

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

MUZIČKA AKADEMIJA

VI. ODSJEK

IVAN ŠIMATOVIĆ

Akustika gitare

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

MUZIČKA AKADEMIJA

VI. ODSJEK

# AKUSTIKA GITARE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: red. prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

Student: Ivan Šimatović

Ak.god. 2017./2018.

ZAGREB, 2018.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

---

Potpis

U Zagrebu \_\_\_\_\_ 2018.

Diplomski rad obranjen

POVJERENSTVO:

---

---

---

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICI MUZIČKE  
AKADEMIJE

## **Predgovor**

Posebice bih zahvalio mentoru, red. prof. dr. sc. Kristianu Jambrošiću, koji je uza sve svoje projekte i obveze našao vremena da me usmjeri u ovom radu i da zajedničkim putem nađemo rješenja problema.

Ovim putem zahvalio bih se Pavlu Severu, graditelju jedne od snimljenih gitara, na bezrezervnoj podršci i pomoći u opisivanju građe gitare, te profesoru, doc. art. Krešimiru Bedeku, na pružanju bogatog znanja tijekom pet godina napornog rada.

# SADRŽAJ

1. Sažetak
2. Ključne riječi
3. Uvod
4. Oznake
5. Razrada teme
  - 5.1. Povijest i građa gitare
    - 5.1.1. Povijest gitare
    - 5.1.2. Građa gitare
  - 5.2. Značajke zvuka i akustičke osobine instrumenta
    - 5.2.1 Zvuk
    - 5.2.2 Akustičke osobine instrumenta
  - 5.3. Mjerenja
    - 5.3.1 Specifikacije mjerenja
    - 5.3.2. Prvo mjerenje: proučavanje amplitude u ovisnosti o tehnici trzanja žice
    - 5.3.3. Drugo mjerenje: proučavanje frekvencijskog spektra u ovisnosti o mjestu trzaja
    - 5.3.4. Treće mjerenje: proučavanje amplitude dominantne i potisnute frekvencije s usporednim kriterijem
    - 5.3.5. Četvrto mjerenje: proučavanje frekvencijskog odziva tranzijentnog udarca
6. Zaključak
7. Bibliografija

## **1. Sažetak**

Ovaj se rad sastoji od tri glavne cjeline. Prva cjelina donosi povijest gitare i objašnjenje kompleksne građe tradicionalnog tipa tog instrumenta. U drugoj se cjelini objašnjava zvuk kao pojava te slijedi objašnjenje akustike istog glazbala. U posljednjoj su cjelini prikazana mjerenja kojima se objašnjavaju određene akustičke osobine zvuka proizvedenog na gitari.

## **2. Ključne riječi**

Mjerenja, cedar, smreka, frekvencija, amplituda, povijest gitare

## **1. Abstract**

This thesis consists of 3 main sections. The first section is about the history of guitar and the explanation of its complex construction. Second part brings description of sound as appearance and acoustic features of the instrument. The last section shows measurements made to show the specific acoustic characteristics of the sound produced on guitar.

## **2. Key words**

Measurements, cedar, spruce, frequency, amplitude, the history of the guitar

### 3. Uvod

Gitara je instrument na kojem se zvuk dobiva trzanjem žice. No, kako zapravo nastaje zvuk? Kakva je razlika između gitare i žice razapete između dva jednostavna kraja bez pomoći rezonantne kutije? Koja je i kolika razlika između različitih načina trzanja žice? Zašto je boja drugačija ovisno o mjestu trzaja žice? To su samo neka od pitanja kojima će rad biti posvećen.

Kroz ovaj sam rad htio samo malo zagrabit u duboko more akustičkih obilježja koja mi umjetnici percipiramo na drugačiji, subjektivni način. U ovom ću radu, stoga, prikazati kratku povijest gitare i njenu povezanost s drugim povijesnim instrumentima, građu tradicionalne gitare te akustičke osobine gitare. Kroz mjerenja predočit ću važne objektivne značajke zvuka koje će biti popraćene subjektivnim dojmovima slušatelja. Mjerit ću akustičke osobine dviju gitara i kao rezultat mjerenja trebao bih dobiti usporedbu dviju gitara izrađenih od različitog materijala.

### 4. Oznake

Hz: herc (jedinica frekvencije)

dB: decibel (jedinica razine zvučnog tlaka)

mm: milimetar (jedinica duljine)

N: njutn (jedinica sile)

## 5. Razrada teme

### 5.1. Povijest i građa gitare

#### 5.1.1. Povijest gitare

Proučavanjem egipatske, hetitske i babilonske kulture, može se utvrditi da povijest gitare počinje u drugom tisućljeću prije Krista. Uvidom u reljef Höyük koji pripada hetitskoj kulturi, utvrđuje se prisutnost kopljaste lutnje, instrumenta sličnog gitari po zaobljenosti trupa. Instrument se izrađivao na sljedeći način: iz prirode se uzelo šuplje tijelo (bundeva ili oklop kornjače), prepolovilo te se kroz njega probolo koplje. U babilonskoj pak kulturi nalazimo dva reljefa koji nam ukazuju da se i kod njih prakticirala upotreba takvog glazbala, a jedina je razlika bila u tome što je oblik trupa bio pravokutan. U Egiptu se, također, vidi prisutnost kopljaste lutnje na reljefima i pretpostavlja se da je u njihovu kulturu ušla prodorom Hetita u Egipatsko carstvo. Razvoj se nastavlja kod Grka gdje se 300. g. pr. Kr. uočava drugačija konstrukcija instrumenta. Naime, ti spomenuti instrumenti bili izgrađeni od daščica i posjedovali su konjić.

Selimo u Španjolsku, gdje se uz godinu 1484. vezuje otkriće viole kao instrumenta (*Hispanorum invento*). Taj instrument, poznatiji kao vihuela, imao je važnu ulogu u stvaranju današnje moderne gitare. Postojale su dvije vrste vihuele: *vihuela de mano* i *vihuela de arco*. U isto vrijeme u Europu je dospjela lutnja i ona je uživala samostalnost u razvoju. Glavna je razlika između tadašnje viole i lutnje bila ta što je viola bila ravna i s obje strane zaobljena, dok je tijelo lutnje bilo ispupčeno. Daljnja glazbala razvijena iz lutnje bila su gitara i u manjem obliku gitarna, a isticale su se tankim zvukom. Početkom 16. stoljeća počinjemo pratiti zbog zasebnog razvoja samo *vihuelu de mano* koja poprima naziv vihuela. Imala je korpus u obliku kutije, ravnu glasnjaču, ugrađen vrat s pragovima, glavu s napinjačama otraga, nalijepljen konjić i šest parova žica.

Gitara je prvi put opisana 1328. godine kao oštar i grub instrument pod nazivom *La guitarra serranista*. Smatrana je glazbalom puka i na njoj tada nisu bila izvođena djela velike umjetničke vrijednosti. Imala je četiri para žica, a oblikom je bila puno manja od vihuele. Najstarija sačuvana gitara ona graditelja Giovannija Smita (Milano, 1646.), a dužina joj je bila samo 56.5 cm. Do kraja 16. stoljeća počinje se upotrebljavati gitara s



pet žica i ta zadnja žica dodana je u basu. Na primjeru glazbala Joachima Tielkea zaključujemo sljedeće za to razdoblje: veličina gitare povećala se (iznosi između 61 i 71.5 cm), konjić je izrađen za uzlanje žica, glasnjača se nastavljala malim komadićem u vrat i kao pragovi koristile su se crijevne strune koje su se omatale oko vrata. U drugoj polovici 18. st. gitara dobiva šesti par žica, a neposredno nakon toga parovi žica su ukinuti i prihvaćena je gitara sa jednožičnim sustavom. Najveća promjena bilo je uvođenje lepezastih letvica koje su po navođenju Josea Romanillosa imale zadatak da zajedno s glasnjačom uspostave ravnotežu između napetosti i fleksibilnosti. To je najvjerojatnije posljedica želje za glasnijim instrumentom. Uz to, u upotrebu je ušla separatna hvataljka te se dugo korištena mehanika za ugađanje poboljšala. Nakon toga, gitara je poprimila današnji oblik i uslijedile su samo manje izmjene.

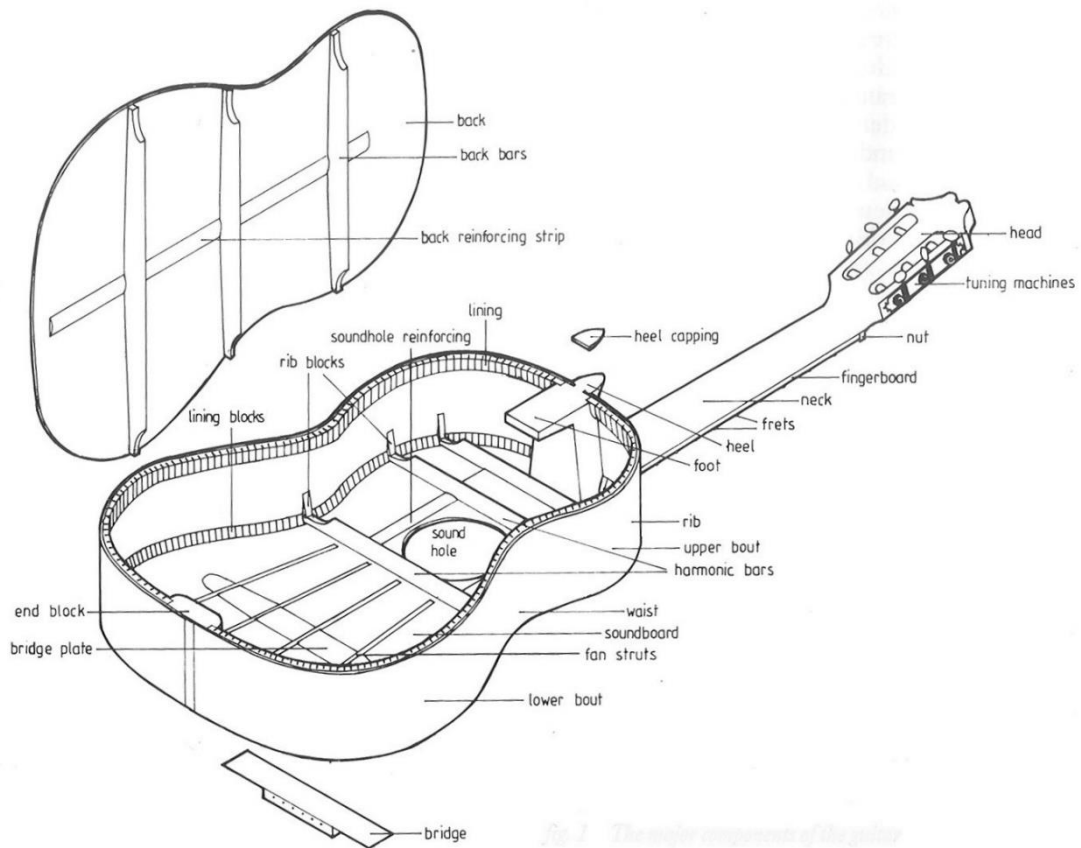
### **5.1.2. Građa gitare**

Tradicionalna se gitara sastoji od dva osnovna složena dijela i to su: trup te glava s vratom gitare.

Glava se gitare nastavlja na vrat i na nju je pričvršćen mehanizam za ugađanje gitare. Vrat gitare sastavljen je od drvene podloge na koju je pričvršćena hvataljka sa pragovima. Na najvišem dijelu nalazi se kost ili slonovača preko koje prelaze žice. Donji dio vrata naziva se „peta“ i na njega su pričvršćene bočne stranice trupa gitare.

Trup gitare najsloženiji je dio. Osnovna je podjela na: prednju ploču (glasnjača), stražnju ploču i bočne stranice. Prednja se ploča sastoji se od: zvučnog otvora, rozete i mosta („konjića“) s vanjske strane. S unutarnje pak strane nalazimo dvije šire letvice postavljene paralelno omeđujući zvučni otvor, a u donjem dijelu nalazimo niz manjih letvica koje čine strukturu, obično u obliku rešetke ili lepeze. Stražnja se ploča tradicionalne gitare sastoji obično od tri poprečne letvice pričvršćene na jednu tanju letvicu koja je okomito postavljena na njih. Bočne stranice dijele se po položaju u odnosu na „struk“ gitare na gornji i donji dio. Prednja i stražnja ploča s bočnim stranicama povezane su spojnicom koja je po građi letvica zarezana u određenom pravilnom razmaku kako bi mogla pratiti zakrivljenje gitare. Samo za napomenu, ovdje

je riječ o tradicionalnom tipu instrumenta. Danas postoje razne modifikacije u građi pa tako položaj i broj letvica varira od graditelja do graditelja.

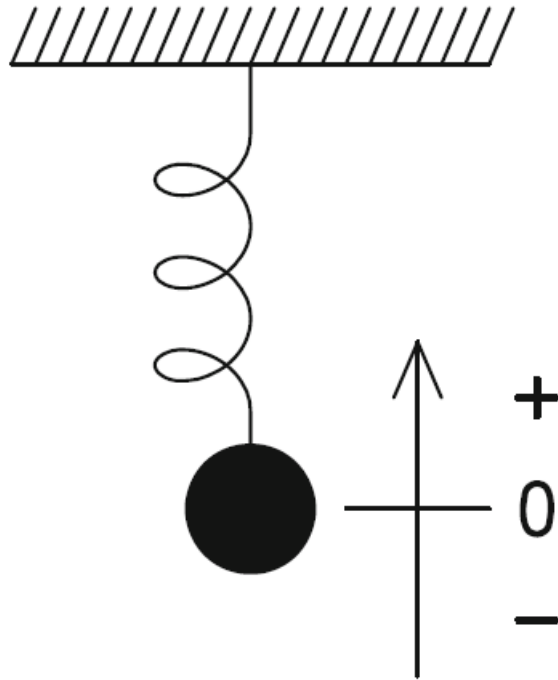


Sl. br. 1 Dijelovi gitare, Courtnall, 1993.

## 5.2. Značajke zvuka i akustičke osobine instrumenta

### 5.2.1. Zvuk

Zvuk je val. Valno se gibanje može opisati pomoću tijela obješenog o elastičnu oprugu. U početku se tijelo nalazi u ravnotežnom položaju pri čemu na njega djeluju dvije sile jednakog iznosa u suprotnim smjerovima i rezultantna je sila jednaka 0 N. Povučemo li tijelo prema dolje, ono će početi titrati oko ravnotežnog položaja radeći pritom pozitivni i negativni pomak. Vrijeme potrebno da tijelo napravi pozitivni i negativni pomak i vrati se u ravnotežni položaj nazivamo periodom.

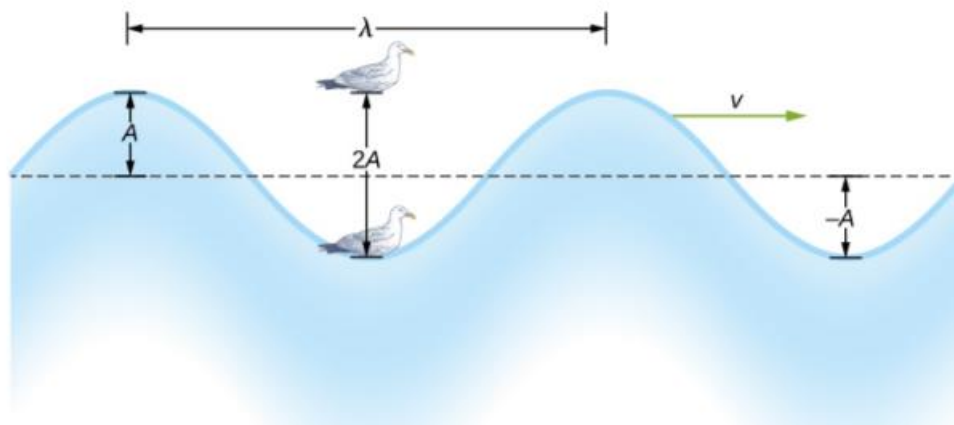


Sl. br. 2 Tijelo obješeno o elastičnu oprugu, Hartmann, 2013.

„Val je, dakle, poremećaj sredstva koji se određenom brzinom širi kroz prostor. Valovi pri kojima čestice sredstva titraju okomito na smjer širenja vala zovemo transverzalni valovi. Dok čestica u izvoru vala napravi jedan potpuni titraj, val prevali određeni put koji zovemo valna duljina, a broj titraja u jedinici vremena daje frekvenciju  $f$ .“<sup>1</sup> Što je ton po slušnom dojamu viši, veća mu je frekvencija, a samim time i manja valna duljina. Isto tako, što je ton niži, frekvencija mu je manja, a valna duljina veća. Kod toga zvučnog vala definiramo pojam promjene zvučnog tlaka koji označava razliku između maksimuma ili minimuma i horizontalne osi koordinatnog sustava, koja se očitava kao razina. Razinu zvučnog tlaka označavamo u decibelima koji predstavljaju logaritamski omjer mjenjenog zvučnog tlaka i referentnog zvučnog tlaka. Također, treba istaknuti pojam intenziteta koji se definira kao količina zvučne energije koja prostruji po jedinici površine prostora postavljenoj okomito na smjer širenja vala.

---

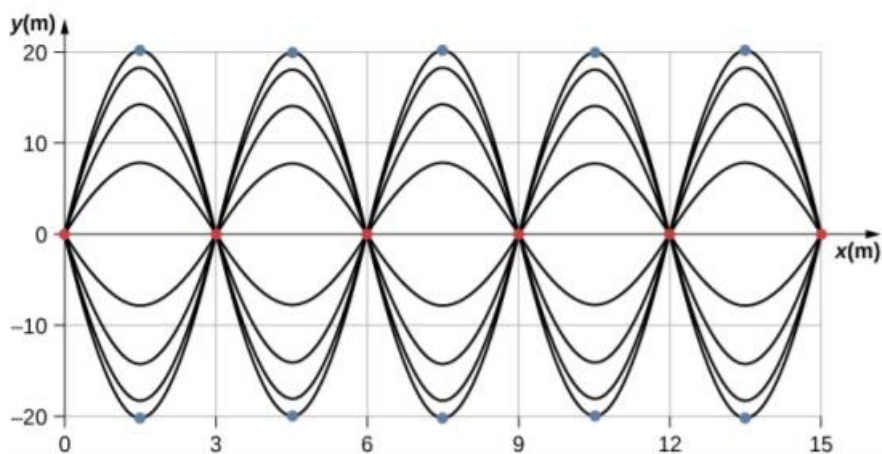
<sup>1</sup> Valovi i optika, 75, 77



Sl. br. 3 Prikaz transverznog vala, Ling; Sanny; Moebis, 2016.

### 5.2.2. Akustičke osobine instrumenta

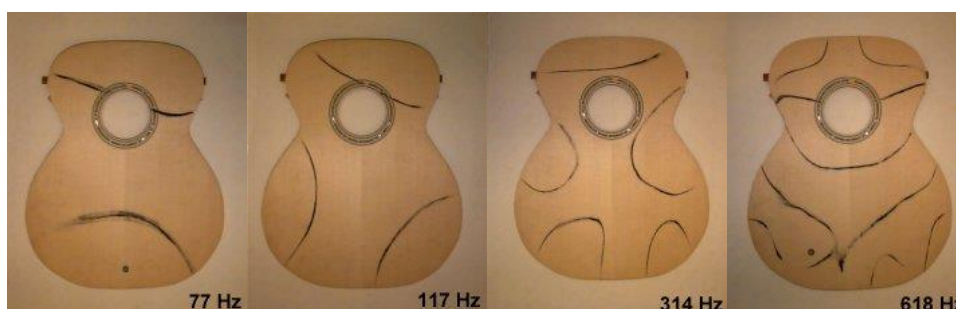
Transverzalni val je val kod kojeg čestice titraju okomito na smjer širenja vala. Taj val karakterističan je za gitaru kod koje je medij kojim se val širi žica razapeta između dva čvrsta kraja. Od mjesta se trzaja val širi na obje strane i od čvrstog se kraja reflektira te dolazi do pozitivne i negativne interferencije te na kraju i do pojave stojnih valova. Stojni se valovi sastoje od čvorova<sup>2</sup> i pripadajućih područja između njih gdje je pomak u odnosu na ravnotežni položaj maksimalan.



Sl. br. 4 Prikaz stojnog vala, Ling; Sanny; Moebis, 2016.

<sup>2</sup> Čvor je točka gdje je pomak od ravnotežnog položaja minimalan.

Različiti modovi vibracija prednje ploče nastaju ovisno o frekvenciji zbog pojave stojnih valova. Na sljedećim slikama prikazana je prednja ploča prekrivena prahom koji se pri svakoj od navedenih frekvencija drugačije razmjestio. Sabirno područje praha predstavlja čvorove stojnih valova te se jasno može uočiti proporcionalnost između frekvencije, te razmaka i broja linija (što je frekvencija veća, veći je broj čvorova stojnih valova). Nepravilnost linija proizlazi iz nepravilnog oblika prednje ploče, odnosno same gitare.



Sl. br. 5 Modovi vibracija prednje ploče, Wolfe, S.A.

Trzanjem note određene frekvencije ne projicira se samo ta frekvencija već i njezin pripadajući sustav viših harmonika. Svaki od navedenih harmonika dobije se tako da se osnovna frekvencija pomnoži s određenim brojem.

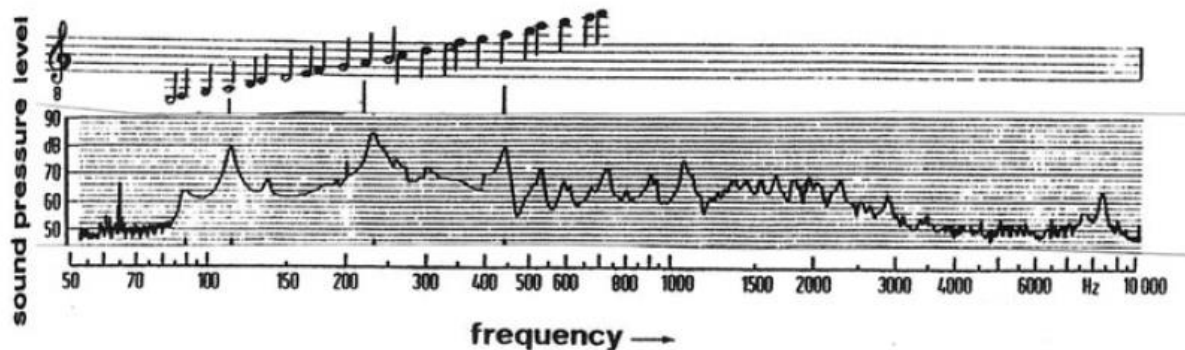


Sl. br. 6 Prikaz prvih osam harmonika note „g“ (98 Hz), Roederer, 2009.

Razina zvučnog tlaka koju žica svojim titranjem proizvede zanemariva je u odnosu na preostali tijek projekcije zvuka. Naime, pri višim frekvencijama titrajna se energija prenosi na „konjić“, a preko njega na prednju ploču koja nastavlja titrati pritom povećavajući razinu zvučnog tlaka. Kod niskih frekvencija, titrajna energija prelazi pomoću bočnih stranica i zračne šupljine na stražnju ploču, dominantnu za

projekciju niskih frekvencija na gitari. Mnogo je istraživanja provedeno kako bi se utvrdile dominantne frekvencije na gitari pa su dobiveni sljedeći rezultati.

Područja oko 100, 200 i 400 Hz najistaknutija su frekvencijska područja kao i čitav raspon od 400 do 700 Hz. U glazbi to odgovara tonovima: „a“, „a<sup>1</sup>“, „a<sup>2</sup>“ te cijelom području od „a<sup>2</sup>“ pa sve do „f<sup>3</sup>“ kao što je prikazano na slici br. 7.

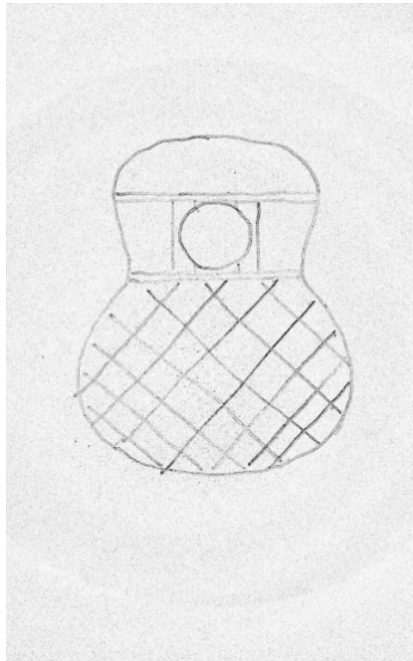


Sl. br. 7 Istaknutost frekvencijskih područja povezana s glazbenim tonovima, Rossing, 2010.

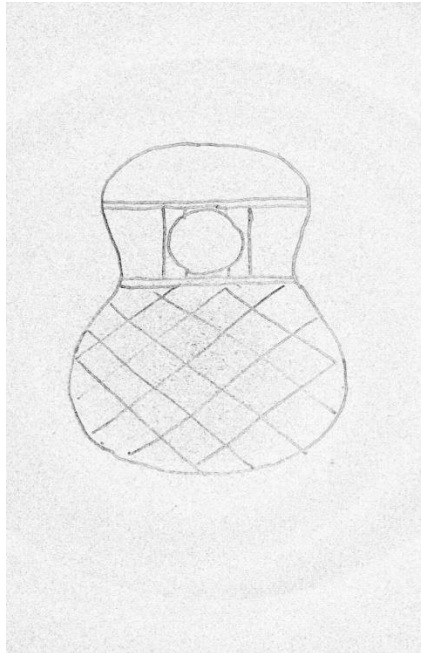
## 5.3. Mjerenja

### 5.3.1. Specifikacije mjerenja

Mjerenjima ću nastojati objasniti određene akustičke osobine gitare i povezanost s percepcijom slušatelja, a provedena su u „gluhoj komori“ na Fakultetu elektrotehnike i računarstva. Za potrebe istih upotrijebljene su dvije gitare: prva je djelo hrvatskog graditelja Pavla Severa iz 2015. godine, dok je drugu gitaru izradio grčki graditelj Giannis Paleodimopoulos. Mjerenja se temelje na snimkama zvuka gitara snimljenih mikrofonom tvrtke AKG C414 te zvučnom karticom tvrtke Focusrite Scarlett 2i2. Svaki ton odsviran je i snimljen dva puta. Među ciljevima ovih mjerenja bilo je prikazati i razliku ovisno o materijalu prednje ploče. U prvom slučaju riječ je o drvu smreke pri rubovima debljine 2,4 mm sužavajući se prema sredini na 1,7 mm, dok je druga gitara od cedrovine pri rubovima debljine svega 1 mm šireći se prema sredini do 1,5 mm. Jako važnu ulogu ima i konstrukcija letvica: obje su gitare rešetkaste strukture. U prvom slučaju nalazimo pet letvica sa svake strane položenih pod kutem od 90 stupnjeva, a u drugom jednaki kut, no ovoga puta po sedam letvica sa svake strane.



Sl. br. 8 Rešetkasta struktura cedra sastavljena od 7 letvica sa svake strane



Sl. br. 9 Rešetkasta struktura smreke sastavljena od 5 letvica sa svake strane



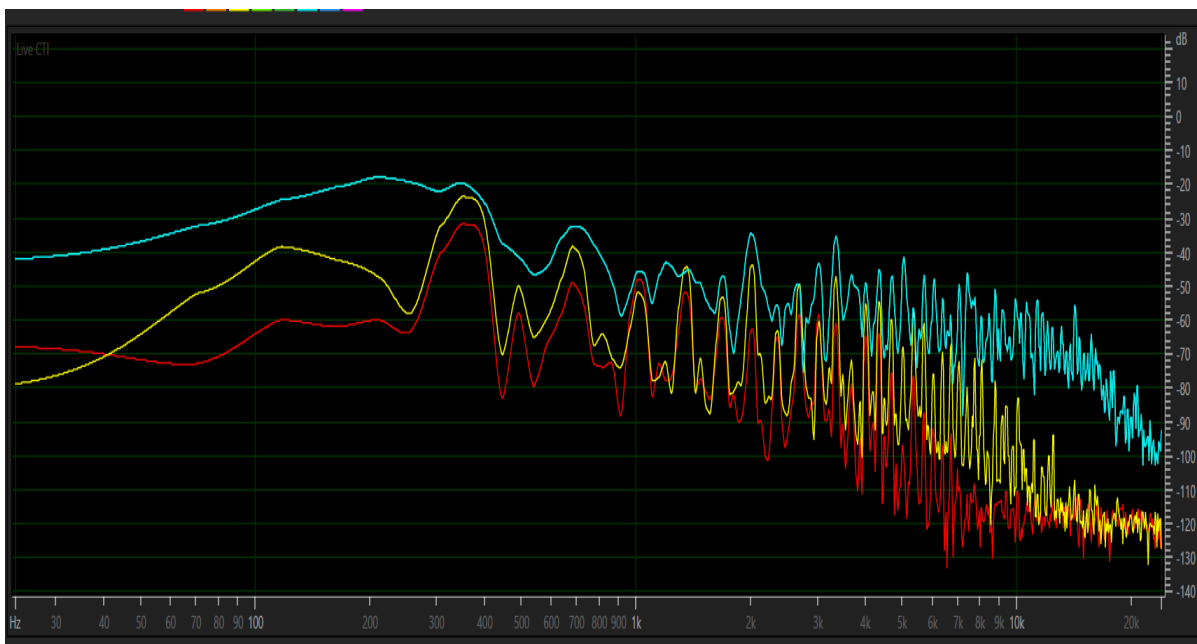
Sl. br. 10 Prikaz postave gitare i mikrofona za prva 3 mjerenja

### 5.3.2. Prvo mjerenje- amplituda zvuka gitare u ovisnosti o tehnici trzanja žice

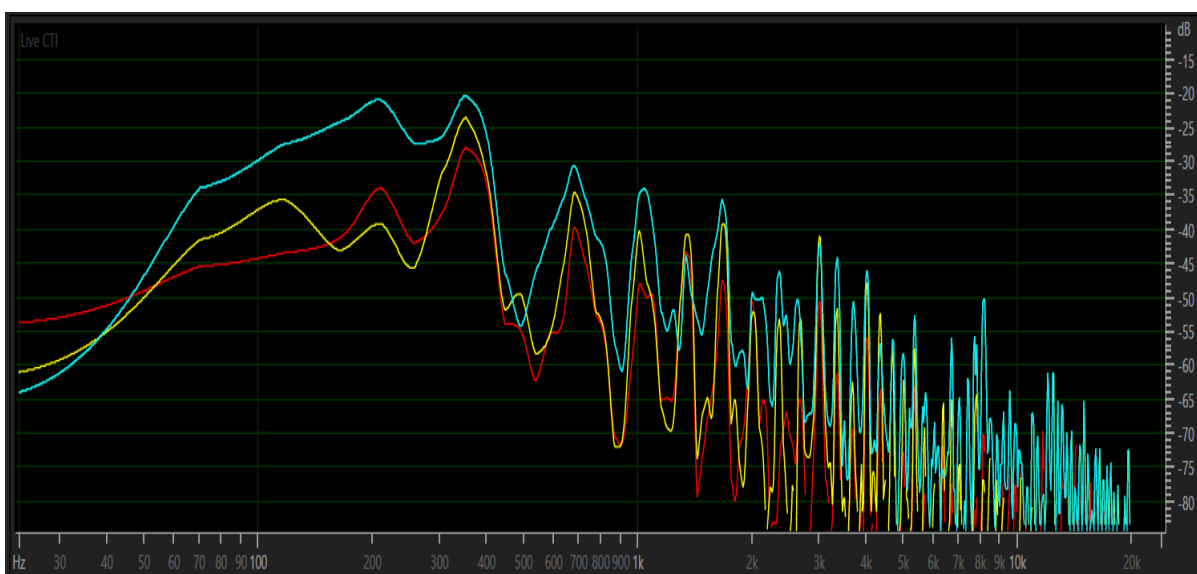
U prvom je mjerenju proučavana amplituda osnovnog harmonika ovisno o načinu trzanja žice.

Žica je trzana približno jednakom snagom pomoću tri različite tehnike trzanja: *tirando* (trzanje prema susjednoj žici), *apoyando* (trzanje pod kutem od 45 stupnjeva u odnosu na prednju ploču) i trzanje potiskom prema glasnjači (trzanje okomito na prednju plohu).





Sl. br. 11 „Smreka“ - crvena krivulja prikazuje tirando tehniku, žuta *apoyando*, a plava potisak prema glasnjači

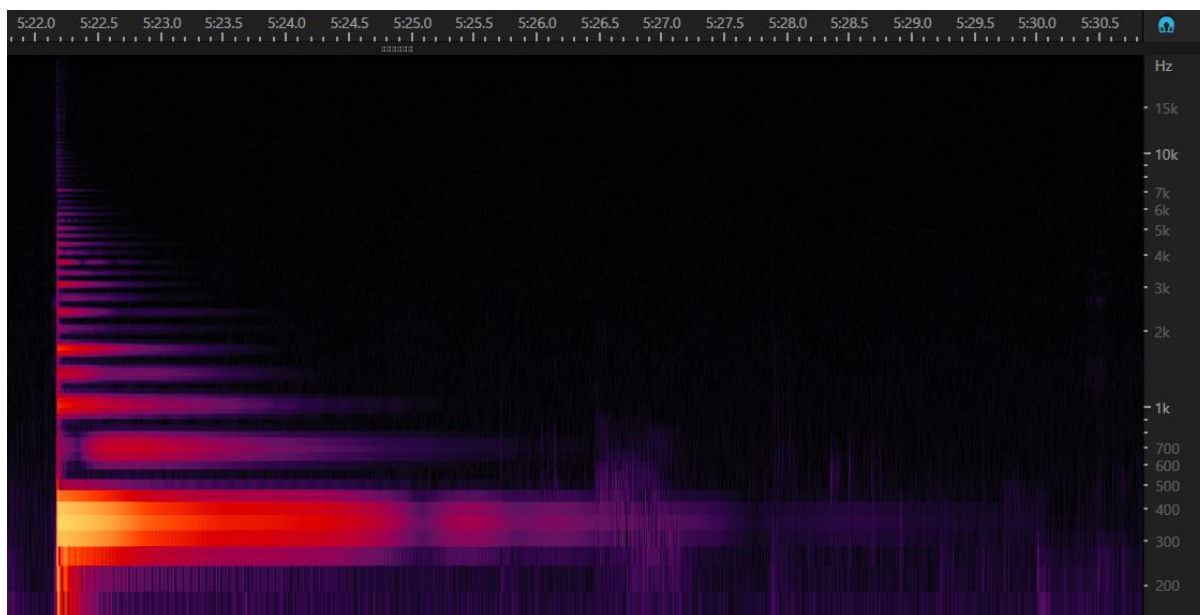


Sl. br. 12 „Cedar“ - crvena krivulja prikazuje tirando tehniku, žuta *apoyando*, a plava potisak prema glasnjači

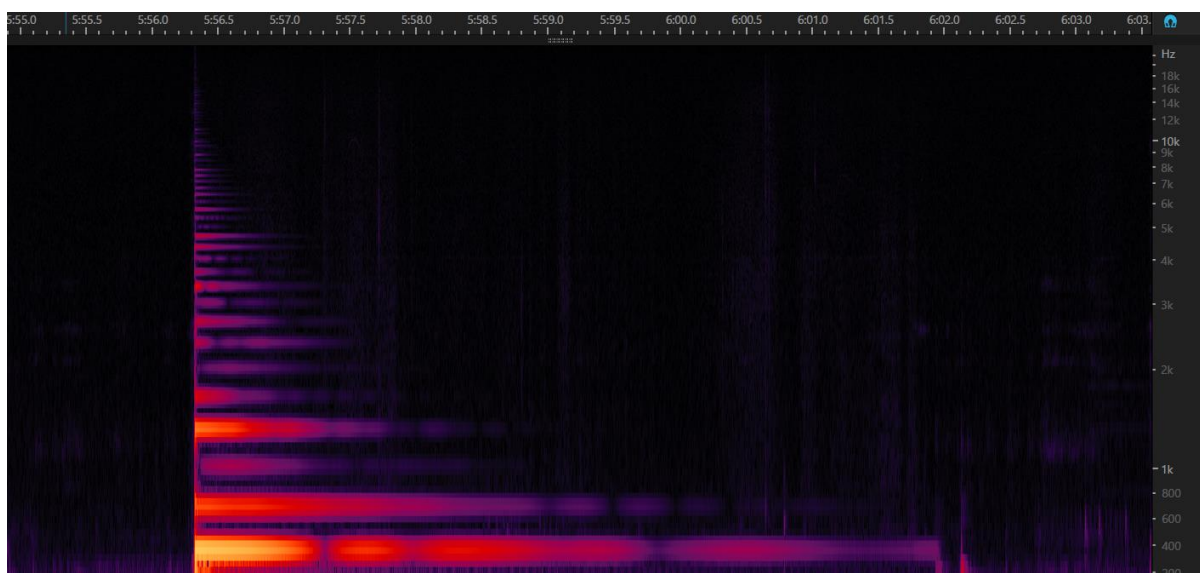
Navedenim mjerenjima u oba slučaja možemo iščitati dominaciju u korist *apoyanda* i tehnike potiska prema glasnjači naspram tiranda gdje nalazimo razliku od čak 10 dB (razlika od 10 dB daje približno osjet dvostruke glasnije dinamike).

### 5.3.3. Drugo mjerenje- razlika frekvencijskog spektra zvuka gitare u ovisnosti o mjestu trzaja

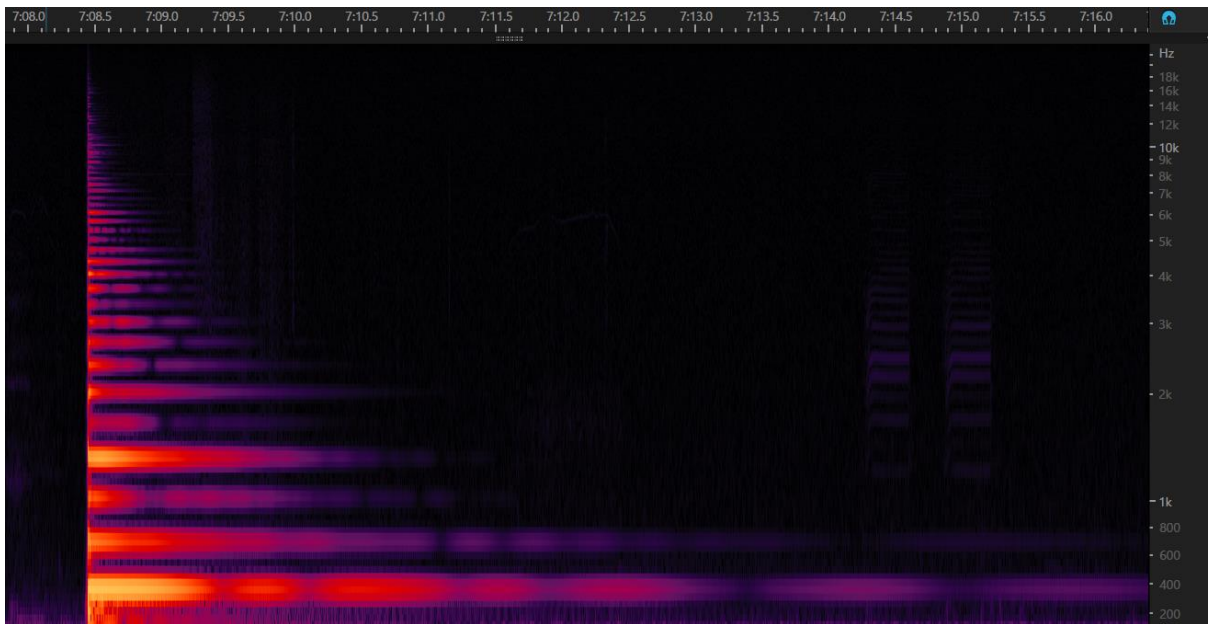
U ovom mjerenju proučava se frekvencijski spektar, alikvotni niz s obzirom na mjesto trzaja žice i utjecaj na slušni osjet boje tona. Žica je trzana istim prstom i približno jednakim intenzitetom na polovini, trećini i petini njene udaljenosti mjereći od konjića na glasnjači.



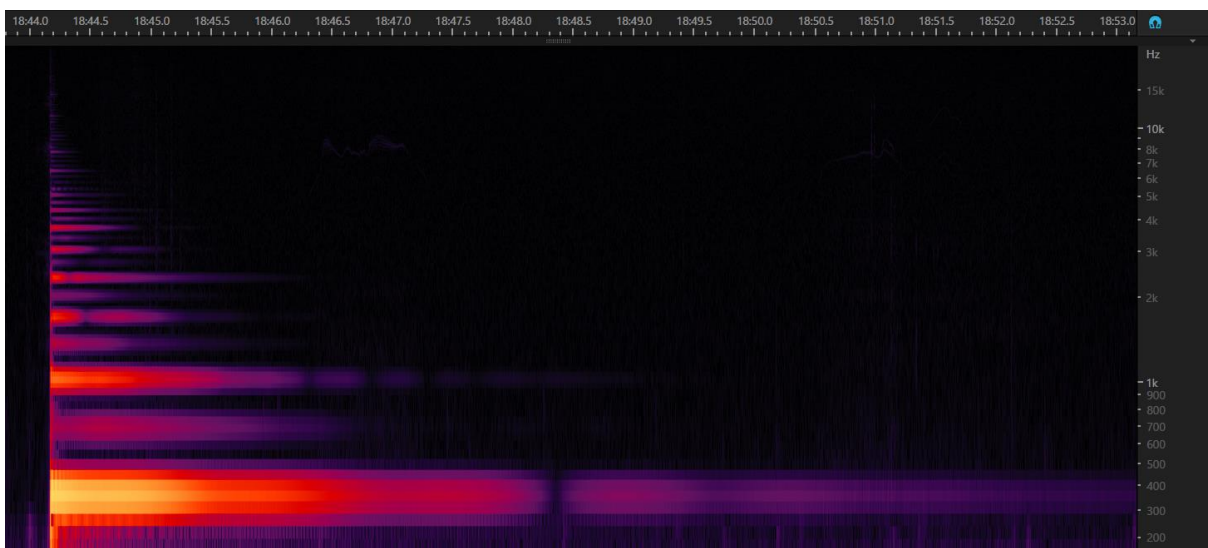
Sl. br. 13 „Smreka“: trzaj na polovini žice



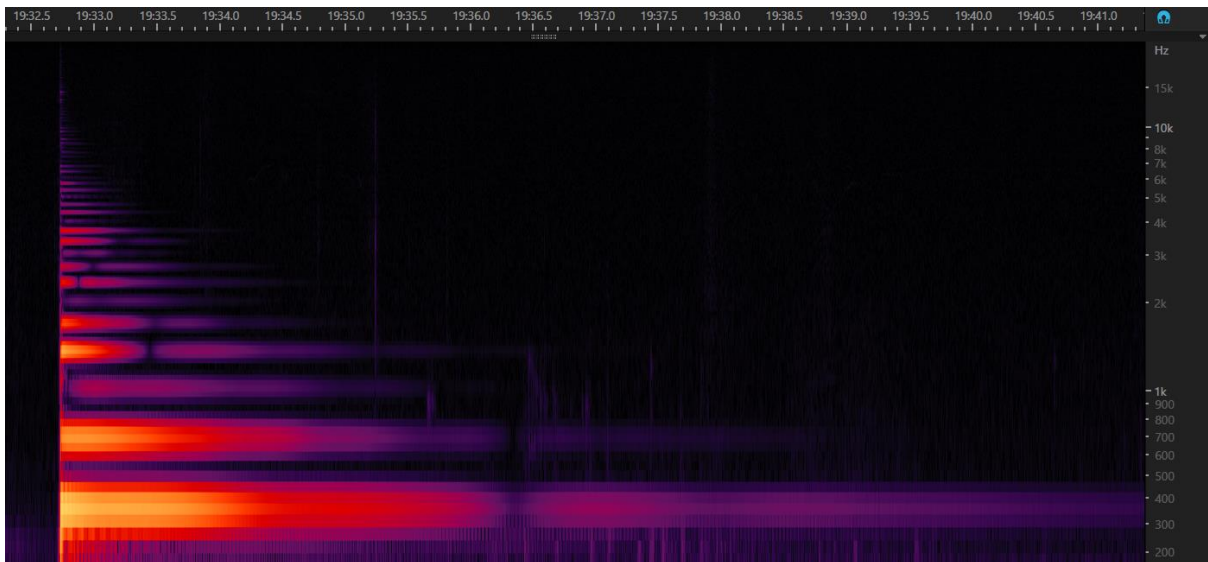
Sl. br. 14 „Smreka“: trzaj na trećini žice



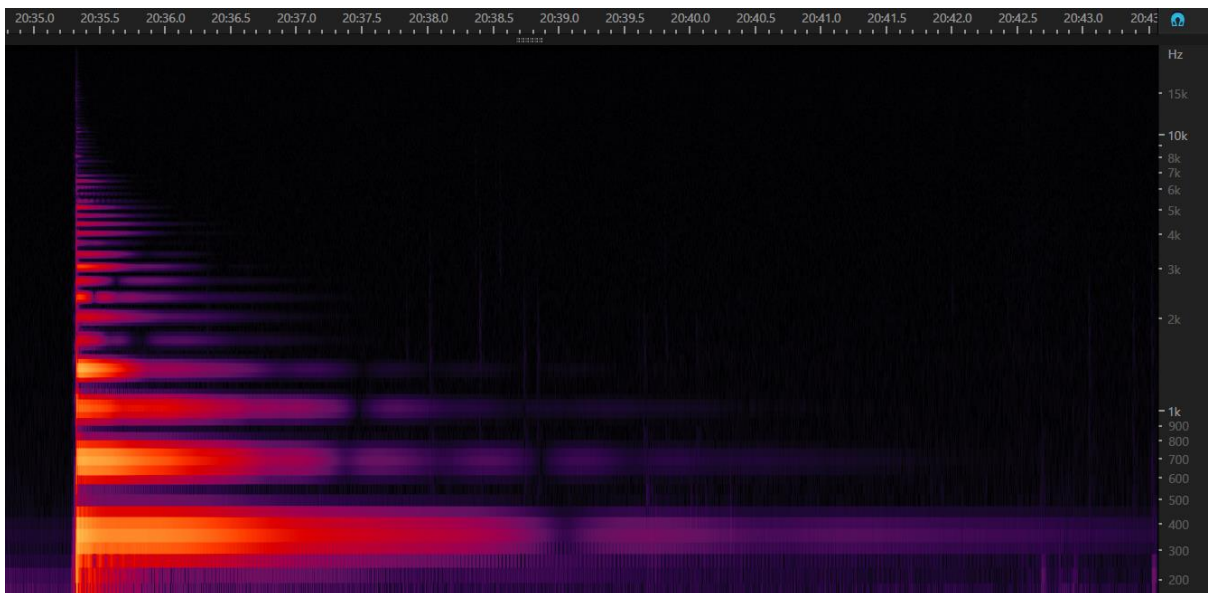
Sl. br. 15 „Smreka“: trzaj na petini žice



Sl. br. 16 „Cedar“: trzaj na polovini žice



Sl. br. 17 „Cedar“: trzaj na trećini žice



Sl. br. 18 „Cedar“: trzaj na petini žice

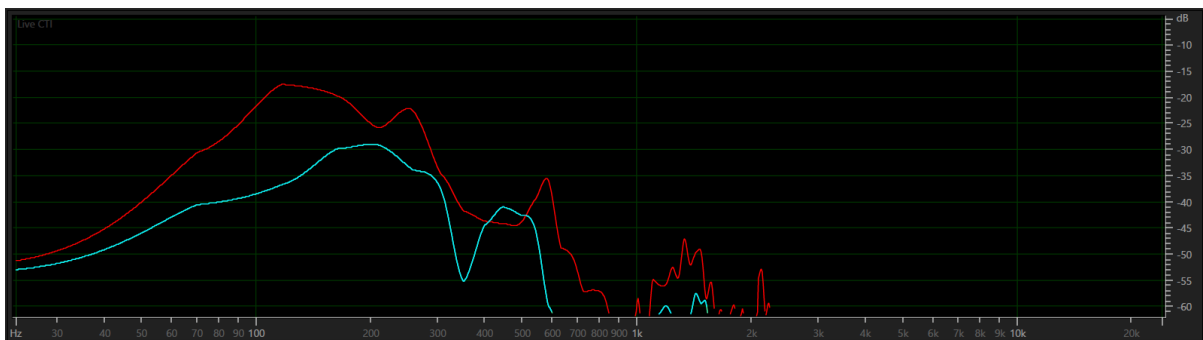
Ovim je mjerenjem cilj ukazati na razliku frekvencijskog spektra ovisno o mjestu trzaja i povezati ju sa slušnom razlikom u boji tona. Trzanjem žice nastaju valovi osnovne frekvencije i alikvotnih frekvencija pri čemu zbog širenja vala na žici i odbijanja od oba čvrsta kraja dolazi do pozitivnih i negativnih interferencija i pojave stojnog vala, a time i do efekta poništavanja određenih alikvotnih frekvencija. Ako pogledamo graf, uvidjet ćemo kako se mjerenja u potpunosti podudaraju sa navedenom hipotezom. Pri trzaju na polovini duljine žice, na grafu jasno uočavamo

izostanak drugog harmonika i svakog njegovog višekratnika; pri trzaju na trećini izostanak trećeg harmonika i njegovih višekratnika te pri trzaju na petini izostanak frekvencije petog harmonika. Ta je razlika u frekvencijskom spektru jedna od ključnih u oblikovanju boje tona. Na polovini je žice boja „najtamnija“, a pomakom prema konjiću posvjetljuje se. Zašto? Trzanjem na polovini žice dolazi do gubitka svakog drugog harmonika čime se automatski poništavaju više frekvencije koje uvelike oblikuju boju osnovnog tona. Kod trzaja na petini žice ne dolazi do poništavanja harmonika viših frekvencija u tolikoj mjeri pa te više frekvencije čine ton svjetlijim.

### 5.3.4. Treće mjerenje- amplitude zvuka gitare dominantne i potisnute frekvencije s usporednim kriterijem

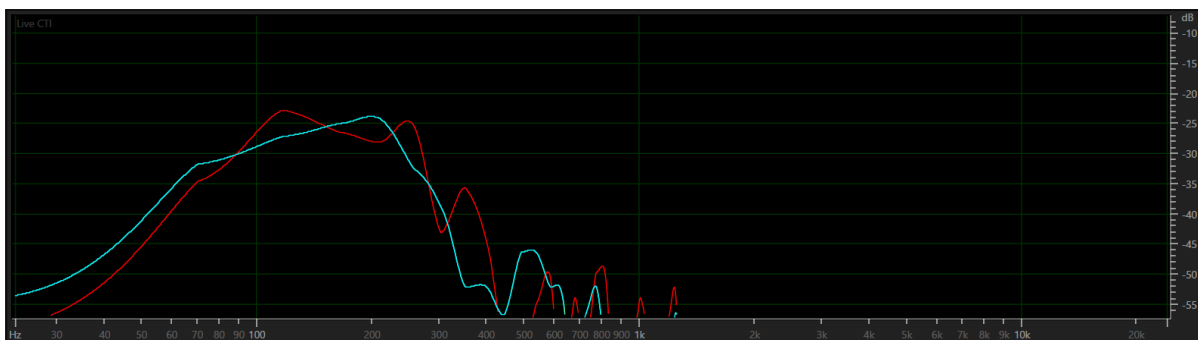
Tema je mjerenja usporedba frekvencije od 82.41 Hz (nota „e“) i frekvencije od 110 Hz (nota „a“).

Svrha je ovog mjerenja pokazati razliku u razini zvučnog tlaka između jedne od dominantnijih frekvencija (110 Hz) i jedne od potisnutijih (82.41 Hz) pri trzanju približno jednakom silom.



Sl. br. 19 „Smreka“: krivulja plave boje prikazuje trzaj note „e“ u maloj oktavi, dok krivulja crvene boje prikazuje trzaj note „a“ u maloj oktavi





Sl. br. 20 „Cedar“: krivulja plave boje prikazuje trzaj note „e“, dok krivulja crvene boje prikazuje trzaj note „a“

Iz prikazanog uočavamo kako je u oba slučaja ista dokazana, samo što je u slučaju smreke razlika puno veća nego kod cedra. Upravo ovo mjerenje pokazuje nelinearnost gitare u frekvencijskom području koje iziskuje kompenzaciju intenzitetom trzaja kako bi se određene frekvencije izjednačile po razini zvučnog tlaka.

### 5.3.5 Četvrto mjerenje- frekvencijski odziv tranzijentnog udarca

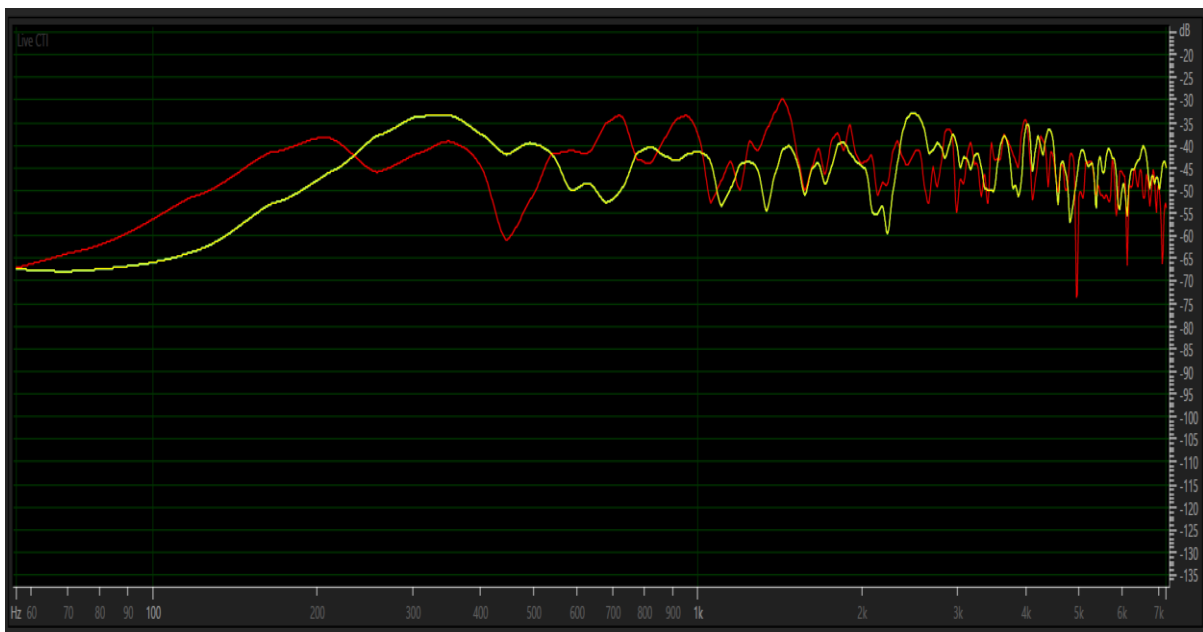
Posljednje je mjerenje iznjedrilo razlike u frekvencijskom spektru „smreke“ i „cedra“ pobuđenom tranzijentnim udarcem kuglice koja je prethodno padala slobodnim padom s relativne visine od 20 cm.



Sl. br. 21 Četvrto mjerenje

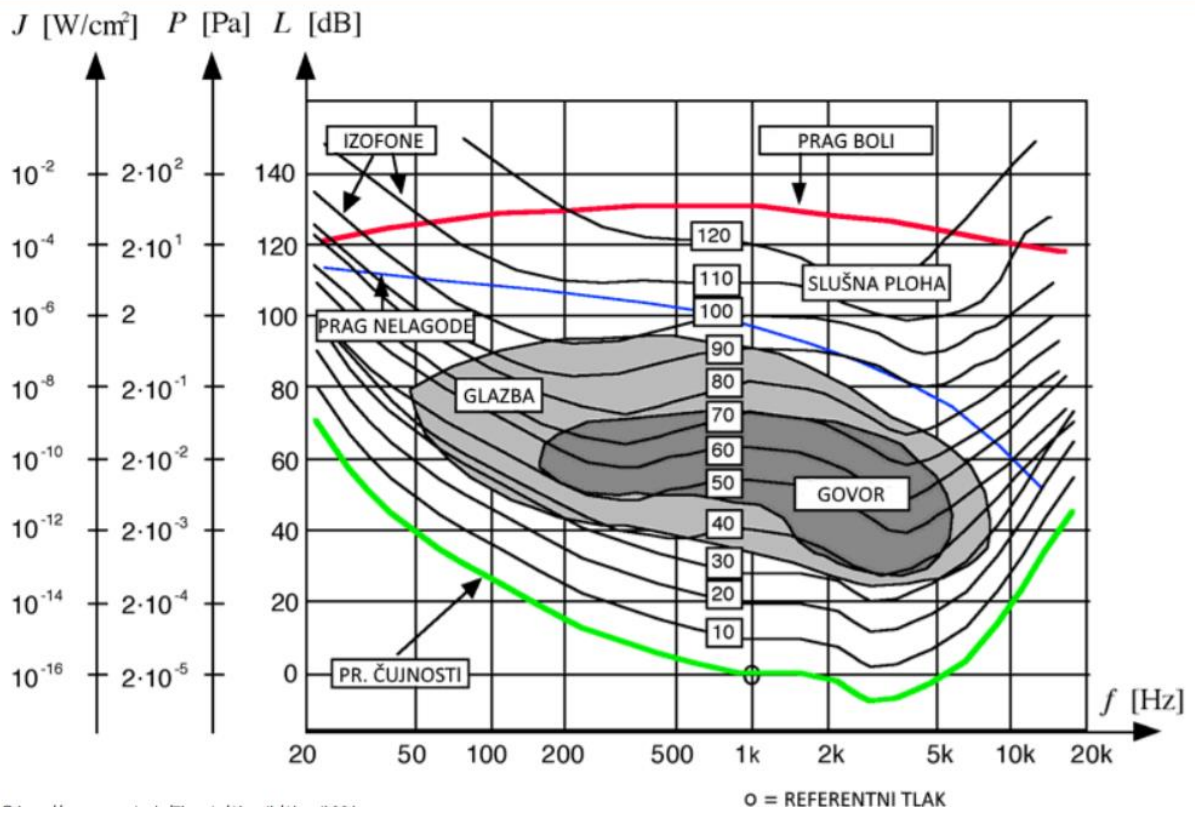
Mjerenje je izvedeno na sljedeći način: gitara se postavila vodoravno na dvije stolice s prethodno otpuštenim žicama do te mjere kako ne bi utjecale na frekvencijski spektar tranzijentne pobude. Kuglica je namještena na način da udari točno u središte stražnje plohe i to ne više od jedanput.

Zaključnim je mjerenjem cilj bio pokazati razliku u odzivu rezonantnih kutija s jednakim pobudama. Iz grafa se može očitati dominantnost „cedra“ u području do oko 230 Hz, potom izmjena i dominacija smreke u području od 230 Hz pa sve do 630 Hz, i onda slijedi niz izmjena u daljnjem frekvencijskom spektru. Dani odziv odgovara subjektivnom osjetu glasnoće pa se tako slušajući „cedar“ zaista može čuti nadmoć u basovim žicama, a penjući se prema višim tonovima dominacija se premješta na „smreku“.



Sl. br. 22 Crvena krivulja prikazuje tranzijentni odziv „cedra“, a žuta tranzijentni odziv „smreke“.

Isto tako, povezujući nelinearnost ljudskog sluha, presjekom prikaza slušne plohe i frekvencijskog spektra danih gitara uviđamo kako cedar dominira na području od 1 kHz do 5 kHz i to područje predstavlja frekvencijsko područje na kojem je ljudski sluh najosjetljiviji pa se time „cedar“ doima glasnijim.



Sl. br. 23 Slušna ploha



## 6. Zaključak

Ovim je radom ispunjena moja želja da malo zavirim u instrument koji toliko dugo poznajem. Samome sam sebi objasnio određene pojave u nastajanju zvuka na gitari, a isto se tako nadam se da će i kolege imati koristi od ovog rada. Smatram da nije naodmet poznavati osnovna akustička obilježja instrumenta koji nam je predmetom struke. Posebno mi je zadovoljstvo činilo proučavanje uzroka razlike u boji ovisno o mjestu trzaja ako varijablu načina trzanja ostavimo nepromijenjenom. Isto tako, zanimljivo je sagledati povijest gitare: koliko je jednostavna konstrukcija preteče, a kako je samo kompleksna trenutna reprezentacija gitare. Velik je broj toga što bise moglo još istražiti i vjerujem da bi se detaljnijim uvidom u akustiku gitare mogao postići daljnji razvoj gitare. Ovakvim mjerenjima sa sigurnošću možemo utvrditi određene manjkavosti, povezati ih s konstrukcijom gitare te raditi na tome da se iste otklone.

## 7. Bibliografija

Courtnall, Roy. *Making Master Guitars*. Ohio: Robert Hale Ltd., 1993.

Hartmann, William M. *Principles of Musical Acoustics*. New York: Springer Verlag, 2013.

Henč-Bartolić, Višnja; Kulišić, Petar. *Valovi i optika*. Zagreb: Školska knjiga, 2004.

Ling, Samuel J.; Sanny, Jeff; Moebs, William. *University Physics Volume 1*. Houston: Rice University, 2016.

Meyer, Jürgen: *Acoustics and the Performance of Music*. New York: Springer, 2010.

Paeffgen, Peter. *Gitara - Osnovne crte njenog razvoja*. Zagreb: Music Play, 2003.

Roederer, Juan G. *The Physics and Psychophysics of Music*. New York: Springer, 2009.

Rossing, Thomas D. *The Science of String Instruments*. New York: Springer Verlag, 2010.

Wolfe, Joe. Music acoustics. *How does a guitar work?*,

<http://newt.phys.unsw.edu.au/music/guitar/guitarintro.html> (pristup 26.8.2018.)