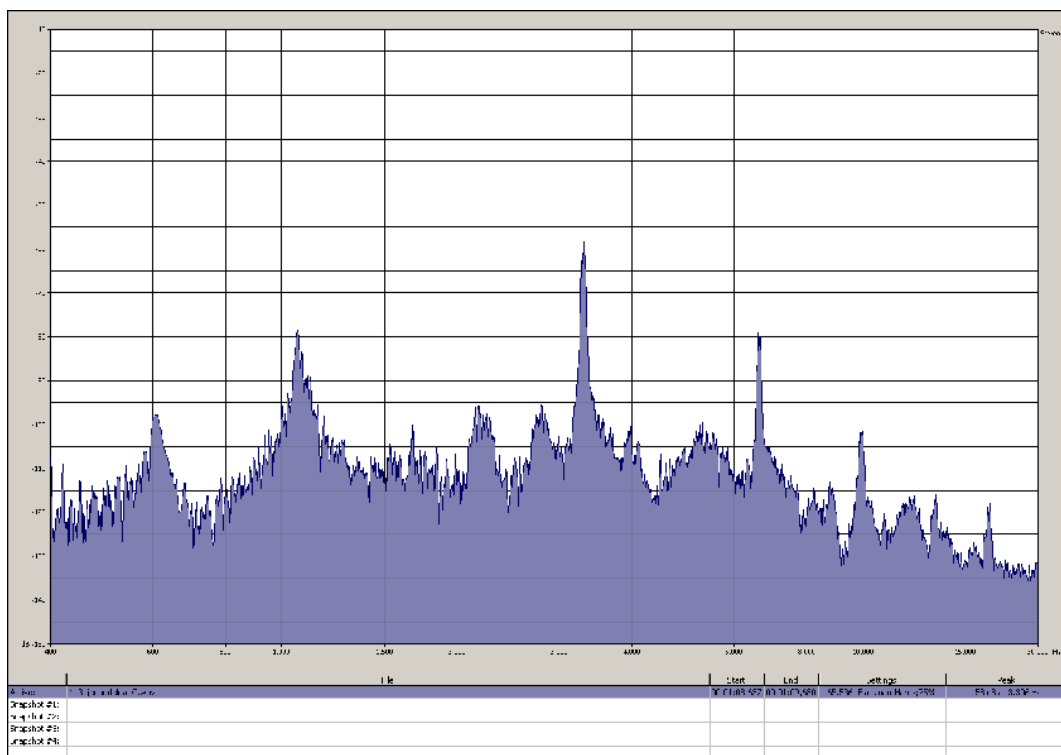




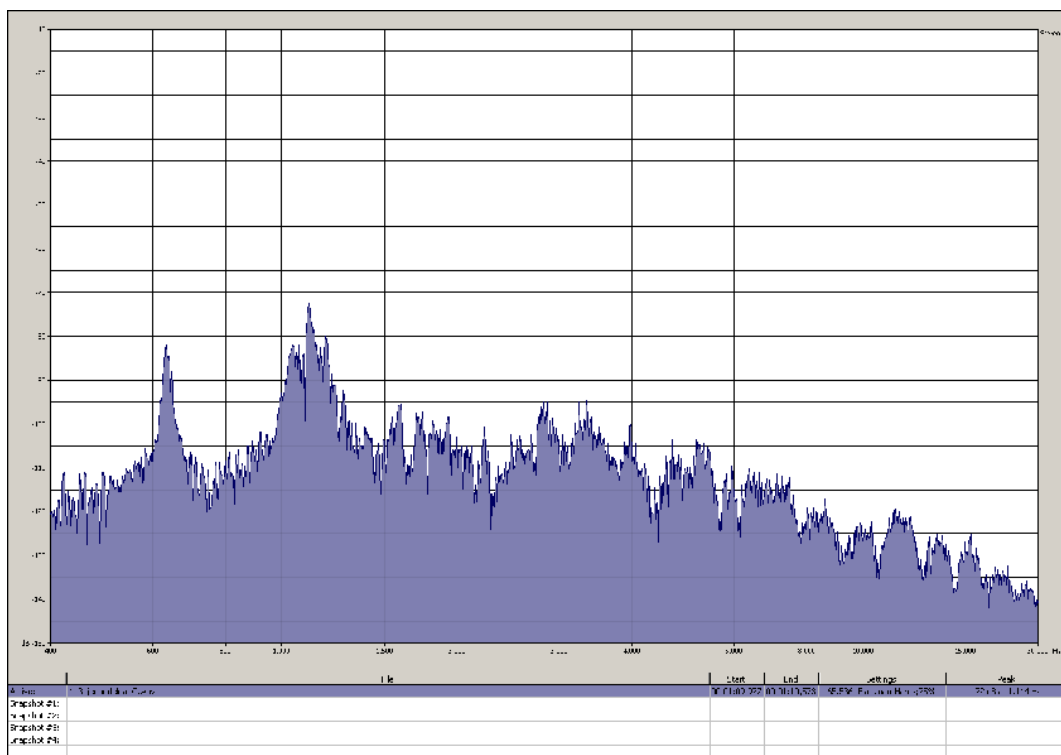
Slika 36.7: Frekvencijski spektar tona  $C^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



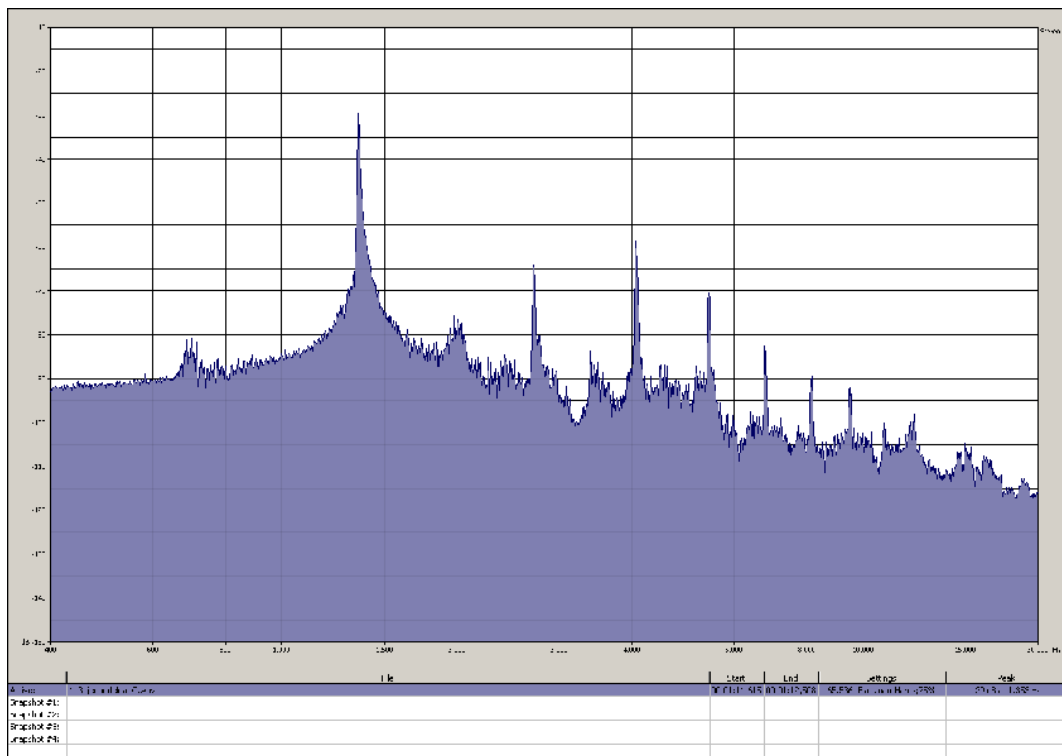
Slika 36.8: Frekvencijski spektar tona  $C^3$ , odsviranog u donjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



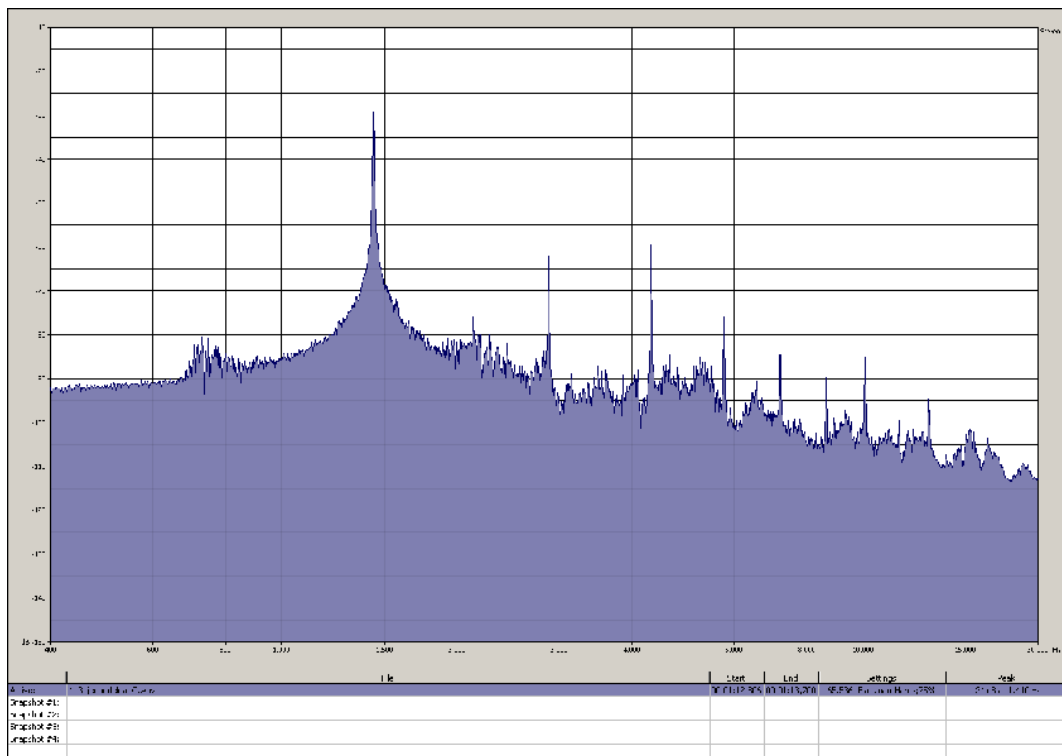
Slika 36.9: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog u gornjem registru na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



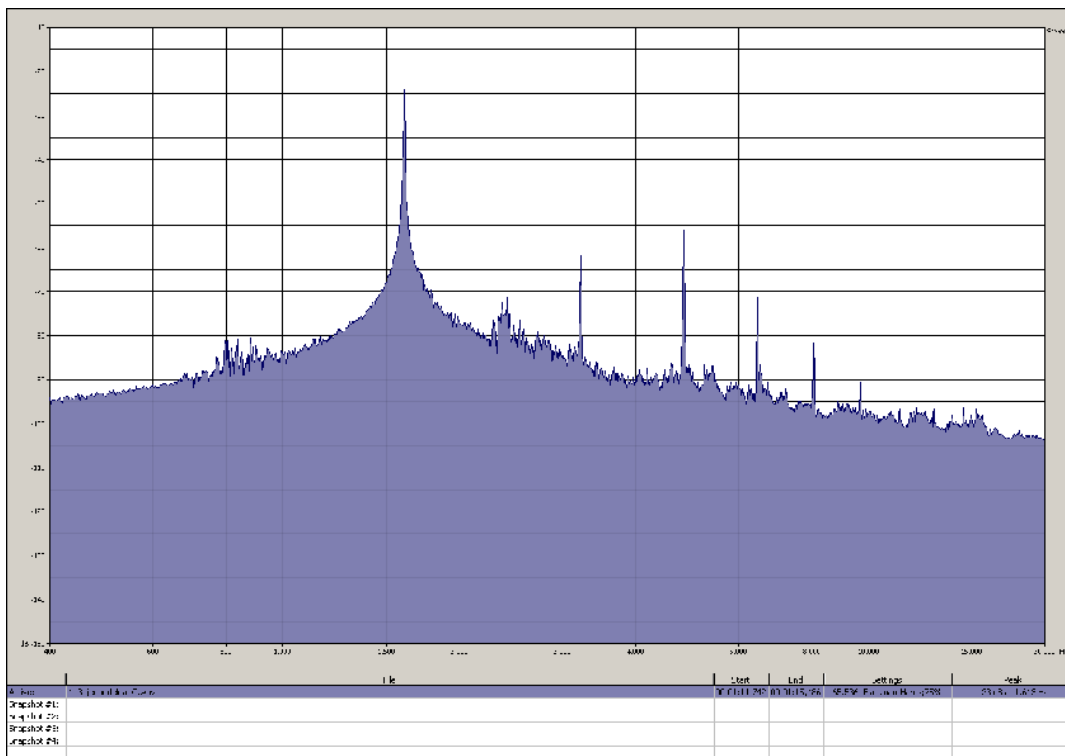
Slika 36.10: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



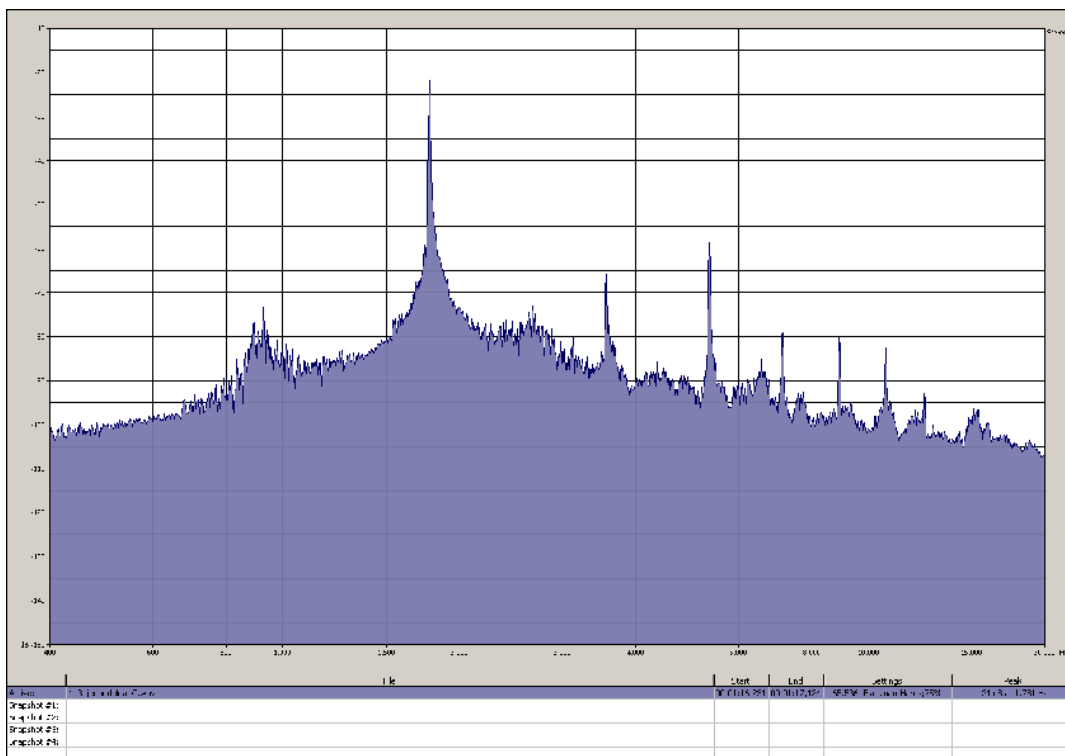
Slika 36.11: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



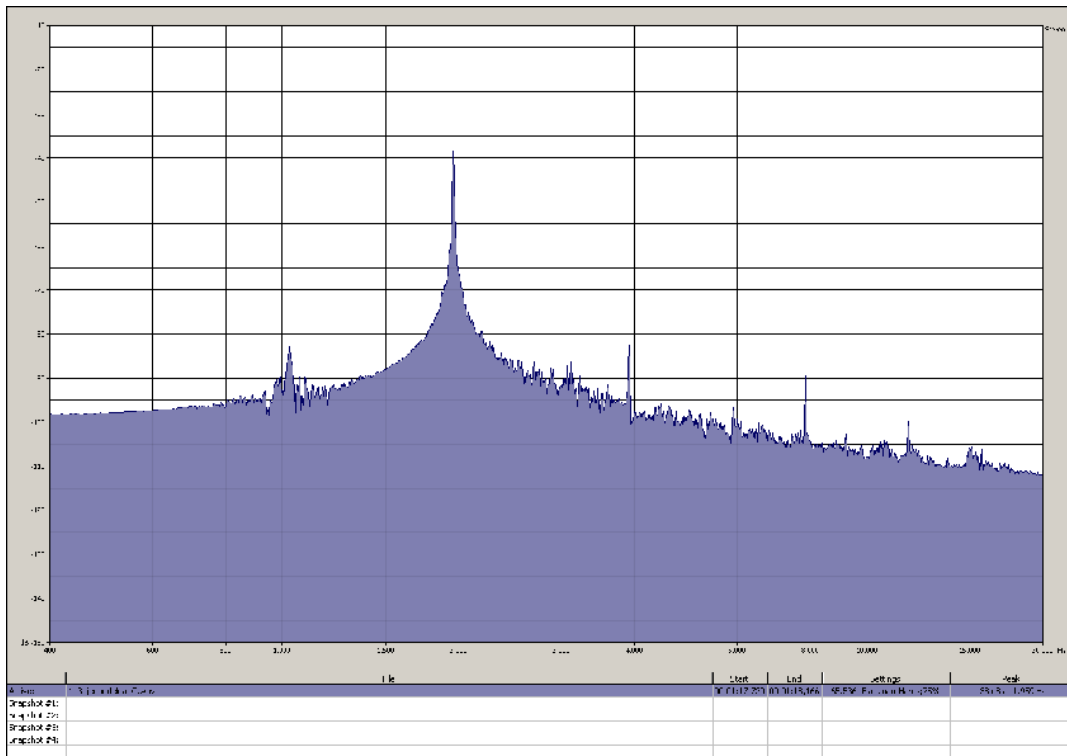
Slika 36.12: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



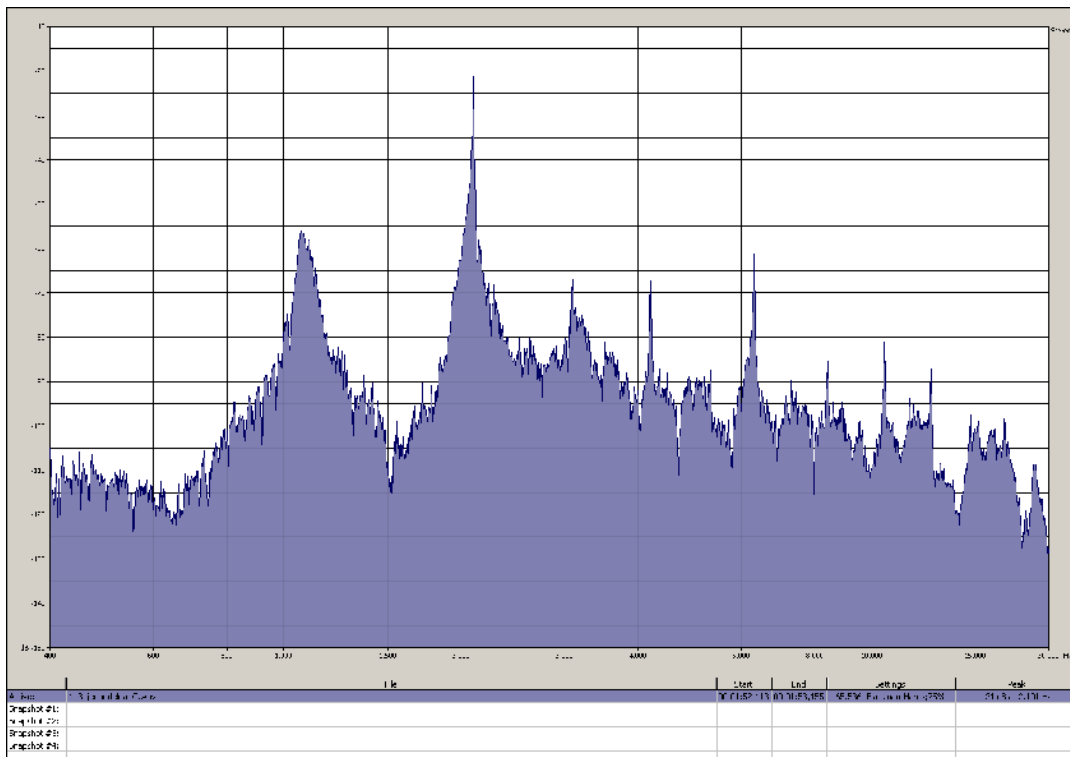
Slika 36.13: Frekvenčni spekter tona  $g^3$ , odsviranog na jednodielnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3



Slika 36.14: Frekvenčni spekter tona  $a^3$ , odsviranog na jednodielnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

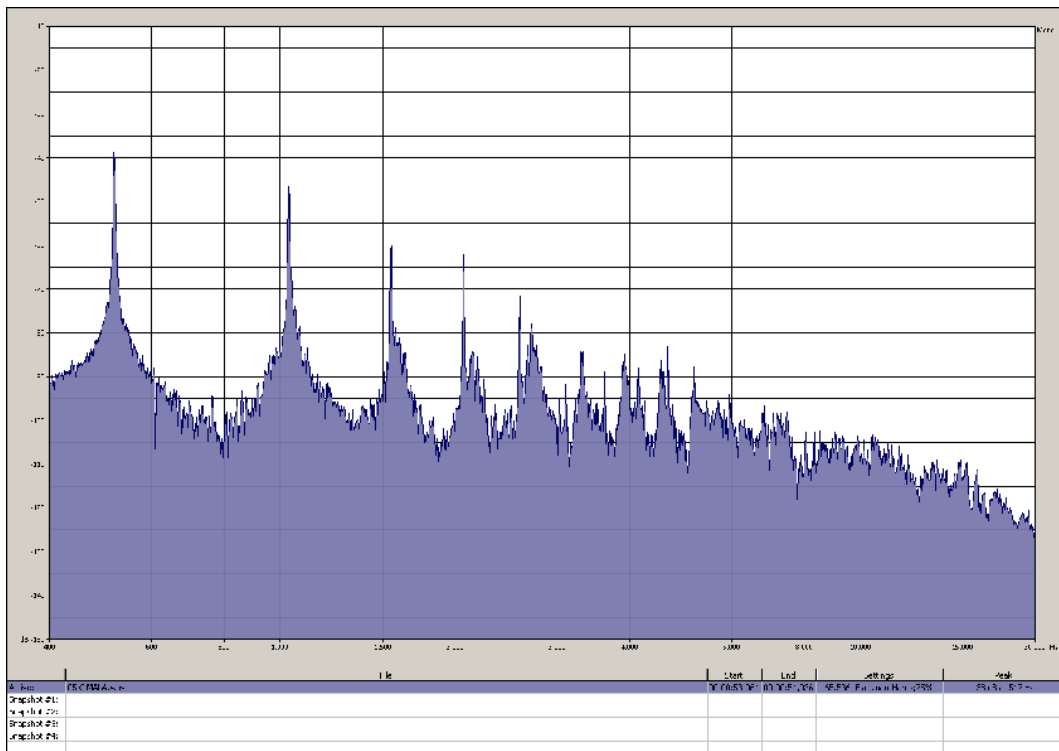


Slika 36.15: Frekvencijski spekter tona  $h^3$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

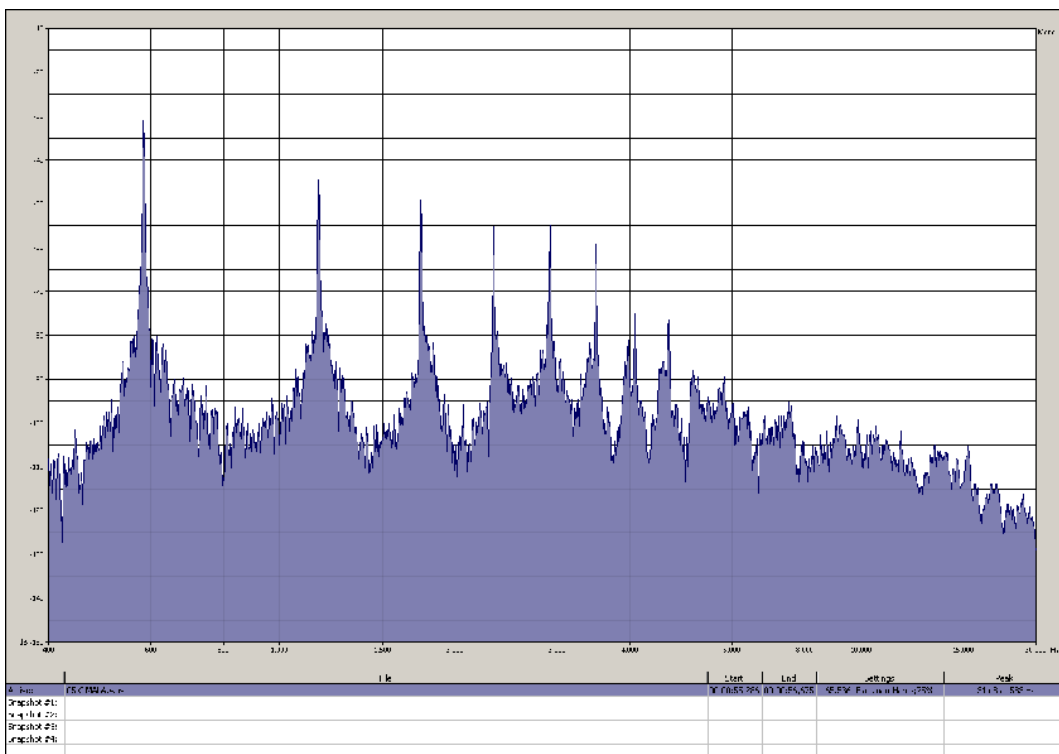


Slika 36.16: Frekvencijski spekter tona  $c^4$ , odsviranog na jednodelnoj C fruli (bagrem,  $\Phi = 14$  mm) sa prigušivačem 3

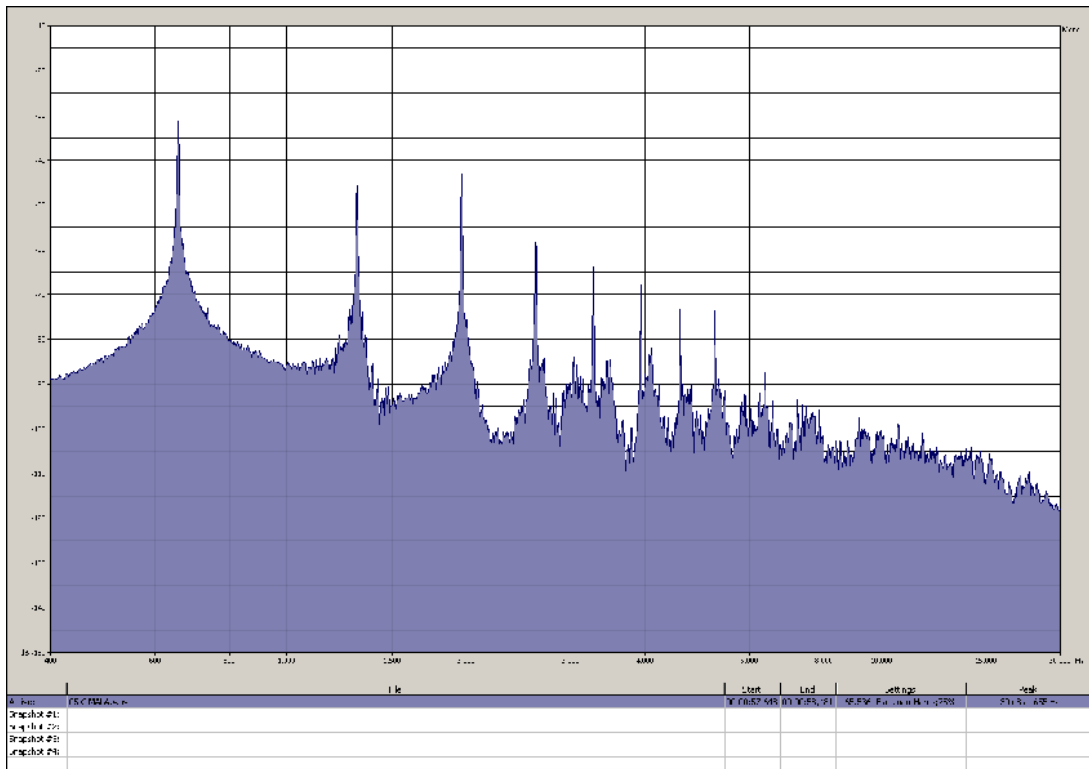
DODATAK 37: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
 DVODELNE C FRULE 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  
 $\Phi = 14.5$  mm) - 'Zlatna frula'



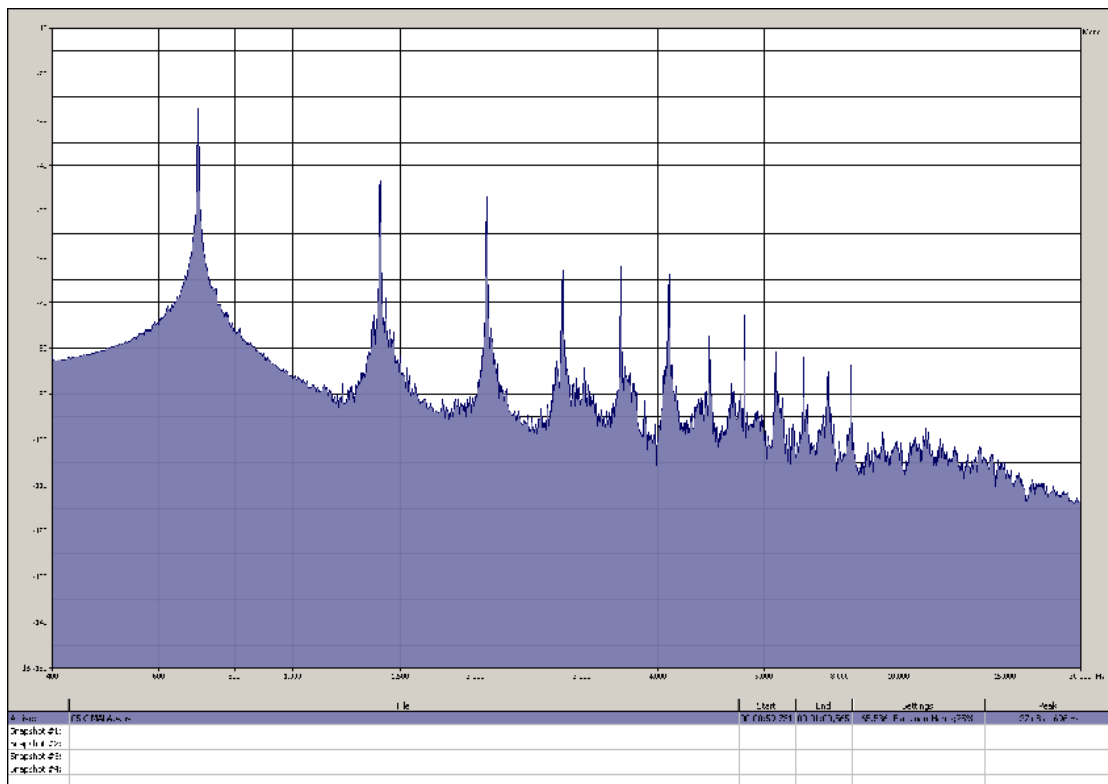
Slika 37.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



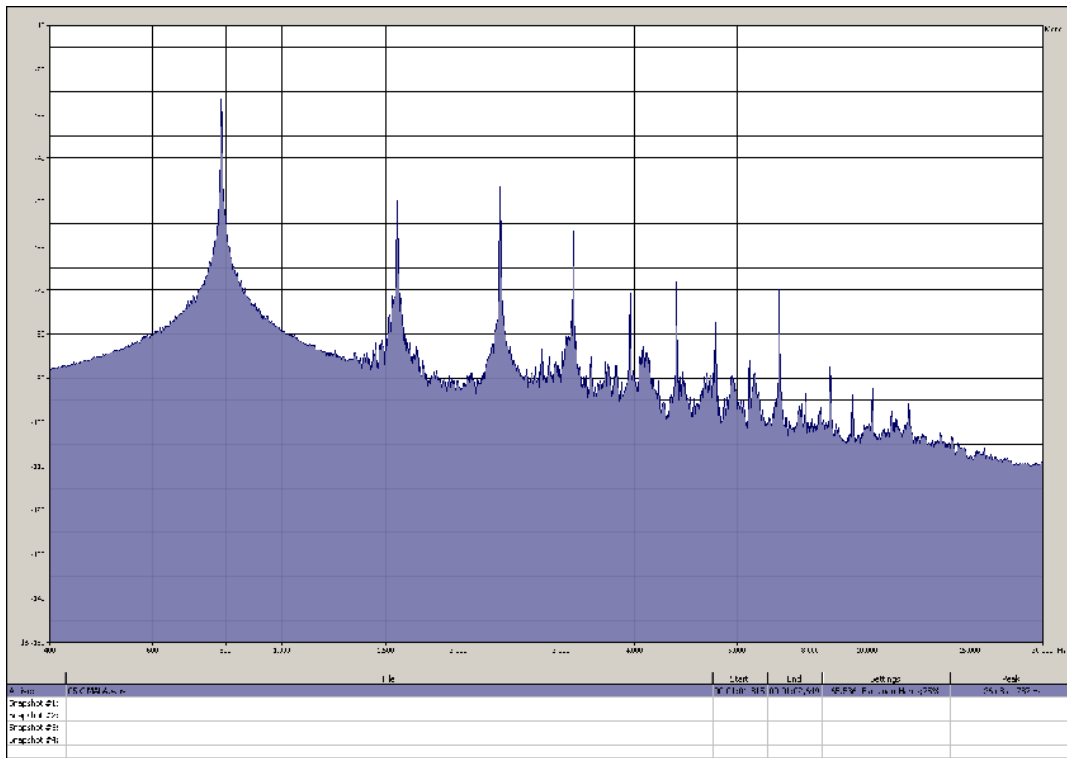
Slika 37.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



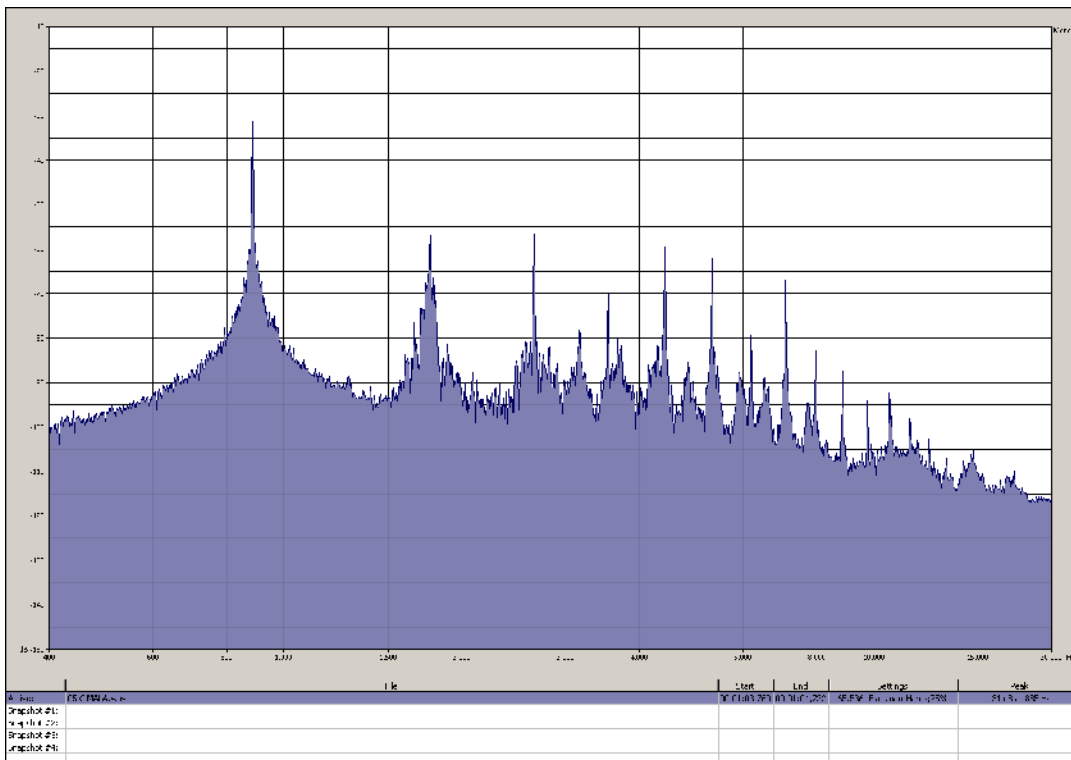
Slika 37.3: Frekvencijski spektar tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)



Slika 37.4: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)

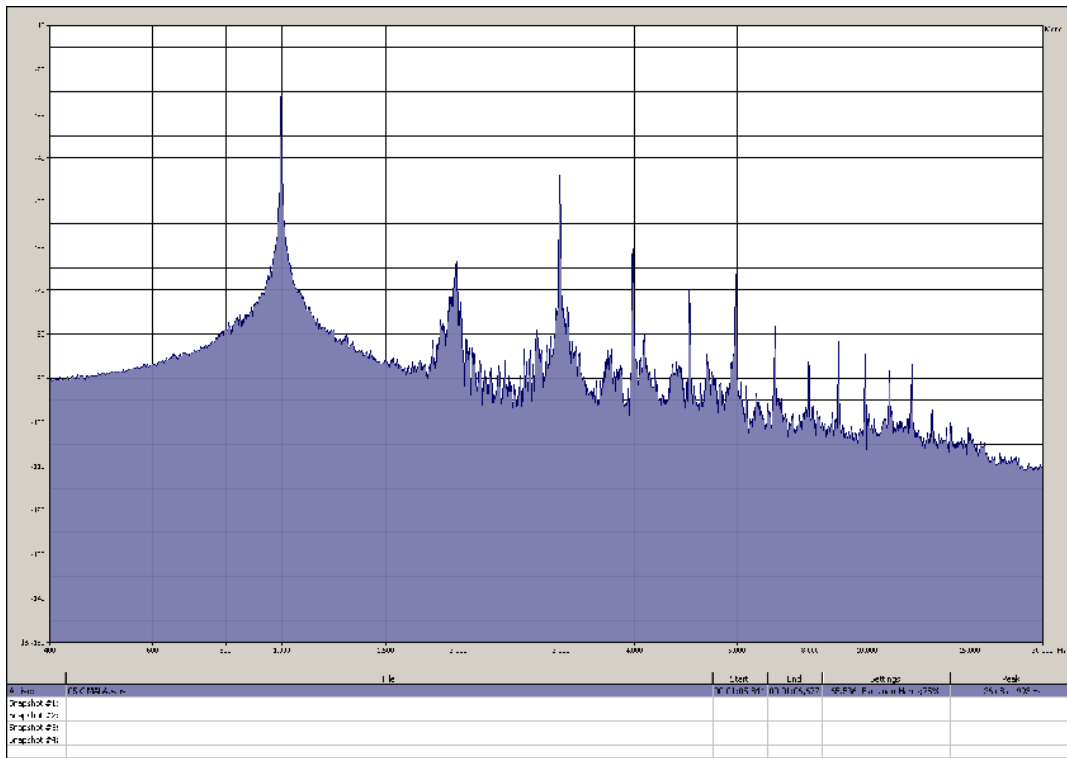


Slika 37.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)

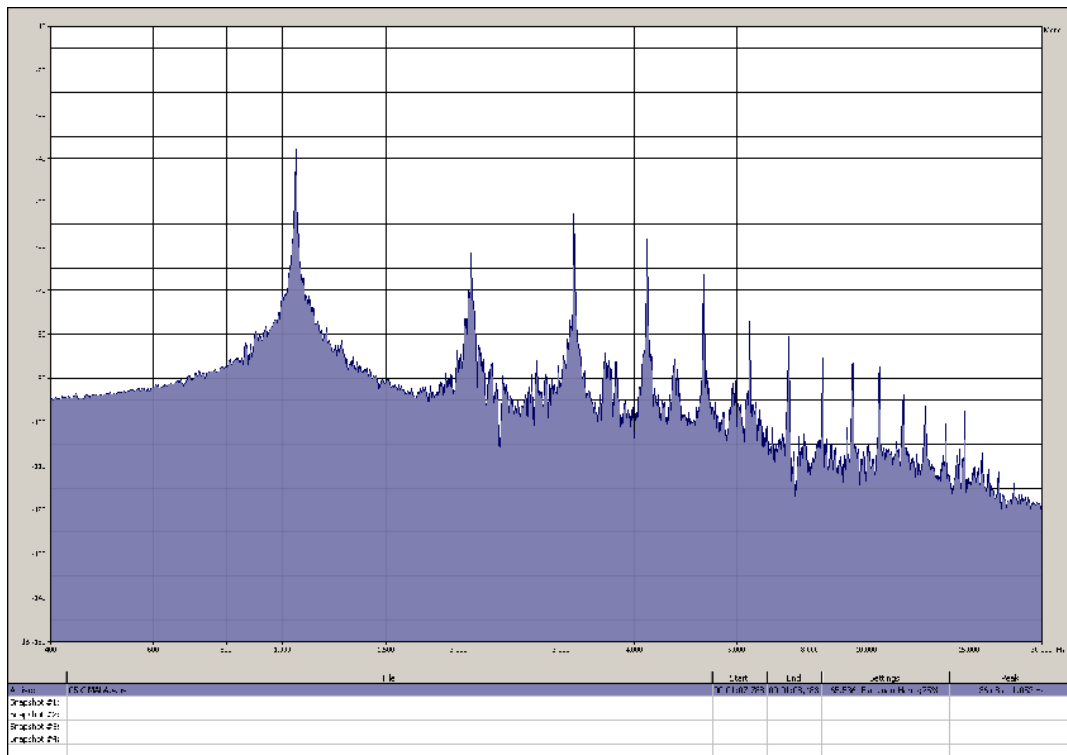


Slika 37.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)

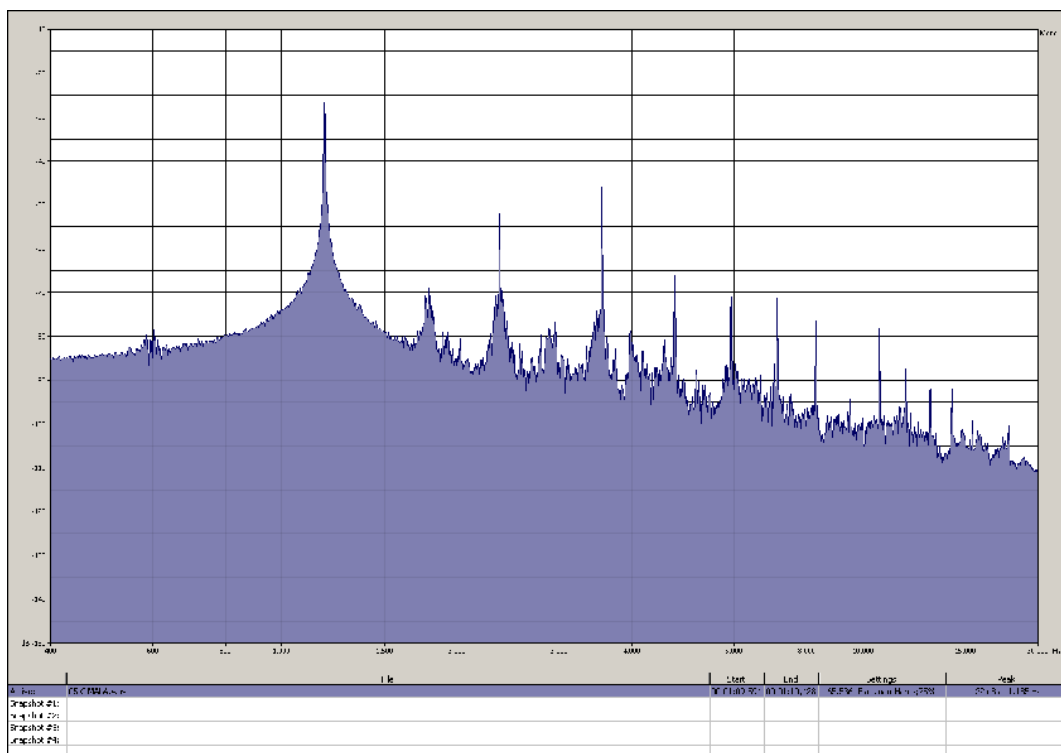




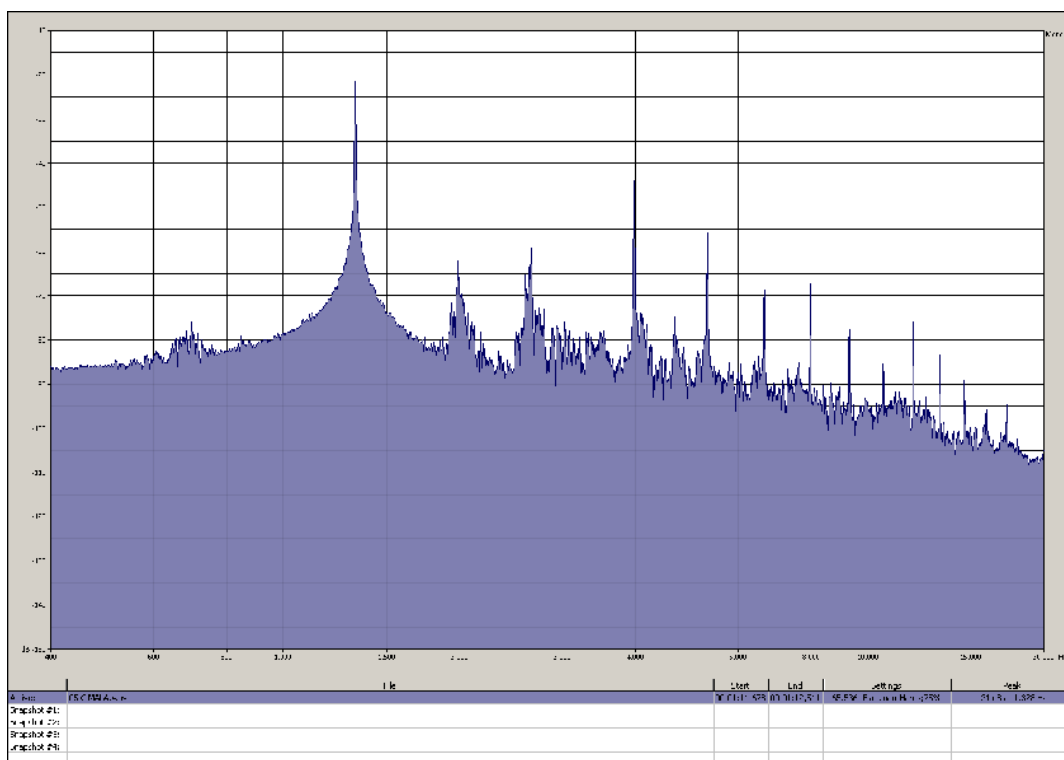
*Slika 37.7: Frekvencijski spektar tona  $A^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



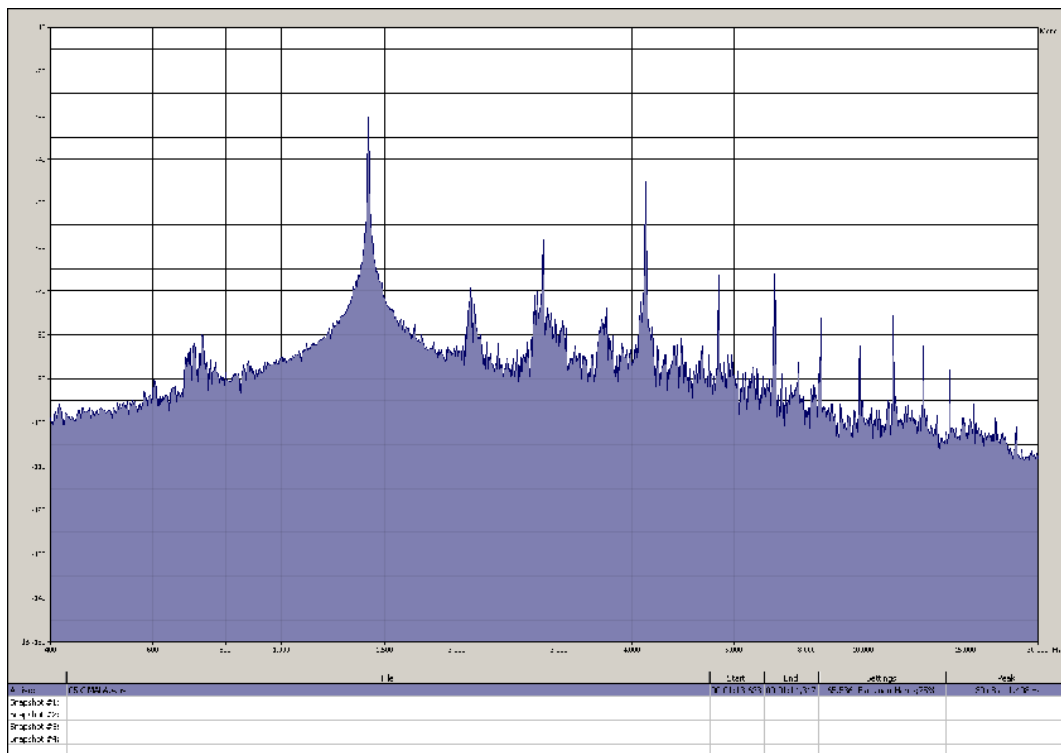
*Slika 37.8: Frekvencijski spektar tona  $C^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



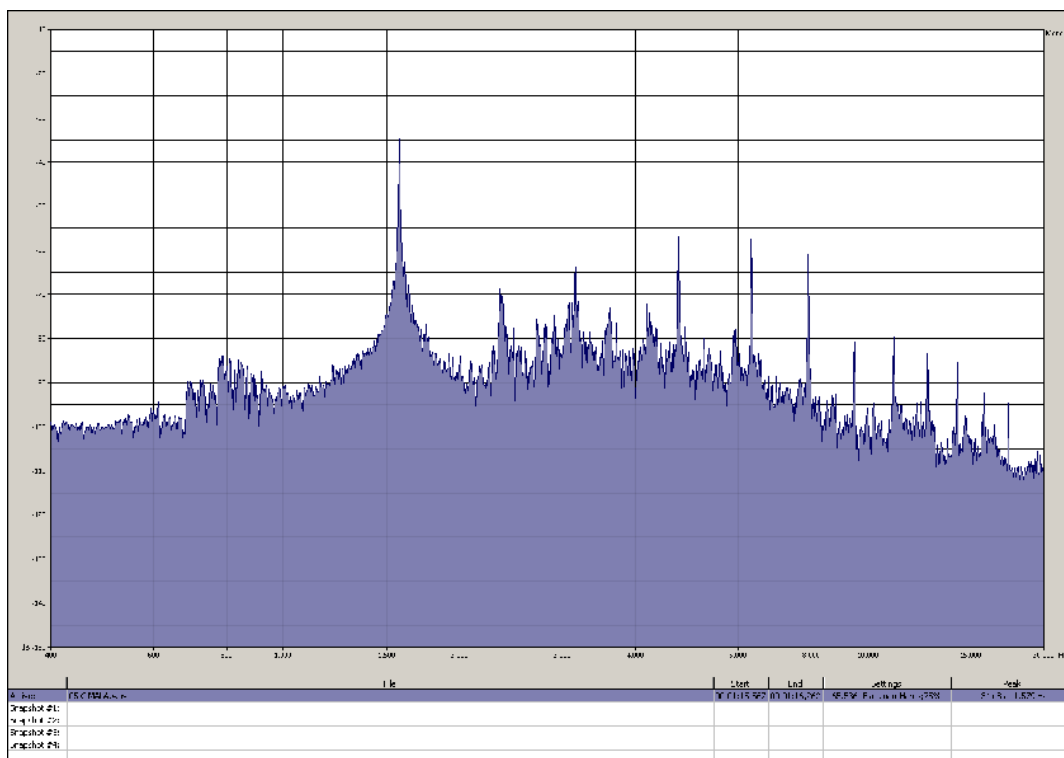
*Slika 37.9: Frekvencijski spektar tona  $d^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



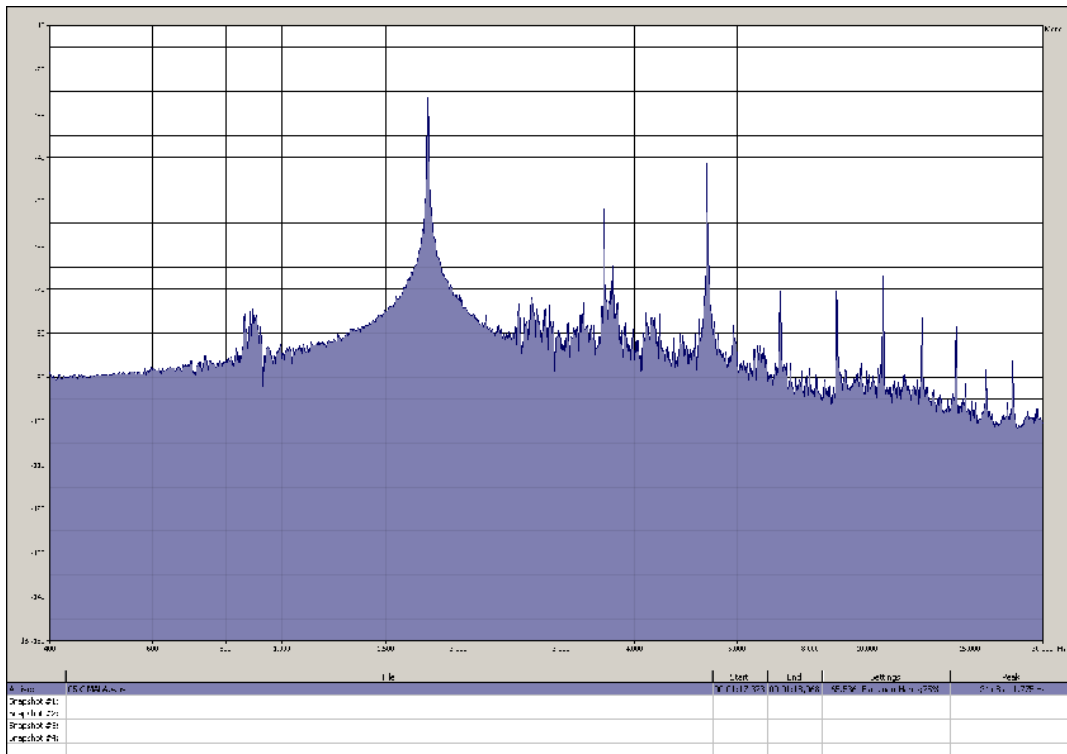
*Slika 37.10: Frekvencijski spektar tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



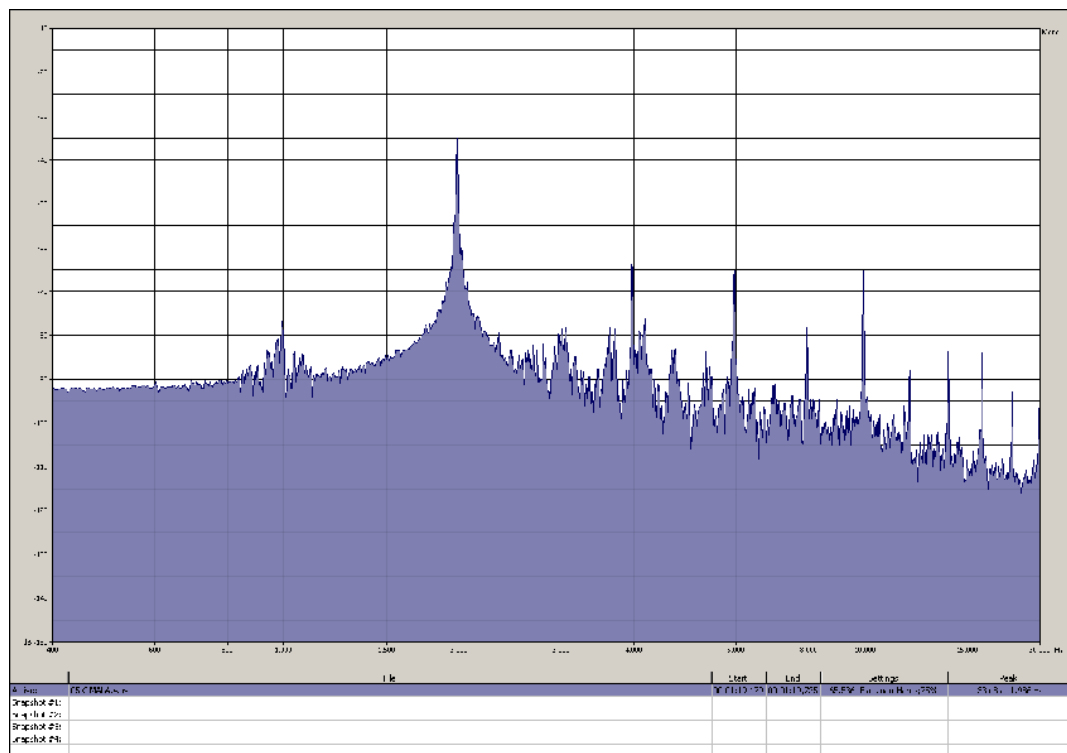
Slika 37.11: Frekventijski spektar tona  $P^2$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)



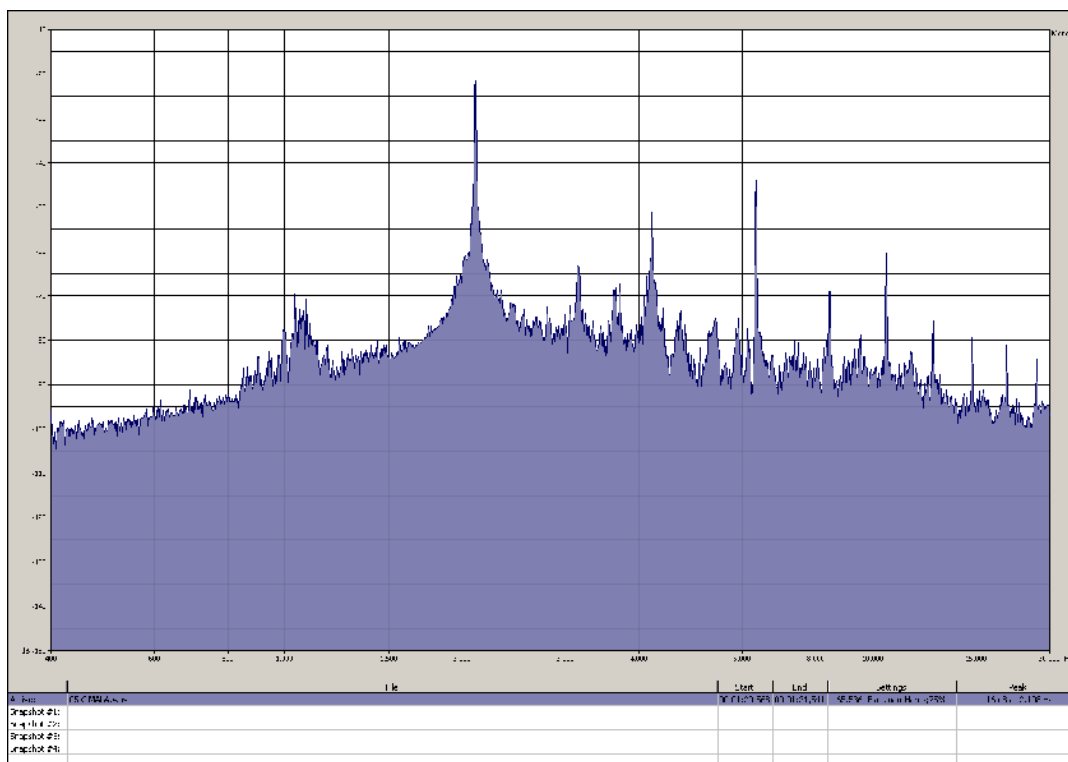
Slika 37.12: Frekventijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)



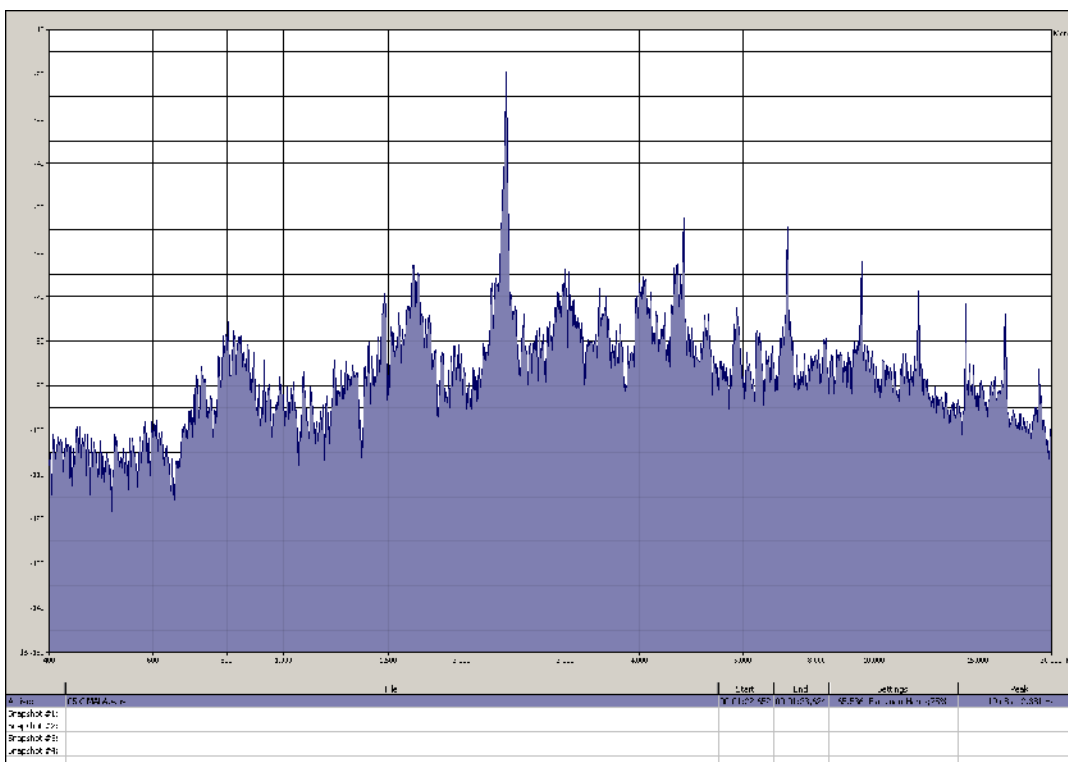
Slika 37.13: Frekvencijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)



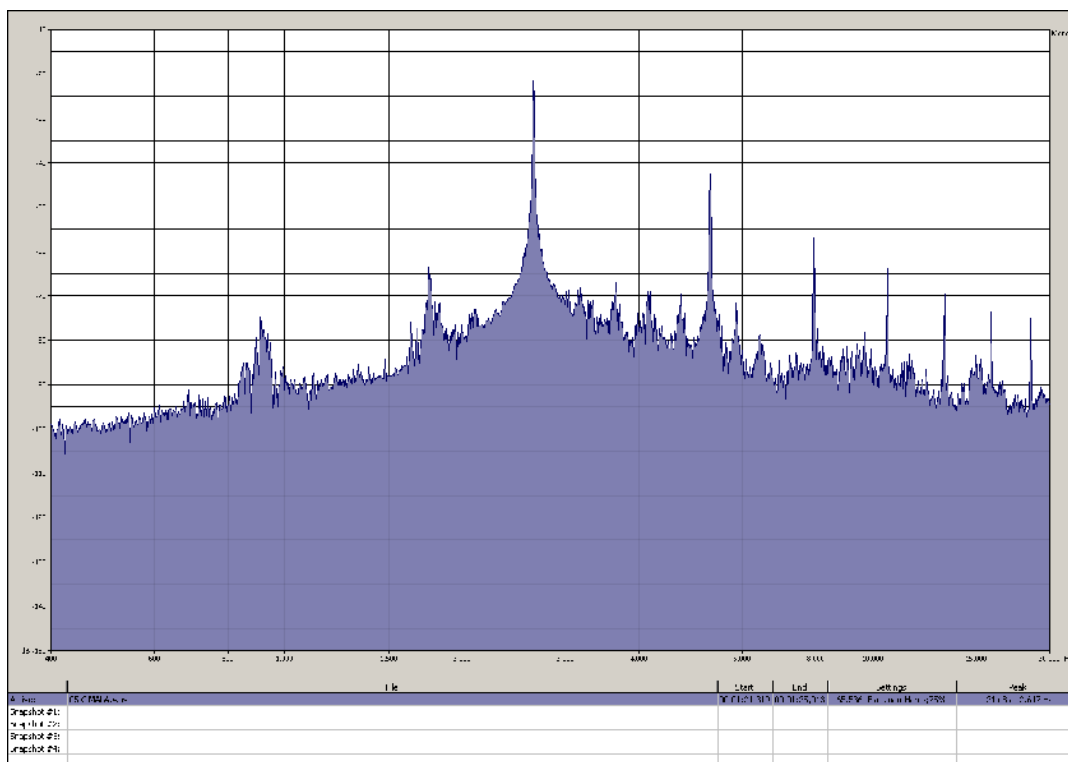
Slika 37.14: Frekvencijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celulozom,  $\Phi = 14.5$  mm)



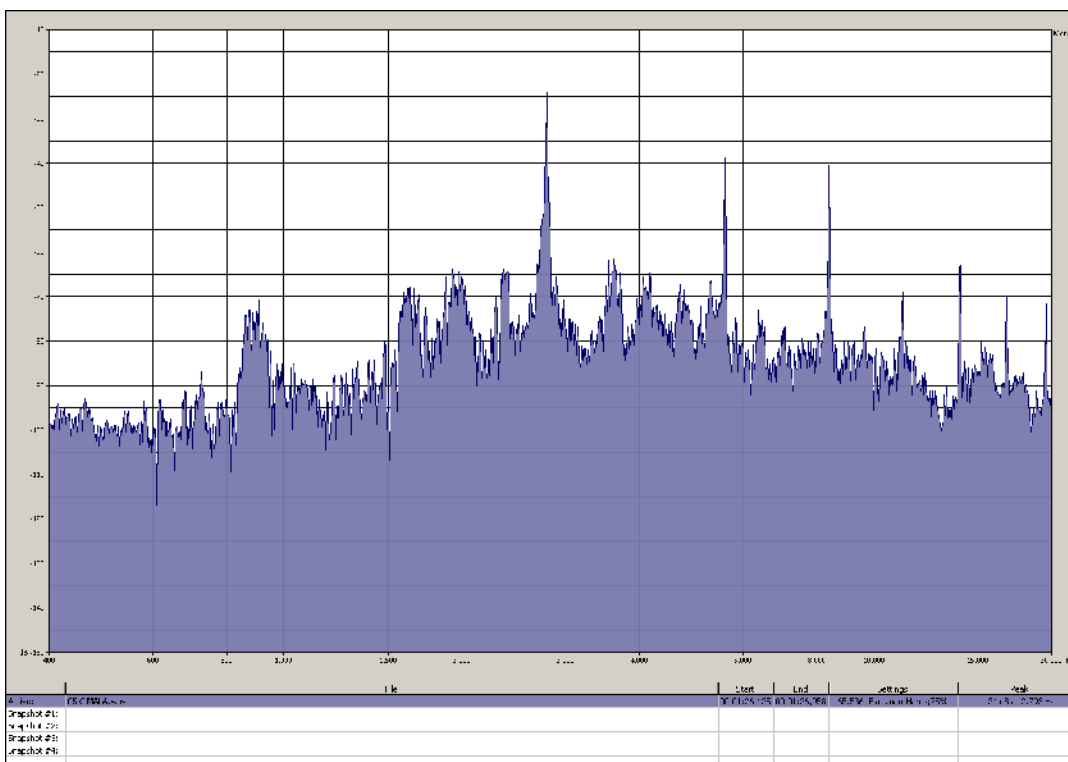
*Slika 37.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



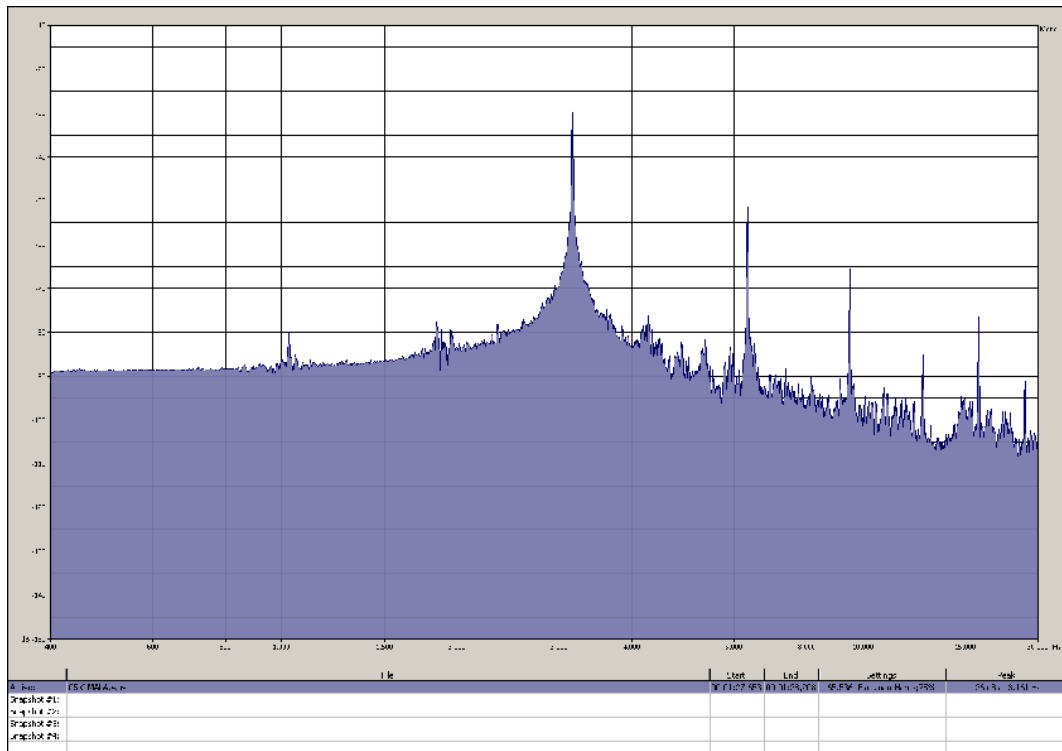
*Slika 37.16: Frekvencijski spektar tona  $d^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*



Slika 37.17: Frekvencijski spektar tona  $e^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)

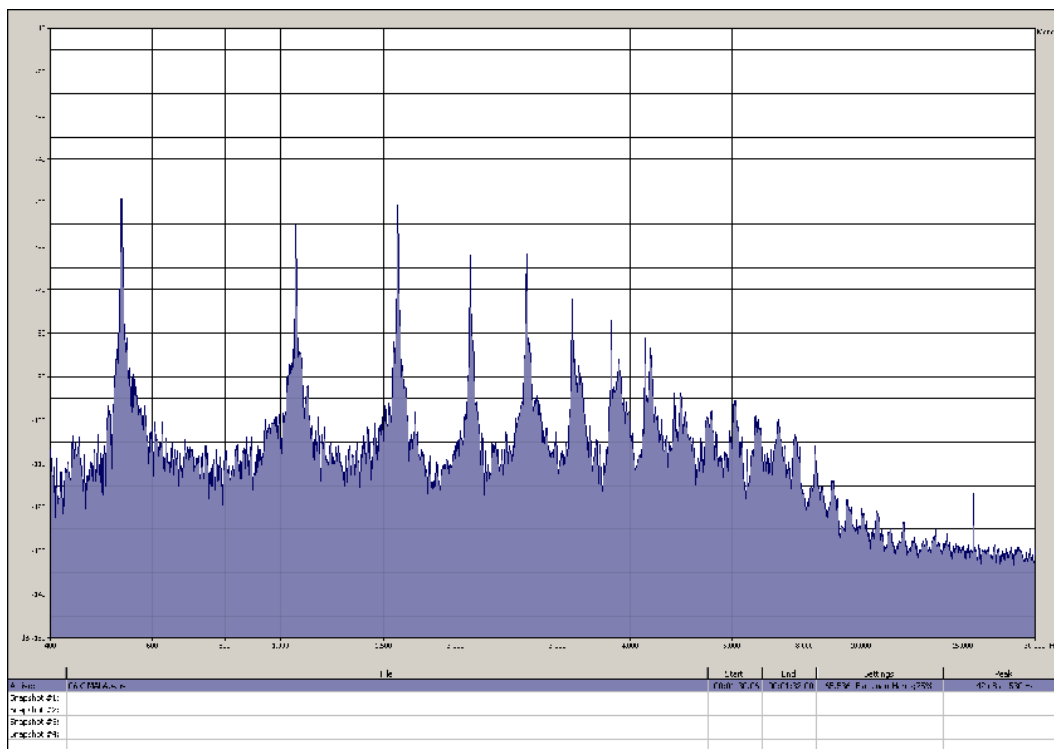


Slika 37.18: Frekvencijski spektar tona  $f^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)

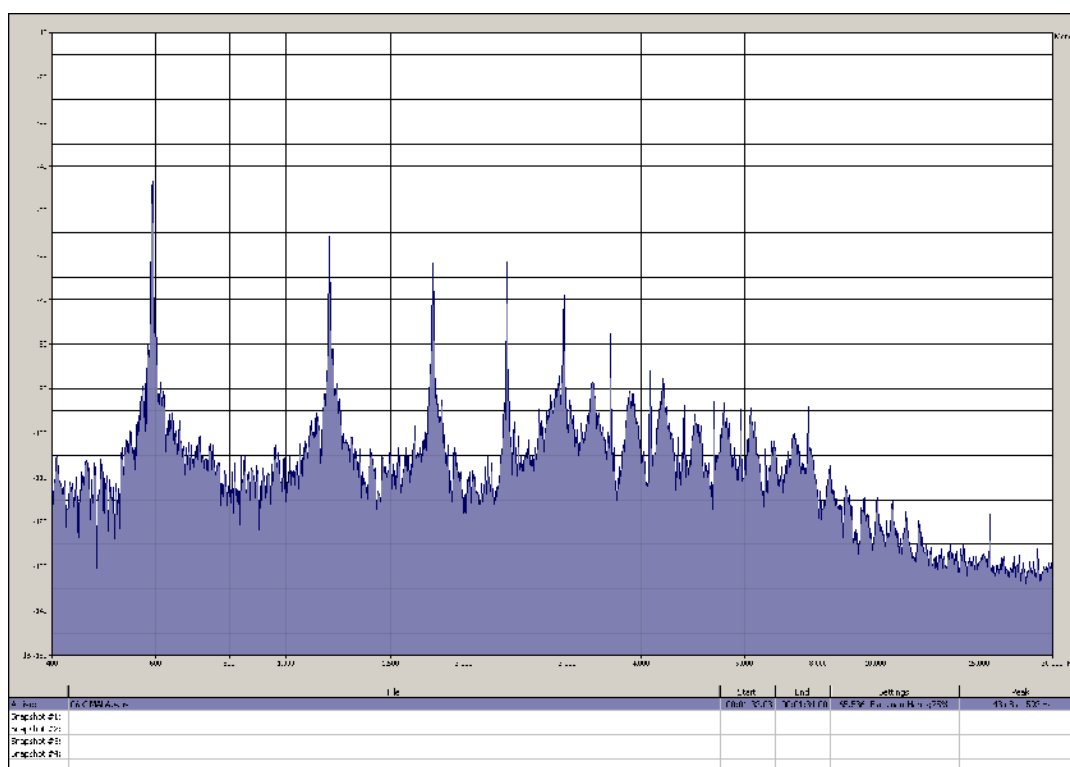


*Slika 37.19: Frekvencijski spektar tona  $g^4$ , odsviranog na fruli 5 BD (šljiva, presvučena celuloidom,  $\Phi = 14.5$  mm)*

DODATAK 38: FREKVENCIJSKI SPEKTAR SVIH SNIMLJENIH TONOVA  
 DVODELNE C FRULE 6 BD (glava: dren, usnik: bagrem, cev:  
 mesing, presvučena celuloidom, ( $\Phi = 12$  mm) - 'Australija'

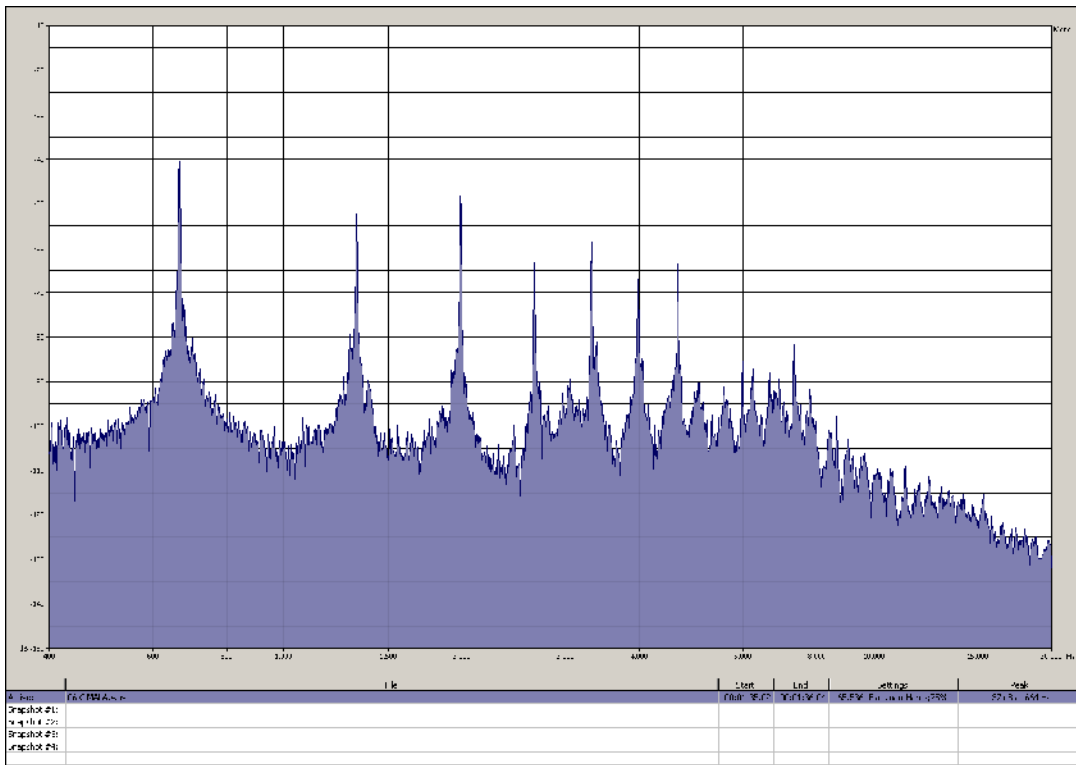


Slika 38.1: Frekvencijski spektar tona  $c^2$ , odsviranog na fruli 6 BD  
 (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

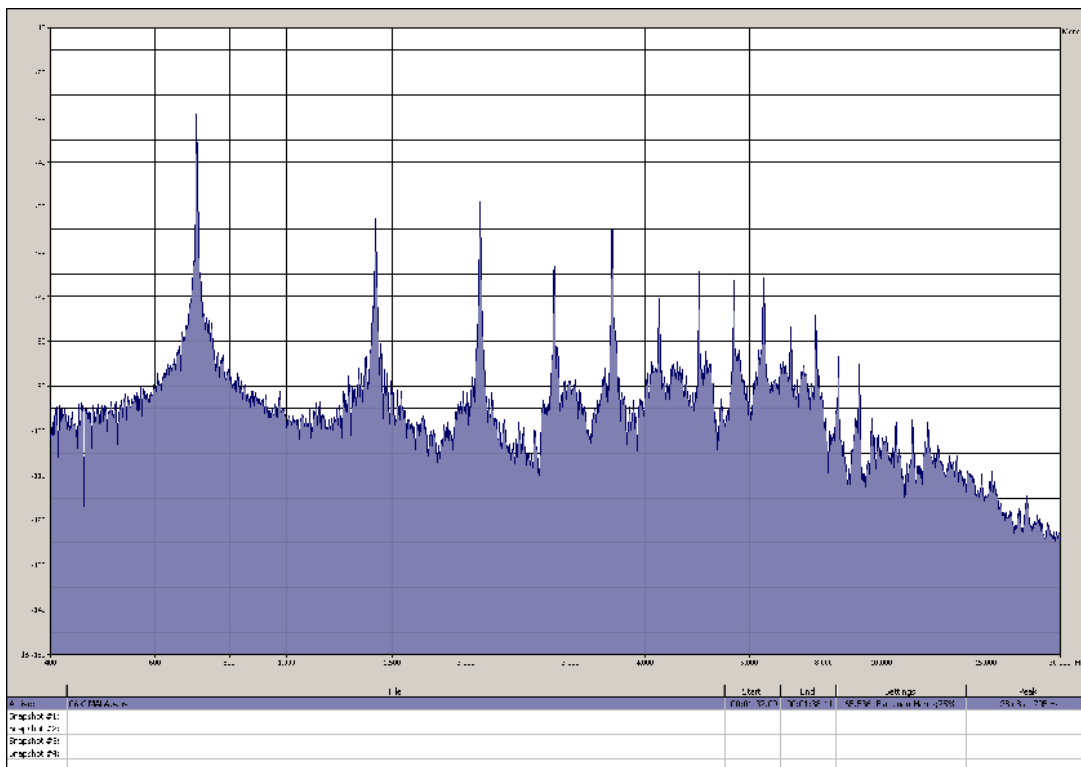


Slika 38.2: Frekvencijski spektar tona  $d^2$ , odsviranog na fruli 6 BD  
 (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

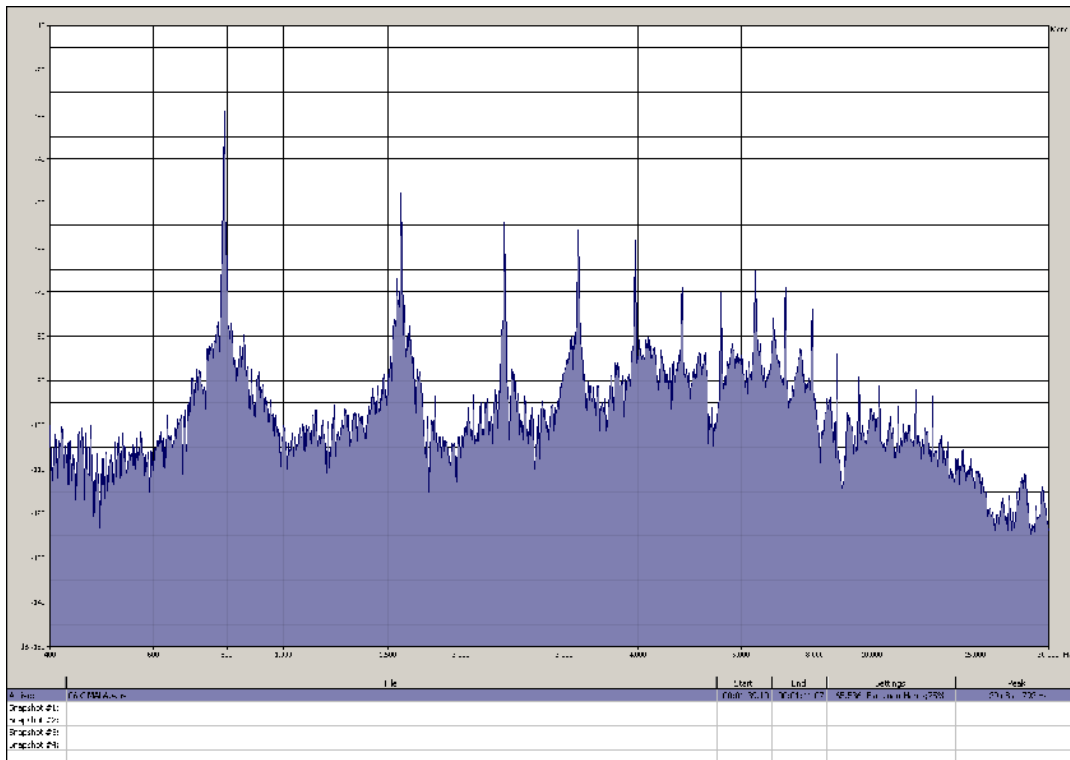




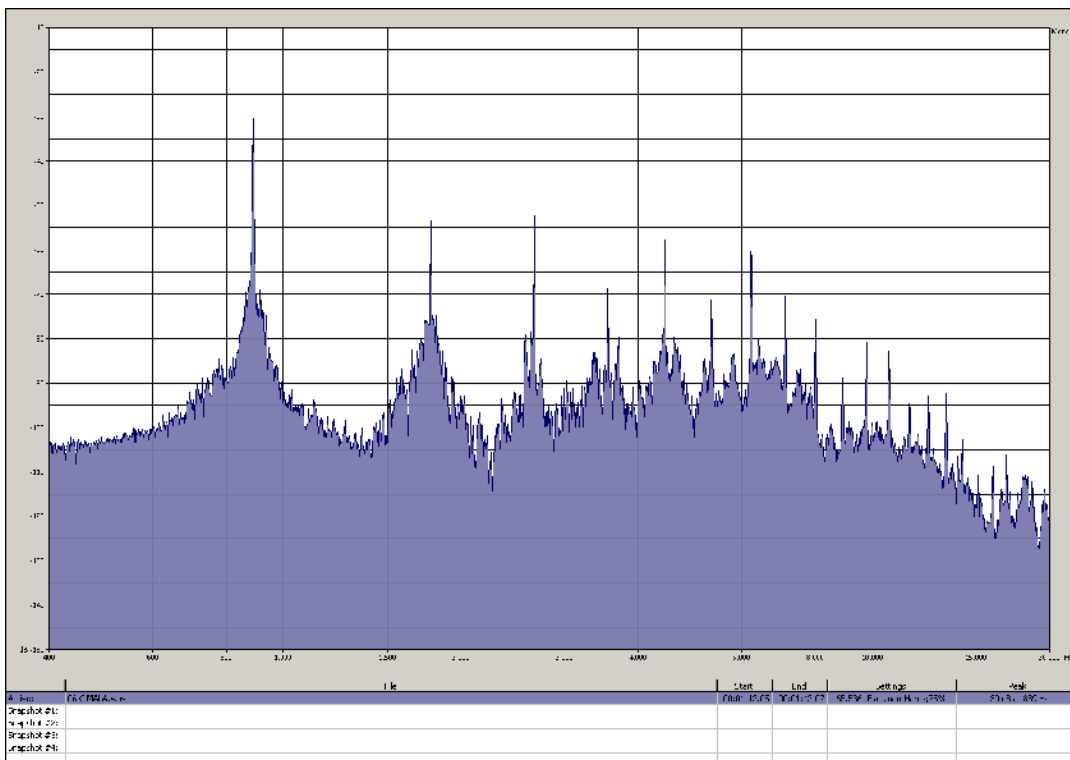
Slika 38.3: Frekvencijski spekter tona  $e^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



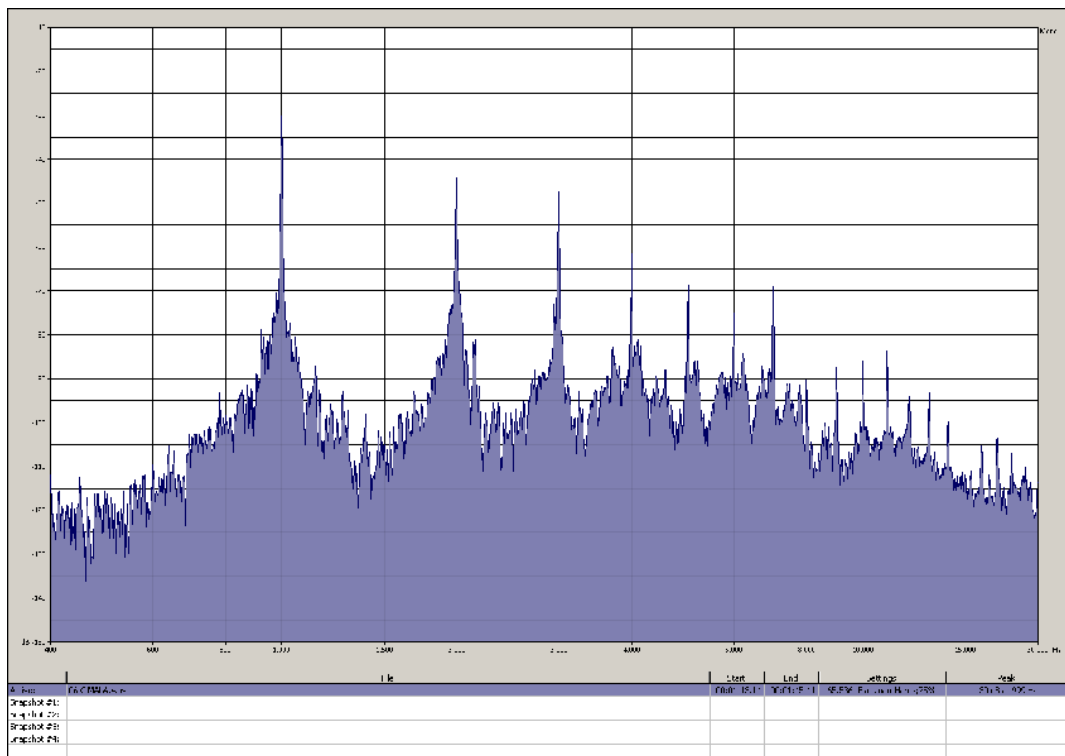
Slika 38.4: Frekvencijski spekter tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



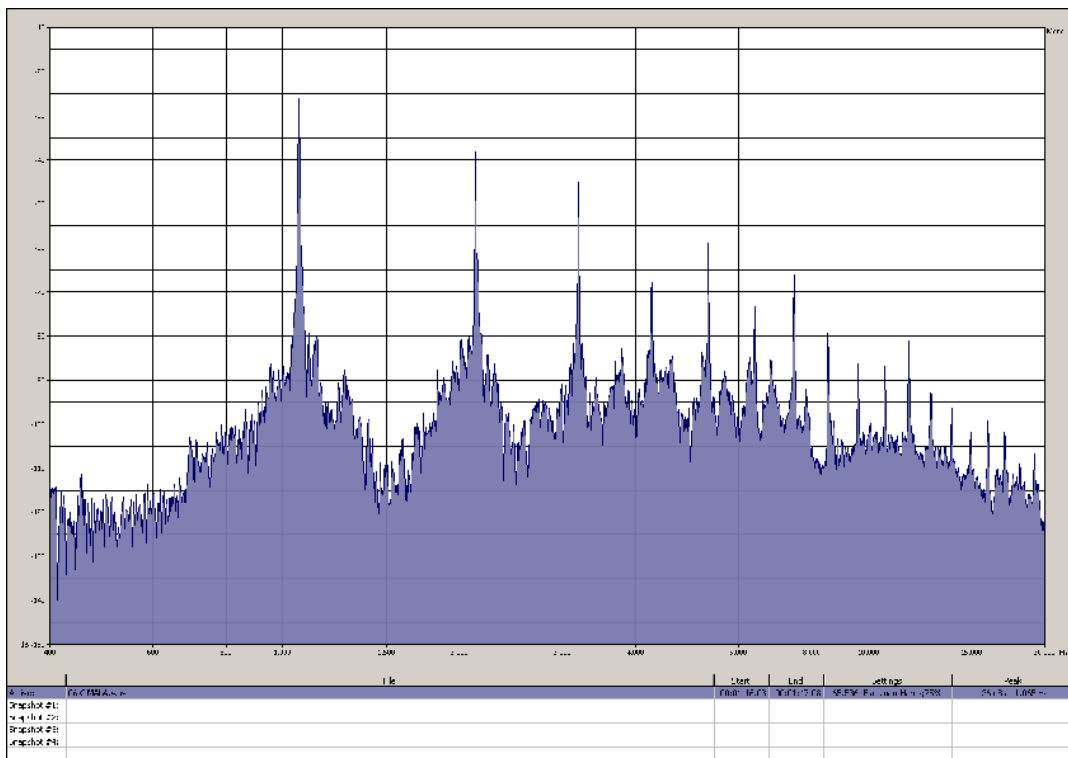
Slika 38.5: Frekvencijski spektar tona  $g^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



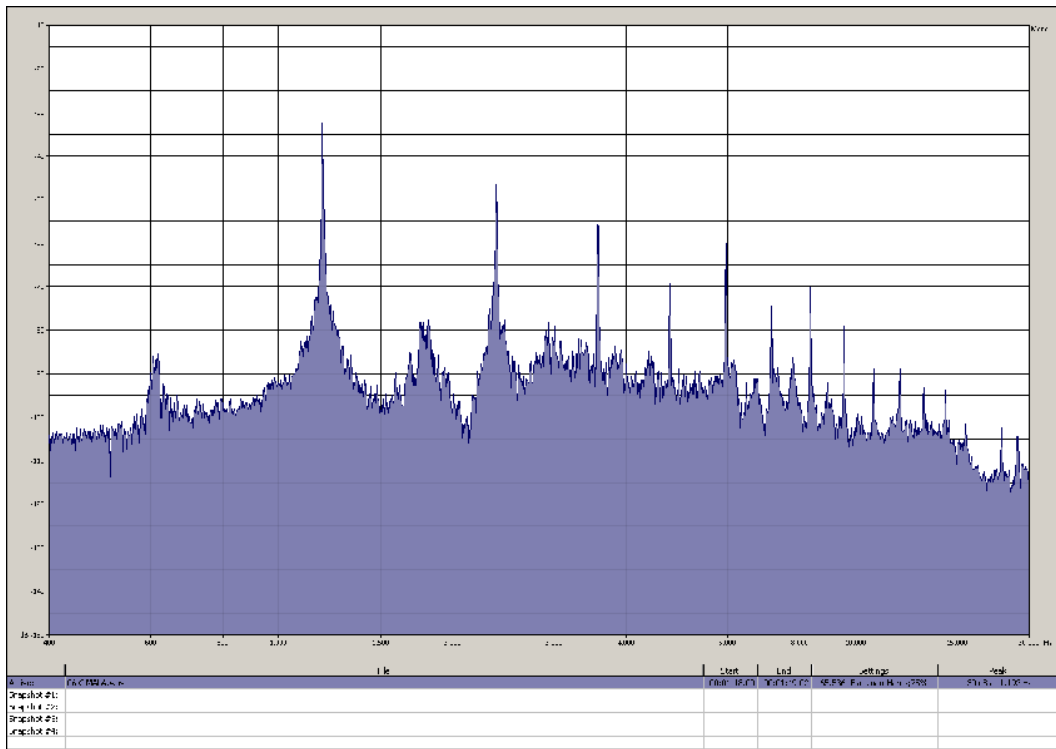
Slika 38.6: Frekvencijski spektar tona  $a^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



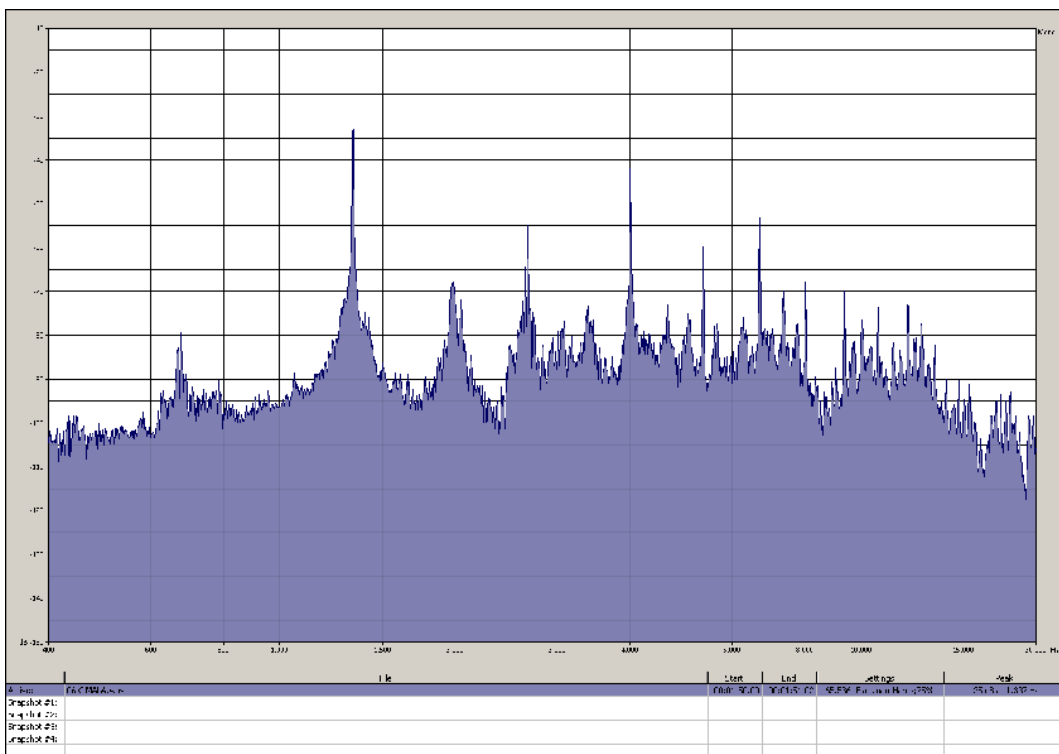
Slika 38.7: Frekvencijski spektar tona  $h^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



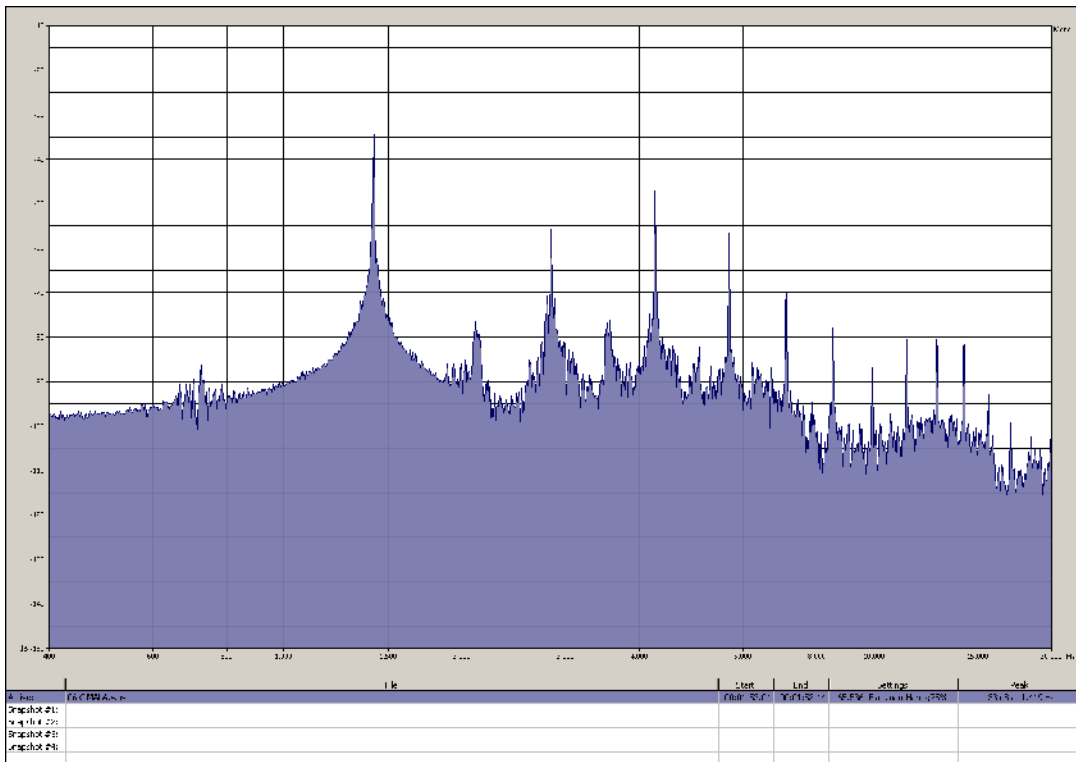
Slika 38.8: Frekvencijski spektar tona  $c^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



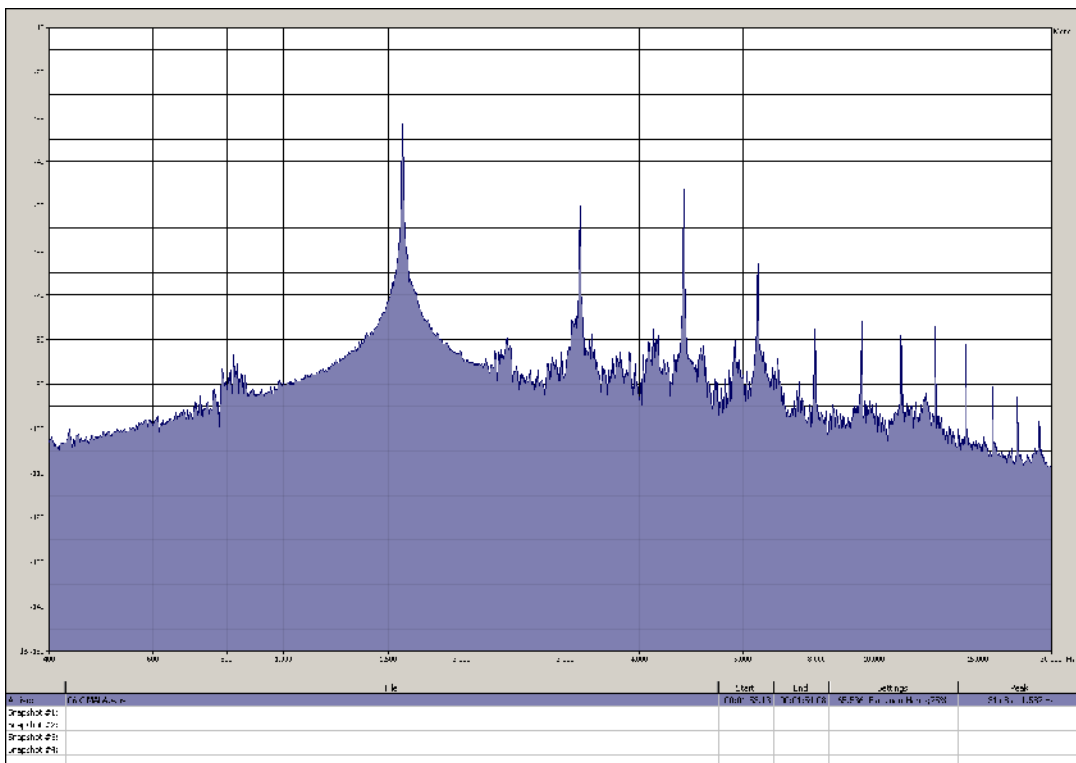
Slika 38.9: Frekvencijski spekter tona  $d^b$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



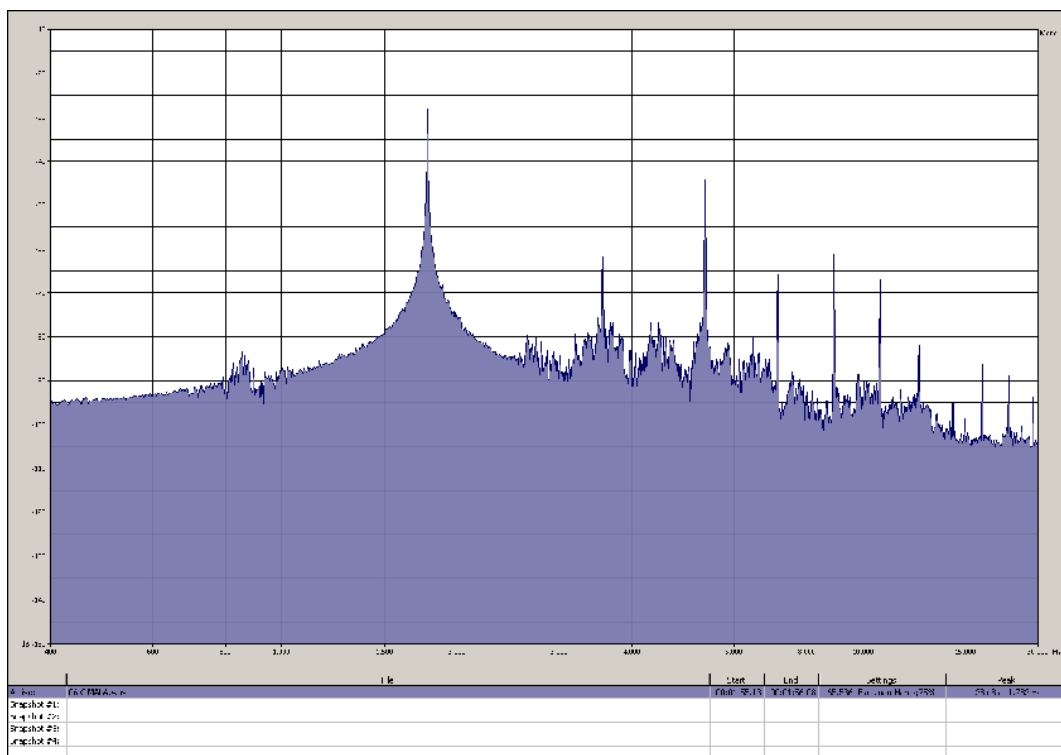
Slika 38.10: Frekvencijski spekter tona  $e^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



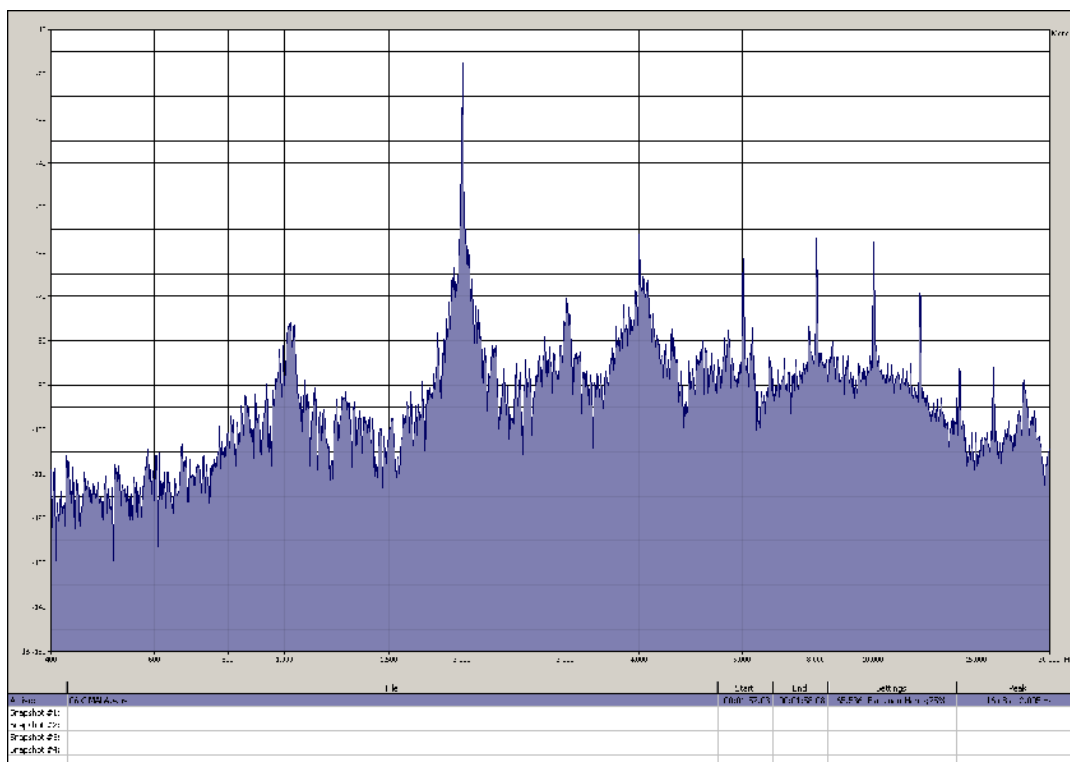
*Slika 38.11: Frekvencijski spektar tona  $f^2$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)*



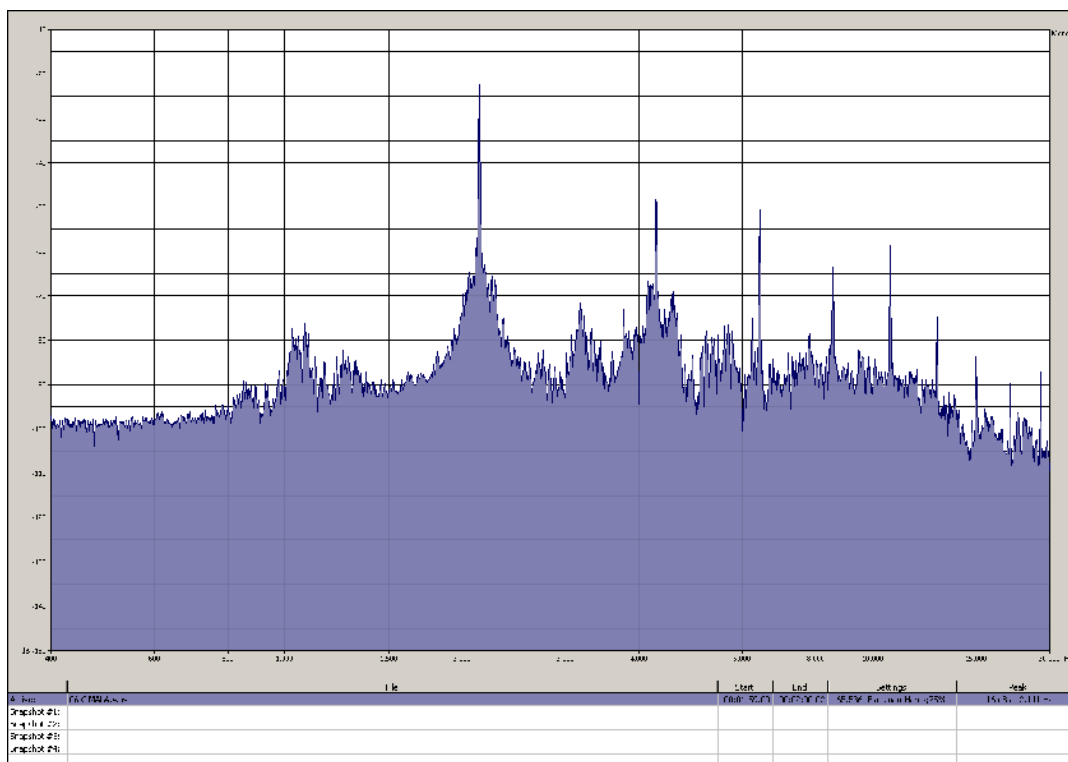
*Slika 38.12: Frekvencijski spektar tona  $g^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)*



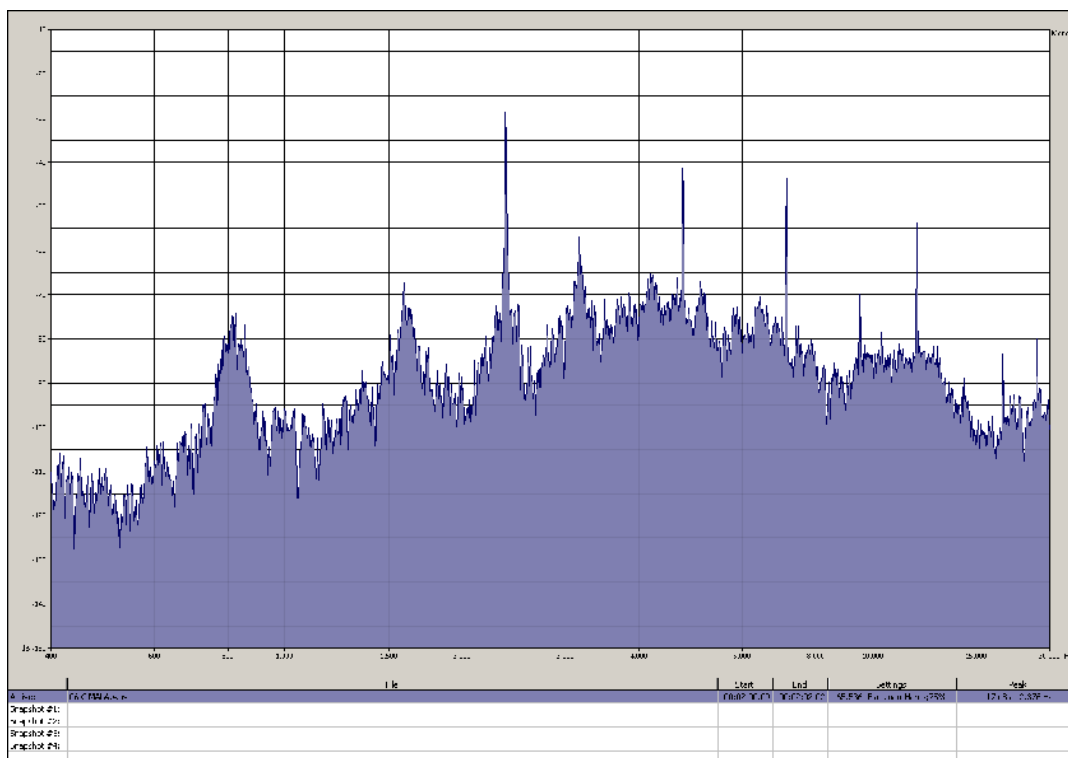
Slika 38.13: Frekventijski spektar tona  $a^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



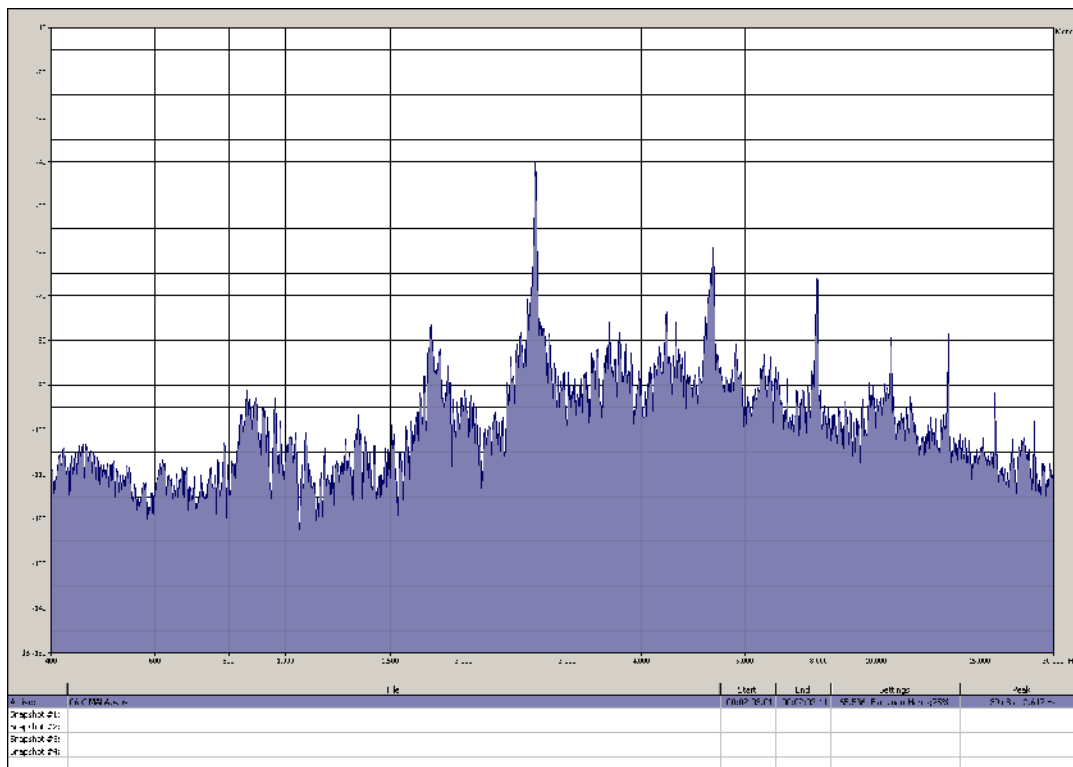
Slika 38.14: Frekventijski spektar tona  $h^3$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



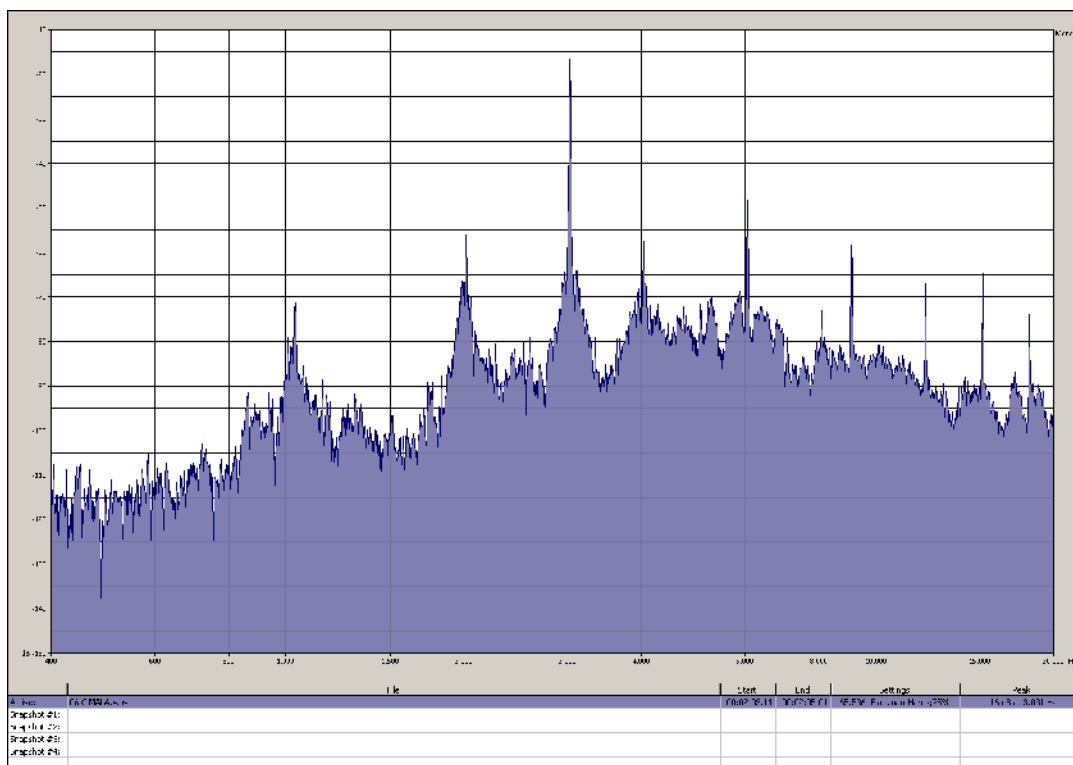
Slika 38.15: Frekvencijski spektar tona  $c^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 38.16: Frekvencijski spektar tona  $d^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

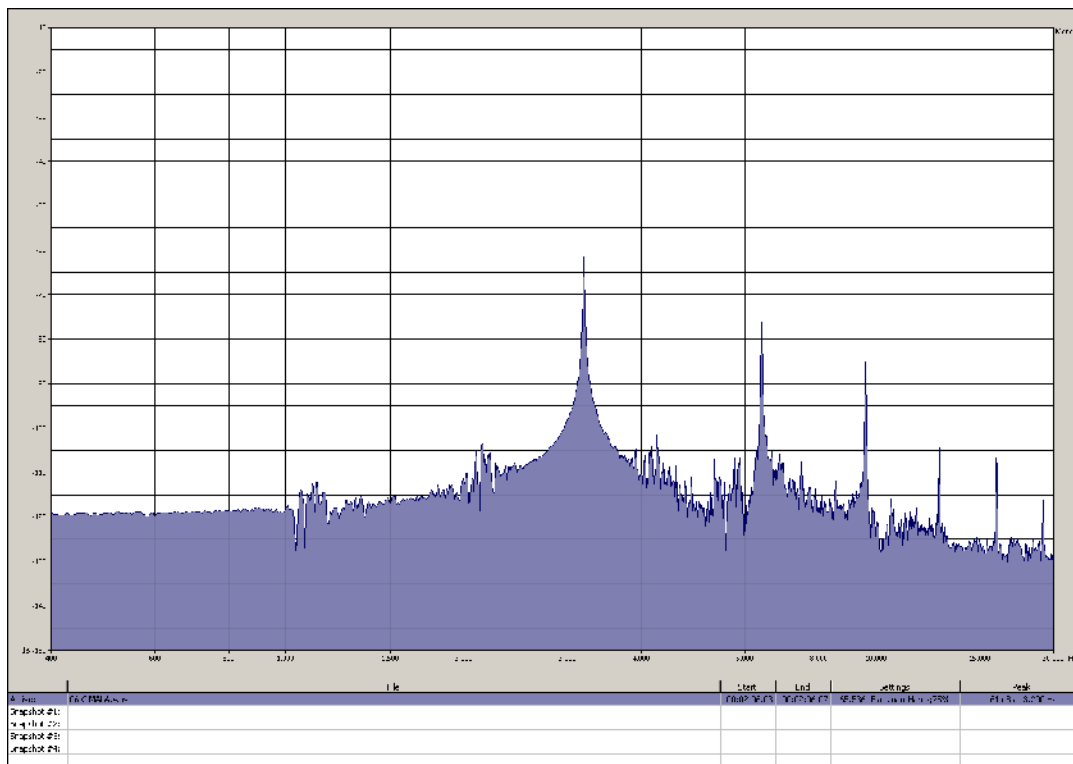


Slika 38.17: Frekvencijski spektar tona  $e^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

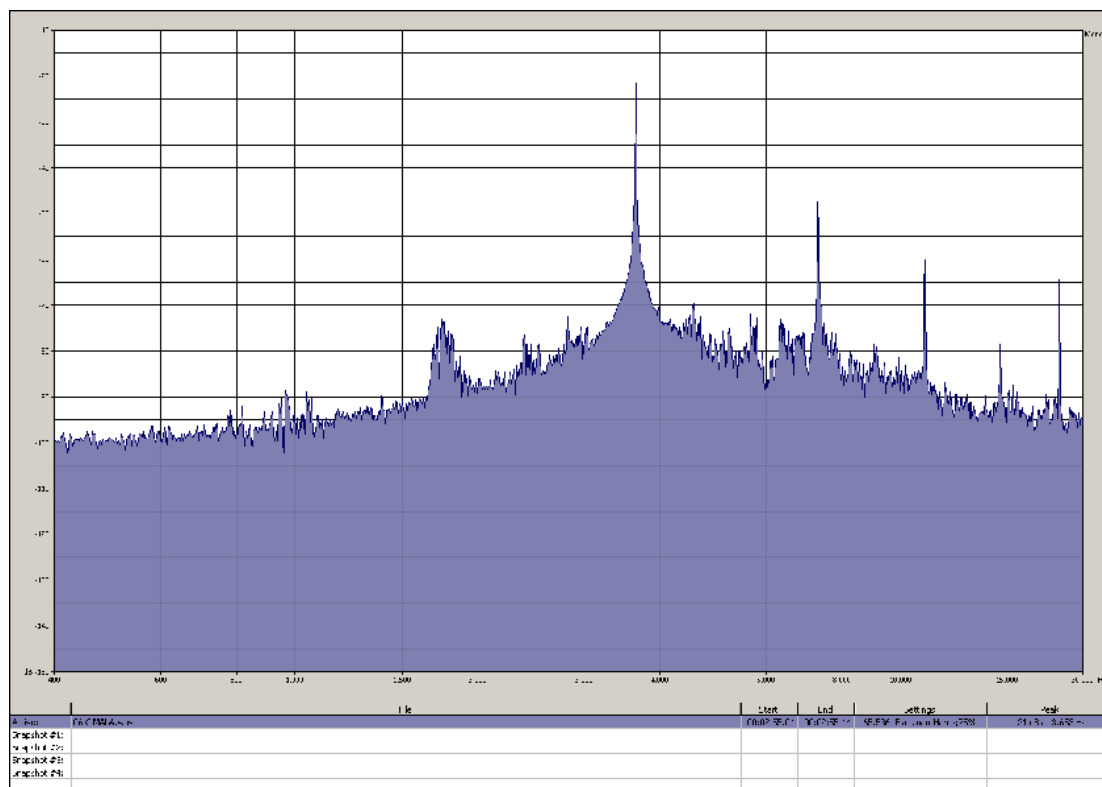


Slika 38.18: Frekvencijski spektar tona  $f^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)





Slika 38.19: Frekvencijski spektar tona  $g^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)



Slika 38.20: Frekvencijski spektar tona  $a^4$ , odsviranog na fruli 6 BD (dren – bagrem - mesing, presvučena celuloidom,  $\Phi = 12$  mm)

## DODATAK 39: SA BOROM DUGIĆEM U STUDIJU



*Slika 39.1: Bora Dugić*



*Slika 39.2: Bora Dugić: 'Skakavac'*



*Slika 39.3: AKG C 414*



*Slika 39.4: Postavka mikrofona Neumann U 87*