Fizikalni principi rada električne gitare

Ucović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:325429

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Ivan Ucović

Fizikalni principi rada električne gitare

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I KEMIJA; SMJER: NASTAVNIČKI

Ivan Ucović

Diplomski rad

Fizikalni principi rada električne gitare

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc Emil Tafra

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2024.

Sažetak

U ovom radu proučavat ćemo princip rada električne gitare. Promotrit ćemo samu konstrukciju i građu gitare te opisati kako svaki dio utječe na zvuk koji nastaje u konačnici. Proučit ćemo titranje žice i stojne valove koji su nastali trzanjem žice. Potom promatramo u kojem su odnosu titranje žice i pickup zavojnica električne gitare. Usporedit ćemo spektre i zvučne valove nastale trzanjem žica akustične gitare i električne gitare. Također ćemo uspoređivati zvučne valove kada gitaru direktno spojimo u osciloskop i kada koristimo distorziju na pojačalu. Opisat ćemo rad pojačala i zvučnika, te utjecaj ton blende i trzalice na zvuk.

Ključni pojmovi: električna gitara, zvuk, titranje žice, stojni valovi, fundamentalni ton, viši harmonici, harmonijski spektar, pickup zavojnica, Faradayev zakon, elektromagnetska indukcija, pojačalo, zvučnik, ton blenda

Physical principles of electric guitar

Abstract

In this paper, we will study the principle of operation of the electric guitar. We will look at the structure of the guitar and describe how each part affects the resulting sound. The most important elements for us are the vibration of the string and resulting standing waves.. We will observe the relationship between the vibration of the string and the pickup magnet of the electric guitar. The emphasis will be on comparing the spectra and the sound wave created by plucking the strings of an acoustic guitar and an electric guitar. Comparison between the sound waves when we connect the guitar directly to the oscilloscope and when we use distortion on the amplifier will also be made. We will describe the operation of amplifiers and speakers, and how the tone knob and the guitar pick affect the sound.

Keywords: electric guitar, sound, string vibrations, standing waves, fundamental frequency, harmonics, harmonic spectrum, guitar pickup, Faraday's law, electromagnetic induction, amplifier, loudspeaker, tone potentiometer

Sadržaj

1. Uvod.....1

1.1. Povijest.....1

1.2. Konstrukcija.....2

2. Fizikalna osnova.....5

2.1. Zvuk.....5

2.1.1 Zvučni tlak i brzina zvuka.....6

2.1.2 Intenzitet zvuka.....7

2.1.3. Interferencija i udari.....9

2.2 Osnove titranja žice.....10

2.2.1. Stojni valovi.....10

2.2.2. Fundamentalna frekvencija i viši harmonici.....11

2.2.3. Titranje žice gitare.....12

2.3. Magnetizam.....15

2.3.1. Faradayev zakon.....15

2.3.2. Pickup zavojnice.....17

3. Elektronika.....21

3.1.Strujni krugovi.....21

3.2. Filteri.....25

3.3. Pojačalo.....28

3.3.1. Operacijsko pojačalo.....28

3.3.2. Distorzije.....31

3.4. Zvučnik.....33

4. Psihoakustika.....35

4.1 Tonalni sustav.....35

4.2 Frekvencija i visina tona.....38

4.3 Timbar.....40

5. Rezultati.....43

5.1. Fundamentalna frekvencija.....43

5.2. Akustična gitara.....48

5.3. Električna gitara....51
5.3.1. Trzalica i položaj sviranja....51
5.3.2. Rezonancija....54
5.3.3. Oktava i alikvotni niz tonova....56
5.3.4. Neharmoničnost spektra....58
5.3.5. Pickup zavojnica....60
5.3.6. Ton blenda....62
5.3.7. Tremolo ručica....68
5.3.8. DI signal i zvuk žice....69
5.3.9. Pojačalo i distorzija....71
5.3.10. Volume i gain kontrola....76
5.3.11. Bass i treble kontrola....79
5.3.12. Metal i British mod distorzije....81
5.3.13. Powerchord....82
6. Zaključak....85
Dodatak....87
Literatura....88

1. Uvod

Električna gitara je jedan od najraširenijih i popularnijih instrumenata današnjice a i zadnjih desetljeća. Zbog svoje popularnosti ali i kompleksnosti također je i jedan od najzanimljivijih instrumenata za proučavanje. Naime, električna gitara na jedinstven način ujedinjuje glazbu, fiziku, tehniku pa čak i kemiju. Elementi ključni za fiziku su proučavanje fenomena zvuka te titranje žice koje je specifično za gitaru. Potom je važno uvesti i pojmove iz elektrodinamike, a kroz magnetizam ćemo se dotaknuti i fizike čvrstog stanja. Kroz poglavlje o filterima i pojačalu ulazimo u sferu elektronike. Psihoakustika će biti važno poglavlje koje će se naslanjati na glazbu i ljudsku percepciju sluha. Materijali i elementi od kojih su izrađeni pojedini dijelovi doticat će se kemije.

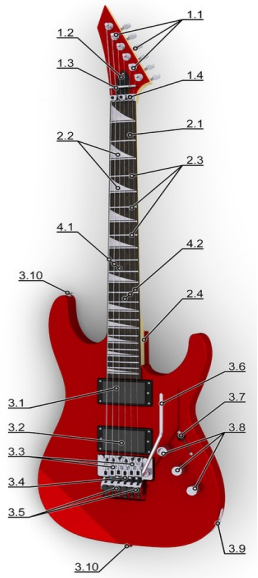
1.1. Povijest

Početkom 20. stoljeća popularizacijom jazz glazbe i žanrova deriviranih iz tog stila pojavila se potreba za glasnijim zvukom. Da bi se gitara jasnije i bolje čula unutar jazz big banda, došlo je do razvijanja prvih prototipa električne gitare. George Beauchamp je 1931. godine razvio prvi električno pojačani (amplificirani) žičani instrument nadimka "Frying Pan". Narednih godina Adolph Rickenbacker dolazi do patenta pickup magneta.[15] Swing – jazz gitarist Charlie Christian bio je prvi gitarist koji je 1940-ih primijenio ovu inovaciju. Prvi prototipovi električnih gitara su bili aluminijski. Zagrijavanjem aluminija pod svjetlom reflektora stvaralo je problem pri štimanju i zadržavanju intonacije žica. Također, prve električne gitare su bile šupljeg tijela, slične tadašnjim akustičnim gitarama, što je ponekad predstavljalo problem zbog mikrofonije (engl *feedback loop*). 1941. godine nastaje i danas popularna gitara s punim tijelom, koju je napravio gitarist Les Paul. Tadašnje gitare su imale jedan ili dva magneta, sve dok Leo Fender, drugi veoma poznat i popularan tvorac električnih gitara nije u svoje gitare ubacio i treću pickup zavojnicu. Postojali su pokušaji stvaranja gitara s 4 pickup zavojnice, ali nisu primijećene velike razlike u zvuku. Gibson Les Paul i Fender Stratocaster i danas su jedne od najprodavanijih i popularnijih električnih gitara. Obje imaju veoma specifičan zvuk i karakter, i svaka ima svoju primjenu u različitim žanrovima. Sve većom upotrebom električne gitare u glazbi dovodi do nastanka novih glazbenih žanrova kao što su rhythm and blues, rockabilly i rock

and roll. 1960-ih godina se nastavlja dalje razvijati oprema i tehnologija koja se koristi u glazbi. Razna pretpojačala, efekti kao što su tremolo, wah-wah, flanger, phaser, distorzije itd. pronalaze svoje mjesto u glazbi. To također uzrokuje nastanak novih podžanrova unutar rock glazbe. Električna gitara je tijekom godina mijenjala svoje oblike i nastajali su razni modeli. Danas imamo i gitare s dva vrata, kao i gitare s više od 6 žica. Najčešće pronalazimo one sa 7, 8 i 12 žica. Zadnjih par godina pojavljuju se i digitalne gitare, tj. gitare koje funkcioniraju kao MIDI (Musical Instrument Digital Interface) uređaji. Kao software emulacije hardware uređaja pojavljuju se i razni VST programi, kao i plugin efekti, te razno razna digitalna pojačala i Kemper Profileri. Bez obzira na nove tehnologije i trendove, električna gitara se i danas zadržala u svom prvotnom obliku, te je vrlo popularna i korištena u raznim žanrovima glazbe.

1.2. Konstrukcija

Električna gitara se sastoji od tri glavna dijela a to su glava (headstock), vrat (neck) i tijelo (body).Slika 1.1. Na glavi se nalaze mašinice (1.1.) koje služe za natezanje žica na željenu frekvenciju. Zatim poklopac šipke u vratu (engl. truss rod) (1.2.) koji služi kao protusila tenziji žica, kako bi vrat ostao neiskrivljen. Zatim imamo vodilice (1.3.) i gornju kobilicu (1.4.) koja se još naziva i konjić (engl. nut). Na vratu imamo polja (2.1.) i pragove (2.3.) koji odjeljuju susjedna polja. Na poziciji (2.4.) nalazi se prijelaz vrata na tijelo, vrat može biti zalijepljen ili uglavljen u tijelo. Na tijelu se nalazi most (engl. bridge) (3.3.). Jedna pickup zavojnica se nalazi pored mosta (3.2.), a druga blizu vrata (3.1.) pa su i po svojoj poziciji dobile nazive. Gitara može imati i samo jedan ili čak i tri zavojnice. Ispod mosta nalazi se donja kobilica ili sedlo (3.4). Ispod sedla su navoji za fino uštimavanje (3.5.) Preklopnik (3.7.) služi za mijenjanje pickup zavojnica koje se koriste. A potenciometri (3.8.) služe za mijenjanje volumena ili boje tona, to su tzv. volumen blenda i ton blenda. Neke gitare posjeduju i tremolo ručicu (3.6.) Zadnji važni element je „output" (izlaz) gitare na koji dolazi TS konektor (3.9.) gitarskog kabela i koji vodi dalje signal u pojačalo. Na tijelu se još nalazi i držač remena (3.10.)



Slika 1.1. Konstrukcija gitare (Preuzeto iz [1])

Tremolo ručica je zapravo neispravan naziv. Ta ručica bi trebala imati naziv vibrato ručica. Vibrato je efekt u kojem se jako brzo mijenja frekvencija tona, naizmjenično na višu i nižu vrijednost od osnovnog tona. Tremolo je efekt gdje se jako brzo mijenja volumen tona. A efekt koji se postiže ovom ručicom je zapravo vibrato. U kratkom vremenu mi zatežemo i otpuštamo žice mijenjajući tenziju te samim time i frekvenciju. Kada ručicu pritisnemo, tj. primaknemo gitari, žice se otpuste i intonacija se snizi. Ako ručicu povučemo od gitare, žice se dodatno stegnu i intonacija, tj. frekvencija ide prema gore.

Tijelo gitare izrađeno je od drva. Najčešće vrste drva koje se koriste su jasen, mahagonij, topola, lipa i javor. Poneke jeftine verzije gitara koriste ivericu i bor. Iako se često tvrdi da vrsta drva utječe na zvuk električne gitare ipak nije provedeno dovoljno istraživanja koja to mogu potvrditi, a uočljive razlike u zvuku su minimalne da bi se mogle pripisati samoj vrsti drva. Ono što se može sa sigurnošću reći je da kvaliteta izrade i kvaliteta drva pridonose stabilnosti. A stabilnost nam općenito daje kvalitetu reprodukcije kakvu želimo ali ne i karakter gitare. Kod akustične gitare drvo ipak ima utjecaj na karakter, no to je vrsta gitare koja je drugačije od električne. Za vrat gitare također se koriste javor, mahagonij i jasen, a za polja se koristi ebanovina i palisandrovina (ružino drvo). Žice gitare napravljene su od čelika, što je zapravo legura željeza i ugljika. Često se dodaje i mangan, a ako je u pitanju nehrđajući čelik onda i krom. Žice E, A i D su najčešće

presvučene niklom i nekim premazom protiv hrđanja. Pragovi su također napravljeni od čelika, a često i od legure nikla, bakra i cinka. Drvo može biti premazano s nekoliko vrsta organskih spojeva. Najčešće se koriste nitroceluloza (ester celuloze i dušične kiseline) ili poliuretan i poliester. Navedeni spojevi otopljeni su u nekom organskom otapalu i zatim premazani na tijelo gitare. Magneti gitare imaju nekoliko izvedbi. Najpoznatiji su Alnico (AlNiCo) magneti, napravljeni od aluminija, nikla i kobalta. [4] Koriste se još i keramički ili feritni magneti koji su bazirani na mješavini željezova oksida i stroncijeva ili barijeva karbonata. U upotrebi su i neodimijski magneti, koji su najjači magneti koje poznajemo.

2. Fizikalna osnova

2.1. Zvuk

Zvuk je longitudinalni val koji se širi medijem. Najčešće njegovo širenje opisujemo u zraku, ali također se širi i ostalim plinovima, tekućinama i čvrstim tvarima. Za longitudinalni val je karakteristično gibanje atoma oko ravnotežnog položaja u smjeru u kojem se val propagira. Najjednostavniji zvučni valovi su sinusoidni. Pojam zvuka u svakodnevnom životu obično koristimo da bi opisali valove frekvencija između 20 Hz i 20000 Hz. To područje nazivamo čujnim područjem. Frekvencije ispod 20 Hz spadaju u područje infrazvuka, a iznad 20 kHz u područje ultrazvuka. Ljudsko uho je iz evolucijskih razloga najosjetljivije u području srednjih frekvencija. A s godinama gornja granica čujnosti se smanjuje.

Zvuk je val što znači da ga možemo opisati veličinama kao što su amplituda, frekvencija i valna duljina. Uz zvuk također vezujemo fizikalne pojmove kao što su valni oblik i tlak. Za opis vala najbolje je koristiti valnu funkciju gdje y predstavlja pomak iz ravnotežnog položaja, A je amplituda (maksimalni pomak iz ravnotežnog položaja), k je valni broj, t je vrijeme, ω je kružna frekvencija, x je koordinata na kojoj promatramo titranje medija.(2.1.)

$$y(x,t)=A\cos(kx-\omega t) \tag{2.1.}$$

Zvuk dijelimo na tonove i šumove. Ton je zvuk koji ima određenu visinu, trajanje, jačinu i boju. Navedene parametre smatramo pojmovima iz slušne percepcije. Fizikalne veličine i pojmove možemo pridružiti pojmovima iz slušne percepcije. Brzina, frekvencija i valna duljina su vezani uz pojam visine tona, točnije frekvencija je ta koja opisuje visinu tona. Oblik vala i frekvencijski spektar su usko povezani s bojom tona, a tlak zvučnog vala povezujemo s amplitudom. Što je amplituda veća, to je jačina tona veća. Trajanje tona povezujemo s vremenom.

2.1.1 Zvučni tlak i brzina zvuka

Zvučni (akustički) tlak je razlika između trenutnog atmosferskog tlaka i statičkog tlaka na nekom području. Ta razlika ili fluktuacija tlaka može biti iznad ili ispod vrijednosti atmosferskog tlaka. Ona je sinusoidnog oblika i ima frekvenciju koju imaju okolne molekule zraka. Zvučni val koji ulazi u uho dolazi do bubnjića, zatitra bubnjić zbog razlike između tlaka koju nosi zvučni val i tlaka u srednjem uhu (atmosferskog).[5] Na sličnom principu funkcioniraju i mikrofoni. Tu fluktuaciju tlakova možemo izraziti kao (2.2.).

$$p(x,t)=BkA\sin(kx-\omega t) \tag{2.2.}$$

Kao što smo već spomenuli zvuk se širi plinovima, tekućinama i čvrstim tvarima te je moguće i odrediti tu brzinu širenja, tj brzinu zvuka. Po definiciji, brzina zvuka u čvrstim tvarima dana je izrazom(2.3.) , gdje je ρ gustoća materijala, a Y Youngov modul elastičnosti.

$$v=\sqrt{\frac{Y}{\rho}} \tag{2.3.}$$

Na sličan način možemo opisati i brzinu zvuka u tekućinama i plinovima, međutim moramo pronaći neku drugu reprezentaciju Youngovog modula elastičnosti. Kod tekućina to nam predstavlja veličina B koju nazivamo modul stlačivosti (engl. bulk modulus). Pa je brzina zvuka u tekućinama dana s (2.4.).

$$v=\sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{2.4.}$$

Za naš primjer najzanimljivije je gibanje zvuka u plinovima, pogotovo u zraku. Modul stlačivosti u zraku ovisi o tlaku, pa ga možemo prikazati kao (2.5.).

$$B=p\cdot\kappa \tag{2.5.}$$

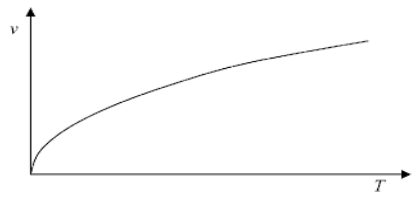
gdje κ predstavlja adijabatski koeficijent. Kada iskoristimo jednadžbu stanja idealnog plina (2.6.), gdje je T termodinamička temperatura a R opća plinska konstanta

$$pV=nRT \tag{2.6.}$$

dobijemo izraz za brzinu zvuka (2.7.) u plinovima preko relacije [10]

$$v=\sqrt{\frac{\kappa\cdot R\cdot T}{M}} \quad . \tag{2.7.}$$

Brzina zvuka v dakle ne ovisi fundamentalno o tlaku, već o temperaturi. Raste s porastom temperature i graf ovisnosti će izgledati kao parabola. Slika 2.1.



Slika 2.1. Graf ovisnosti brzine zvuka o temperaturi

Za male promjene temperature, izraz možemo pojednostaviti i prikazati preko temperature t izražene u stupnjevima Celzijusa. (2.8.)

$$v = 331.4 + 0.6t \tag{2.8.}$$

Brzina zvuka u zraku pri 20°C iznosi 343 m/s. To je vrijednost koja nam je u kontekstu zvuka i glazbe najkorisnija, posebice pri računanju „delay-a" kojeg treba namjestiti kad su zvučnici poprilično udaljeni u velikim otvorenim prostorima ili koncertnim dvoranama.

2.1.2 Intenzitet zvuka

Zvučni valovi prenose energiju. Tu energiju najjednostavnije možemo opisati s pomoću veličine koja se zove intenzitet I. Intenzitet je po definiciji prenešena energija po jedinici vremena i po jedinici površine okomite na smjer širenja. Intenzitet zvučnog vala daje izraz (2.9.)

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\rho B} \cdot \omega^2 \cdot A^2 \tag{2.9.}$$

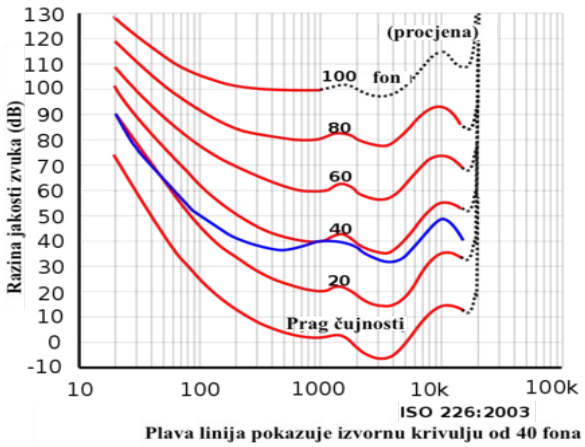
Praktična primjena izraza je kod stereo sistema razglasa. On pokazuje zašto membrana niskofrekventnog subwoofer-a mora titrati većom amplitudom od visokofrekventnog tweeter-a da bi dobili isti intenzitet. Također veličinu možemo izraziti i preko tlaka, pa dobivamo (2.10.)

$$I = \frac{p_{max}^2}{2 \cdot \sqrt{\rho B}} \tag{2.10.}$$

Za odrađivanje razine jakosti zvuka koristimo veličinu L, koju izražavamo kao (2.11.)

$$L=(10dB)\log(\frac{I}{I_0}) \tag{2.11.}$$

I_0 je intenzitet na pragu čujnosti i iznosi 10^{-12} W/m^2. Razina jakosti zvuka je zapravo logaritamska skala i veličina L se izražava u decibelima (dB). Razina jakosti zvuka se u kolokvijalnom govoru često naziva glasnoća, međutim ta dva pojma iako slična nisu zapravo ista. Razina jakosti zvuka je fizikalni pojam, povezan s intenzitetom. Glasnoća je zapravo subjektivan pojam (koji ima svoj fizikalni opis), jer ljudsko uho ne čuje sve frekvencije jednako glasno. Ako govorimo o glasnoći, vrijednosti opisujemo s veličinom fon ili ponekad son. Ranije smo spomenuli da je ljudsko uho najosjetljivije u srednjem spektru frekvencija. Slika 2.2. prikazuje Fletcher-Munson krivulju, koja nam govori na koliko se decibela mora nalaziti određena frekvencija kako bi je mi percipirali jednako glasnom kao neka druga frekvencija. Iz te krivulje vidimo, da za niske frekvencije je potrebno puno više decibela nego za srednje frekvencije, također visoke frekvencije zahtijevaju više decibela. Primjerice, ton frekvencije 20 Hz se mora nalaziti na 120 dB razine jakosti zvuka, da bi ton frekvencije 1000 Hz koji se nalazi na 100 dB, percipirali jednako glasnim, tj glasnoće 100 fona. To je i jedan od razloga zašto frekvencije ispod 50 Hz najčešće više osjećamo nego što ih čujemo. Općenito frekvencije ispod 250 Hz počinjemo osjećati.

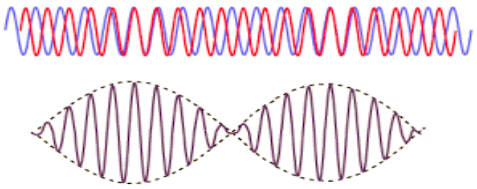


Slika 2.2. Fletcher- Munson krivulja (Preuzeto iz [2])

2.1.3. Interferencija i udari

Interferencija je pojava zbrajanja dva vala u istoj točki prostora. Ako primjerice imamo dva zvučnika, koja emitiraju zvučni val iste frekvencije, jednakim intenzitetom i ako postavimo mikrofon na jednakoj udaljenosti od oba zvučnika, na mjestu mikrofona se događa konstruktivna interferencija. Zvučni valovi dolaze do te točke s istom fazom. Amplitude se zbrajaju i u slučaju da su početne amplitude iste, konačna će biti dvostruko veća od amplituda pojedinih valova. Treba biti oprezan i zaključiti da to ne znači da će i razina jakosti zvuka biti dvostruko veća. Uvrštavanjem u formulu vidimo da dva jednaka zvučnika daju povećanje od 3dB. Ako jedan od zvučnika pomaknemo za polovinu valjne duljine od mikrofona, vidimo da valovi dolaze do te točke s razlikom u fazi. Ta razlika u fazi nam daje destruktivnu interferenciju. Opet, u slučaju da su amplitude jednake, dobivamo potpuno destruktivnu interferenciju, i na tom mjestu se zvukovi poništavaju i amplituda nastalog vala je nula. Dakle za razliku hoda od cjelobrojnog višekratnika valne duljine (λ, 2λ, 3λ, ...) interferencija je konstruktivna, a za razliku hoda od cjelobrojnog višekratnika polovine valne duljine ($1/2\ \lambda$, $3/2\ \lambda$, ...) imamo destruktivnu interferenciju. Sada možemo promatrati što se događa ako dva zvučnika proizvode zvučni val jednakih amplituda ali različitih frekvencija, ali opet dovoljno bliskih. Neka to budu frekvencije od 20 Hz i 22 Hz. Valovi interferiraju, i u određenim trenucima su valovi u fazi, ali u određenim trenucima zbog razlike u njihovim frekvencijama dolazi do destruktivne interferencije. Amplituda nastalog vala mijenja svoju vrijednost, ponekad je u svojoj maksimalnoj vrijednosti, a ponekad je nula. Frekvencija kojom amplituda oscilira iznosi 2 Hz. Ova pojava naziva se udar (engl. beat) (Slika 2.3.) , a frekvencija osciliranja amplitude frekvencija udara f_{beat}. Iz izraza (2.12.) vidimo da je frekvencija udara uvijek jednaka razlici između frekvencija dvaju tonova, gdje je f_a frekvencija višeg tona, a f_b frekvencija nižeg.

$$f_{beat} = f_a - f_b \tag{2.12.}$$

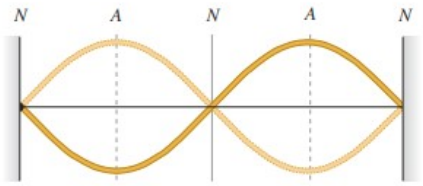


Slika 2.3. Udari (Preuzeto iz [3])

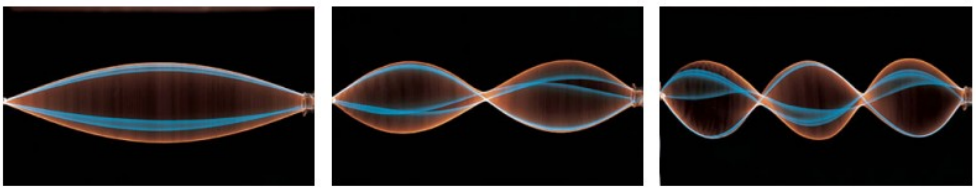
2.2 Osnove titranja žice

2.2.1. Stojni valovi

Ako promatramo val na žici koji nailazi na čvrsti ili slobodni kraj, znamo da će se val reflektirati. Ako se reflektira o slobodni kraj, ne mijenja fazu, a ako se reflektira o čvrsti kraj, val će se okrenuti. Brijeg postaje dol, i obratno, tj. mijenja mu se faza. Nas zanima slučaj kad se val odbija od čvrsti kraj a drugi kraj držimo rukom i proizvodimo valove određene frekvencije. U ovom slučaju promatramo interferenciju dva vala. Jedan je upadni val, a drugi je reflektirani. Nastaje poseban oblik vala kojeg karakteriziraju čvorovi (mjesta nulte amplitude) i trbusi (mjesta maksimalne amplitude). Djeluje nam kao da se val ne giba i takvu vrstu vala nazivamo stojnim valom (Slika 2.4.). Na čvorovima dolazi do destruktivne interferencije upadnog i reflektiranog vala, a na trbusima do konstruktivne interferencije. Ovisno o frekvenciji titranja ruke možemo dobiti stojni val s različitim brojem trbuha i čvorova. (Slika 2.5.)



Slika 2.4. Stojni val s vidljivim čvorovima (N - node) i trbusima (A- antinode) (Preuzeto iz [5])



a) b) c)

Slika 2.5.Prikaz stojnog vala kroz neko vrijeme a) duljina žice je polovina valne duljine b) duljina žice je jednaka valnoj duljini c) duljina žice je 3/2 valne duljine (Preuzeto iz [5])

Stojni valovi za razliku od putujućih ne prenose energiju. Općenito stojni val možemo prikazati izrazom (2.13.) gdje je A_{SW} amplituda stojnog vala i ona je jednaka dvostrukoj amplitudi upadnog, tj reflektiranog vala

$$y(x,t)=(A_{SW}\,sinkx)\sin\omega t \qquad (2.13.)$$

2.2.2. Fundamentalna frekvencija i viši harmonici

Žica gitare predstavlja žicu koja je učvršćena na oba kraja. Dakle na oba kraja imamo čvorove i žicu duljine *L*. Kada trznemo žicu, val putuje i reflektira se od oba kraja. Nastaje stolni val koji vibraciju prenosi na okolni zrak te nastaje zvučni val čija je frekvencija ovisna o svojstvima žice. Vidjeli smo da su susjedni čvorovi stojnog vala udaljeni za polovicu valne duljine. Dakle da bi nastali stojni valovi na žici gitare, duljina žice mora biti cjelobrojni višekratnik polovine valne duljine. (2.14.)

$$L=\frac{n\cdot\lambda}{2} \qquad (2.14.)$$

Slijedi da je valna duljina jednaka (2.15.)

$$\lambda_n=\frac{2\cdot L}{n} \qquad (2.15.)$$

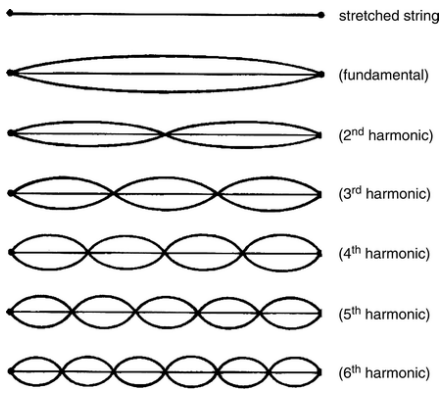
Valnu duljinu ćemo izraziti preko frekvencije, jer je to veličina koja nas zapravo zanima. Za najveću valnu duljinu, dobijemo najmanju frekvenciju f_1. Za n=1, λ=2L dobijemo f_1 (2.15.)

$$f_1=\frac{v}{2L} \qquad (2.15.)$$

f_1 ćemo nadalje zvati f_G i to nam predstavlja fundamentalnu frekvenciju žice. Stojne valove ostalih mogućih frekvencija općenito prikazujemo s (2.16.)

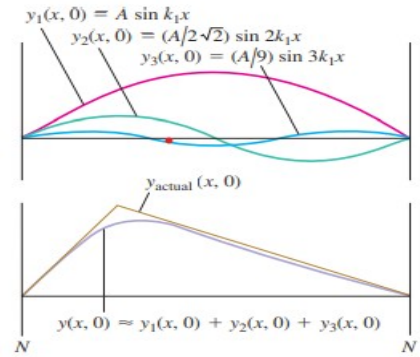
$$f_n=\frac{nv}{2L}=nf_G \qquad (2.16.)$$

Te frekvencije nazivamo višim harmonicima, i onu su jednaki cjelobrojnim višekratnicima osnove fundamentalne frekvencije.Slika 2.6. O njima ćemo više kasnije kada budemo razmatrali kako oni utječu na zvuk gitare.



Slika 2.6. Prikaz valnog oblika fundamentalne frekvencije i viših harmonika (Preuzeto iz [8])

Kada trznemo žicu gitare i nastane stojni val, taj val možemo opisati nekakvom sinusnom funkcijom.Slika 2.7. Međutim ne nastaje samo ton osnovne frekvencije, već i viši harmonici. Što više sinusnih funkcija (koje opisuju više harmonike) iskoristimo to će reprezentacija biti preciznija. Ono što zapravo radimo je Fourierova analiza, tj. periodičku funkciju opisujemo kao sumu sinusa različitih amplituda, faza i frekvencija. Takva suma se naziva Fourierov red. [9]



Slika 2.7. Stojni val nastao trzanjem žice gitare (trokutasti oblik) prikazan kao suma tri sinusne funkcije (Preuzeto iz [5])

2.2.3. Titranje žice gitare

Trzanjem žice stvara se oscilator koji titra uz gušenje. Vibracija se prenosi na okolni zrak u obliku zvuka ili se uz pomoć pick-up magneta pretvara u električni signal i amplificira u

pojačalu. Žice električne gitare napravljene su od čelika (legura željeza i ugljika) i imaju gustoću ρ oko $8 \cdot 10^3$ kg/m^3. [6] Uobičajena duljina žice L iznosi 65 cm. Trzanjem žice transverzalni val se širi od mjesta na kojem smo trznuli žicu u oba smjera, jedan je prema gornjoj kobilici (engl. nut) a drugi prema donjoj kobilici (engl. bridge). Za promjer žice D od 0,35 mm i napetost T 50 N uz pomoć izraza (2.17.) možemo odrediti brzinu propagacije v koja iznosi oko 255 m/s.

$$v = \frac{2}{D} \cdot \sqrt{\frac{T}{\pi \cdot \rho}} = \frac{\sqrt{T}}{D} \cdot 12.6 \frac{m}{s} \tag{2.17.}$$

Val koji putuje žicom od mjesta trzanja reflektira se o jedan kraj žice, putuje natrag, prolazi opet kroz isto mjesto trzanja, reflektira se o drugi kraj žice i vraća ponovno u početno mjesto trzanja. Val pritom prijeđe duljinu od $2L$ za jedan period. Inverzna veličina perioda je fundamentalna frekvencija žice f_G

Žica	Frekvencija/Hz
E(E_2)	82,4
A(A_2)	110,0
D(D_3)	146,8
g(G_3)	196,0
b(B_3)	246,9
e(E_4)	329,6

Tablica 2.1. Fundamentalna frekvencija žica u standardnom štimanju gitare

Fundamentalna frekvencija žice ovisi o napetosti T, gustoći ρ, promjeru D i duljini L, te se može izračunati iz izraza. (2.18.)

$$f_G = \frac{v}{2L} = \frac{\sqrt{T/\pi\rho}}{D \cdot L} \tag{2.18.}$$

Titranje žice nakon nekog vremena stane zbog disipacije energije. Jedan dio energije pretvara se u zvuk, a dio energije prelazi u toplinu.

Električne gitare često imaju žice koje se presvučene nekim drugim metalom, a to su najčešće nikal i bakar. Najdeblje 3 žice su one koje su presvučene. Presvučene žice imaju stoga dva promjera, jedan je promjer unutarnje žice D_K, a drugi je ukupni promjer unutarnje žice i presvlake D_A. Da bi smanjili krutost žice κ (engl. flexural stiffness) omjer između dva promjera mora biti što manji. $\kappa = D_K / D_A$ .Da bi deblje (presvučene) žice zadržale dobru intonaciju (štimanje) one moraju biti više zategnute od ostalih žica. Također za određivanje gustoće takve žice moramo uzeti u obzir oba materijala te činjenicu da se između žice i presvlake također nalazi zrak, pa je i gustoća presvučene žice ρ_{wound} nešto manja od gustoće žice istog promjera ρ_{plain}. Gustoću dobijemo iz izraza (2.19.)

$$\overline{\rho} = \rho_{wound} = [\kappa^2 + \frac{(1-\kappa^2)\cdot\pi\cdot\rho_W}{4\cdot\rho_K}]\cdot\rho_{plain} \approx 0.9\cdot\rho_{plain} \tag{2.19.}$$

ρ_W je gustoća materijala od kojeg je napravljena presvlaka a ρ_K gustoća žice ispod presvlake. Žice posjeduju u sebi parametar zvan krutost na savijanje što uzrokuje pomicanje harmonika prema višim frekvencijama tj. neharmoničnost. Pojava je uočljivija što se više penjemo prema harmonicima višeg reda. U engleskom jeziku bi harmonike točnije bilo zvati engl. *partial* kada pričamo o djelomično neharmoničnom sustavu kao što je gitara.

Frekvenciju harmonika možemo izračunati iz izraza (2.20.) gdje je f_i frekvencija i-tog harmonika, a b predstavlja parametar širenja ili parametar neharmoničnosti kojeg određujemo DFT analizom ili iz izraza (2.21.). za obične žice i (2.22.) za presvučene žice.

$$f_i = i\cdot f_G\cdot\sqrt{i+b\cdot i^2} \tag{2.20.}$$

$$b = \frac{\left(\frac{\pi D}{8\cdot L^2\cdot f_G}\right)^2\cdot Y}{\rho} \tag{2.21.}$$

$$b=\frac{\pi^2 \cdot E}{64 \cdot L^4 \cdot f_G^2 \cdot \overline{\rho}} \cdot \kappa^4 \cdot D_A^2 \tag{2.22.}$$

Presvučene žice zbog reduciranog parametra krutosti pokazuju manju neharmoničnost od običnih žica iste debljine. Također treba naglasiti da je neharmoničnost ista za žicu bez obzira da li sviramo otvorenu žicu ili smo pritisnuli neko od polja i odsvirali ton. Neharmoničnost se povećava ako koristimo neki od drugih štimanja gitare gdje se žice štimaju niže, primjerice drop D (umjesto E žice, najdeblja žica naštimava se na ton D).

Proces trzanja gitare je relativno spor u usporedbi s brzinom širenja vala na žici, pa kažemo da je kvazi stacionaran. Za takvo gibanje žicu možemo usporediti s oprugom opisanom veličinom koja se naziva lateralna krutost s_Q (engl. lateral stiffness). (2.23.)

$$s_Q=\frac{\frac{\psi}{L} \cdot \frac{L}{x}}{1-\frac{x}{L}} \tag{2.23.}$$

x predstavlja udaljenost donje kobilice (bridge) od mjesta trzanja. Najčešća pozicija trzanja je 6 do 10 cm od kobilice. Lateralna krutost je relativno ista za svih šest žica. Oblik i veličina trzalice pridonose zvučnoj slici. Trzalice s oštrim rubom daju više harmonika, i zvuče oštrije, dok one sa zaobljenim rubom daju tamniji zvuk. Deblja trzalica daje topliji, a tanja svjetliji zvuk. Kut pod kojim je trzalica u odnosu na plohu gitare utječe na to koliko će biti izražene niske frekvencije. Što je kut manji, niske frekvencije su atenuirane.

2.3. Magnetizam

2.3.1. Faradayev zakon

Ako promatramo neki električni naboj, na taj naboj može djelovati Lorentzova sila (2.24.).

$$\vec{F}=q\vec{E}+q\vec{v}\times\vec{B} \tag{2.24.}$$

Ona ima dva dijela, jedan je električni dio sile, a drugi je magnetski dio. Magnetski dio djeluje samo na naboje u gibanju. Oerstedov pokus je pokazao da naboji u gibanju ili struje, oko sebe u prostoru stvaraju magnetsko polje. Magnetsko polje je vektorska veličina. Magneti su materijali koji imaju sposobnost stvaranja magnetskog polja oko sebe.

Oni posjeduju sjeverni i južni magnetski pol. Sjeverni magnetski pol je mjesto odakle izlaze linije magnetskog polja, a magnetski južni pol je mjesto gdje linije ulaze. One se unutar magneta zatvaraju same u sebe. Magnetski monopoli ne postoje. Sada možemo uvesti i veličinu koja se zove magnetski tok (2.25.). Veličina predstavlja plošni integral magnetskog polja po plohi kojoj je petlja granična krivulja. [17] Možemo integrirati po beskonačnom broju ploha, rezultat je neovisan o tome.

$$\Phi_B(t)=\int_S \vec{B}\cdot d\vec{a} \tag{2.25.}$$

Konačno možemo promotriti pokuse koji nas vode do Faradayevog zakona. Zamislimo da se u prostoru nalazi nekakvo magnetsko bolje *B*. I u tom magnetskom polju imamo neku strujnu petlju. Ako mičemo strujnu petlju nekom brzinom *v* u tom magnetskom polju, petljom će teći struja. Također ako pomičemo primjerice magnet oko kojeg se nalazi magnetsko polje, petljom će poteći struja. Osim navedena dva primjera, možemo i mijenjati magnetsko polje u vremenu, pa se i mijenja magnetski tok Φ_B kroz površinu petlje, te tako opet poteče struja petljom. Ovaj fenomen se naziva elektromagnetska indukcija. Ona nam kaže da promjena magnetskog toka u vremenu inducira elektromotornu silu (elektromotorni napon). Inducirani napon nam daje induciranu struju. Elektromotorni napon možemo izraziti kao integral po zatvorenoj petlji električnog polja, što je jednako negativnoj promjeni magnetskog toka u vremenu. (2.26.)

$$\varepsilon=\oint \vec{E}\cdot d\vec{l}=-\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) \tag{2.26.}$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l}=-\int \frac{\delta \vec{B}}{\delta t}\cdot d\vec{a} \tag{2.27.}$$

Primjenom Stokesovog teorema imamo

$$\int_S (\vec{\nabla} x \vec{E})\cdot d\vec{a}=-\int_S \frac{\delta \vec{B}}{\delta t}\cdot d\vec{a} \tag{2.28.}$$

Konačan izraz za Faradayev zakon glasi (2.29.)

$$\vec{\nabla} x \vec{E}=-\left(\frac{d\vec{B}}{dt}\right) \tag{2.29.}$$

Dobili smo izraz u diferencijalnom obliku. Dakle, rotacija električnog polja jednaka je negativnoj derivaciji magnetskog polja u vremenu. Sada možemo izreći Faradayev zakon u sljedećoj formulaciji: ako se u nekoj točki prostora mijenja magnetsko polje u vremenu, producirat će se električno polje.
Ako ne pričamo o petlji, već o nekakvoj zavojnici, kao što je slučaj kod pickup zavojnice izraz (2.26.) dobiva oblik (2.30.) gdje je N broj navoja.

$$\varepsilon = -N\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) \tag{2.30.}$$

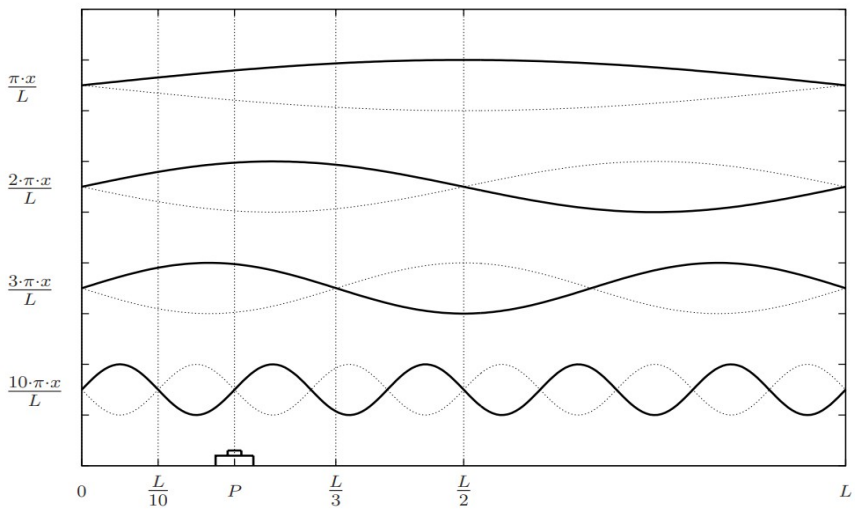
Predznak minus dolazi od Lenzovog pravila, koje kaže da će se inducirati takav napon koji će potjerati induciranu struju koja će biti takvog smjera da stvori magnetskog polje koje se opire promjeni toka.

2.3.2. Pickup zavojnice

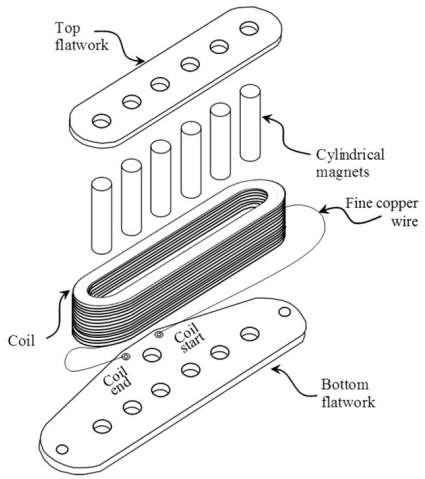
Pickup zavojnica gitare pretvara mehaničko titranje žice u električni signal. Najčešće vrste su elektromagnetski, optički i piezo pickup. U ovom radu ćemo se fokusirati na elektromagnetski pickup te ćemo dalje upotrebljavati izraz pickup zavojnica. Različite pickup zavojnice daju različite spektre ovisno o vrsti, načinu izvedbe i karakteristikama. Pickup će registrirati vibraciju samo na onom mjestu gdje se nalazi. Idealno je da se pickup nalazi na sredini žice, gdje se nalazi amplituda fundamentalne frekvencije titranja žice, međutim to je nepraktično. Stoga se pickup pomiče bliže „bridge-u". (Slika 7.1.) Međutim na toj poziciji se mjeri samo postotak titranja fundamenta. Preko sljedećeg izraza (2.31.) možemo odrediti amplitudu A_n pojedinih harmonika na specifičnoj poziciji P gdje se nalazi pickup.

$$A_n(P) = A_n \sin\left(\frac{n\pi P}{L}\right) \tag{2.31.}$$

Osnovni dijelovi pickup-a (Slika 2.9.) su magneti koji su najčešće cilindrični i postavljeni tako da se svaki nalazi točno ispod odgovarajuće žice gitare. Ponekad se može koristiti i samo jedan magnet koji obuhvaća sve žice. Magnete često odjeljuje komad plastike s utorima. Oko tog komada plastike se nalazi zavojnica, tj. namotana žica u veliki broj navoja. Dvije ploče s gornje i donje strane stabiliziraju cijelu konstrukciju.



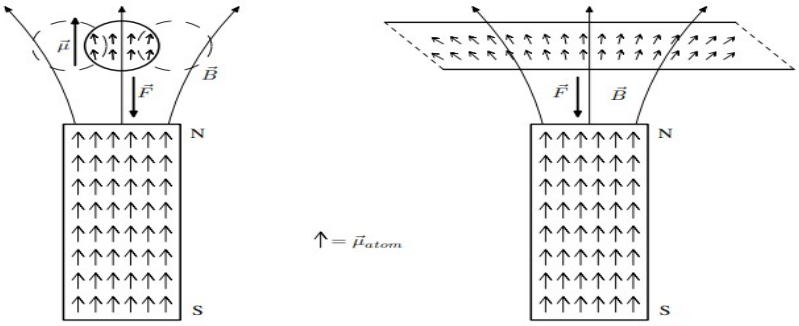
Slika 2.8. Prikaz pozicije pickup magneta i amplitude fundamentalne frekvencije, drugog, trećeg i desetog harmonika (Preuzeto iz [7])



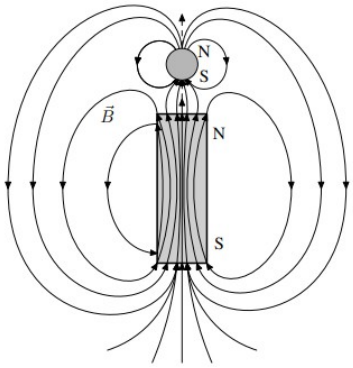
Slika 2.9. Shematski prikaz dijelova single-coil pickup-a (Preuzeto iz [16])

Magnetizam je po definiciji odziv materijala na magnetsku pobudu. On je posljedica mikroskopskih magnetskih momenata. Ti magnetski momenti mogu biti permanentni ili inducirani magnetskim poljem. Odziv mjerimo magnetskom susceptibilnošću χ_m i relativnom permeabilnošću μ_r. Poznajemo tri vrste magnetizma, a to su dijamagnetizam, para magnetizam i feromagnetizam. Kod dijamagnetizma magnetsko polje inducira magnetske dipole u smjeru suprotnom od smjera magnetskog polja, dok se kod paramagnetizma stvaraju permanentni dipoli usmjereni kao i magnetsko polje. Nama je za

naš slučaj najzanimljiviji feromagnetizam. Za razliku od prethodna dva slučaja, magnetizam se javlja i u odsustvu vanjskog polja, možemo reći u prisustvu infinitezimalno male pobude. Feromagnetizam se pojavljuje u materijalima s permanentnim magnetskim momentima i na konačnoj temperaturi se javlja u domenama. U prisustvu vanjskog polja domene se mogu povećavati ili smanjivati, ali za dovoljno jako polje uzorak postaje homogen i magnetizacija je maksimalna. [22] Primjenom magnetizirajućeg polja H (magnetiziranjem feromagneta), dolazi do odziva na tu pobudu u obliku magnetizacije *M*. Jednostavnije rečeno, magnetizirali smo feromagnet. Poznati feromagneti su željezo, kobalt i nikal. Željezo i nikal su elementi koje koristimo u izradi žica gitare. Dakle, pick-up magneti gitare u našem slučaju magnetiziraju žice gitare, koje su načinjene od feromagnetskih materijala. Žice su najprije demagnetizirane, dipolni momenti usmjereni su nasumično. (Slika 2.10.) Prinošenjem magneta koji generira magnetno polje oko sebe (i kroz magnet) dipolni momenti žice se usmjeravaju u istom smjeru kao i magnetno polje. (Slika 2.11) Donji dio žice, onaj koji je bliži magnetu postaje južni pol novonastalog feromagneta, a gornji dio je sjeverni pol. Nakon što je žica magnetizirana, ona s magnetom čini jednu cjelinu. Žica je pokretni dio te cjeline, te će njeno titranje mijenjati magnetski tok kroz zavojnicu pickup magneta. Frekvencija kojom se mijenja magnetski tok direktno je povezana s frekvencijom titranja žice. A amplituda induciranog napona će ovisiti o brzini titranja žice. Razlog zbog kojeg se često koriste AlNiCo magneti je taj što su oni jako dobri permanentni magneti. Površina njihove histereze je velika i potrebno je jako veliko magnetno polje suprotnog smjera da se dogodi demagnetizacija.



Slika 2.10. Shematski prikaz magnetiziranja žice (Preuzeto iz [16])



Slika 2.11. Linije magnetskog polja unutar i oko magneta i žice (Preuzeto iz [16])

3. Elektronika

3.1.Strujni krugovi

Elektronika je grana znanosti i tehnike koja jednim dijelom proučava elektroničke sklopove. Neki od nama interesantnijih elektroničkih sklopova su pojačala, oscilatori, ispravljači itd... Stoga je dobro promotriti koji su najosnovniji elementi elektroničkog sklopa. Strujnih krugovi u sebi posjeduju jedan od (ili sve) navedenih elemenata, a to su otpornik, kondenzator (kapacitor) i zavojnica. Navedenim elementima su pridružene sljedeće veličine otpor *R*, kapacitet *C* i induktivitet *L*. Ti elementi su tzv. pasivni elektronički elementi, i razlikuju se od aktivnih (elektronske cijevi, tranzistori, diode, integrirani krugovi) u tome što ne pokazuju ispravljačko djelovanje ili djelovanje pojačavanja.

Prije nego pogledamo svaku od komponenata strujnog kruga, dobro je za početak napisati izraz za Ohmov zakon (3.1.) . To je izraz koji koristimo pri svim mjerenjima i analizama bilo kakvog strujnog kruga. Mikroskopski oblik Ohmovog zakona glasi

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \tag{3.1.}$$

j nam predstavlja gustoću struje, σ je vodljivost koja je jednaka recipročnoj vrijednosti otpornosti, veličinu koju ćemo uvesti kada budemo govorili o otpornicima, i *E* je električno polje. Nama je korisniji makroskopski oblik (3.2.) Ohmova zakona, kada analiziramo strujne krugove. *I* je struja, a *V* napon

$$I = \frac{V}{R} \quad . \tag{3.2.}$$

Otpornik je najjednostavniji element, i on se u strujne krugove može spajati na dva načina. Jedan je da spajamo otpornike serijski, a drugi je paralelno. Ukupni otpor ima izraz (3.3.) za serijski spoj a izraz (3.4.) nam da je ukupni otpor za paralelni spoj.

$$R_{uk} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots \tag{3.3.}$$

$$\frac{1}{R_{uk}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots \tag{3.4.}$$

Generalno otpor možemo izraziti kao (3.5.)

$$R=\rho\frac{l}{A} \quad . \tag{3.5.}$$

Gdje je ρ otpornost, i to je veličina koja ovisi o materijalu od kojeg je otpornik izrađen. l nam predstavlja duljinu, a A je poprečni presjek.

Sljedeća komponenta strujnih krugova koju ćemo razmatrati je kondenzator. U krugu izmjenične struje kondenzator se ponaša kao otpornik, ali za razliku od otpornika, otpor kondenzatora (točnije rečeno impedancija) ovisi o frekvenciji. Stoga se kondenzatori često koriste u sklopovima koji služe kao filteri. Uloga kondenzatora je da pohranjuje energiju, koja se kasnije iskoristi. Taj proces se naziva punjenje i pražnjenje kondenzatora. Oni se zapravo pune nabojima (elektronima) q, koji se tada nalaze na pločama kondenzatora koje su na različitim potencijalima. Razlika potencijala je napon V. Sada možemo napisati izraz za kapacitet kondenzatora, a on je jednak (3.6.)

$$C=\frac{q}{V} \tag{3.6.}$$

Između ploča kondenzatora najčešće kažemo da se nalazi vakuum, međutim ponekad možemo umetnuti i dielektrik. Dielektrici mijenjaju kapacitet kondenzatora prema (3.7.)

$$C=\varepsilon\,\varepsilon_0\frac{A}{d} \tag{3.7.}$$

ε je električna permitivnost vakuuma, ε_0 je relativna permitivnost dielektrika, A je površina ploča kondenzatora, a d udaljenost ploča.

Nakon što smo uveli čemu je jednak kapacitet kondenzatora, sada možemo pokazati kako kapacitet ovisi o frekvenciji. Promotrimo strujni krug gdje nam je q = Cv, v nam predstavlja napon u krugu izmjenične struje. Ako na obje strane djeluje s dt/dt dobit ćemo izraz (3.8.)

$$\frac{d}{dt}q(t)dt=C\frac{d}{dt}v(t)dt \tag{3.8.}$$

Znamo da je $(d/dt)q$ zapravo struja i, a napon v možemo izraziti kao $v = V_0 \sin(\omega t)$, pa dobivamo (3.9.)

$$i=C\frac{d}{dt}V_0\sin(\omega t) \tag{3.9.}$$

Deriviranjem konačno dolazimo do (3.10.)

$$i=\omega C V_0 \cos(\omega t)=\omega C V_0 \sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \tag{3.10.}$$

Faza struje na kondenzatoru ide ispred napona za vrijednost π/2. Konačno dolazimo do izraza za struju u krugu izmjenične struje s kondenzatorom, a to je (3.11.). Imaginarnu jedinicu označavamo slovom *j*.

$$I=j\omega C V_0=\frac{V_0}{\frac{1}{j\omega C}} \tag{3.11.}$$

Ako desni izraz usporedimo s Ohmovim zakonom, vidimo da je impedancija *Z* (otpor u krugu izmjenične struje) jednaka (3.13.)

$$Z=\frac{1}{j\omega C} \tag{3.12.}$$

Iz formule koja prikazuje kompleksnu impedanciju možemo izvući imaginarni faktor *j*, te dobijemo izraz (3.13.)za reaktanciju χ_C koja ovisi o kapacitetu i frekvenciji

$$\chi_C=\frac{1}{\omega C} \tag{3.13.}$$

Kondenzatore možemo kao i otpornike spajati u krug serijski i paralelno. Serijski spojeni kondenzatori daju ekvivalent ukupnog kapaciteta kao (3.14.) a paralelni spoj nam daje ukupni kapacitet (3.15.)

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+... \tag{3.14.}$$

$$C=C_1+C_2+C_3+... \tag{3.15.}$$

Sljedeća komponenta strujnog kruga koju ćemo razmatrati je zavojnica. To je zapravo jako dugačka žica koja je savijena u veliki broj navoja poredanih jedan pored drugoga, a potom se navojni mogu slagati i jedan na drugoga. Induktivnost prikazujemo kao (3.16.)

$$L=N\frac{\Phi_B}{i} \tag{3.16.}$$

N je broj navoja zavojnice, a ΦB je tok magnetskog polja. Induktivnost nam predstavlja svojstvo vodiča da se opire promjeni struje. Kao i kondenzator, zavojnica također ovisi o

frekvenciji u strujnom krugu, pa ćemo i ovisnost impedancije zavojnice prikazati u krugu izmjenične struje. Najprije zapišimo izraz za napon (3.17.)

$$v(t)=L\frac{d}{dt}i(t) \tag{3.17.}$$

Koristeći sličnu metodologiju kao i za kondenzator dobijemo (3.18.)

$$v(t)=L(\frac{d}{dt})I_0\sin(\omega t)=\omega\, L\, I_0\cos(\omega t)=\omega\, L\, I_0\sin(\omega t+\frac{\pi}{2}) \tag{3.18.}$$

Sada nam struja na zavojnici kasni za naponom za π/2. Konačan izraz glasi (3.19.)

$$V=j\omega\, L\, I_0 \tag{3.19.}$$

Uspoređujući ponovno s Ohmovim zakon, impedancija sada ovisi o $j\omega L$, a reaktancija χ_L iznosi ωL. Zavojnice možemo spajati serijski (3.20.)i paralelno (3.21.) u strujni krug, te se vrijednosti ekvivalenta računaju kao i kod otpornika.

$$L=L_1+L_2+L_3+... \tag{3.20.}$$

$$\frac{1}{L}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3}+... \tag{3.21.}$$

Prilikom takvog spajanja zavojnica, treba biti oprezan da postoji dovoljno velika udaljenost među njima, jer one posjeduje sposobnost stvaranja međuindukcije koja će mijenjati vrijednosti na pojedinim zavojnicama.

Kada analiziramo strujne krugove, najčešće zapravo računamo vrijednosti nepoznatih veličina ili određujemo koje vrijednosti treba koristiti pri konstrukciji elektroničkih sklopova. Kako bi to napravili koristimo se pravilima koja se zovu Kirchhoffova pravila.

1. Kirchhoffovo pravilo

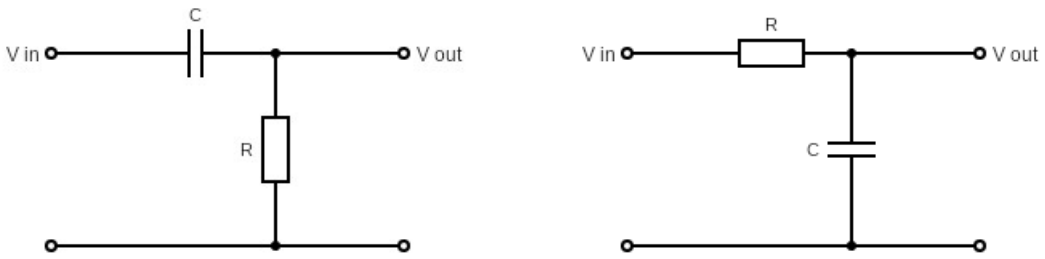
Zbroj jakosti struja koje ulaze u neki čvor strujnog kruga, jednak je zbroju struja koje iz tog čvora izlaze. Algebarski zbroj struja u čvorovima jednak je nuli. Čvorovi su mjesta gdje se vodljive žice spajaju.

2. Kirchhoffovo pravilo

Zbroj padova napona unutar zatvorene strujne petlje jednak je nuli. To je posljedica zakona očuvanja energije. Kada se strujnom petljom krećemo u smjeru kojim teče struja, padovi napona na trošilima su pozitivni. Kada baterijom prolazimo od pozitivnog pola do negativnog, pad napona je također pozitivan, neovisno o smjeru struje.

3.2. Filteri

Filteri su sklopovi koji služe za eliminiranje određenih komponenti iz signala, a najčešće pod time mislimo na uklanjanje određenih frekvencija. Poznati su nam low-pass i high pass filteri koji se još nazivaju i high-cut odnosno low-cut filteri (Slika 3.1.). Postoje još i band pass, band stop, notch, comb i all-pass filteri. Također filtere možemo dijeliti i na linearne, nelinearne, analogne, digitalne, itd. Filteri mogu biti dio sklopova s aktivnim ili pasivnim elementima. Njihova primarna uloga je eliminacija signala nekih frekvencija, pa ćemo koristiti pasivne elemente kako ne bi unosili nikakvo pojačanje signala u sustav. Promotrit ćemo kako napraviti low pass i high pass filter uz pomoć pasivnih elemenata strujnog kruga. Na sljedećim slikama vidimo primjere visokopropusnog i niskopropusnog filtera.



Slika 3.1. Visokopropusni (lijevo) i niskopropusni (desno) filter

Ton blenda gitare je niskopropusni filter pa ćemo se više fokusirati na njega. Izlazni napon V_{out} možemo odrediti preko umnoška ulaznog napona V_{in} i pojačanja. (3.22.) Koristeći Ohmov zakon i Kirchhoffova pravila imamo da je izlazni napon jednak

$$V_{out}=V_{inp}\cdot\frac{1}{j\omega C}\cdot\frac{1}{R+\frac{1}{j\omega C}} \quad . \tag{3.22.}$$

Sređivanjem izraza dobijemo

$$V_{out}=V_{inp}\cdot\frac{1}{1+j\omega CR} \quad . \tag{3.23.}$$

Pojačanje A nam sada iznosi (3.24.)

$$A=\frac{1}{1+j\omega CR} \quad . \tag{3.24.}$$

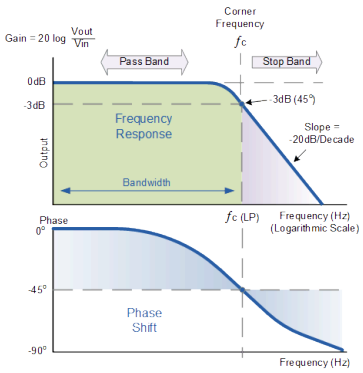
f_0 je cutoff frekvencija, to je frekvencija na kojoj je signal 3dB slabiji od početnog, tj. $2^{1/2}$ puta manji od početnog.

$$f_0=\frac{1}{2\pi CR} \tag{3.25.}$$

Konačno imamo pojačanje

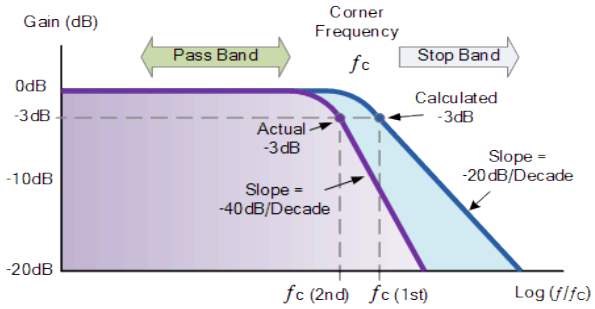
$$|A|=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad . \tag{3.26.}$$

Kao što smo rekli ranije, maksimalno pojačanje će biti jedan, tj. nema ga. (Slika 3.2.) Ako uvrstimo velike frekvencije u izraz za pojačanje, vidimo da se izraz u nazivniku povećava, a ukupno pojačanje se smanjuje, što znači da imamo gušenje tih frekvencija. Ako uvrstimo male frekvencije, ωCR je puno manji od jedan, pa se može zanemariti, i pojačanje je jednako jedan. Dobili smo niskopropusni filter.



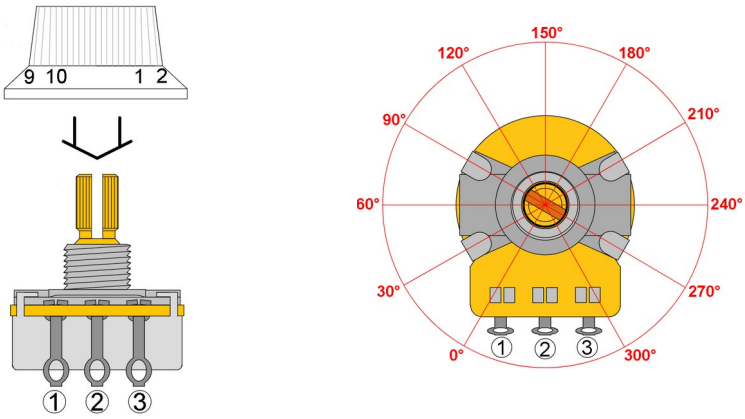
Slika 3.2. Graf ovisnosti pojačanja o frekvenciji niskopropusnog filtra (Preuzeto iz [20])

Pasivne elemente možemo spajati u kaskadu (Slika 3.3.), pa ovisno o rednom broju *n* RC spoja koji smo ponovili, dobit ćemo i frekventnu ovisnost *n*-tog reda. Svaka sljedeća cut-off frekvencija imat će strmiji nagib (slope).



Slika 3.3. Graf ovisnosti pojačanja o frekvenciji niskopropusnog filtra/kaskada (Preuzeto iz [20])

Potenciometri na gitari najčešće mogu rotirati od 0 do 300 stupnjeva (Slika 3.4.). Generalno potenciometri mogu biti linearni i logaritamski. U glazbi su većina logaritamski da bi se prilagodili ljudskome sluhu, a kao što znamo iz prethodnih poglavlja decibel skala koja opisuje razinu jakosti zvuka je logaritamska skala.



Slika 3.4. Shematski prikaz ton blende (potenciometra) (Preuzeto iz [21])

Pinovi 2 i 3 predstavljaju input i output signal između kojih je kontrola koja ovisi o našem okretanju potenciometra, a pin 1 se spaja na uzemljenje..

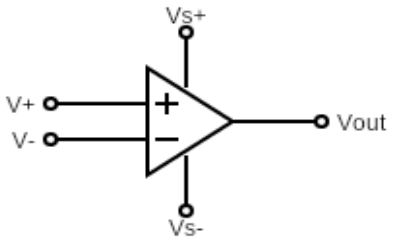
3.3. Pojačalo

Dvije vrste gitarskih pojačala koja danas koristimo su tranzistorska i cijevna pojačala. Općenito uređaji koji koriste vakuumsku cijev danas nisu toliko u upotrebi osim kod gitarskih pojačala. Navedeni uređaji imaju svoje prednosti i nedostatke. Zbog svoje raširenosti fokusirat ćemo se na tranzistorska pojačala. Za razliku od cijevnih njihova je upotreba jednostavnija, nisu potreba prethodna zagrijavanja, moguće je raditi na nižim vrijednostima napona, manja su i lakša, te otpornija na neka mehanička oštećenja. Najčešće se koriste u svakodnevnoj upotrebi, ako ne govorimo o nekim velikim koncertnim ozvučenjima. Najčešći dijelovi gitarskih pojačala su pretpojačalo, ton kontrola i u zadnjem koraku se nalazi pojačalo snage. Između navedenih dijelova možemo pronaći i još neke dodatne naponske kontrole ili neke efekte, ali oni nisu osnovni dijelovi. Pretpojačalo nam služi da jako slabi električni signal nastao uz pomoć pickup magneta dovedemo na neku veću vrijednost. Nastali signal mora bit dovoljno velik i čist, bez prisutnosti šumova i smetnji, te spreman na daljnju obradu i pojačanje. Ton kontrola najčešće uključuje bass, mid i treble ekvalizaciju, te ako postoji presence potenciometar koji utječe na high-mid i treble frekvencije. Bass, mid i treble EQ se zapravo najčešće nalazi u stadiju pretpojačanja, tako da djeluju subtraktivno i utječu na oblikovanje tona. „Presence" potenciometar nalazi u sklopu pojačala snage, i zapravo predstavlja „high-shelf boost", te za razliku od prethodnih ekvalizatora daje dodatno pojačanje i oblikovanje tona. U zadnjem koraku se nalazi pojačalo snage koje nam služi da se obrađeni i pojačani signal dodatno amplificira, te da se usklade impedancije između pojačala i sljedećeg uređaja u nizu, a to je zvučnik koji zahtjeva veliku struju na ulazu.

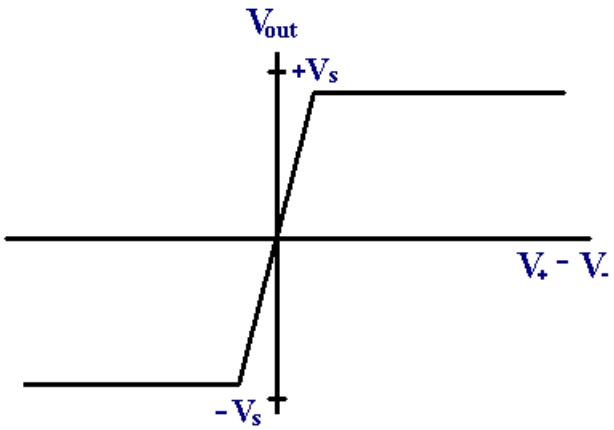
3.3.1. Operacijsko pojačalo

Tranzistorska gitarska pojačala su najčešće operacijski tip pojačala, pa ćemo opisati njihov rad. Operacijska pojačala su podvrsta diferencijalnih pojačala, što znači da imaju diferencijalni ulaz, tj. pojačavaju razliku između dva ulaza u operacijsko pojačalo. Ako govorimo o idealnom operacijskom pojačalu, onda pojačanje ide u beskonačnost, kao i ulazni otpor, a izlazni otpor ide u nulu. Jedan ulaz pojačala je invertirajući V-, a drugi je neinvertirajući V+, dok nam V_{S+} i V_{S-} u shemi predstavljaju napajanje. Slika 3.5. Možemo

prikazati karakteristike operacijskog pojačala na Slika 3.6... Na x-osi je prikazan napon između dva ulaza operacijskog pojačala, a na y-osi je izlazni napon.



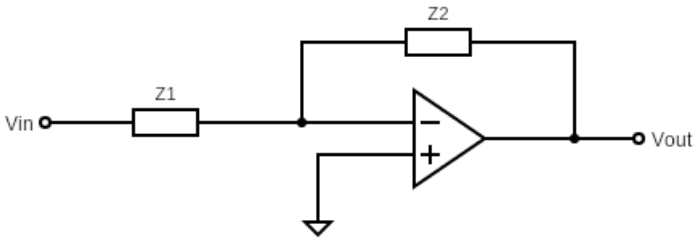
Slika 3.5. simbolički prikaz operacijskog pojačala (op amp)



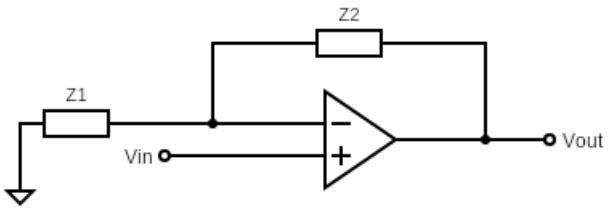
Slika 3.6. Karakteristike operacijskog pojačala Preuzeto iz [23]

Vidimo da u malom intervalu imamo linearan porast izlaznog napona. Važno je uočiti da za mali ulazni napon imamo veliki izlazni napon. Taj veliki izlazni napon nije beskonačan, već je ograničen napajanjem. Dakle, maksimalni napon koji možemo dobiti pojačanjem je napon napajanja. Kod operacijskog pojačala je bitno da se nalazimo u prethodno spomenutom malom intervalu gdje je izlazni napon linearan s ulaznim naponom. To postižemo negativnom povratnom vezom. Možemo spojiti otpornik (Z_2) u povratnu vezu kao na Slika 3.7. koja predstavlja invertirajuće pojačalo koje koristi „op amp" jer se ulazni napon nalazi na invertirajućem ulazu. Slika 3.8. prikazuje neinvertirajuće pojačalo s „op amp-om" , gdje se ulazni napon nalazi na neinvertirajućem ulazu u „op amp". Za navedene

sklopove možemo crtati ekvivalentne sheme i izvesti pojačanje A. Izvod nećemo prikazivati već ćemo samo prikazati konačno rješenje uz pretpostavku da se radi o idealnom operacijskom pojačalu koje posjeduje pojačanje A_∞.



Slika 3.7. Invertirajuće pojačala s „op amp-om”



Slika 3.8. Neinvertirajuće pojačalo s „op amp-om”

Konačno dobijemo izraz (3.27.) za pojačanje invertirajućeg pojačala s „op amp-om”, što je vidljivo s predznakom minus.

$$A = -\frac{Z_2}{Z_1} \tag{3.27.}$$

Dok izraz (3.28.) daje pojačanje neinvertirajućeg pojačala s „op amp-om”.

$$A = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \tag{3.28.}$$

Korisno je da sad pojačanje možemo dobiti biranjem otpornika koji predstavljaju impedancije Z_1 i Z_2. Naravno, još uvijek smo ograničeni naponom napajanja, kao maksimalnim mogućim izlaznim naponom. Pozitivne karakteristike operacijskog pojačala je beskonačna ulazna impedancija, koja nam neće opterećivati ulaz. Mali otpor na izlazu nam omogućuje da spojimo neko trošilo s također malim otporom tako da nam pojačalo

može dati i velike struje. To je upravo ono što nam je potrebno za zvučnik, kao sljedeće trošilo u nizu. Operacijska pojačala u svakodnevnoj upotrebi nisu idealna, već realna pojačala, pa se i neke karakteristike razlikuju od idealnih. Za naš slučaj je važno spomenuti da je jedna od tih karakteristika distorzija na višim frekvencijama kao posljedica slabije izražene povratne veze upravo na tim višim frekvencijama. Svako pojačalo generira šum i kad nije prisutan ulazni signal, tzv. šum treperenja „flicker noise" , koji se često naziva i „pink noise". Pink noise predstavlja signal tako da je snaga po intervalu frekvencije obrnuto proporcionalna frekvenciji. Svaka oktava (dvostruko smanjivanje ili povećavanje frekvencije) nosi jednaku količinu energije.

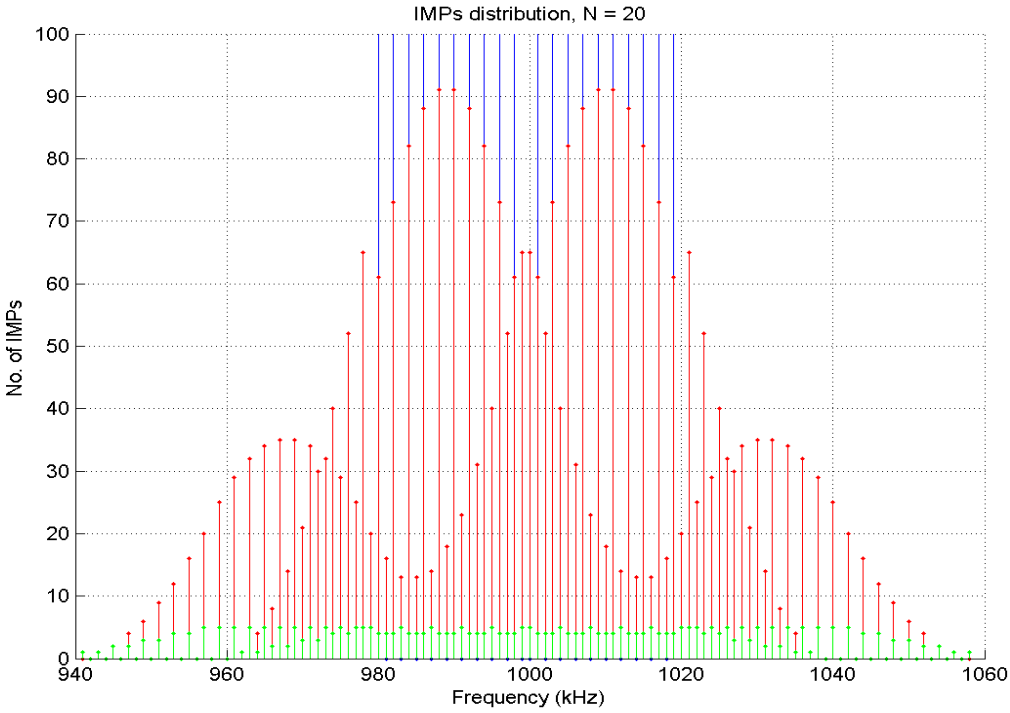
3.3.2. Distorzije

Distorzija je pojam koji predstavlja bilo kakvo izobličavanje izlaznog signala u usporedbi s ulaznim signalom. Najčešće je ona nepoželjna pojava, ali konkretno u našem slučaju električne gitare je iskorištena kao koristan efekt u obradi signala. Postoji nekoliko tipova distorzija, odnosno efekata koje kategoriziramo kao distorzije.

Za početak harmonijska distorzija opisuje pojavu viših harmonika kao cjelobrojnih višekratnika osnovnog tona određene frekvencije. Pojavu smo opisali u prethodnim poglavljima. Činjenica da osim osnovnog tona postoje i neke druge frekvencije svrstava ovu pojavu u distorzije.

U distorzije spada i pojava zvana „clipping". Ako signal pojačavamo izvan mogućnosti sustava da reproducira tu količinu napona ili struje, dolazi do „clippinga" signala, gdje se vrhovi signala režu i on podsjeća na square wave, to dovodi do generacije novih harmonika u višem frekvencijskom području. Ako je pojava blaga govorimo o „soft clippingu" a ako je agresivnija onda o „hard clippingu". „Soft clipping" koristi se u izvedbi *Overdrive* gitarskih pedala, gdje se diode za „clipping" postavljaju u povratnu vezu „op amp-a", a „hard clipping" se koriste kod *Distortion* pedala gdje se iste diode koriste, ali nakon „op amp-a". Osim u pojačalima clipping signala može se postići i u zvučnicima. Međutim, u ovom slučaju je to nepoželjan i negativan efekt koji može prouzročiti zvuk pucketanja ili još gore, prouzročiti štetu. Najčešće se to događa na visokotoncima (tweeter). Ponekad se uz zvučnik može oštetiti i napajanje pojačala.

Treći najvažniji oblik distorzije uključuje intermodulacijsku distorziju. Ona nastaje kod signala koji u sebi nose dvije ili više različitih frekvencija, dobar primjer u glazbi je akord, kod električne gitare se koristi tzv „powerchord” o kojem ćemo više pričati u poglavlju Rezultati. Pojava dovodi do nastanka novih frekvencija koje nisu cjelobrojni višekratnih osnovnih frekvencija, već su to zbrojevi ili razlike onih frekvencija koje nalazimo u signalu. Ako primjerice imamo signal za tri tona frekvencije f_a, f_b i f_c, možemo dobiti harmonike na vrijednostima $f_a + f_b + f_c$, $f_a+f_b-f_c$, $2f_a-f_b$ i mnoge druge kombinacije. Intermodulacija se događa zbog nelinearnosti pri obradi signala kod analognih uređaja koje koristimo. Kao što je vidljivo iz formula kao i iz Slika 3.9. intermodulacija može dovesti do nastanka nižih harmonika (subharmonika).



Slika 3.9. Distribucija intermodulacijskih produkta trećeg reda, osnovni tonovi (plavo), dominantni produkti intermodulacije (crveno), specifični produkti intermodulacije (zeleno) Preuzeto iz [24]

Osim najvažnijih spomenutih oblika distorzije, postoje još pojmovi i pojave koje svrstavamo u distorziju zbog činjenice da se originalni signal frekvencijski mijenja na neki način, a to su frekvencijska karakteristika uređaja (mikrofon ili zvučnik) koja nije transparentna (flat), „flutter”, modulacija, kompresija, fazna distorzija i „aliasing”.

3.4. Zvučnik

Zvučnik je pretvarač, koji pretvara električni signal, tj. električnu energiju u mehaničku energiju. Postoje nekoliko različitih vrsta zvučnika, a to su: dinamički, elektrostatski, „ribbon", piezoelektrični itd. Mi ćemo opisati rad dinamičkog zvučnika koji je najraširenij i koji se koristi u kombinaciji sa pojačalom električne gitare.

Osnovni dijelovi zvučnika su zvučnička kutija, jedan ili više „driver-a", te kablovi i spojnice. Slika 3.10.. „Driver" je centralni dio zvučnika i on se sastoji od nekoliko važnih dijelova, a to su permanentni magneti, zavojnica koja je suspenzijom („spider") vezana uz membranu zvučnika (dijafragma, konus). Membrana se veže na nekakav okvir. Magneti i okvir su statični dijelovi, dok zavojnica sa suspenzijom i membranom čine pomični dio zvučnika. Magneti stvaraju magnetsko polje B oko sebe, a zavojnicu možemo zamisliti kao žicu duljine l kojom teče struja I. Na ravan vodič kojim teče struja djeluje sila koja se zove Ampere-ova sila i možemo je izraziti kao (3.29.)

$$\vec{F} = I\,\vec{l} \times \vec{B} \tag{3.29.}$$

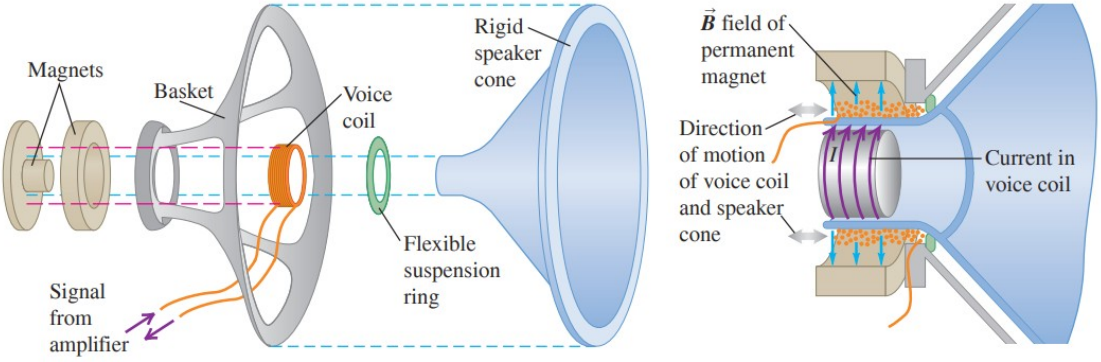
Zavojnica nije ravan vodič, ali izraz možemo prilagoditi i prikazati infinitezimalni dio sile koji djeluje na infinitezimalni komadić vodiča, koji je zapravo ravan u toj domeni. Izraz (3.29.) poprima oblika (3.30.)

$$d\vec{F} = I\,\vec{dl} \times \vec{B} \tag{3.30.}$$

Izraz (3.30.) se integrira po cijelom vodiču i dobije se sila na vodič bez obzira kakvog je on oblika.

Kada električni signal iz pojačala dolazi u zavojnicu zvučnika, magnetsko polje permanentnih magneta djeluje silom na zavojnicu, te se ona sa membranom krene gibati. Struja koja dolazi u zavojnicu je izmjenična struja, što znači da ona oscilira i svojim smjerom i iznosom. Ovisno o amplitudi struje proporcionalno će se mijenjati amplituda titranja zavojnice i membrane. Suspenzija ili „spider" služi za vraćanje membrane u početni položaj, nakon što se ona pomaknula u jednom od smjerova. U zadnjem koraku nam titranje membrane proizvodi zvuk koji mi čujemo. Nastali zvuk frekvencijski

odgovara frekvenciji titranja zavojnice tj. membrane. Membrane su najčešće izrađene od nekih papira ili tkanine. Poželjno je da budu čvrste zbog reprodukcije niskih frekvencija, a opet dovoljno pokretne za reprodukciju visokih frekvencija. Najčešće zvučnici visoke kvalitete koji žele pokriti široki pojas frekvencija u sebi posjeduju više „driver-a". Svaki od njih je zadužen za svoj pojas frekvencija, pa tako imamo „subwoofer", „woofer" i „tweeter" zvučnike. U slučaju da ne govorimo o specijaliziranim zvučnicima za određene frekvencije, već o zvučnicima koji posjeduju nekoliko „driver-a" moramo spomenuti i skretnice ("crossover"). Skretnice se koriste za slanje točno određenog frekvencijskog spektra na specijalizirani „driver". One mogu biti pasivne ili aktivne. U slučaju da su aktivne, svaki „driver" mora imati i svoje pojačalo. Svaki zvučnik ima i svoju frekvencijsku karakteristiku (odziv, engl „frequency response"), koja nam opisuje zvučnu sliku koju on reproducira u čujnom spektru od 20 do 20000 Hz. Ako kažemo da je odziv ravan (flat) to znači da zvučnik podjednako reproducira sve frekvencije.



Slika 3.10. Osnovni dijelovi zvučnika Preuzeto iz [5]

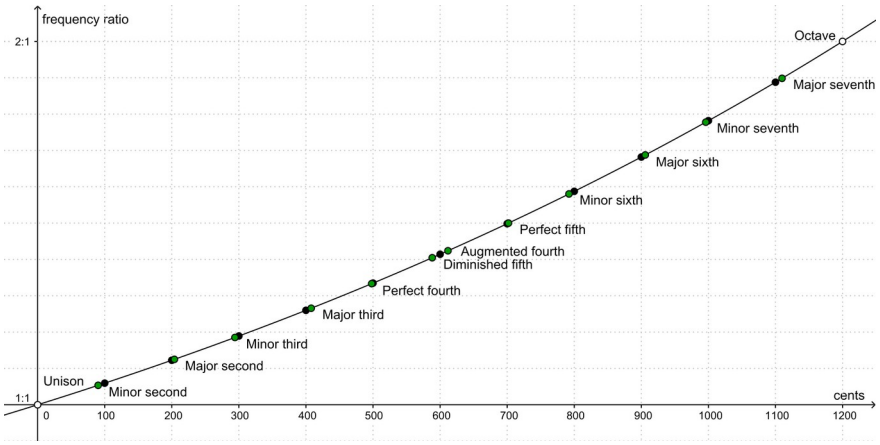
4. Psihoakustika

4.1 Tonalni sustav

Žice gitare naštimane su u standardnom štimanju na tonove E – A – D – g – b – e. (Tablica 2.1.) Svakom tonu odgovara određena frekvencija. Skraćivanje žice na pola njene vrijednosti povećava frekvenciju titranja dva puta. Taj ton koji čujemo je zvučno sličan početnom tonu i za njega kažemo da je oktavu više od prvotnog tona (koji čujemo titranjem cijele žice). Razlog zbog kojeg tonovi slično zvuče je taj što se unutar prvog tona nalazi drugi harmonik koji je iste frekvencije kao i ton odsviran oktavu više. Zapravo postoji još i veći broj harmonika koji se podudaraju. Zbog njihove zvučne sličnosti, tonove označavamo istim slovima uz poneku popratnu notaciju (npr. E, e, e', e'' ili E, e^0, e^1, e^2 ili E, E_1, E_2 itd.). Oktava je dakle naziv za interval između dva tona koji slično zvuče, pri čemu je viši ton duplo više frekvencije. Unutar jedne oktave postoje i drugi intervali, a to su redom prima (isti odsvirani ton), sekunda, terca, kvarta, kvinta, seksta i septima.

Pitagorina škola je bila prva koja je opisala tonove u frekvencijskom omjer 1:2 kao oktavu. Nadalje, omjer od 3:2 predstavljao je interval kvintu. [10] Ako na početni ton primijenimo skok od kvinte, nakon 7 oktava dobit ćemo 12 različitih tonova. Ako sve tonove stavimo u istu oktavu, dobijemo ljestvicu od 12 tonova. Takav sustav koji smo konstruirali s pomoću intervala oktave i kvinte naziva se Pitagorinim tonalnim sustavom. Nakon Pitagore pojavili su se i još neki sustavi kao npr. prirodna intonacija (engl. just tuning). Takav sustav je opisivao intervale tako da su njihovi frekvencijski odnosi omjeri prirodnih brojeva, ali omjeri su jednostavniji naspram Pitagorinog sustava.. Takav sustav se zapravo pojavljuje prirodno u harmonijskom nizu tonova, tj. višim harmonicima. Prirodna intonacija riješila je problem udara (engl. beat) koji su nastajali između harmonika u tonovima Pitagorinog sustava, posebno problematičan interval je bio terca. Međutim, problematika oba sustava je što intervali nemaju isti omjer ovisno o tome koji je početni ton. Terca na početnom tonu C i na tonu D nisu iste. Takvi sustavi se baziraju na relativnom štimanju u odnosu na jedan ton. Što znači da ista kompozicija odsvirana u različitim tonalitetima zvuči drugačije. Nakon njih pojavio se „dobro ugođeni" tonalni sustav (engl. well (equal) tempered). On opisuje ljestvicu od 12 tonova (12 polustepena) u kojima su razmaci između svih susjednih tonova (polustepen) jednaki, tj. ljestvica je podijeljena logaritamski na 12 jednakih dijelova. Taj razmak možemo opisati i s pomoću veličine koja se naziva cent. Oktava u

svim sustavima je ista, i iznosi 1200 centi, a u modernom sustavu razmak između dva susjedna tona (jedan polustepen) iznosi 100 centi. (Tablica 4.1.) Moderni sustav je također pokazao da tonovi F# i Gb (Fis- povišeni F / Ges – sniženi G) su tzv. enharmonijska zamjena, tj isti tonovi, dok u Pitagorinom sustavu je postojala mala razlika. (Slika 4.1.)



Slika 4.1. Grafički prikaz omjera frekvencija između intervala u Pitagorinom sustavu i modernom (equal tempered) sustavu (Preuzeto iz[11])

Prirodna intonacija je ono što bi smatrali točnom i ispravnom intonacijom u fizikalnom i glazbenom smislu. Instrumenti kao što su gitara i klavir nisu zapravo „točno" naštimani baš iz razloga jer se baziraju na modernom sustavu intoniranja (gitara nešto više nego klavir). Razlog zbog kojih su navedeni gitara i klavir je taj što su to instrumenti s fiksnim štimanjem. Nemoguće je tijekom sviranja mijenjati štimanje kao kod npr. violine, trube, itd. Ako na gitari odsviramo akord (skup tonova od minimalno tri note koje uključuju osnovni ton, tercu i kvintu) zvučno ćemo primijetiti razliku od istog akorda odsviranog prirodnim intoniranjem. Kvinta se razlikuje za 2 centa, što je zanemariva razlika, međutim terca, ovisno o tome je li velika ili mala, daje razliku od +13,7 ili – 15,6 centi. Ta razlika je u ovom kontekstu dosta uočljiva, pogotovo što je terca interval koji se izrazito čuje unutar akorda, jer ona određuje vrstu akorda (dur, mol). Ako pokušamo naštimati tercu da odgovara prirodnoj intonaciji akorda imat ćemo problema s intonacijom u daljnjem sviranju drugih akorada. Iako „equal tempered" sustav pokazuje neke razlike od prirodne intonacije, još uvijek je najbolji sustav koji možemo koristiti. Sva glazba od 18. stoljeća pa do danas koristi taj sustav.

Interval/ ton		Pitagorin sustav	Centi	Prirodna intonacija	Centi	„Equal tempered”	Centi
Unison	C	1/1	0,00	1/1	0,00	1/1	0,00
Mala sekunda	C#	256/243	90,22	16/15	111,73	$2^{1/12}$	100,00
Velika sekunda	D	9/8	203,91	10/9	182,40	$2^{1/6}$	200,00
Mala terca	D#	32/27	294,13	6/5	315,64	$2^{1/4}$	300,00
Velika terca	E	81/64	407,82	5/4	386,31	$2^{1/3}$	400,00
Čista kvarta	F	4/3	498,04	4/3	498,04	$2^{5/12}$	500,00
Povećana kvarta	F#	729/512	611,73	45/32	590,22	$2^{1/2}$	600,00
Smanjena kvinta	Gb	1024/729	588,27	64/45	609,78		
Čista kvinta	G	3/2	701,96	3/2	701,96	$2^{7/12}$	700,00
Mala seksta	G#	128/81	792,18	8/5	813,69	$2^{2/3}$	800,00
Velika seksta	A	27/16	905,87	5/3	884,36	$2^{3/4}$	900,00
Mala septima	A#	16/9	996,09	9/5	1017,60	$2^{5/6}$	1000,00
Velika septima	B	243/128	1109,78	15/8	1088,27	$2^{11/12}$	1100,00
Čista oktava	C	2/1	1200,00	2/1	1200,00	2	1200,00

Tablica 4.1. Usporedba Pitagorinog sustava, sustava prirodne intonacije i „Equal tempered” sustava

4.2 Frekvencija i visina tona

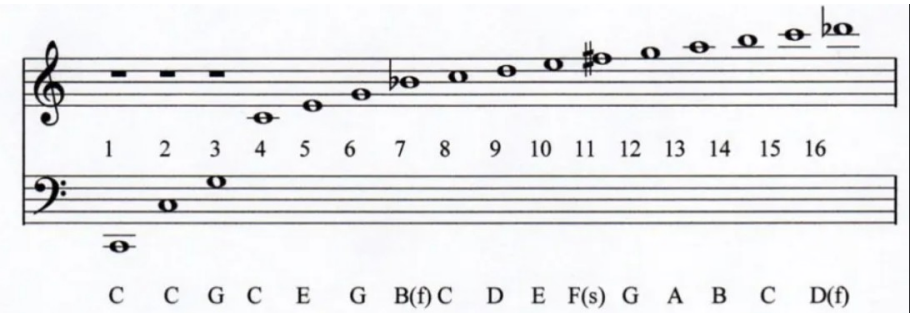
U glazbi razlikujemo pojmove koji imaju objektivno, fizikalno mjerljivo značenje i pojmove koji se odnose na subjektivnu percepciju slušatelja. Ono što je subjektivno se teško može direktno izmjeriti ali to ne znači da se dva ili više slušatelja neće složiti oko iste interpretacije pojmova. Jedan takav slučaj je frekvencija i visina tona (engl *pitch*). Iako veoma slični, to su dva različita pojma. Frekvencija je fizikalno mjerljiva veličina, dok je visina tona pojam koji ovisi o frekvenciji i koristi se pri opisivanju tonova u odnosu na neki drugi (referentni) ton. Tonove više frekvencije percipiramo slušno višim. Tonovi za koje kažemo da se nalaze na određenim frekvencijama unutar sebe sadrže zapravo više frekvencija. Primjerice, ton na frekvenciji 440 Hz (glazbena interpretacija je ton A) koja odgovara fundamentalnoj (osnovnoj) frekvenciji također sadrži više harmonike. U engleskom jeziku je osnovni ton zapravo prvi harmonik. Viši harmonici su cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije. Osnovnom tonu frekvencije 400 Hz, odgovara prvi viši prizvuk (engl. overtone) na frekvenciji 800 Hz (drugi harmonik), zatim drugi viši prizvuk na frekvenciji 1200 Hz (treći harmonik) itd. Viši harmonici se u većoj ili manjoj mjeri pojavljuju pri svakom odsviranom tonu na glazbenom instrumentu. Oni određuju boju ili timbar. Upravo zbog njih isti ton odsviran na različitim instrumentima daje različitu zvučnu sliku. Iako je ton iste osnovne (fundamentalne) frekvencije, i mi čujemo tu frekvenciju, zvučna slika je drugačija. Harmonici mogu mijenjati visinu tona. Pojava se uočava na frekvencijama iznad 2000 Hz i ispod 1000 Hz.

Osim već spomenutih viših harmonika, tonovi u prirodi u sebi sadrže i anharmonike. Frekvencije koje nisu točno cjelobrojni višekratnik fundamentalne frekvencije. Anharmonici se pojavljuju jer titranje žice nije u potpunosti harmonično. Prisutna su i gušenja. Prisutnost anharmonika može otežati štimanje. Međutim, mi svejedno možemo naštimati gitaru na neku željenu frekvenciju, odnosno visinu tona, iako se u spektru odsviranog tona pojavljuje puno frekvencija. Idealni štimeri (engl. tuner) imaju u sebi low-pass filter što omogućuje bolje štimanje. Eliminiranjem određenih frekvencija ona fundamentalna dolazi do boljeg izražaja. Štimer najčešće registrira frekvenciju najbližu fundamentalnoj i omogućuje preciznije štimanje. Moderni digitalni (električni) štimeri u mjerenju koriste interval od +/- 2,0 ‰ , što odgovara vrijednosti od +/- 3,5 centi. To znači da za ton A frekvencije 440 Hz, sve frekvencije između 439,4 Hz i 440,7 Hz smatraju se

točno naštimanim tonom. Važno je napomenuti i da promjena temperature utječe na preciznost štimanja. Promjena od 1 °C mijenja frekvenciju žice za 5,3 ‰.

U slučaju gitare, harmonici se pomiču prema višim frekvencijama. Na frekvenciji od 1kHz imamo i pomak od +15 centi. To znači da analizom takvog tona dobijem fundamentalnu frekvenciju koja je viša od one koju pokazuje štimer. Međutim, to ne znači da gitaru moramo štimati više. Ljudski slušni aparat je jako kompleksan kao i psihologija samog slušanja, opažanja i interpretiranja zvuka. Također treba naglasiti da se i visina opaženog tona mijenja s povećanjem razine intenziteta zvuka. Za svako povećanje od 10 dB opaža se promjena od 5 centi prema nižim frekvencija. To znači da ponekad i analizirani ton može imati prividno nižu frekvenciju od one koju pokazuje štimer. Generalno pogreške u štimanju ne iznosi više od 5 centi, a pogreška od 10 centi se još smatra prihvatljivom. Ljudsko uho ton koji u sebi sadrži harmonike percipira kao jedan ton. Svi harmonici ne sudjeluju u stvaranju zvučne slike. Poneki harmonici imaju intenzitet puno manji od svojih susjeda. Ti harmonici su suzbijeni i taj proces se naziva maskiranje. Ono što čujemo je frekvenciju osnovnog tona i 6 do 8 harmonika. Te harmonike ne čujemo zasebno, već su oni zajedno grupirani u jedan zvučni događaj. Iako je intuitivno pomisliti da je fundamentalna frekvencija ona koja nam definira visinu tona eksperimenti pokazuju drugačije. Ako snizimo frekvenciju osnovnog tona, a povisimo frekvenciju harmonika, percipirana visina tona će biti viša. Dakle, fundamentalni ton ne utječe primarno na visinu tona, već i na boju. Harmonici također mogu utjecati na percipiranu visinu tona, kao i na boju (timbar). Važno je naglasiti da je potreban dovoljno velik broj harmonika, u suprotnom nam fundamentalni ton određuje percipiranu visinu tona.

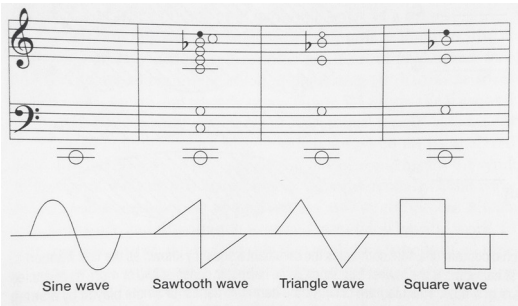
Harmonici u kontekstu glazbe imaju drugačiji naziv, a to je alikvotni niz tonova. (Slika 4.2.) Oni su naslućeni još u 17. stoljeću a u 18. stoljeću su matematički opisani. Poznati francuski skladatelj i glazbeni teoretičar Jean – Phillipe Rameau je na temelju njih napisao knjigu *Rasprava o harmoniji* koja opisuje načelo skladanja barokne glazbe i kasnije klasične glazbe. Ovaj slučaj nam pokazuje primjer u kojem je fizika našla svoje mjesto u glazbi. Neke uočene pravilnosti ili pojave u fizici podudaraju se s upotrebom u glazbi.



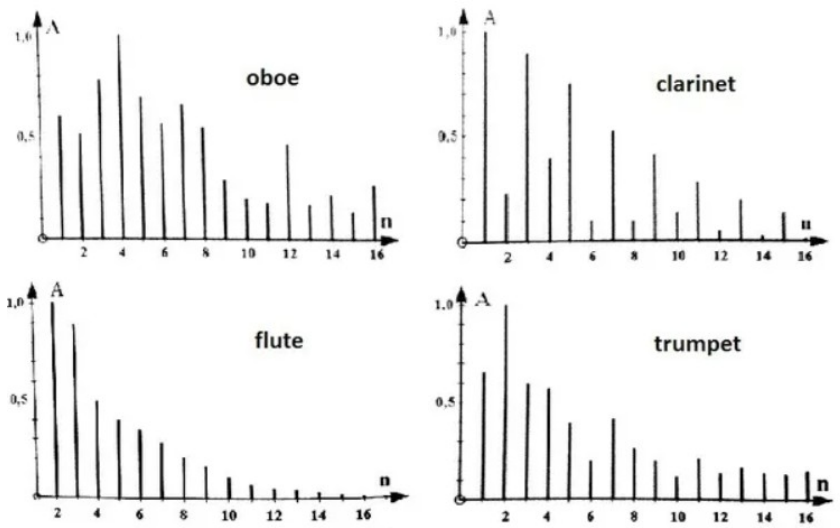
Slika 4.2. Alikvotni niz tonova (Preuzeto iz [12])

4.3 Timbar

Kao što smo već spomenuli ranije timbar ili boja tona nam omogućuje prepoznavanje instrumenata. (Slika 4.4.) Analiziranjem spektra možemo uspoređivati sličnosti i razlike između raznovrsnih izvora zvuka. Važno je promatrati prisutnost viših harmonika. Njihov broj, intenzitet, te koji se harmonici pojavljuju učestalije (parni, neparni) utječu na boju tona. Za parne harmonike kažemo da zvuče „toplije", takav zvuk često daju uređaji koji u sebi imaju cijevno pojačalo (lampe), dok neparni harmonici daju „oštriji" i izraženiji zvuk, kakav je prisutan u simulacijama tape uređaja (traka). Poznati primjer zvuka kojeg dobijemo isticanjem neparnih harmonika su sintesajzeri. Tzv. *triangle* i *square* oblik vala u sebi sadrže istaknute neparne harmonike a potpuno potisnute parne. Square val je puno agresivniji zvukom, te harmonici imaju veći intenzitet. Postoji još i *sawtooth* val koji u sebi sadrži sve višekratnike fundamentalne frekvencije, dakle i parne i neparne harmonike, čiji intenzitet eksponencijalno pada. (Slika 4.3.)

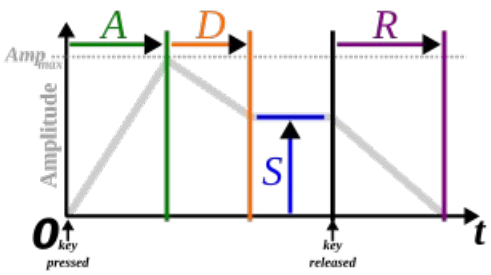


Slika 4.3. Harmonici različitih vrsta zvučnih valova sintesajzera prikazani kao glazbeni tonovi (Preuzeto iz[13])



Slika 4.4. Harmonijski spektar oboe, klarineta, flaute i trube (Preuzeto iz[12])

Osim samog spektra na timbar utječe i envelopa tona. Envelopa nam opisuje kako se ton mijenja u vremenu. Sintesajzeri i sampleri su uređaji koji mogu mijenjati envelopu kontrolirajući četiri parametra popularno nazvanih ADSR. (Slika 4.5.) Attack predstavlja vrijeme potrebno da ton postigne maksimalnu glasnoću. Decay je parametar kojim kontroliramo vrijeme potrebno da ton padne na neku stalnu vrijednost. Sustain predstavlja iznos te stalne vrijednosti (intenzitet). Release nam govori koliko je vremena potrebno da zvuk s vrijednosti sustain-a padne na nulu. Attack, decay i release predstavljaju vremensku veličinu, a sustain predstavlja level intenziteta. Različiti instrumenti pokazuju nam drugačije vrijednosti ADSR. Primjerice udarac palicom po bubnju ili udarac tipke na klaviru ima instantan attack, dok gudalo violine stvara umjereno rastući attack. Gitara također ima relativno brz attack, a sustain može ovisiti o veličini tijela u akustičnoj gitari ili o pickup magnetima kod električne gitare. Generalno je sustain električne gitare veći, jer nema potrebe za prijenosom energije na okolni zrak, stoga je i gušenje manje. Decay gitare je nelinearan. Najprije opada brzo nakon trzanja, a zatim ostaje još prisutan zvuk koji sporo utrne. Također limitiranje od strane pojačala/zvučnika, kao posljedica prekomjerne distorzije može utjecati na decay.



Slika 4.5. Shematski prikaz envelope tranzijenta (ADSR) (Preuzeto iz [14])

U mjerenjima često imamo prisutan ljudski faktor te je teško uvijek dobiti isti spektar za uvijek isti odsvirani ton. Na sam spektar može utjecati mnogo parametara kada je u pitanju gitara. Ako odsviramo isti ton ali pritom mijenjamo poziciju na žici gdje smo svirali trzalicom dobit ćemo različite spektre, također kut pod kojim se nalazi trzalica, kao i razlika između up-stroke i down-stroke sviranja. Osim toga i prsti kojim hvatamo polja na gitari mogu savijati žicu i promijeniti spektar. Promjena može biti u pomicanju cijelog spektra, ako smo previše savili žicu i utjecali na frekvenciju, ili može biti u pomaku harmonika te nastajanje interferencije. Nisu sve promjene koje se dogode čujne. Često intenziteti harmonika nisu dovoljni veliki ili ostanu zamaskirani susjedima te stoga nisu uočljivi i ne pridonose zvučnoj slici iako su fizikalno mjerljivi i prisutni.

5. Rezultati

5.1. Fundamentalna frekvencija

Najprije smo odlučili izmjeriti fundamentalnu frekvenciju kojom titraju žice gitare kad se nalaze u standardnom štimanju. Koristili smo formulu koju smo već prezentirali u prethodnim poglavljima.

$$f_G = \frac{v}{2L} = \frac{\sqrt{T/\pi\rho}}{D \cdot L} \tag{2.18.}$$

Formulu smo modificirali pa smo umjesto promjera žice odlučili izmjeriti masu svake žice (Slika 5.1.), jer je teže bilo odrediti gustoću presvučenih žica. Ovako smo eliminirali mjerenje dva parametra i smanjili moguću pogreške. Znamo da je

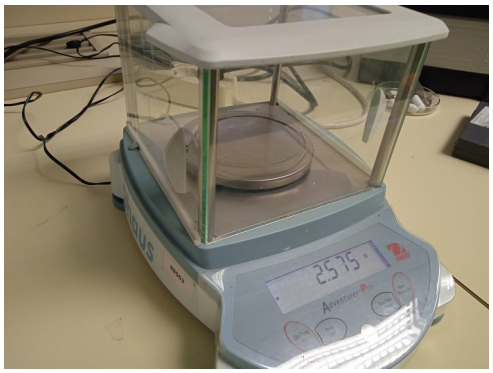
$$\rho = \frac{m}{V} \tag{5.1.}$$

i da volumen žice V iznosi

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot L \tag{5.2.}$$

te konačan izraz nam daje 5.3.

$$f_G = \sqrt{\frac{T}{4m \cdot L}} \quad . \tag{5.3.}$$



, Slika 5.1. Određivanje mase žice

Osim mase žica, trebalo je odrediti i duljinu. Duljina svake žice je bila ista i iznosila je L = 65 cm. Također trebalo je odrediti i tenziju (5.4.). Dinamometrom smo razvukli žicu, i to na njenoj polovici, što odgovara dvanaestom polju na vratu gitare (Slika 5.2.). Uslikali smo

razvučenu žicu i uz pomoć programa odredili kut θ. Iz trigonometrije dobijemo izraz za tenziju. Vrijednosti koje smo odredili upisani su u tablicu Tablica 5.1

$$T = \frac{2 \cdot F}{\sin(\theta)} \tag{5.4.}$$

Slika 5.2. Određivanje sile i kuta

Žica	f (Hz)	θ (°)	m (g)	F (N)	f_G (Hz)	σ_f (Hz)
E(E_2)	85,8	1,9	7,2	2,0	80	± 2
A(A_2)	114,4	2,4	4,4	3,0	112	± 2
D(D_3)	143,1	1,7	2,6	2,0	141	± 3
g(G_3)	200,3	2,3	1,4	3,0	203	± 4
b(B_3)	247,9	1,6	0,9	2,0	247	± 5
e(E_4)	333,8	2,8	0,6	4,0	324	± 6

Tablica 5.1. Eksperimentalne vrijednosti frekvencija, kuta i mase za pojedine žice

$\sigma_F = 0.1$ N

$\sigma_L = 0.001$ m

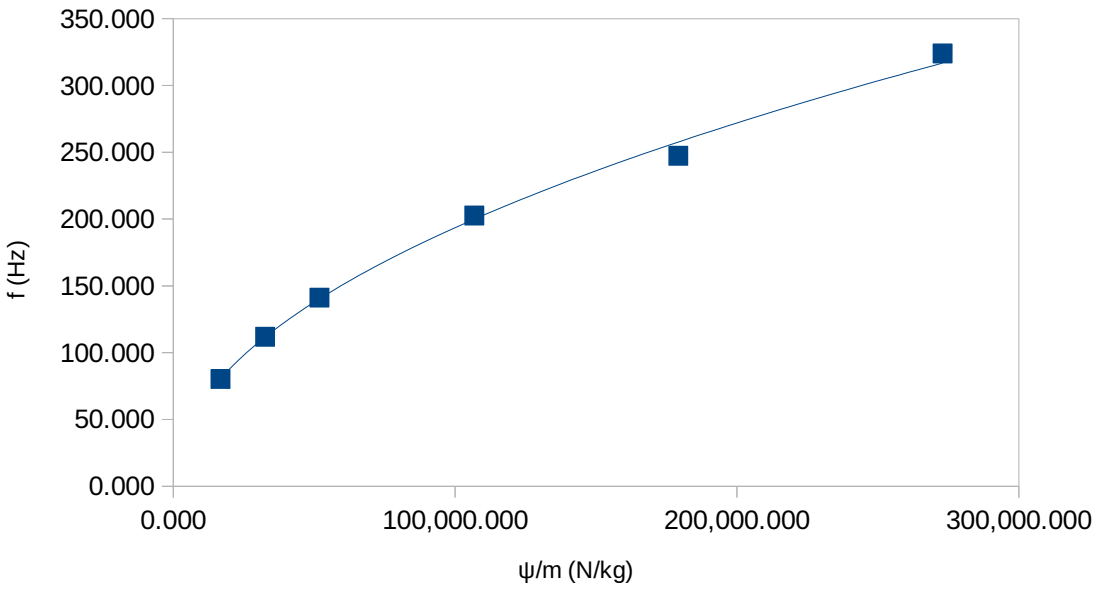
$\sigma_m = 10^{-6}$ kg

$\sigma_{kut} = 0.1^{\circ}$

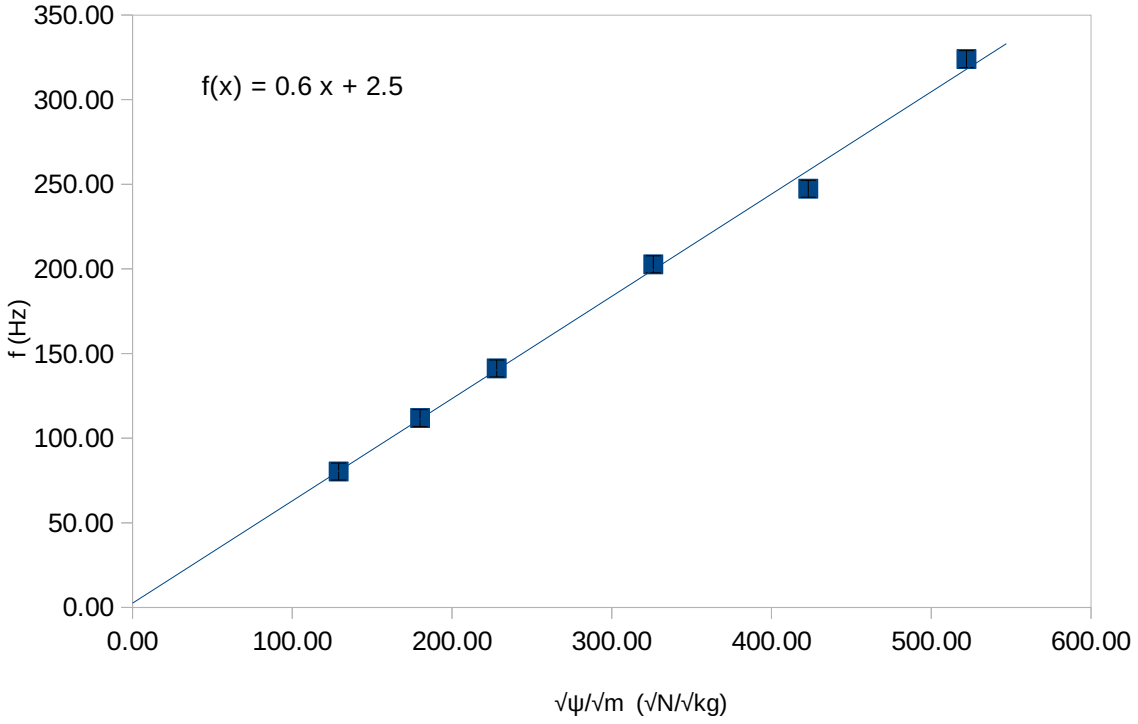
$\sigma_T = 6$ N

$$\sigma_{f_G} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_G}{\partial T} \cdot \sigma_T\right)^2 + \left(\frac{\partial f_G}{\partial L} \cdot \sigma_L\right)^2 + \left(\frac{\partial f_G}{\partial m} \cdot \sigma_m\right)^2} \tag{5.5.}$$

Drugi stupac frekvencija prikazuje vrijednosti koje nam je pokazao osciloskop u mjerenjima gdje smo snimali spektre. Iz mjerenja možemo vidjeti da smo dobili vrijednosti frekvencija koje su približne tabličnim vrijednostima, te također bliske onim mjerenjima koje smo radili na osciloskopu. Naravno prisutna je pogreška, jer se radi o jako malim kutevima koje mjerimo, te odstupanje od čak pola stupnja može uvelike promijeniti rezultat. Također je vrlo vjerojatno da gitara nije bila najpreciznije naštimana, ili da se tijekom samih mjerenja raštimala. Tijekom svih mjerenja bilo je potrebno često šrpvjeravati uz štimer. Također su neka mjerenja provedena u dužem periodu pa je moguće da je starost žice utjecala na frekvenciju. Masu smo mjerili na novim žicama, što je još jedan faktor nepreciznosti. Stare žice s vremenom korodiraju, te im se mijenja masa. Također nisu više elastične kao nove žice. Međutim u našem slučaju pogreška je prihvatljiva jer odstupanja još uvijek pokazuju da se frekvencijski nalazimo bliže tonu kojeg tražimo nego susjednim tonovima. Sada možemo provjeriti ovisnost frekvencije o veličinama koje mjerimo i koje možemo mijenjati. To su napetost i masa. Na sljedećim grafovima ćemo prikazati ovisnosti.



Graf 1. Ovisnost frekvencije o količniku tenzije i mase



Graf 2. Linearna ovisnost frekvencije o korijenu količnika tenzije i mase

$f(x) = 0.6\,x + 2.5$

$f(x) = ax + b$

$a = 0.60 \pm 0.02$

$b = 2 \pm 6$

Iz Graf 1 tenzija, te količnik tenzije i mase pokazuje proporcionalnost s korijenom. Ta opažanja nam odgovaraju izrazu (5.3.) . Ako promotrimo Graf 2 i prikažemo ovisnost o korijenu tenzije i mase, vidimo da je ovisnost linearna. Možemo iscrtati pravac i napisati jednadžbu pravca, koja teorijski ne bi trebala imati odsječak na osi *y*, ali zbog prisutnosti pogreške, ipak postoji. Jednadžba pravca glasi f(x) = 0.6x + 2.5, i možemo je usporediti s izrazom (5.3.) Nagib pravca nam iznosi 0.6 i on odgovara $\frac{1}{\sqrt{4L}}$. Uvrštavanjem vrijednosti dobijemo da *L*, odnosno duljina žice iznosi 69.4 cm. Što odstupa od vrijednosti 65 cm koje smo izmjerili metrom i koja je standardna za većinu električnih gitara. Uz prethodnu napomenu o pogreškama prisutnim zbog nepreciznosti pri mjerenju i štimanju gitare, treba spomenuti da smo i u samom izračunu pretpostavili homogenost žica, odnosno

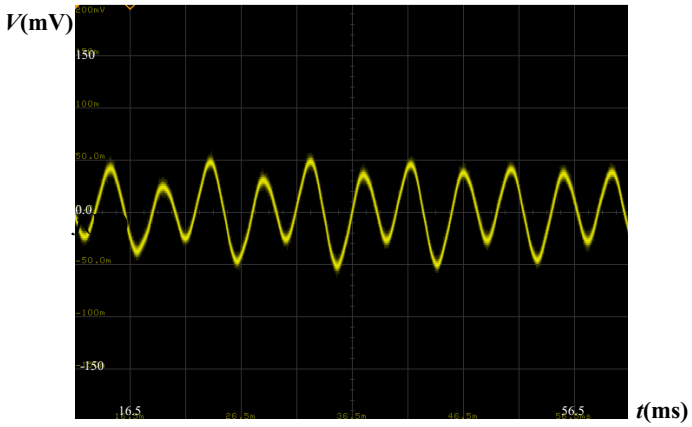
uniformnost gustoće. U ranijim poglavljima smo prikazali način određivanja gustoće žice koji smo u našim mjerenjima zanemarili i pretpostavili da su žice jednake gustoće u svim svojim dijelovima, te smo zanemarili utjecaj presvlake na gustoću. Te pretpostavke i aproksimacije su nas dovele do izraza (5.3.), što je unijelo pogrešku u rezultat.

Možemo zaključiti iz navedenih izraza kao i iz eksperimenta, da povećavanjem tenzije, tj zatezanjem žice podižemo njenu frekvenciju titranja, te i sam ton koji nastaje je viši. A veća masa žice utječe na smanjenje frekvencije. To je razlog zašto se žice koje želimo naštimati niže presvlače, i zašto su žice bas gitare puno deblje od gitarskih žica. Također su i veće duljine, je povećavanjem duljine žice smanjujemo frekvenciju titranja.

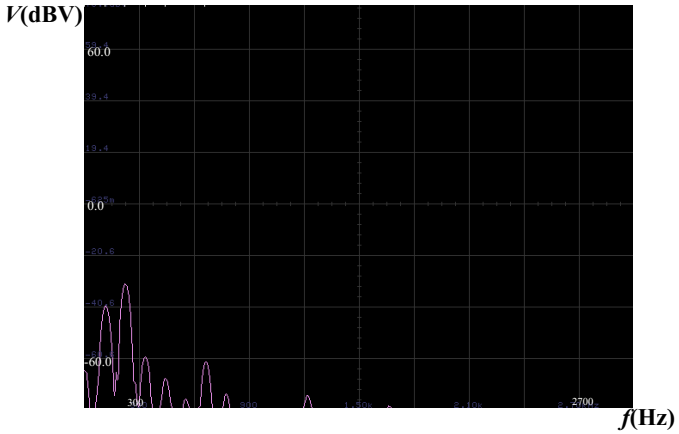
Daljnja mjerenja koja smo provodili odnosila su se na usnimavanje spektra i oblika vala koji nastaje kada trzamo otvorene žice akustične i električne gitare. Mikrofon (Shure SM 58, Slika 2. i Slika 3.) smo približili žicama gitare i usnimili odsvirane tonove na svim otvorenim žicama. Nekoliko mikrofona i različitih pozicija se može koristiti za snimanje akustične gitare. Odlučili smo se mikrofon pozicionirati tako da gleda u 12. polje gitare, tako dobijemo zvučnu sliku koja u sebi sadrži zvuk titranja žice i zvuk koji se razvija iz rezonantne kutije, odnosno samog tijela gitare. Što više mikrofon približimo otvoru kutije dobit ćemo izraženije frekvencije niže u spektru, a što se više penjemo uz vrat imamo manje izražene niske frekvencije, izraženiji je zvuk žice a ne toliko zvuk tijela. Također 12. polje gitare je polovica duljine žice, što znači da tu fundamentalna frekvencija ima najveću amplitudu. Signal iz električne gitare snimili smo direktno u osciloskop, te smo usnimili gitaru preko vanjske zvučne kartice (AD/DA konverter) u program Cubase. Također smo mikrofonom ozvučili pojačalo električne gitare i usnimili signale kad na njih primijenimo distorziju na pojačalu. Pozicija mikrofona je bila na polovici udaljenosti od centra zvučnika i njegovog ruba. (Slika 5.8.) Što smo bliže sredini zvučnika dobit ćemo izražene srednje frekvencije u spektru.

5.2. Akustična gitara

Kod snimanja vala koji nastaje trzanjem žica akustične gitare odmah se može primijetiti kako zvučni val koji nastaje jako podsjeća na čisti sinusni val. Naravno, nijedan ton u prirodi nije čisti sinusni val, već u sebi sadrži više harmonike, Međutim kod akustične gitare tih viših harmonika nije bilo pretjerano puno. U ovom trenutku je dobro uvesti i veličinu koju smo mjerili u ovim pokusima, a to je THD (engl. total harmonic distortion). Ta veličina predstavlja koliko je harmonijske distorzije prisutno u signalu. Računa se kao omjer sume kvadrata svih frekvencija i kvadrata fundamentalne frekvencije.



Slika 5.3. Oblik vala tona A (110 Hz, druga oktava)

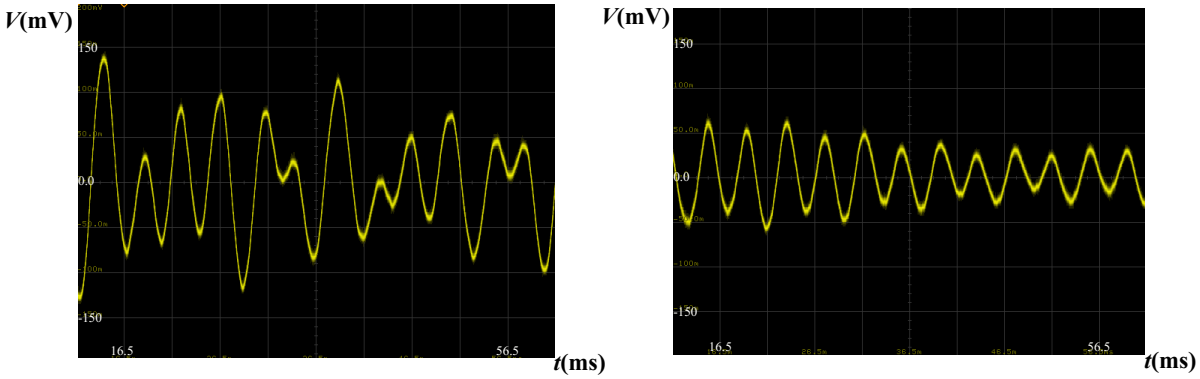


Slika 5.4. Spektar tona A

Fundamentalni ton se pojavljuje na frekvenciji 114 Hz, što je približno tabličnim vrijednostima od 110 Hz za ton A. Sljedeća 3 harmonika su redom 219 Hz, 333 Hz i 436 Hz. Te vrijednosti u većoj mjeri odgovaraju množenjem fundamentalne frekvencije s n=1,2,3,.... Ovo je dobar primjer situacije gdje osnovni ton koji je naštiman malo više ipak

zvuči kao ton A jer su prisutni viši harmonici na nešto nižoj frekvenciji od očekivane. Također, osnovni ton ne mora nužno biti najveće amplitude. U ovom slučaju imamo drugi harmonik koji se nalazi na -31.5 dBV, a osnovni ton je na -40.1 dBV. U spektru vidimo da je prisutno svega nekoliko viših harmonika, pri čemu su neki jako malog intenziteta, a osmi i deveti potpuno izostaju. Izmjereni THD iznosi 4.2 %.

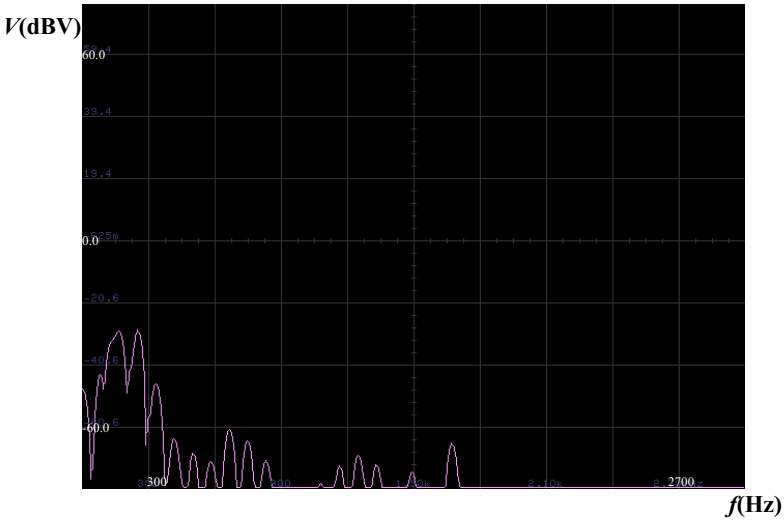
Dalje navodimo par primjera oblika vala za tonove E(82.41 Hz) i h (246.94 Hz)



Slika 5.5. Valni oblik tonova E(82.41 Hz, druga oktava) i b (246.94 Hz, treća oktava)

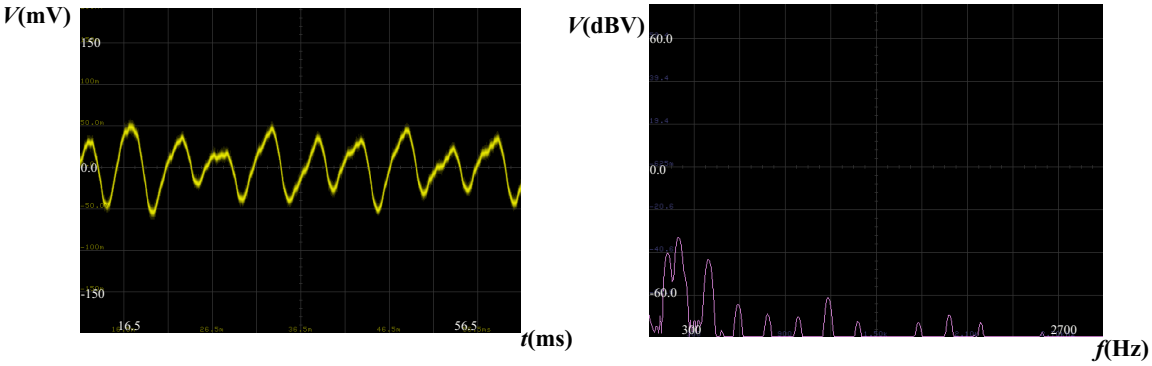
Na prvoj slici vidimo kako je amplituda vala puno veća kada agresivnije trznemo žicu. Cijeli oblik vala je „neuređeniji", dok se titranje ne stabilizira. Zvučno se to također očituje, ponekad i uz zujanje ako žica udara po pragovima na vratu gitare. Na drugoj slici vidimo prirodnije odsviran ton, te pri kraju se vidi lagano gušenje tona, tj „decay". Ranije smo napomenuli kako su za gitaru specifična dva „decay-a". Početni decay osnovnog tona, te drugi „decay" koji predstavlja lagano gušenje preostalih harmonika.

Na sljedećoj slici spektra E žice, vidimo izraženu fundamentalnu frekvenciju kao i drugi i treći harmonik. U ovom slučaju su opet drugi i treći harmonik izraženiji od fundamentalnog. „Peak-ovi" nisu tako oštri kao kod A žice. Vidljivo je zapravo više energije prisutno u niskim frekvencijama, pogotovo jer smo imali agresivni trzaj. Frekvencije prvih nekoliko harmonika su redom 81 Hz, 162 Hz, 248 Hz, što približno odgovara željenoj osnovnoj frekvenciji i vrijednostima pripadajućih harmonika. Zanimljivo je primijetiti kako nema pravila koji harmonici će izostati. U ovom slučaju imamo nedostatak dvanaestog i trinaestog harmonika, međutim dalje se ponovno ističu par narednih.



Slika 5.6. Spektar tona E

Na sljedećem primjeru g žice vidimo sliku koja nije u potpunosti oštra. Takva slika je često nastajala kada bi žica udarila u pragove polja i kada se čulo blago zujanje.



Slika 5.7. Valni oblik i spektar žice g (196 Hz, treća oktava) uz prisutno zujanje

U spektru vidimo u niskim frekvencijama blago izražene peakove, usko poredane jedan do drugog. Oni nisu dijelovi tona, već najvjerojatnije prisutno zujanje, tj nekakav šum. Dalje ćemo kod električne gitare imati još bolji prikaz šuma. Također u spektru se mogu vidjeti frekvencije koje bi odgovarale nižim harmonicima (engl. undertones). Međutim, matematika zabranjuje njihove postojanje. Objašnjenje je rezonancija (engl. sympathetic resonance). Osnovna frekvencija tona g iznosi 196 Hz, mi smo u spektru izmjerili 190 Hz. U spektru se pojavila se i frekvencija od 76 Hz te 124 Hz. Te frekvencije ne pripadaju spektru tona g. Dakle imali smo prisutnu nekakvu rezonanciju.

5.3. Električna gitara

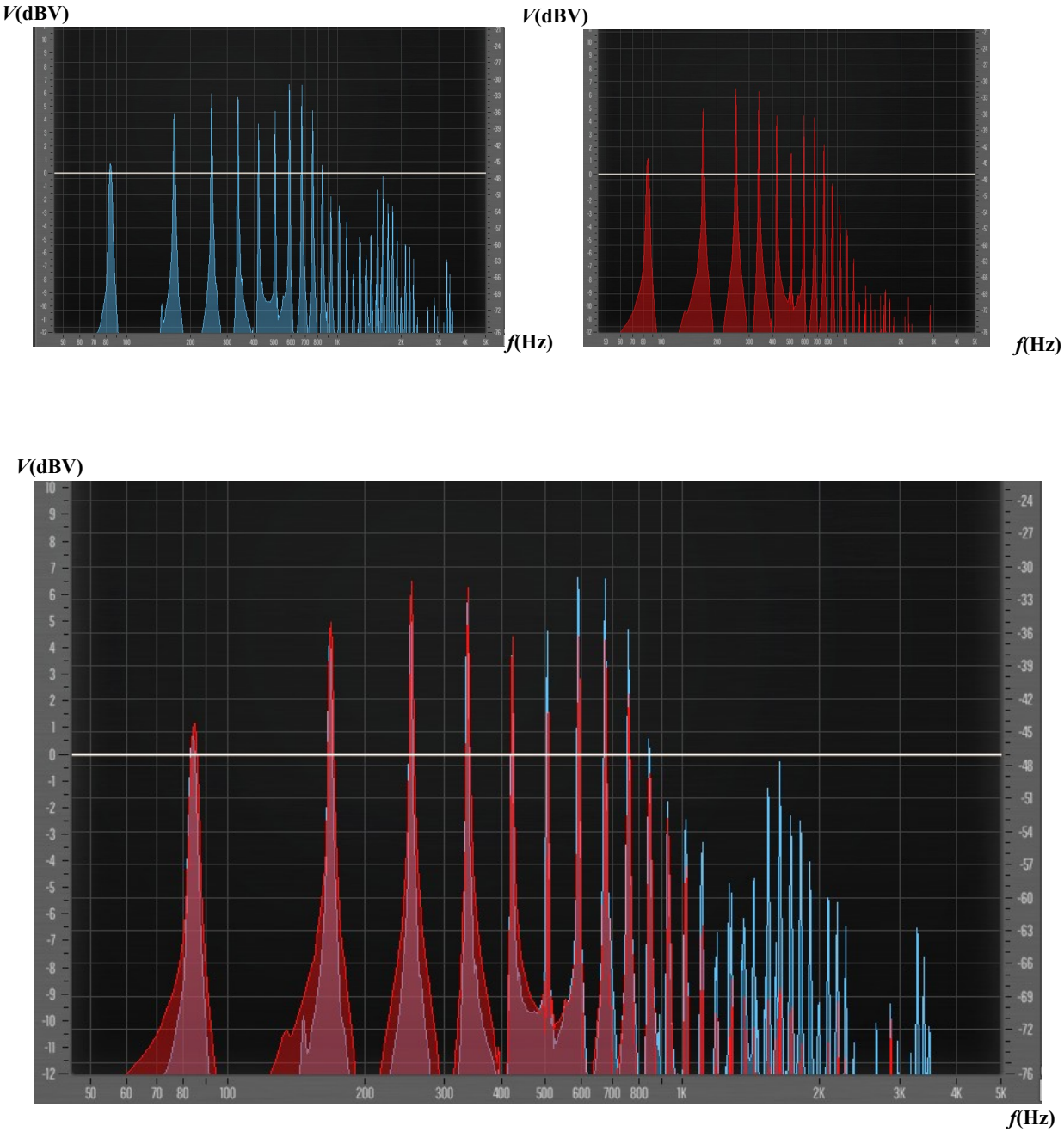
Električna gitara koju smo koristili je Squier Stratocaster, a pojačalo je Fender Champion 40. Sva mjerenja na električnoj gitari snimljena su tako da su tonovi odsvirani trzalicom (Jazz III Nylon Pick 1.35 mm). Korišteni su neck, middle i bridge pickup zavojnice, kao i međupozicije, (tj kombinacija dvije zavojnice spojene u paralelu)

Slika 5.8. Ozvučeno Fender pojačalo Shure SM58 mikrofonom

Za razliku od akustične gitare, kod električne gitare ćemo na prvu odmah primijetiti postojanje većeg broja viših harmonika. Iz tog razloga će električna gitara čak i na „clean" kanalu pojačala davati više boje i karaktera od akustične gitare. Kod akustične gitare su prva tri harmonika dosta izraženiji intenzitetom od ostalih, dok kod električne gitare nije tako. Često prvih tri harmonika nisu najvećeg intenziteta. Također se zvučno čula razlika u „sustain-u" i „decay-u" tona kod električne gitare. Ton je trajao duže i utrnuo sporije.
Sljedeća mjerenja rađena se tako da je gitara spojena u Scarlett Focusrite zvučnu karticu, tj. AD/DA konverter koji zadrži pretpojačalo. To pretpojačalo je transparentno i neće dodati boju našem signalu.

5.3.1. Trzalica i položaj sviranja

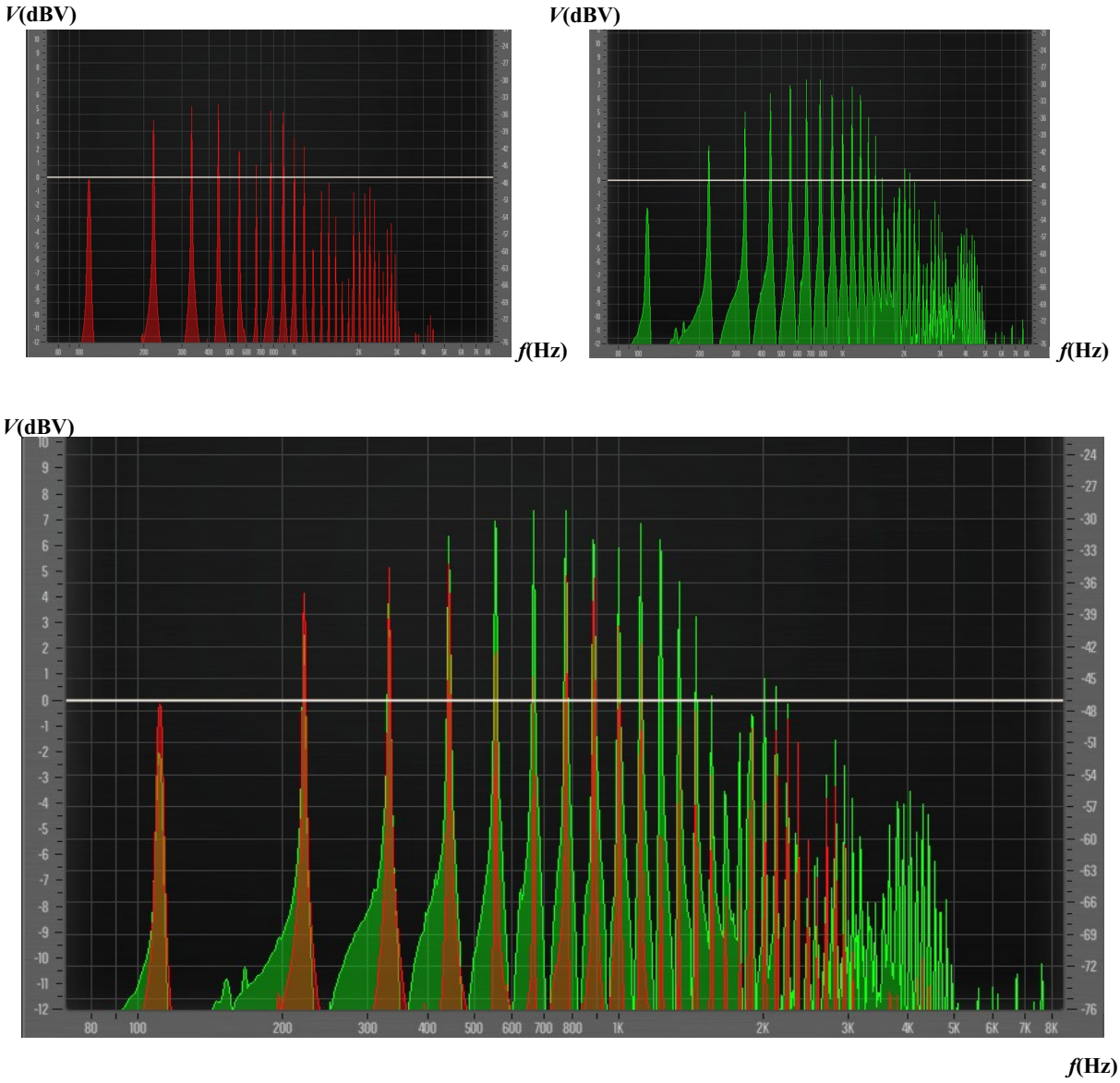
Za početak možemo pokazati usporedbu valne forme kada je korištena trzalica (lijevo) i kada ton odsviran prstima (desno).



Slika 5.9. Spektar tona E odsviranog trzalicom (plavo) i prstima (crveno)

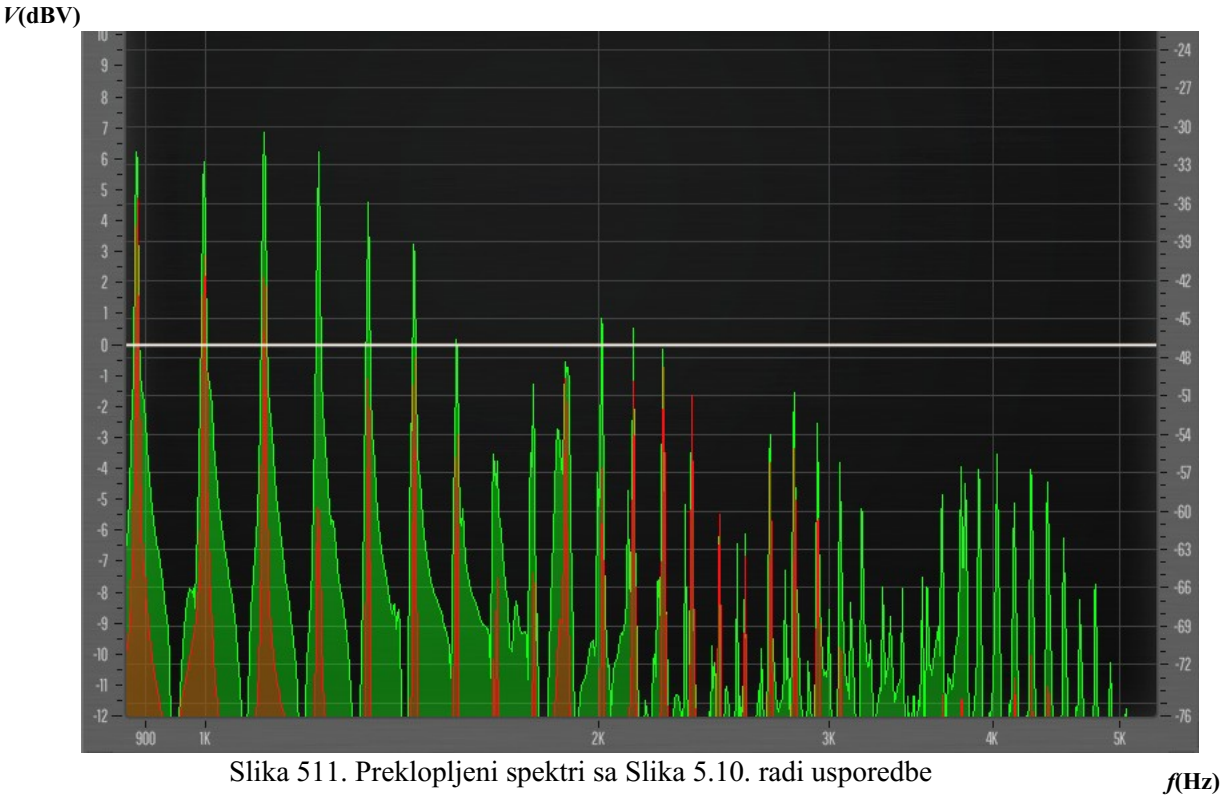
Na spektrima možemo vidjeti fino preklapanje velikog broja harmonika. Poklapanja su vidljiva i u intenzitetu. Ono što ih naime razlikuje je pojava nekoliko novih harmonika na frekvencijama oko 2 kHz i 3.5 kHz. Također su neki harmonici na 1.7 kHz većeg intenziteta. Čujemo da je trzalicom zvuk oštriji, nego kada sviramo prstima, i to točno odgovara frekvencijama kojima pripisujemo prezentnost, oštrinu ili „veći attack”.

Sada možemo promotriti kako položaj trzalice. tj. mjesto trzanja utječe na zvuk i spektre.



Slika 5.10. Spektar tona A odsviranog trzalicom bliže mostu (zeleno) i bliže vratu (crveno)

Trzlicom smo zatitrali žice u dvije pozicije, jedna je bila bliže „neck" pickup zavojnici, a druga bliže „bridge" pickup zavojnici. Vidimo da je kod neck položaja zvuk „topliji" i „zaobljeniji" jer su nam prva dva harmonika izraženiji, većeg intenziteta. Kod bridge pozicije imamo isticanje novih harmonika na frekvencijama između 5 i 10 kHz te su harmonici između 3 i 5 kHz većeg intenziteta. Važno je naglasiti da neki harmonici koji nedostaju u spektru neck pozicije, jesu prisutni, ali su zapravo jako slabi intenzitetom, veoma blizu šuma (noise floor-a) te nisu čujni, tj. ne oblikuju zvučnu sliku.



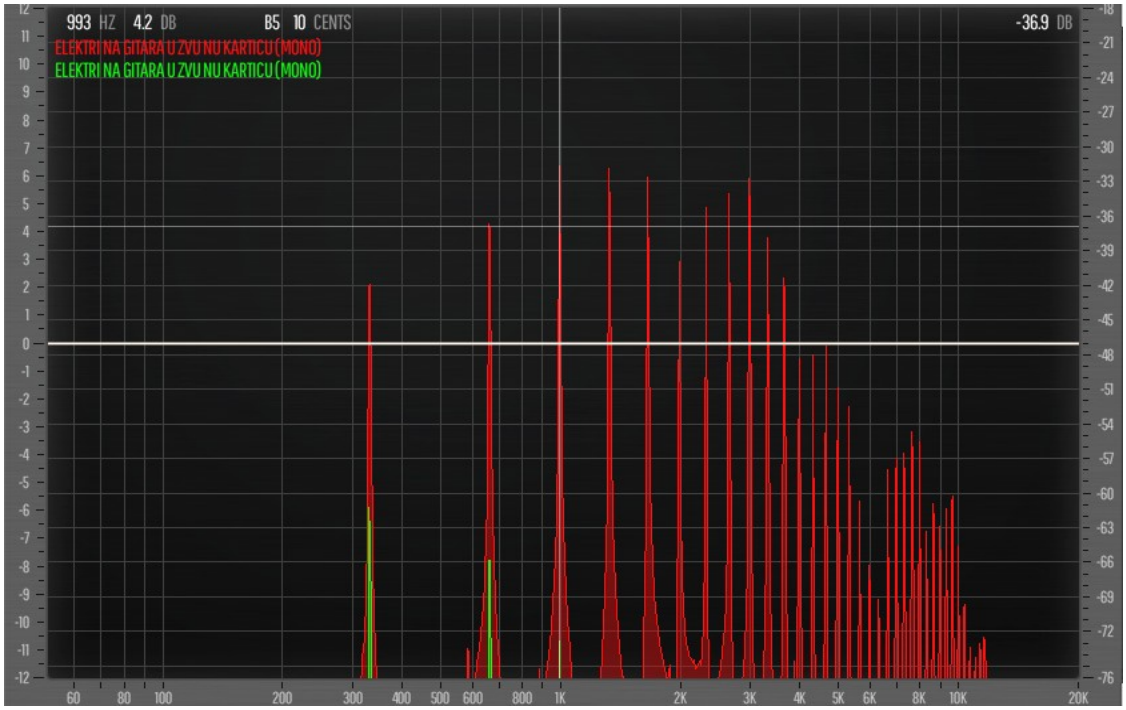
Slika 511. Preklopljeni spektri sa Slika 5.10. radi usporedbe

5.3.2. Rezonancija

Ranije smo napomenuli kako smo u spektru akustične gitare imali pogrešku. tj. pojavu nekih nižih frekvencija i harmonika vjerojatno zbog prisutnosti rezonancije u sustavu. Na sljedećim spektrima možemo konkretno prikazati kako izgleda kada se pojavi rezonancija zbog titranja žice. Rezonancija je pojava kada je frekvencija titranja vanjske pobude jednaka vlastitoj frekvenciji titranja nekog sustava. Tada vanjska pobuda uzrokuje povećanje amplitude titranja tog sustava. Različiti tonovi mogu dijeliti iste harmonike, ti harmonici mogu potaknuti neku drugu žicu na titranje, stoga se mogu zabilježiti frekvencije nekih drugih titranja. Konkretno u našem slučaju smo zatitrali otvorenu žicu e (prva žica, tona E_4) i nakon što smo dlanom zaustavili titranje te žice u spektru smo još primijetili tri harmonika koji su nastavili zvoniti. Ti harmonici su obojeni zeleno i nalaze se na frekvencijama 329 Hz, 660 Hz i 993 Hz te odgovaraju tonovima E_4, E_5 i B_5 (fundamentalni ton, drugi i treći harmonik) . Vidjeli smo da nam je peta otvorena žica, žica A počela titrati potaknuta trzanjem e žice. Usnimili smo spektar te žice te pronašli tražene harmonike u spektru, koji su odgovarali trećem, šestom i devetom harmoniku tona A_2.

Pokazali smo da je postojanje zajedničkih harmonika između dvije žice, trzanjem jedne žice potaknulo i drugu na titranje.

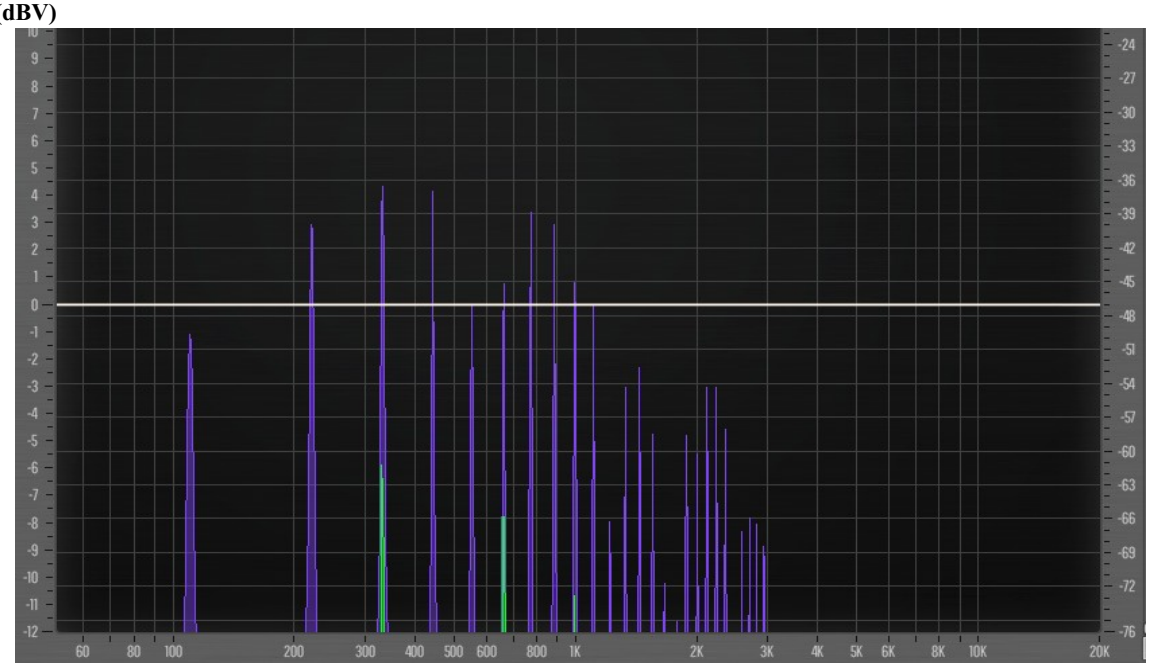
***V*(dBV)**



***f*(Hz)**

Slika 5.12. Spektar tona E (prva žica) (crveno) s istaknutim harmonicima, rezonantnim frekvencijama (zeleno) žice A (peta žica)

***V*(dBV)**

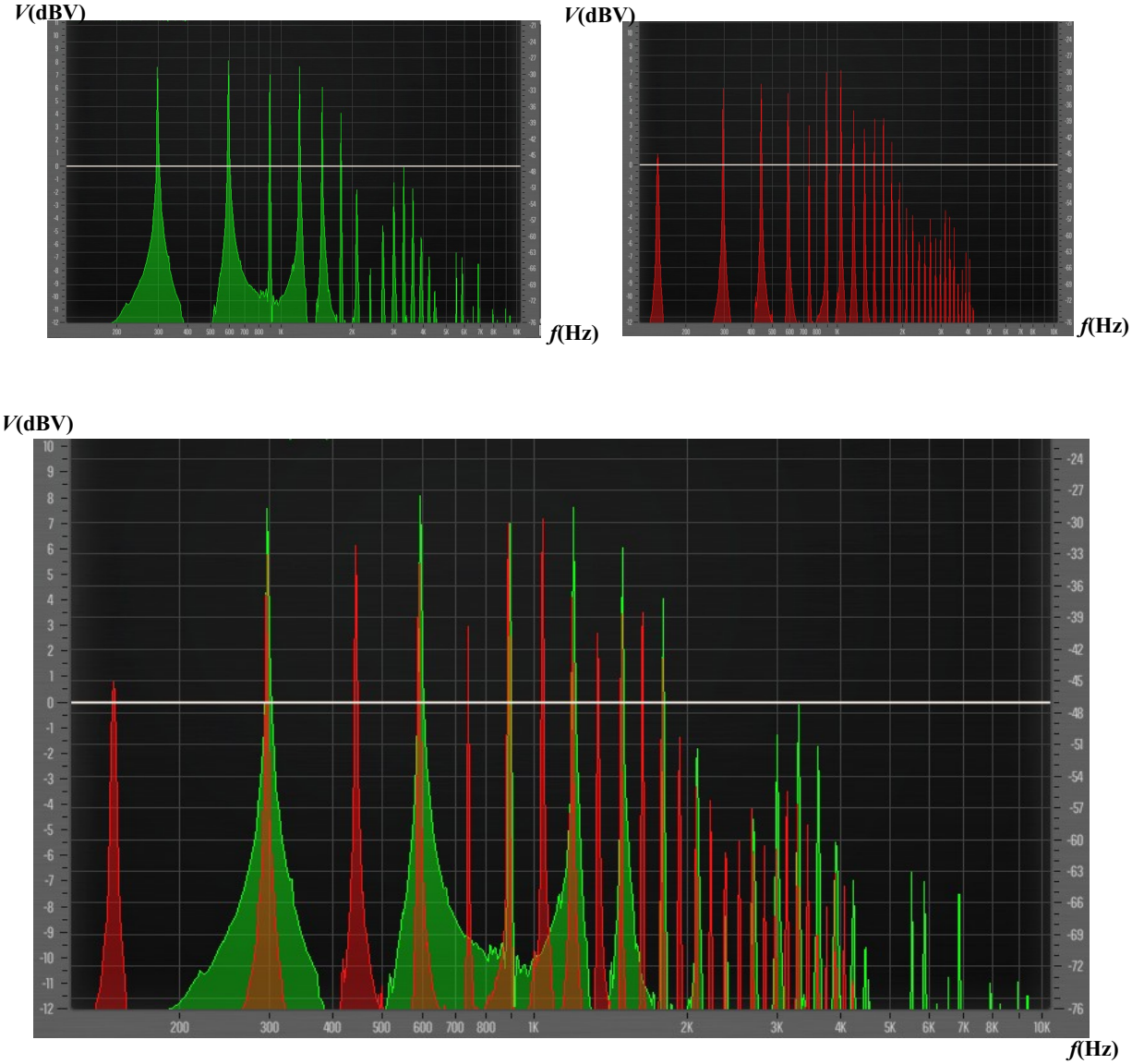


***f*(Hz)**

Slika 5.13. Spektar tona A (ljubičasto) s istaknutim harmonicima (zeleno)

5.3.3. Oktava i alikvotni niz tonova

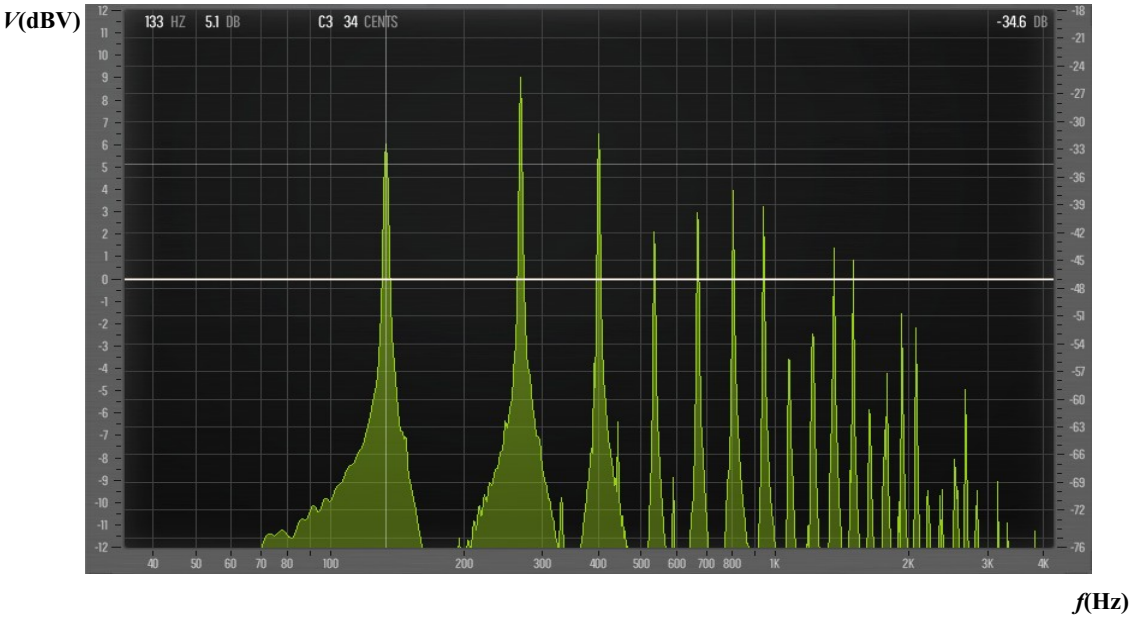
Na sljedećim slikama promatramo spektre odsviranog tona D (otvorena četvrta žica), te tona koji je oktavu više, dakle D_3 i D_4 (treća i četvrta oktava)



Slika 5.14. Spektar tona D_3 i tona D_4 za oktavu više

Usporedbom dvaju spektara sada možemo zaključiti zašto ton odsviran za oktavu više od prvotnog tona, zvuči slično kao i prvotni ton. Naime svi harmonici višeg tona se u potpunosti preklapaju s harmonicima nižeg tona. Niži ton zvuči naravno dublje jer ima fundamentalnu frekvenciju koja je najniža u cijelom spektru, te zvuči punije jer zadrži veći

broj viših harmonika koji se nalaze u low-mid i high-mid frekvencijskom spektru. Spektar višeg tona naravno posjeduje više harmonika u gornjem dijelu spektra.



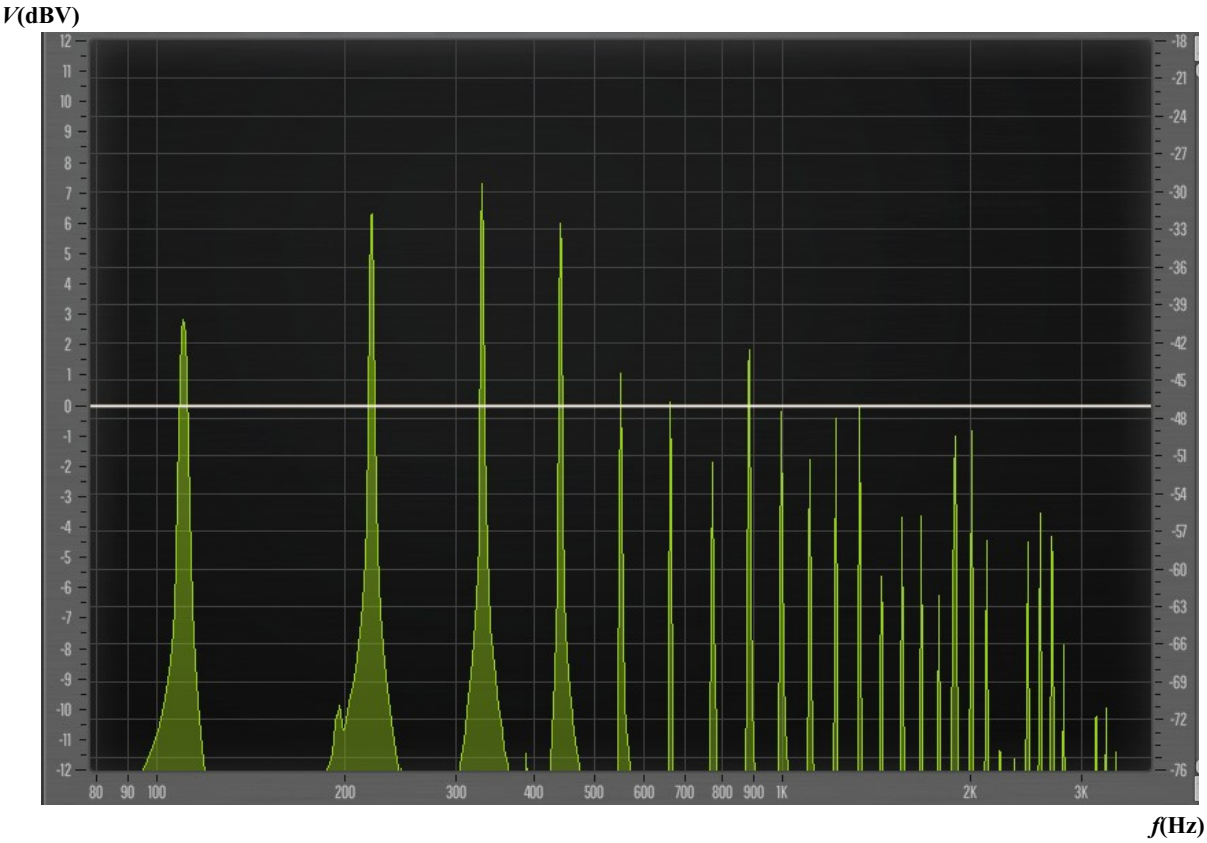
Slika 5.15. Spektar tona C s prisutnim višim harmonicima (alikvotama)

Slika 5.16. Vrijednosti frekvencija viših harmonika, nazivi odgovarajućih tonova i odstupanje u centima

U prethodnim poglavljima smo spomenuli alikvotni niz tonova, pojam iz glazbene teorije, i kako on odgovara zapravo višim harmonicima odsviranog tona. Ovaj spektar prikazuje ton C_3, fundamentalne frekvencije 130 Hz, i njegove više harmonike koji odgovaraju redom tonovima C4, G4, C5, E5, G5, B5 (A#5) i C6. Slika 4.2. Vidimo da je naša žica ipak bila malo više naštimana od uobičajene vrijednosti, te se vidi pogreška i odstupanje u svakom harmoniku. Odstupanje je prikazano u centima.

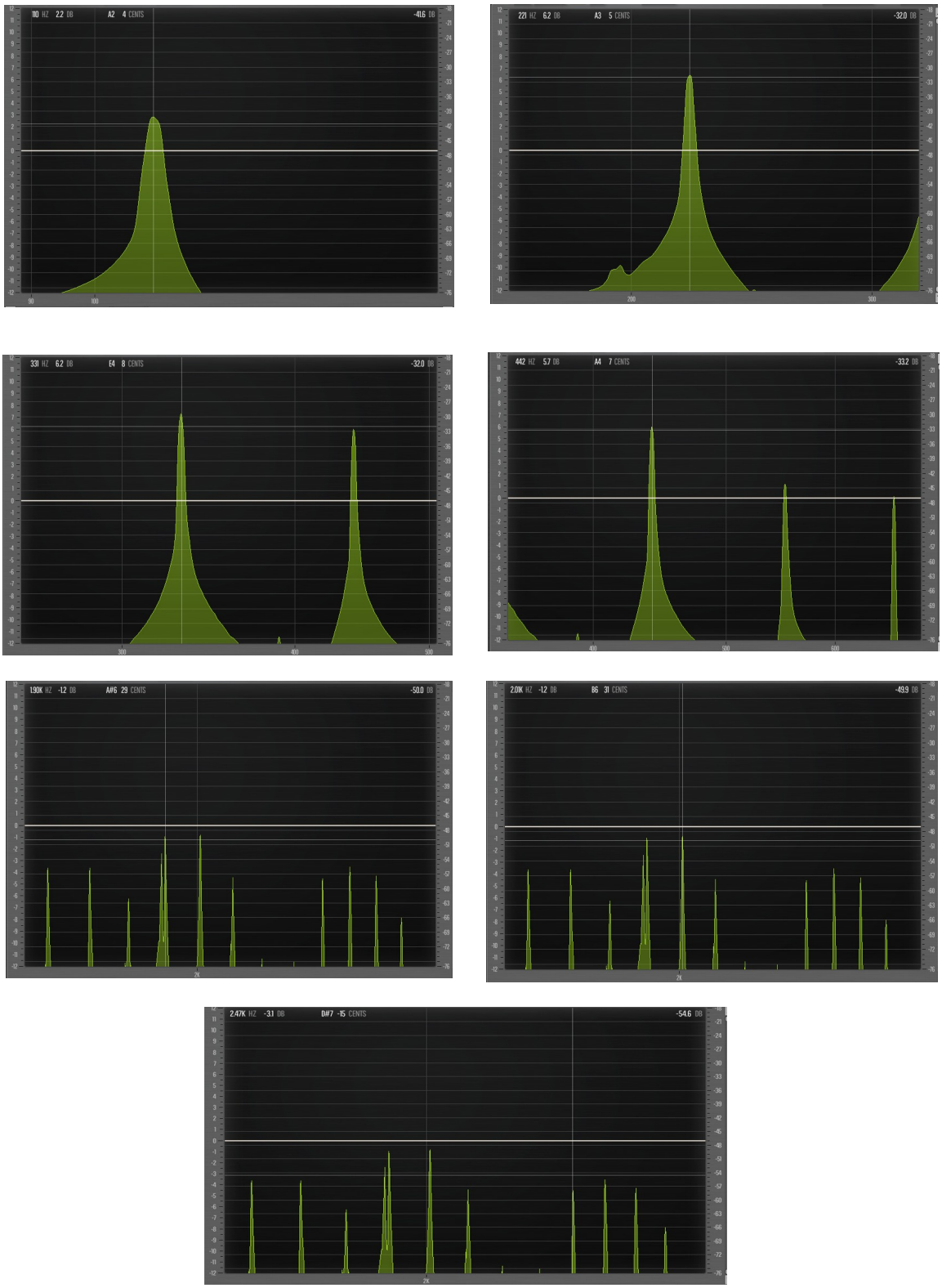
5.3.4. Neharmoničnost spektra

Dalje možemo promatrati neharmoničnost u spektru. Tj. pojavu da se viši harmonici kod žičanih instrumenata, zbog gušenja i krutosti žica pomiču u spektru prema višim vrijednostima.



Slika 5.17. Spektar tona A_2 gdje je vidljiv pomak u harmonicima prema višim vrijednostima (neharmoničnost)

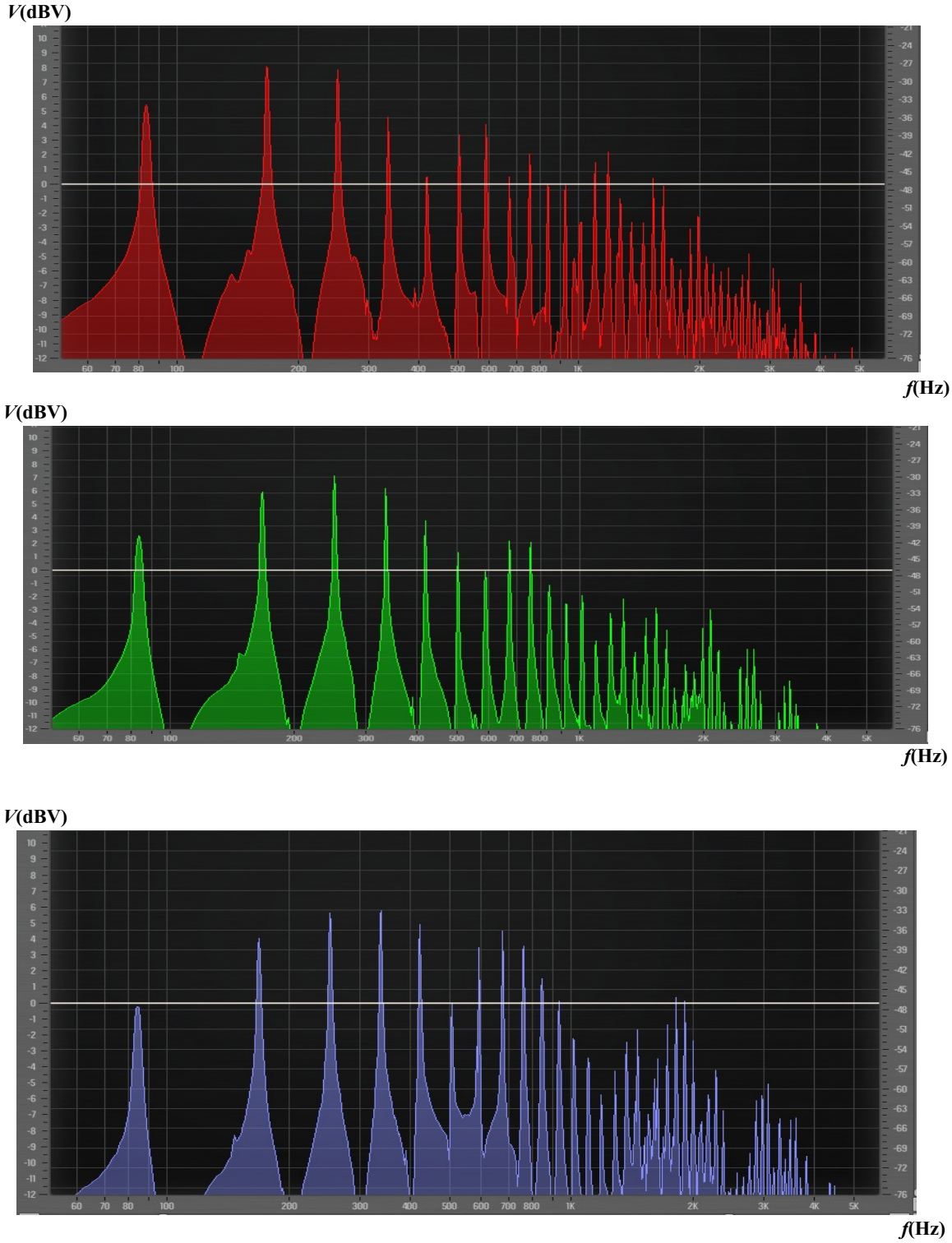
Prvih nekoliko harmonika tona A_2 jesu zapravo harmonici u pravom smislu riječi i njihovu frekvenciju možemo dobiti množenjem rednog broja harmonika s fundamentalnom frekvencijom osnovnog tona, a to je 110 Hz. Te redom dobijemo frekvencije 220, 330, 440, 550 Hz itd. Ako pogledamo harmonike višeg reda, primjerice 17., 18. i 22. harmonik vidimo da njihove frekvencije ne odgovaraju direktnim množenjem s fundamentalnom frekvencijom. Očekujemo vrijednosti od 1870, 1980 i 2420 Hz, a iz spektra očitavamo vrijednosti od 1900, 2010 i 2470 kHz. Što nam daje odstupanje od čak 50 Hz. Harmonici višeg reda, većih frekvencija su kao što smo već ranije zaključili zapravo anharmonici.



Slika 5.18. Vrijednosti harmonika koji se nisu pomaknuti u spektru, i vrijednosti anharmonika koji su pomaknuti u spektru

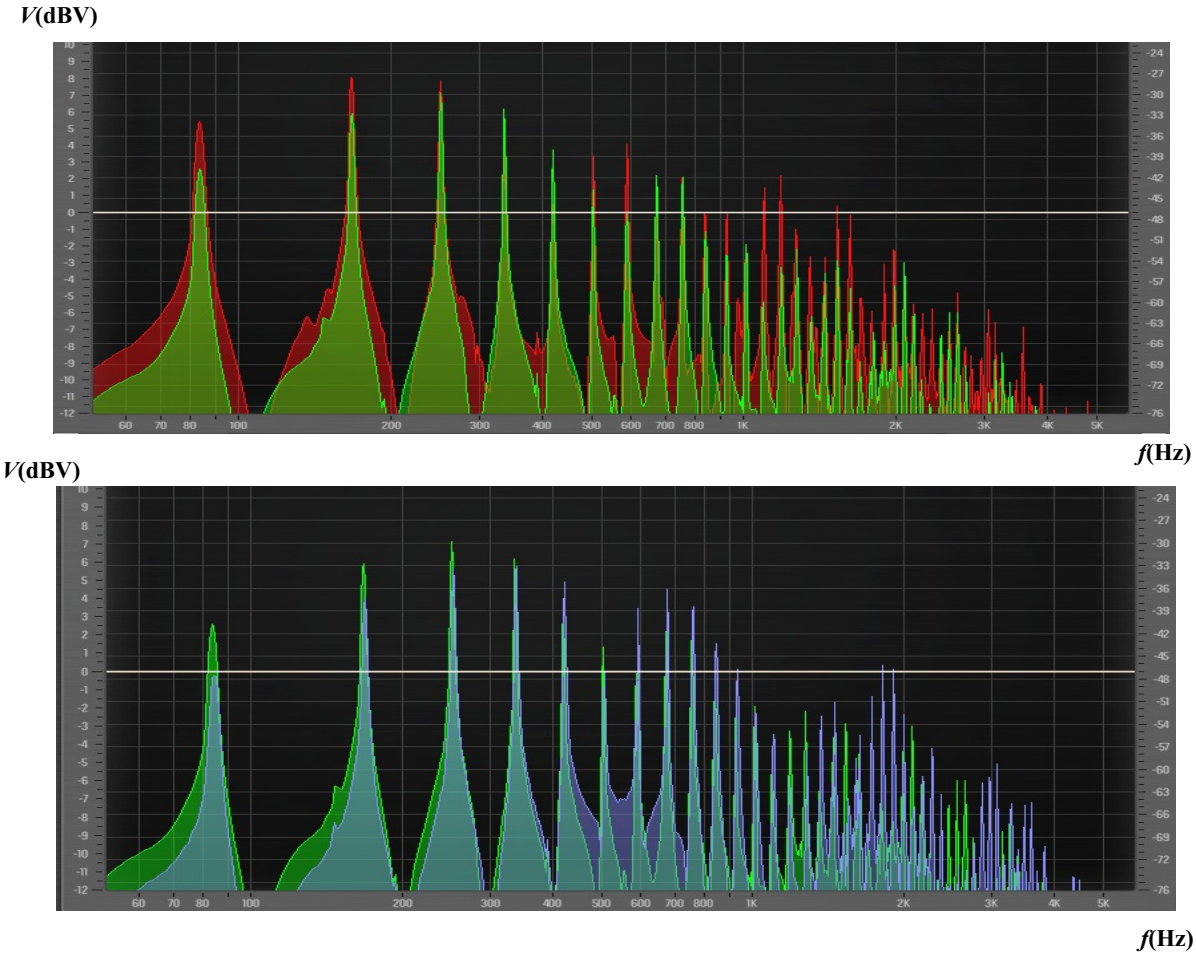
5.3.5. Pickup zavojnica

Konačno možemo promotriti utjecaj pickup zavojnice na zvučnu sliku.



Slika 5.19. Spektar tona E odsviran na tri različita pickup-a, bridge (crveno), middle (zeleno) i neck (ljubičasto)

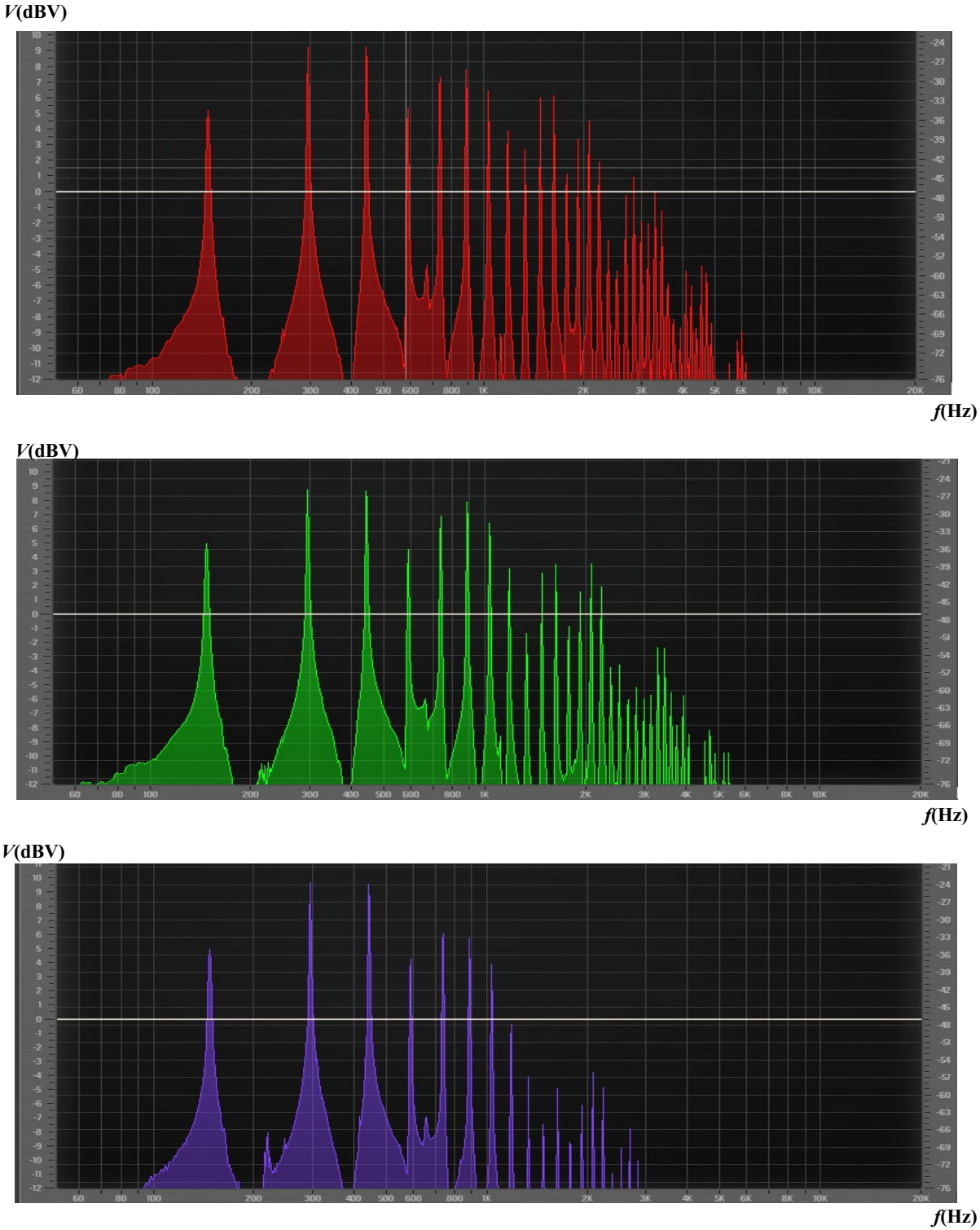
Na prethodnim slikama vidimo spektre tri različite pickup zavojnice. Svaka od njih daje svoju boju i zvučno se razlikuju jedan od drugih. Na usporednim spektrima odmah možemo primijetiti intenzitet prva tri harmonika. Vidimo da je zbog svoje pozicije „neck" pickup zavojnica najviše ističe niske frekvencije, te hvata veći dio amplitude titranja tih harmonika. Potom slijedi „middle" pickup zavojnica, i na kraju „bridge" pickup zavojnica koja najmanje hvata amplitude osnovnog tona, drugog i trećeg harmonika. Stoga je i „neck" pickup najglasniji, zatim „middle" pa „bridge". „Bridge" pickup ima najizraženije visoke harmonike na frekvencijama oko 2 do 4 kHz te stoga zvuči „oštrije" i „svjetlije" od ostalih pickupa. Neck pickup zbog izraženosti prvih harmonika, te manje izraženosti harmonika pri frekvencijama oko 3 kHz zvuči „toplije", „tamnije" ili „zaobljeno". „Middle" pickup pozicijski ali i zvučno upada negdje između prethodna dva pickupa, te djeluje zvučno izbalansirano.



Slika 5.20. Preklopljeni spektri sa Slika 10.15. radi usporedbe

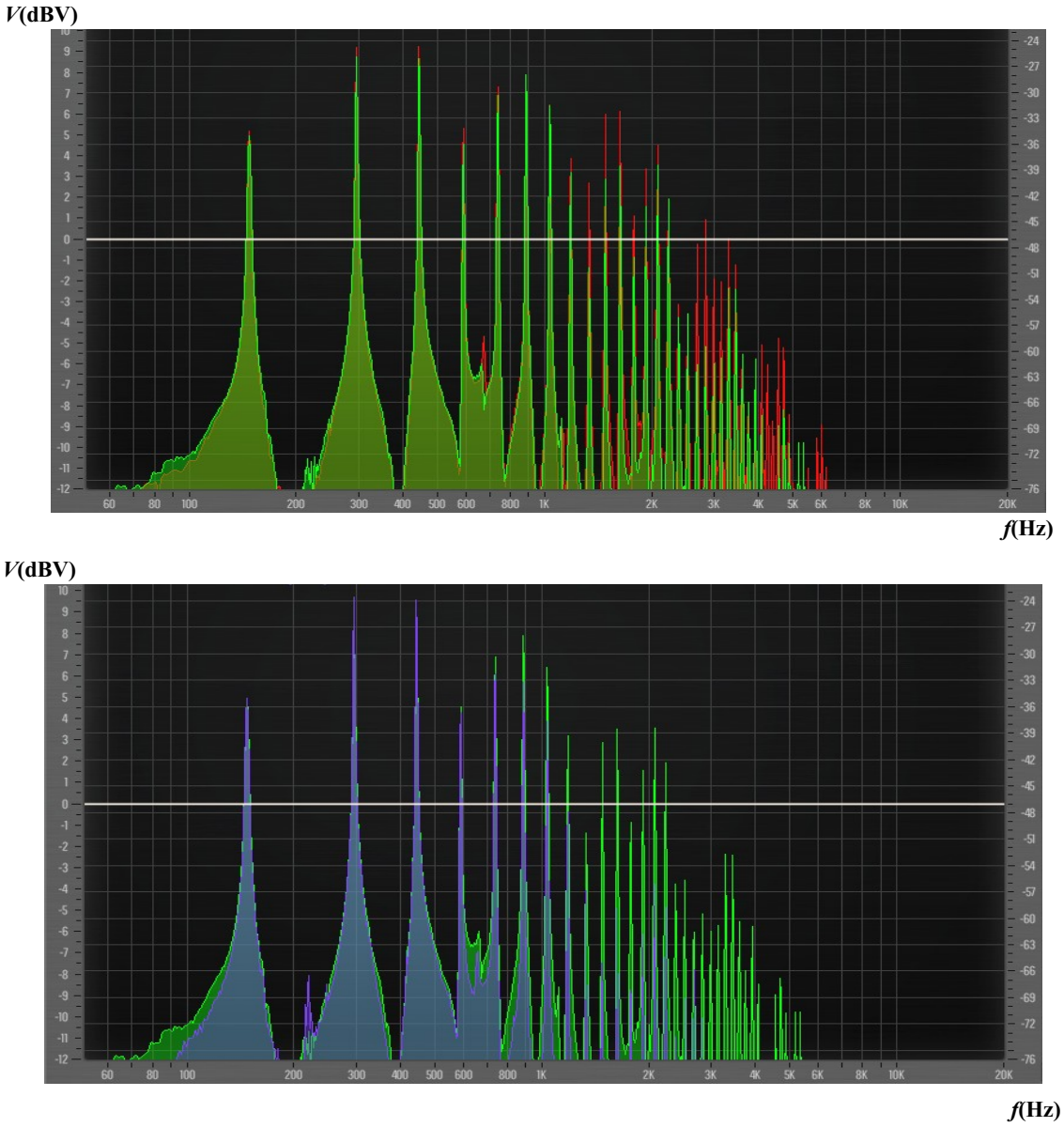
5.3.6. Ton blenda

Promatrali smo također utjecaj ton blende na spektar i zvučnu sliku.



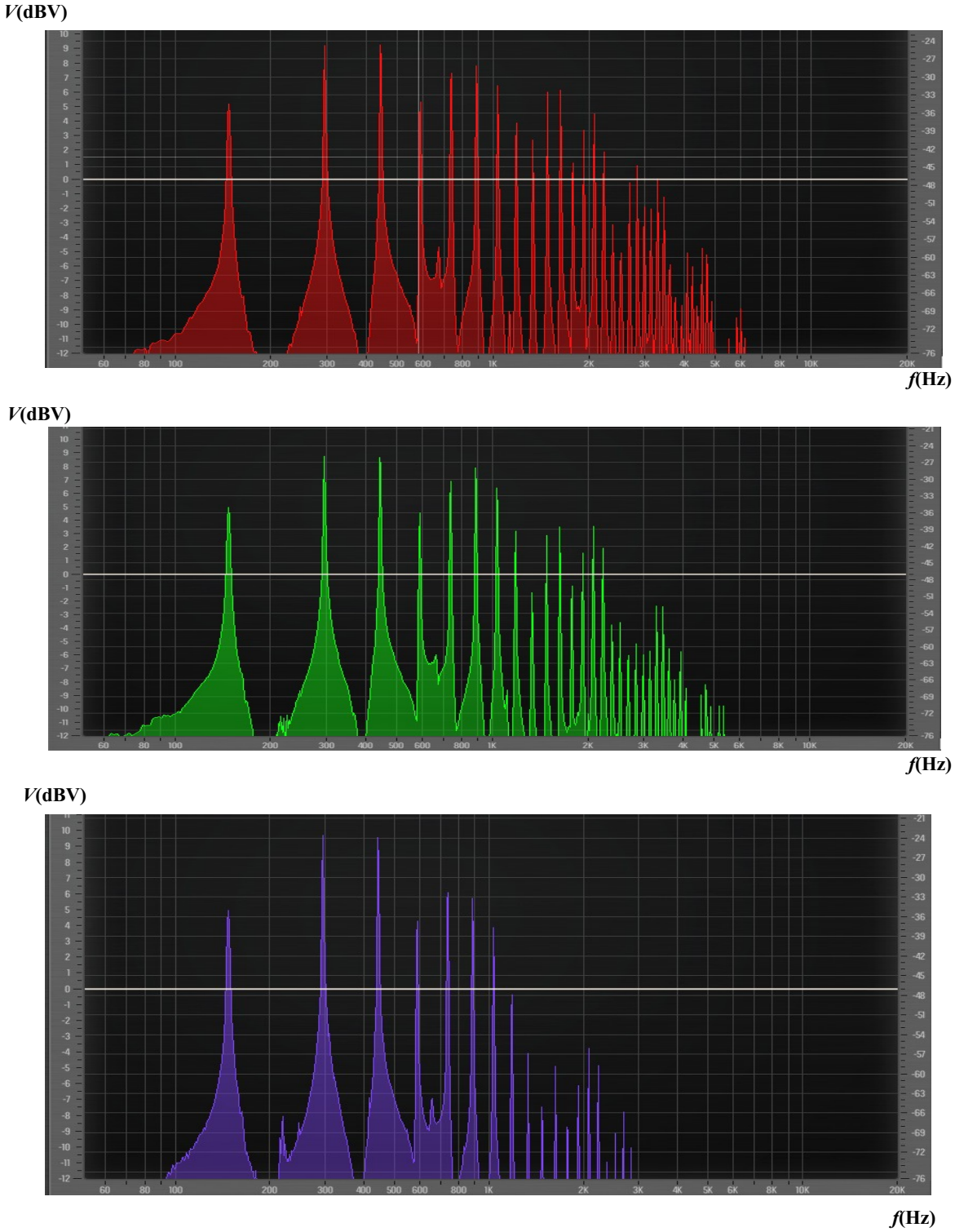
Slika 5.21. Spektar tona odsviran koristeći tri pozicije ton blende: 10 (crveno), 5 (zeleno) i 1 (ljubičasto) Bridge pickup

Ton blendu smo postavili u pozicije 1, 5 i 10. U poziciji deset filter najmanje zahvaća frekvencije i vidimo širu sliku i veći spektar. Pomičući se prema poziciji 1 filter reže više frekvencija. Konkretno ovaj filter je visokopropusni, tj low-cut. U poziciji 10 zbog postajanja više harmonika, zvuk je svjetliji otvoreniji, dok je u poziciji 1 dosta taman. Gornja ton blenda se odnosila na „neck" pickup, dok je donja mijenjala zvuk „middle" pickup-a. „Bridge" pickup nije imao svoju designiranu ton blendu.

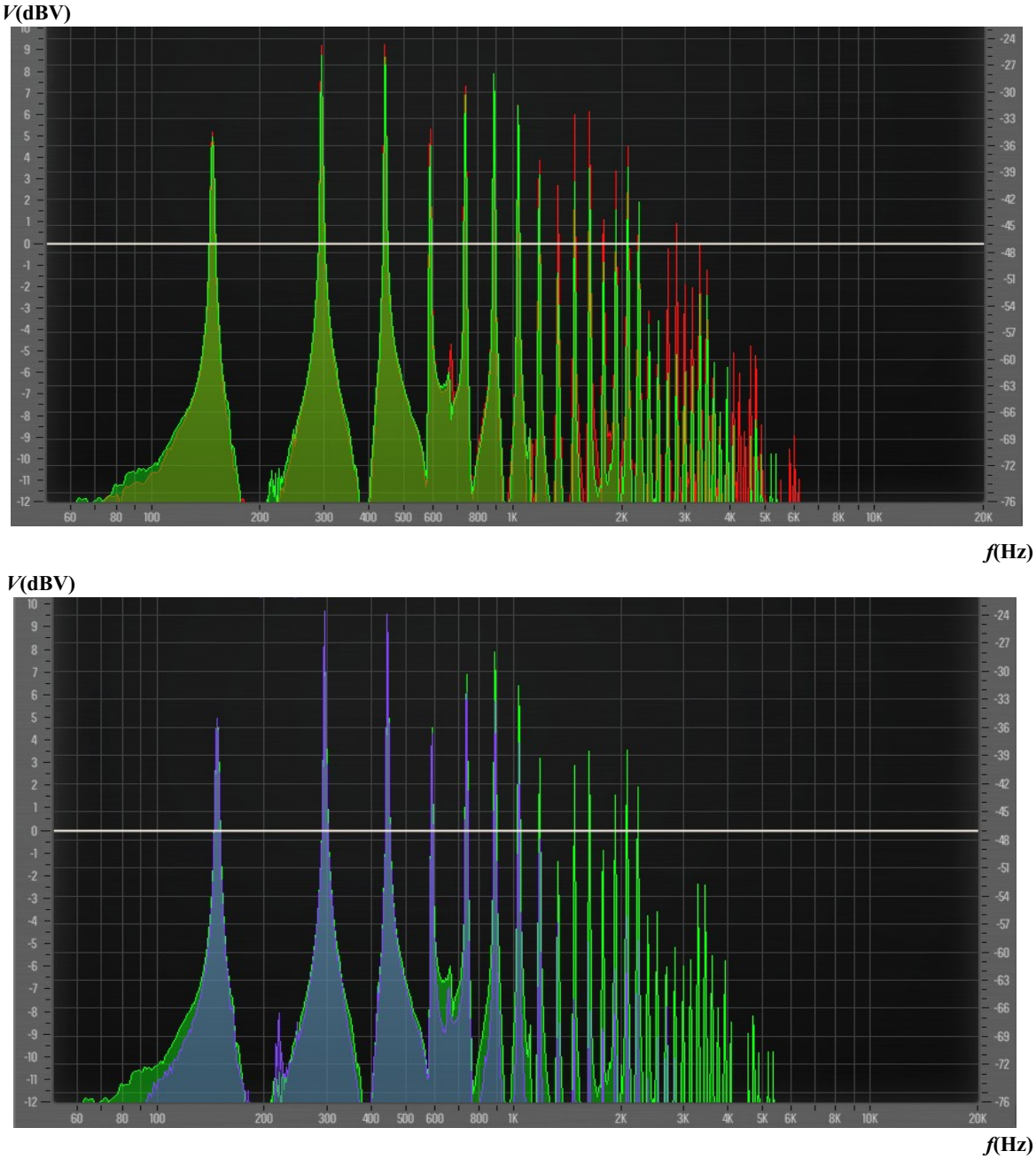


Slika 5.22. Preklopljeni spektri sa Slika 5.21. radi usporedbe

Mjerenja smo napravili za obje ton blende.



Slika 5.23. Spektar tona odsviran koristeći tri pozicije ton blende: 10 (crveno), 5 (zeleno) i 1 (ljubičasto) „Middle" pickup

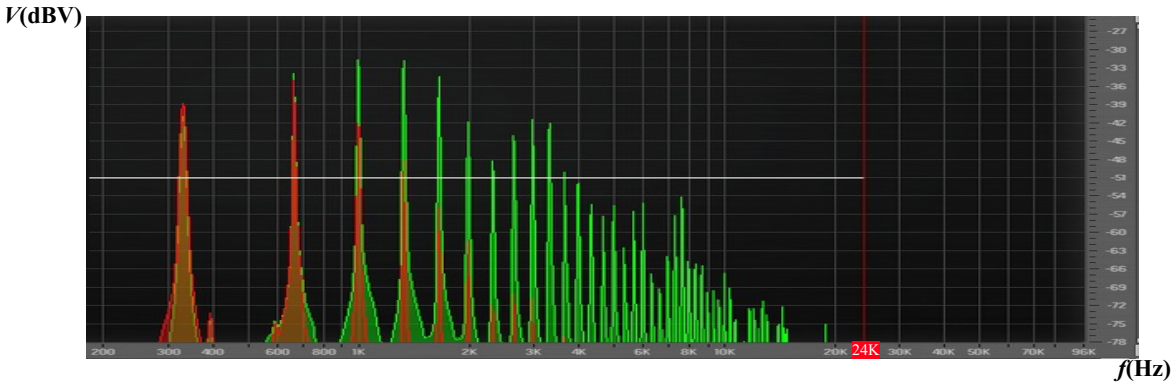


Slika 5.24. Preklopljeni spektri sa Slika 10.19. radi usporedbe

Vidimo da ton blenda middle pickup-a nije toliko agresivna, i tek približavanjem krajnjim položajima pokazuju neku značajnu razliku u zvuku.

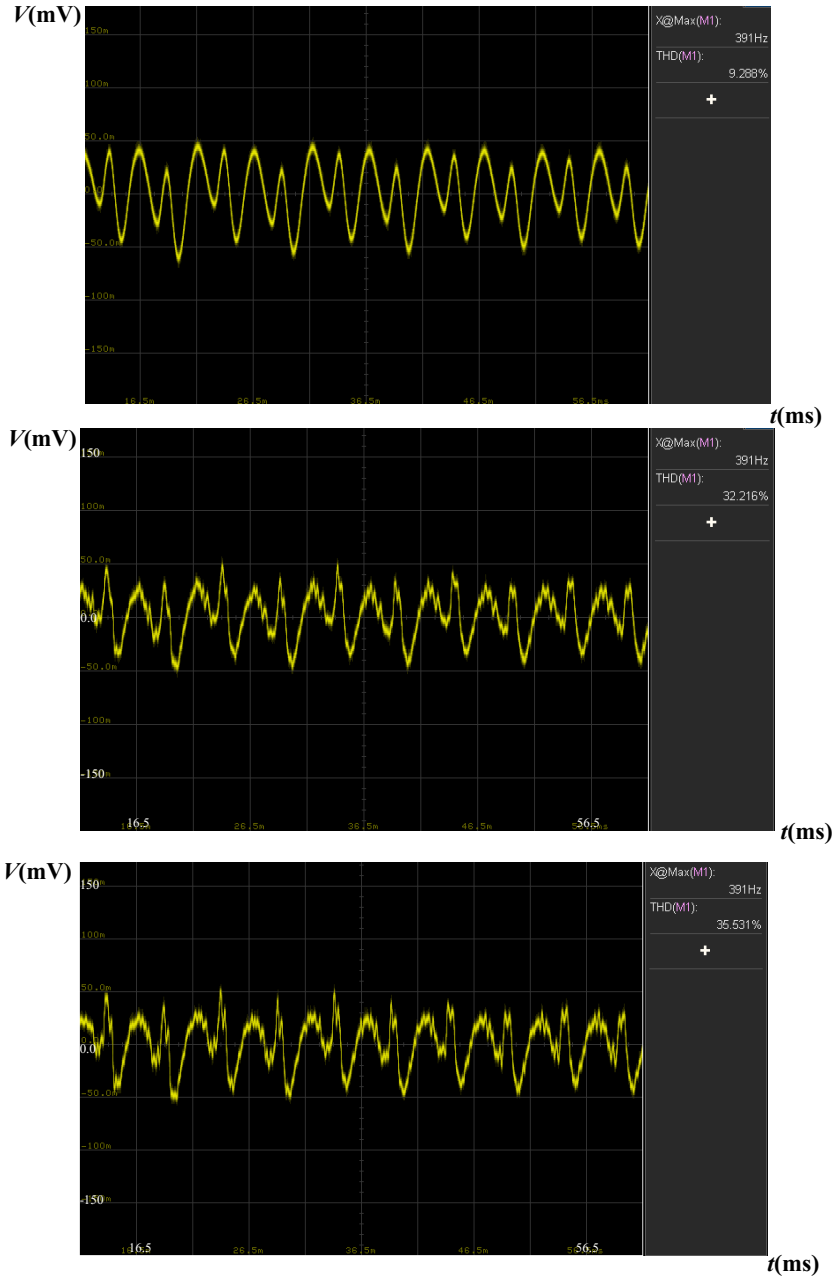
Sljedeća slika prikazuje još jedan primjer kako ton blenda (filter) djeluje na spektar tona e, koji daje harmonike koji se kreću i do frekvencija od 20 kHz. Ovaj primjer je zanimljiv jer na njemu vidimo i crvenu vertikalnu liniju koja nam predstavlja zonu preslikavanja (engl. aliasing). Naime, napomenuli smo da je u analogiji zbog matematike zabranjena prisutnost

nižih harmonika tj. undertones. Međutim u digitalnom svijetu je moguće da se oni pojave.. Da bi mi naš signal što kvalitetnije prikazali u digitalnoj domeni, potreban nam je jako dobar AD/DA konverter, tj. konverter s dovoljno velikim sample rate-om (uzorkovanje). Sample rate nam omogućuje da što više frekvencija iz analogne domene prebacimo u digitalnu. Konkretno, naša zvučna kartica je radila na sample rate-u od 48 kHz, što znači da ona može prikazati frekvencije od 0 do 24 kHz (sample rate podijeljen s dva jer zvučni val ima svoju maksimalnu pozitivnu i negativnu amplitudu).Crvena linija se upravo nalazi na frekvenciji od 24 kHz. Na prvu djeluje da je to dovoljno velik sample rate. Jer ljudsko uho čuje frekvencije do 20 kHz, maksimalno, i to u mladosti. Međutim, u slučaju kada koristimo mnogo saturacije, distorzije, overdrive-a i slično, u spektru nam se pojavljuje i mnogo više harmonika. Ponekad ti harmonici ne moraju biti velikog intenziteta, ili čak čujni. Problem nastaje ako oni prijeđu vrijednost barijere (crvena linija) koja se naziva Nyquistova frekvencija. Tada dolazi do pojave aliasinga i preslikavanja frekvencija. Ako primjerice radimo na sample rate-u od 32 kHz, naša barijera se nalazi na 16 kHz. Zamislimo da sada imamo harmonike koji se nalaze na 20 kHz: Oni se u digitalnoj domeni neće stvoriti na toj frekvenciji, jer konverter ne može obaviti taj dio konverzije, i taj zvuk se neće reproducirati, već će se harmonik preslikati na suprotnu stranu, za onoliko koliko se nalazi iznad barijere.. U našem slučaju preslikavanje će se pojaviti na frekvenciji od 12 kHz što nam dosta mijenja zvučnu sliku. Filteri su u tom slučaju dosta korisni za eliminiranje nekih frekvencija koje nam samu mogu poremetiti zvučnu sliku. Mi smo u našim mjerenjima koristili tonove nižih frekvencija, da budemo sigurni kako neće doći do stvaranja novih harmonika zbog aliasing, već zbog efekata koje smo zapravo htjeli istražiti.



Slika 5.25. Spektar uz ton blendu na poziciji 1(crveno) i 10 (zeleno) uz vidljivu crvenu liniju aliasing-a na 24 kHz

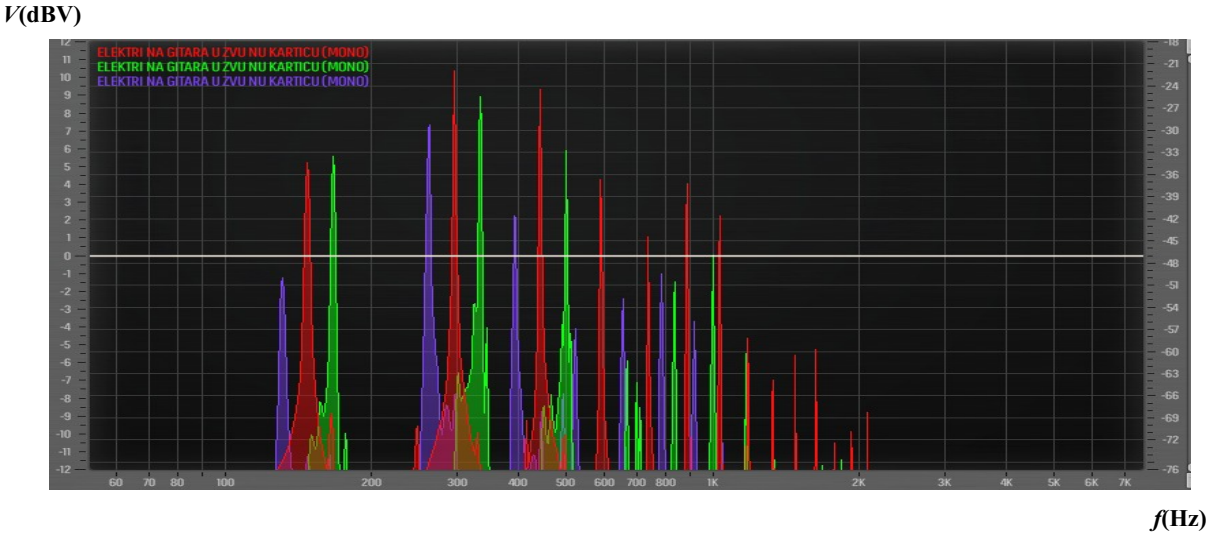
Utjecaj ton blende možemo prikazati i preko grafova koji prikazuju oblik vala, Prvi signal dosta podsjeća na čisti sinusni signal, kada filter eliminira najveći broj frekvencija, a na sljedećim je broj viših harmonika prisutniji. Svaki „nazubljeni" dio vala prikazuje neku od frekvencija. Također smo i mjerili THD vrijednost i iz njenog postotka vidjeli gdje je prisutna veća kolorizacija signala zbog većeg broja harmonika.



Slika 5.26. Utjecaj ton blende na valne oblike tona g (pozicija 1,5 i 10)

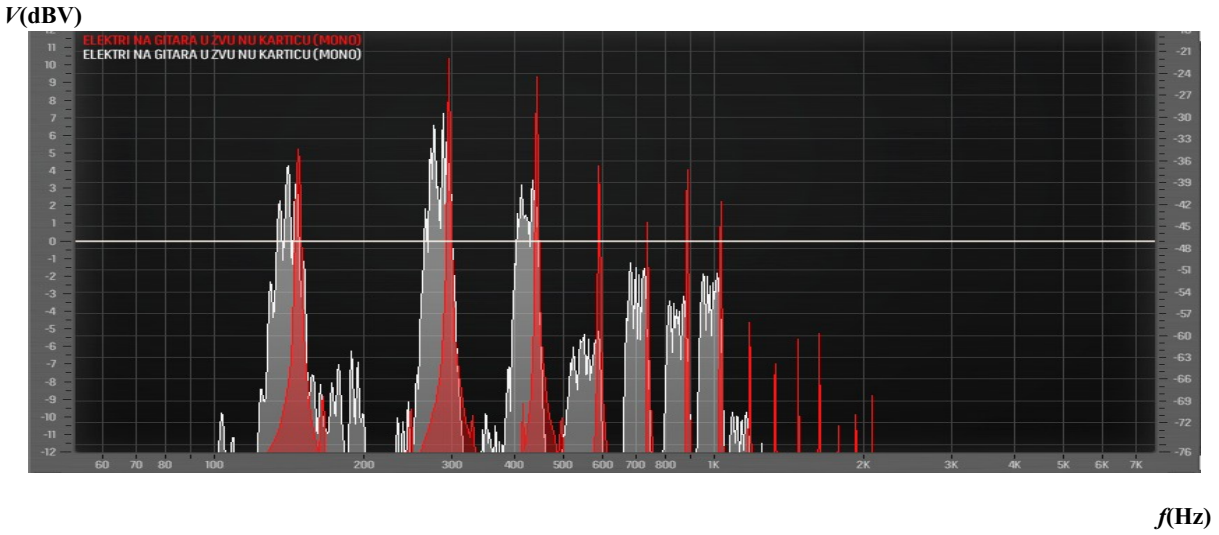
5.3.7. Tremolo ručica

U sljedećem mjerenju smo pokazali tvrdnju iz početnih poglavlja, da tremolo ručica zapravo služi za postizanje efekta vibrata, a ne tremola.



Slika 5.27. Spektar tona odsviranog: bez korištenja tremolo ručice (crveno), uz tremolo ručicu povučenu od gitare (zeleno) i tremolo ručicu približenu gitari (ljubičasto)

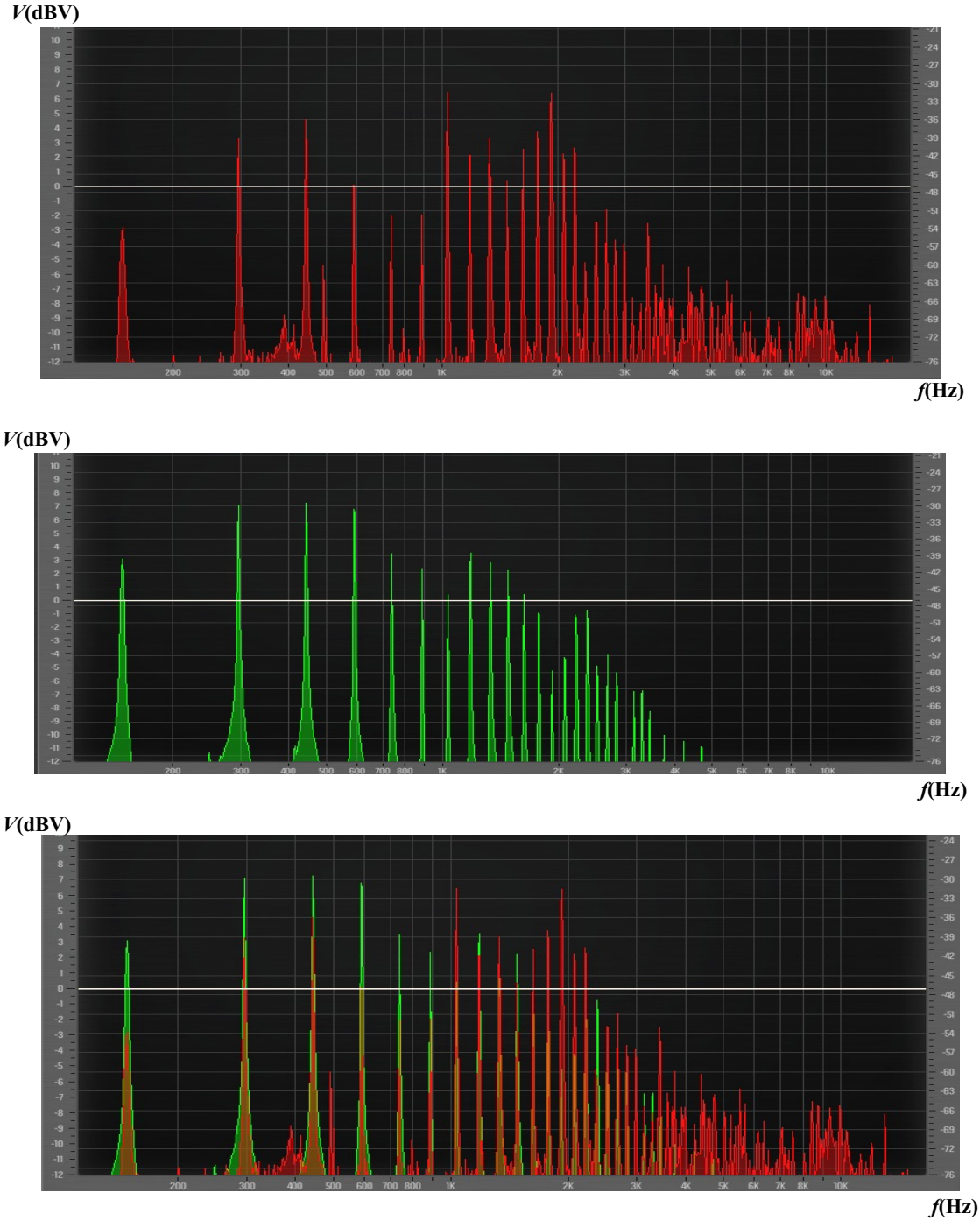
Crveni spektar prikazuje odsvirani ton bez utjecaja ručice. Zeleni spektar prikazuje situaciju kada ručicu povlačimo od gitare (natežemo žice, povećamo frekvenciju), a ljubičasti spektar kada ručicu primičemo gitari i otpuštamo žice (smanjujemo frekvenciju). Na sljedećoj slici vidimo isti efekt ali realni prikaz kako izgleda upotreba ručice.



Slika 5.28. Spektar tona odsviranog bez tremolo ručice i spektar tona na koji je primijenjena tremolo ručica

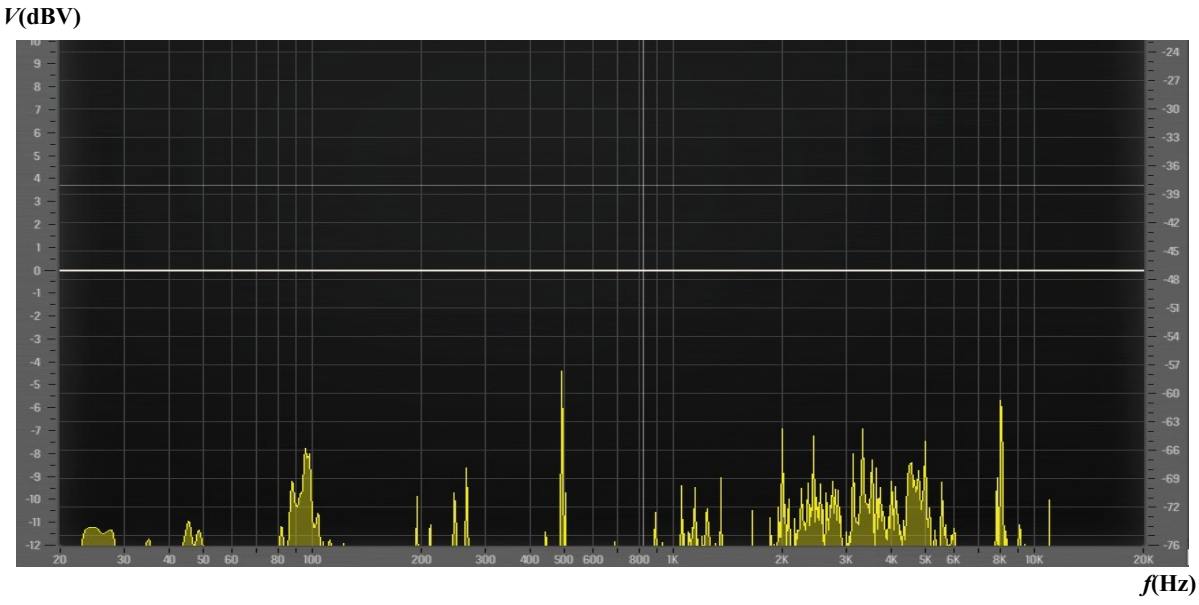
5.3.8. DI signal i zvuk žice

Sljedeće mjerenje prikazuje razliku između spektra usnimljenog spajanjem gitare u zvučnu karticu (D) i spektra koji nastaje kada mikrofon približimo gitari i usnimimo zvuk titranje žice.



Slika 5.29. Spektar tona usnimljenog direktno u zvučnu karticu, DI signal, (zeleno) i spektar tona nastao usnimavanjem zvuka žice preko mikrofona (crveno)

Vidimo da se spektri uglavnom podudaraju, uz razliku na području od 4 do 10 kHz, gdje imamo prisutnost novih harmonika, koji u DI spektru nisu vidljivi. Taj dio spektra zapravo više odgovara šumu koji se javlja jer smo pretpojačalo koje je služilo za pojačanje mikrofona otvorili do kraja. Maksimalno smo podigli noise floor, tj šum. Također je mikrofon postao osjetljiviji na bilo kakvu buku iz okoline, te mu se promijenio i polar pattern. Još jedan razlog zbog kojih su navedene frekvencije istaknute je i taj što mikrofon na tom području u svom frekvencijskom odzivu, ima isticanje, tj EQ „boost", u obliku zvona (bell). A razlog zbog kojih je fundament nešto nižeg intenziteta odgovara „low-cut"-u koji se pojavljuje u frekvencijskom odzivu. Na sljedećoj slici vidimo usnimljen šum kao posljedica pojačanja pretpojačala na maksimalnu vrijednost. „Gain" na pretpojačalu smo morali dosta podići jer je mikrofonski signal sam po sebi slabiji od nekakvog linijskog ili u slučaju gitare instrumentalnog signala. A i titranje žice je također dosta tiho, i za razliku od akustične gitare, električna ne posjeduje rezonantno tijelo, koje bolje iskorištava energiju titranja žice.



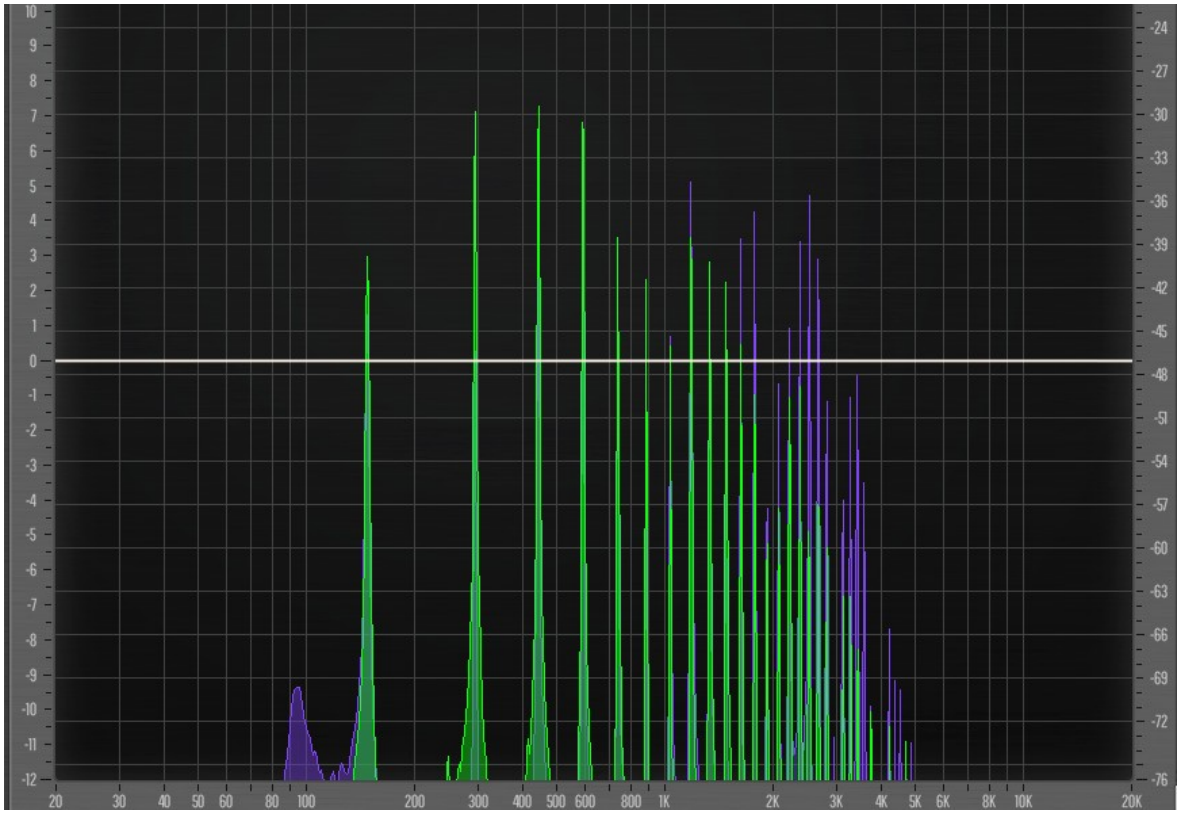
Slika 5.30. Šum nastao kod maksimalnog gain-a na pretpojačalu

Na 500 Hz se vidi peak koji se pojavljuje u spektru gdje je korišten mikrofon, ali taj peak ne postoji u DI snimci. Taj peak dolazi od šuma, kao što je i vidljivo u spektru.

5.3.9. Pojačalo i distorzija

Dalje možemo uspoređivati spektre iz DI snimke i snimke gdje smo mikrofon približili pojačalu. Na pojačalu smo koristili prvi kanal, koji ćemo zvati „clean" kanal. Na njemu možemo mijenjati samo „volume" kontrolu.

***V*(dBV)**



***f*(Hz)**

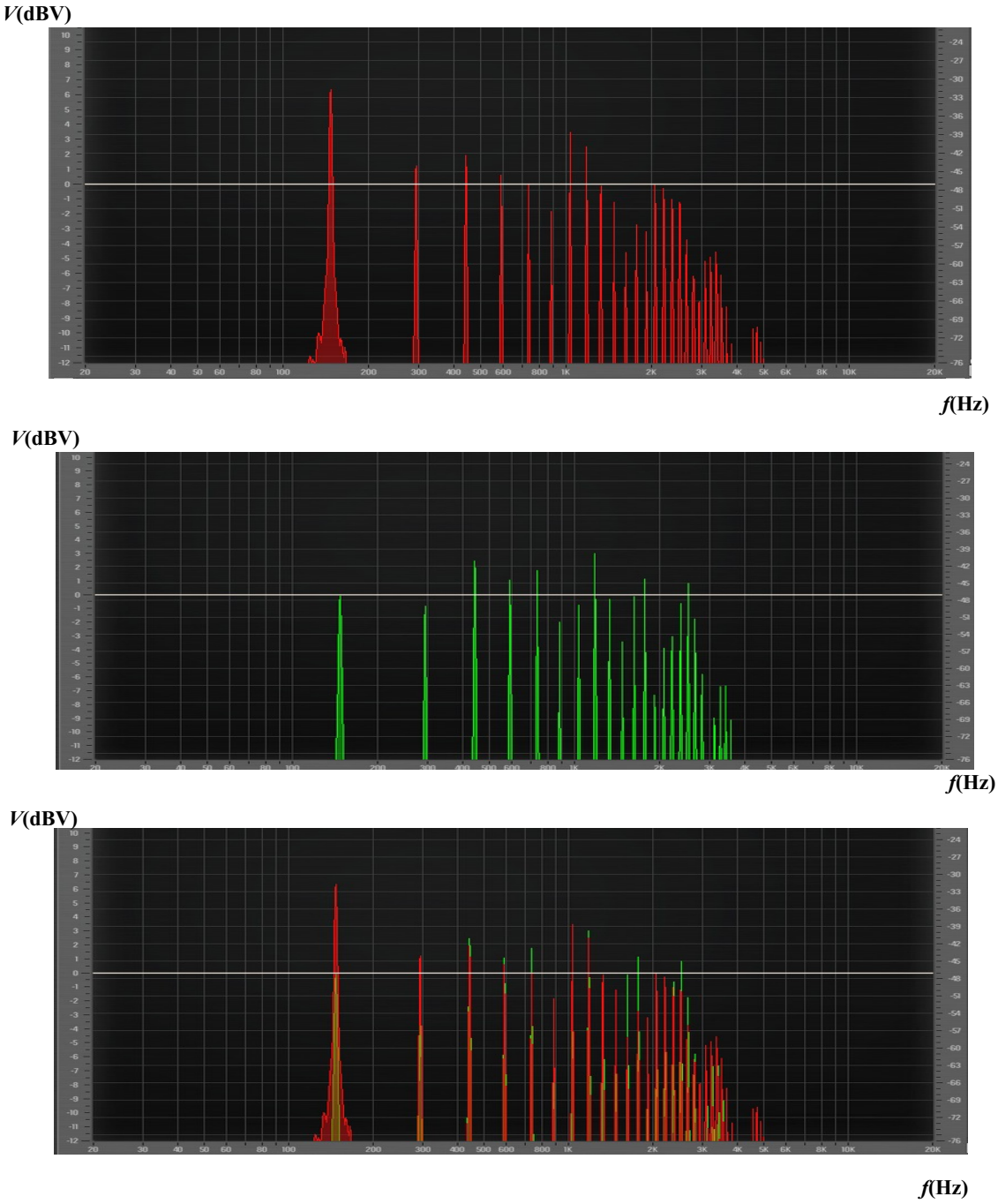
Slika 5.31. Spektar tona usnimljenog direktno u zvučnu karticu, DI signal, (zeleno) i spektar tona nastao snimanjem clean kanala pojačala preko mikrofona (ljubičasto)

Vidimo da se spektri podudaraju u svim harmonicima. Razlika je jedino vidljiva pri 3 do 4 kHz gdje su harmonici većeg intenziteta. Razlog je opet frekvencijski odziv mikrofona. Vidimo da pojačalo na clean kanalu daje dosta transparentan/flat odziv, ne daje karakter i boju signalu.

Daljnja mjerenja odnose se na usporedbu prvog kanala pojačala (clean kanal) i drugog kanala koji uz *volume* kontrolu i posjeduje *gain* potenciometar. Uz to također nalazimo i

treble, te bass ton blendu, te različite postavke (imitacije) poznatih Fenderovih pojačala. Drugi kanal ćemo smatrati kanalom za distorziju.

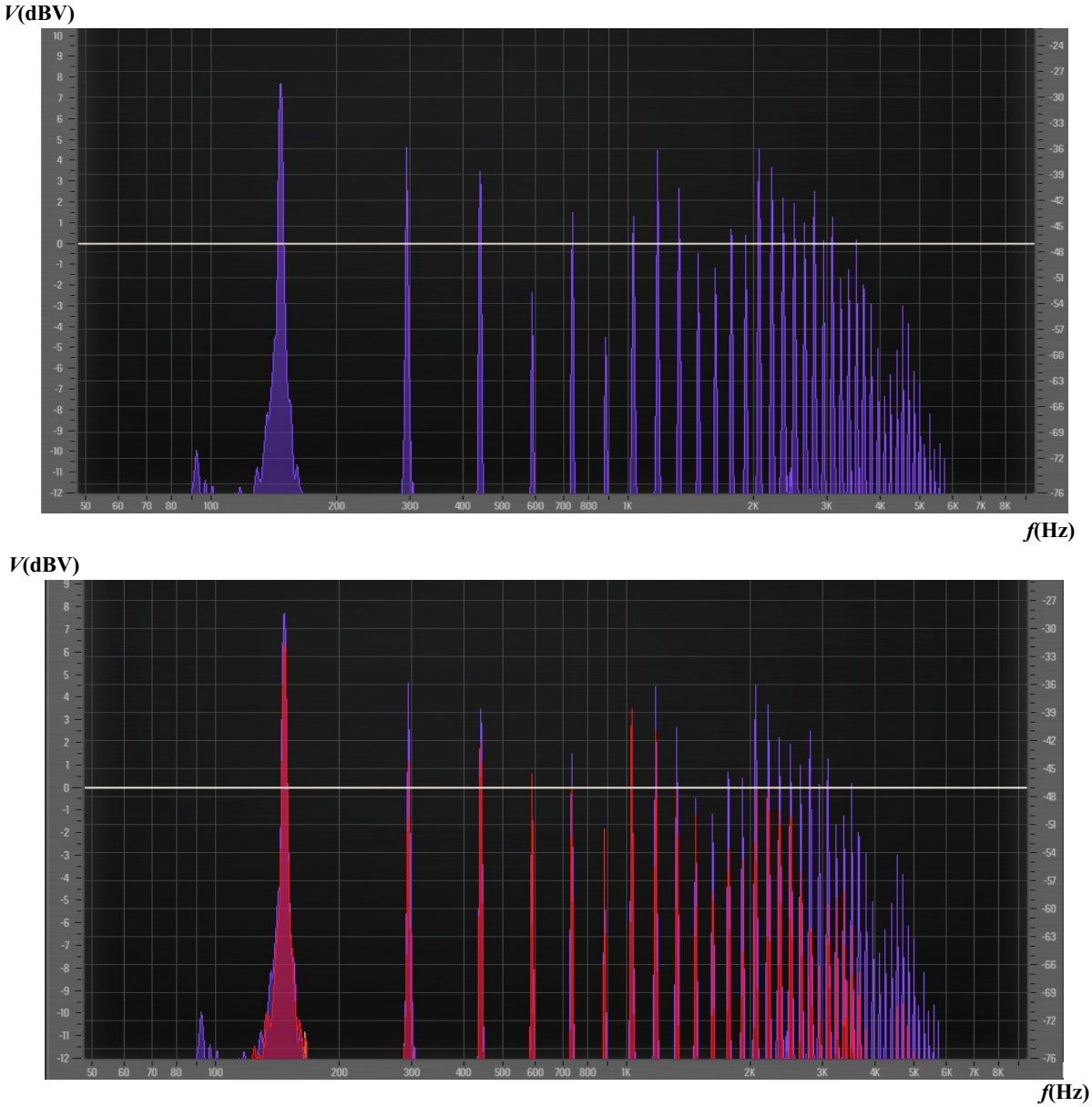
Najprije ćemo pogledati kakve spektre daju oba kanala ako ih postavimo na iste vrijednosti volume kontrole, i na drugom kanalu isključimo „gain”.



Slika 5.32. Usporedba spektra prvog kanala pojačala (crveno) i drugog kanala (zeleno) bez dodanog gain-a

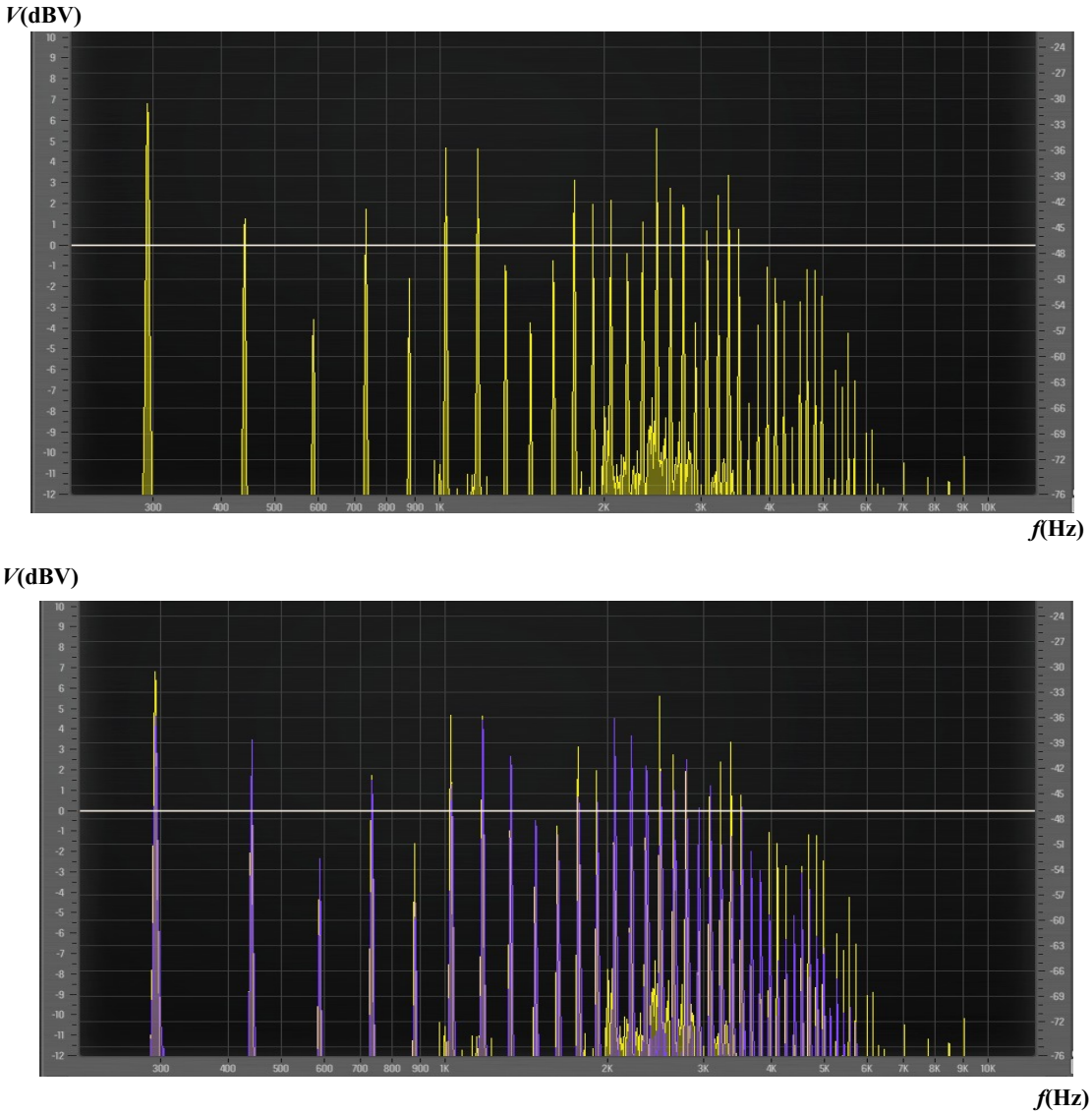
Vidimo da se zapravo radi o dva ista kanala u ovoj postavci mjerenja. Sitne razlike su zanemarive, i mogu se pripisati neujednačenosti u sviranju ili nepreciznosti pri zabilježavanju spektara.

U narednim mjerenjima smo sada na drugom kanalu pojačalo povećavali vrijednost „gain" kontrole, najprije na položaja 4, zatim na položaj 9.



Slika 5.33. Usporedba spektra drugog kanala pojačala s „gain" kontrolom na poziciji 1 (crveno) i na poziciji 4 (ljubičasto)

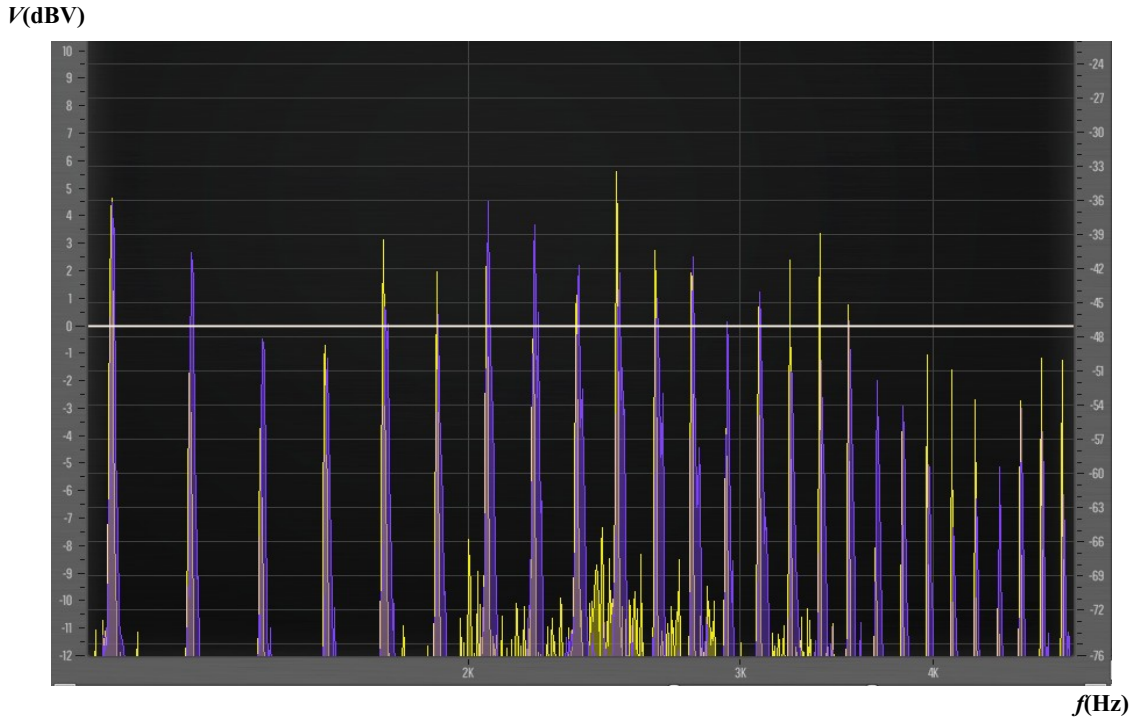
U prvom slučaju vidimo usporedbu dva spektra, „gain” na kontroli 1 i „gain” na kontroli 4. Razlika je uočljiva vizualno i slušno. Dobili smo generaciju novih harmonika na oko 4 i 6 kHz, te pojačanje intenziteta ostalih harmonika. Pokazali smo da jedan dio distorzije uključuje generaciju novih harmonijskih sadržaja.



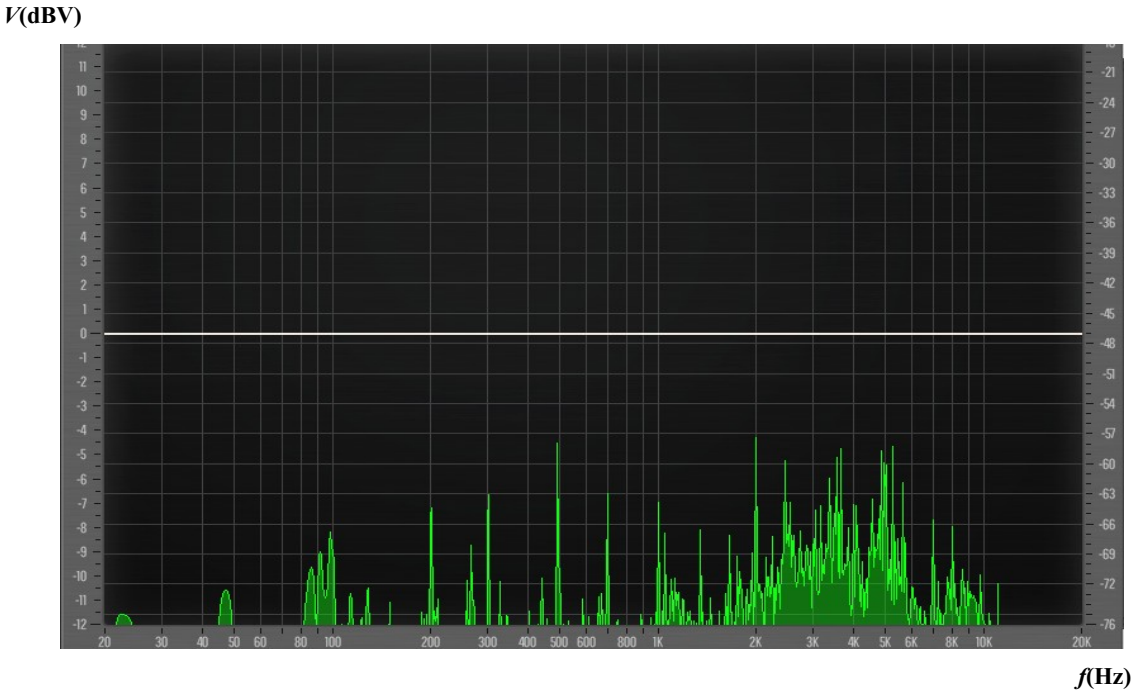
Slika 5.34. Usporedba spektra drugog kanala pojačala s gain kontrolom na poziciji 4 (ljubičasto) i na poziciji 9 (žuto)

U drugom slučaju vidimo također generaciju novih harmonika, sada na frekvencijama od 6 do 10 kHz. Intenzitet najizraženijih harmonika više nije rastao jer smo signal počeli gurati u „soft clipping” koji je odrezao signale i nije ih dodatno pojačavao. Taj „soft clipping” je također utjecao na generaciju novih harmonika. Na sljedećoj slici koja nam uvećano

prikazuje područje od 2 do 3 kHz vidimo kako smo pojačali i uveli šum u zvučnu sliku. Taj šum također pridonosi zvuku distorzije. Naredna slika prikazuje šum kada usnimimo pojačalo s maksimalno podignutom „gain” kontrolom.

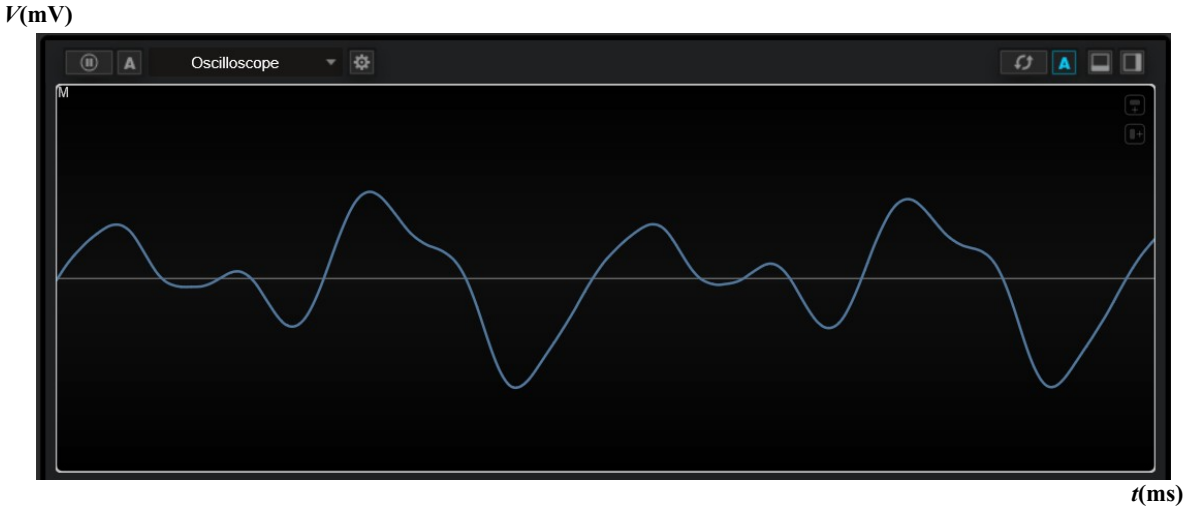


Slika 5.35. Uvećan spektar sa Slika 10.30. radi bolje vidljivosti šuma u signalu



Slika 5.36. Spektar šuma nastao maksimalnim „gain”-om na pojačalu

Sada možemo prikazati valne oblike čistog zvuka, „clean” kanala, te ga usporediti s distorziranom zvukom.



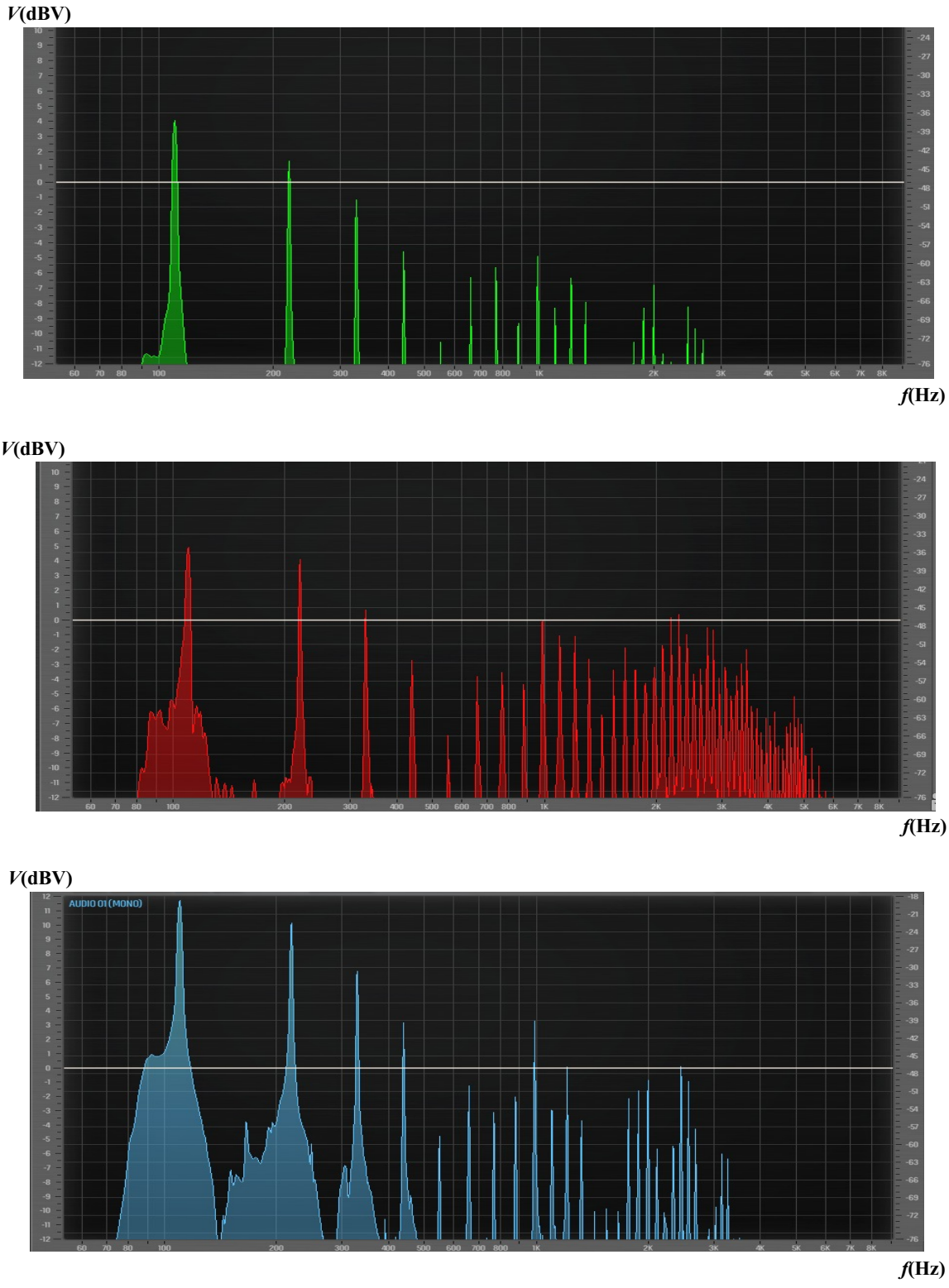
Slika 5.37. Ilustracija valnih oblika nedistorziranog (gore) i distorziranog (dolje) signala uz vidljiv clipping

Kada povećamo „gain”, kao što smo već napomenuli „clean” signal guramo u „clipping.” „Clipping” nam reže signale i oni jako podsjećaju na *„square wave”*.

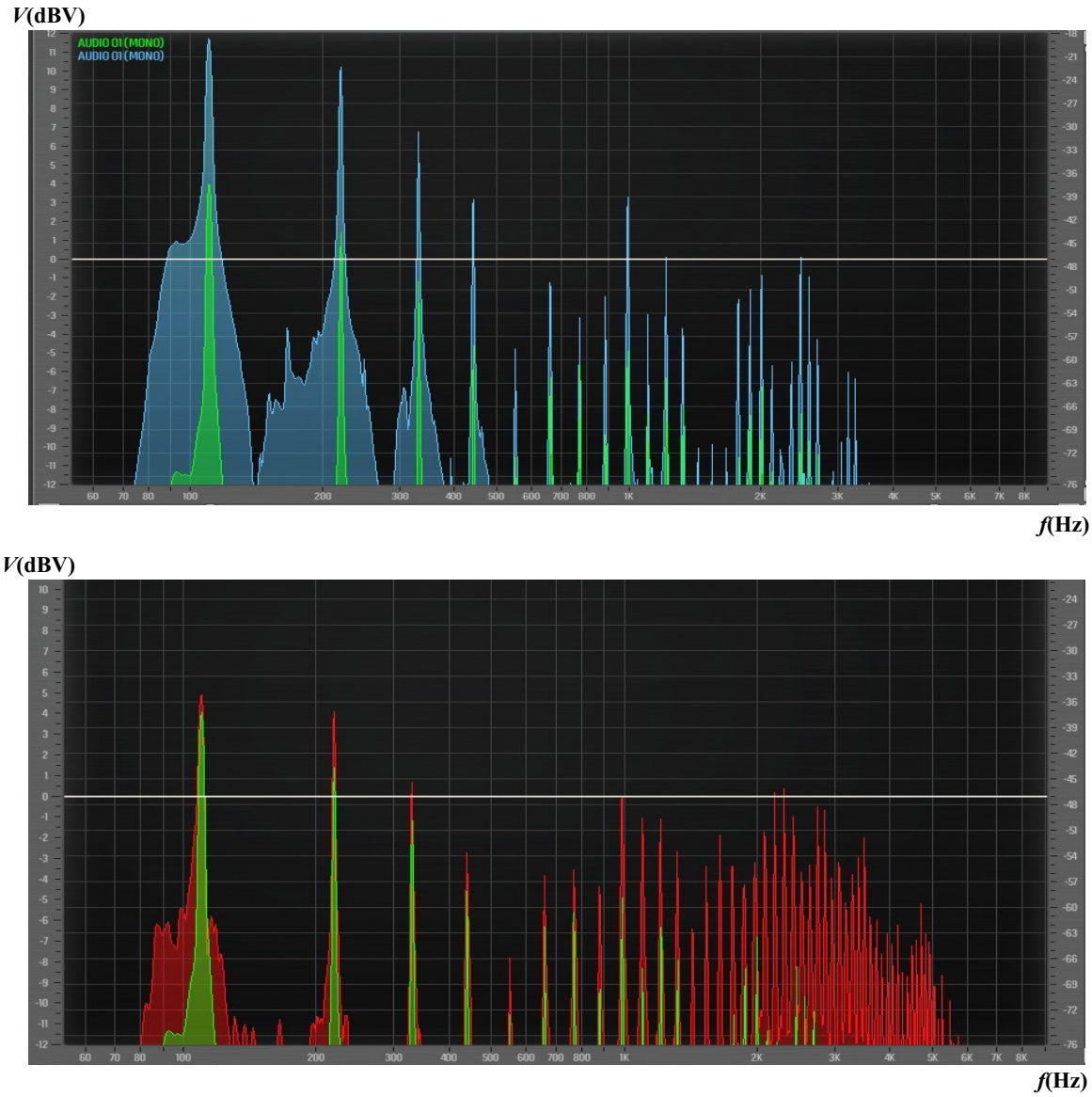
5.3.10. Volume i gain kontrola

Dalje treba promotriti kako „volume” i „gain” kontrola utječu na signal. Ranije smo napomenuli da je „volume” kontrola često dio pojačala snage, a „gain” kontrola dio

pretpojačala. Samim time već možemo pretpostaviti da će uloge ta dva potenciometra biti različite.



Slika 5.38. Spektar tona s gain i volume kontrolom na minimumu (zeleno), zatim gain kontrola na 10 (crveno) i volume kontrola na 10 (plavo)

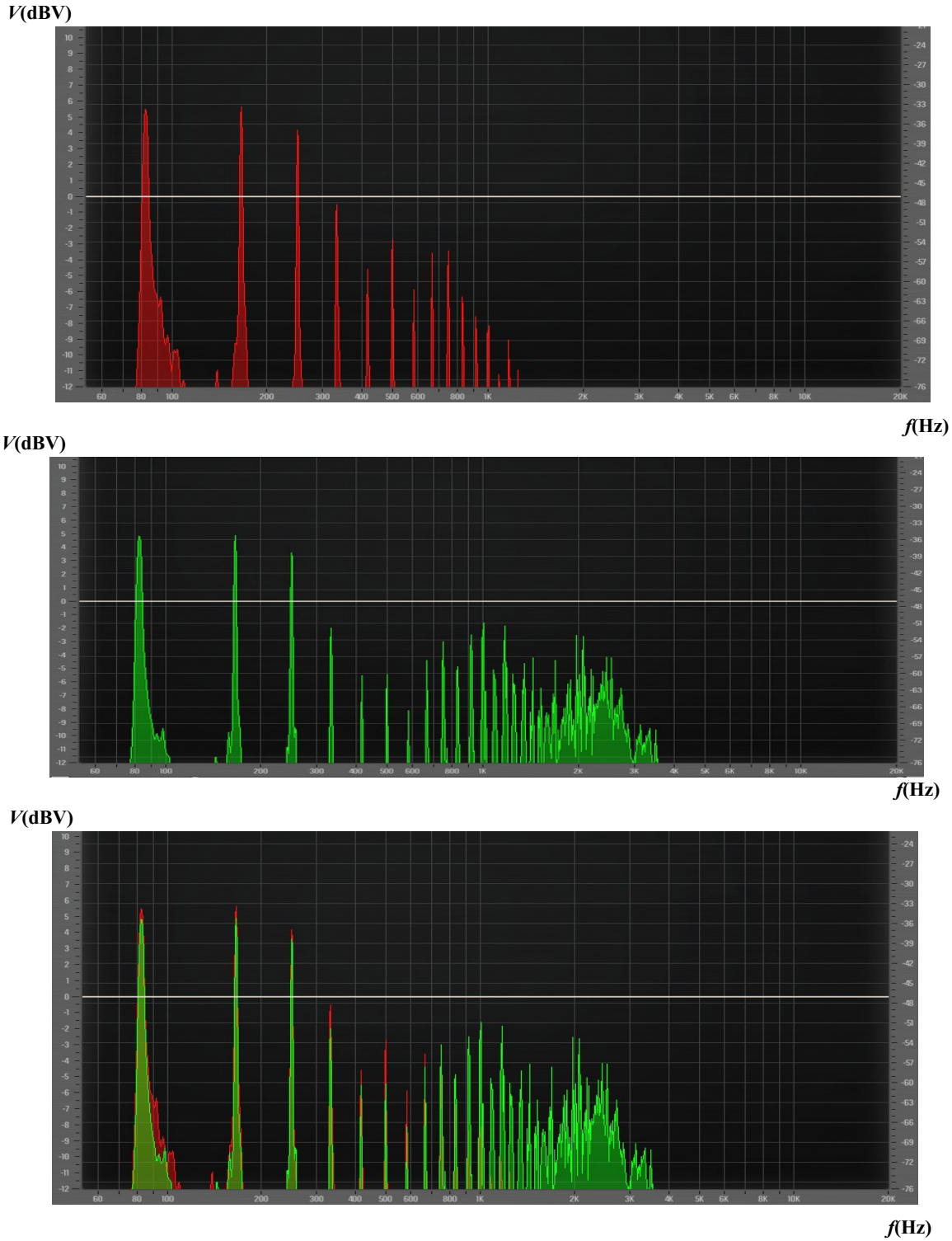


Slika 5.39. Preklopljeni spektri sa Slika 10.38. radi usporedbe

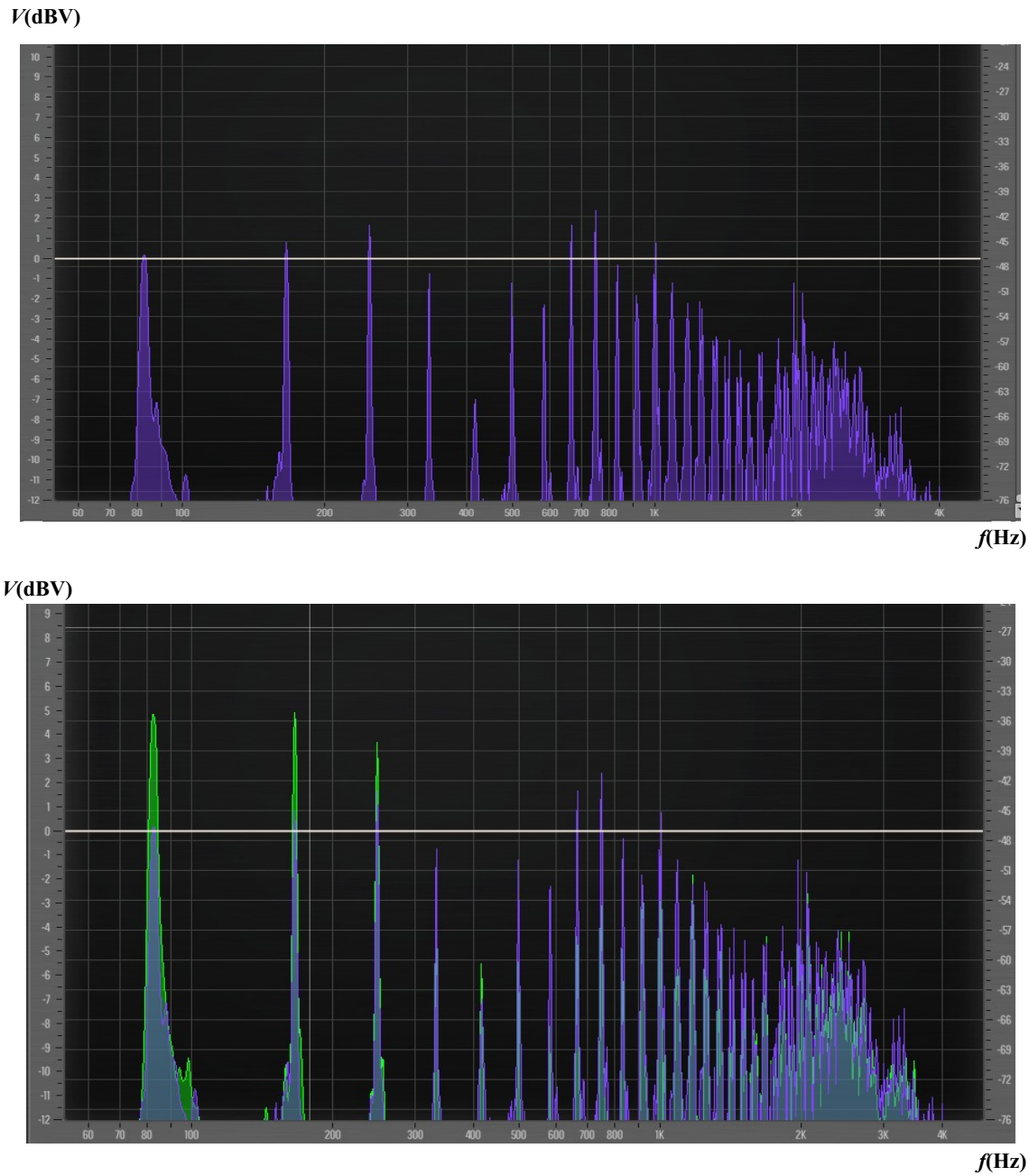
Iz usporednih spektara vidimo da volume kontrola samo pojačava signal, svaki harmonik je većeg intenziteta, međutim novi harmonici se ne generiraju, dok kod gain kontrole imamo stvaranje novog harmonijskog sadržaja. Pojačani su signali koji su bili već dosta tihi, a oni harmonici koji su sami po sebi izraženi su pri maksimalnom gain-u zadržali svoj intenzitet, baš zbog toga što su maksimalno pogurani u clipping. Gain kontrola do neke mjere djeluje kao pojačanje signala, ali u jednom trenutku kada dotaknemo threshold peak se reže.

5.3.11. Bass i treble kontrola

Pojačalo posjeduje i bass te treble potenciometre, pa smo provjerili i njihovo djelovanje



Slika 5.40. Spektar tona pri treble kontroli na poziciji 10 (zeleno) i spektar tona pri treble kontroli na poziciji 1 (crveno)

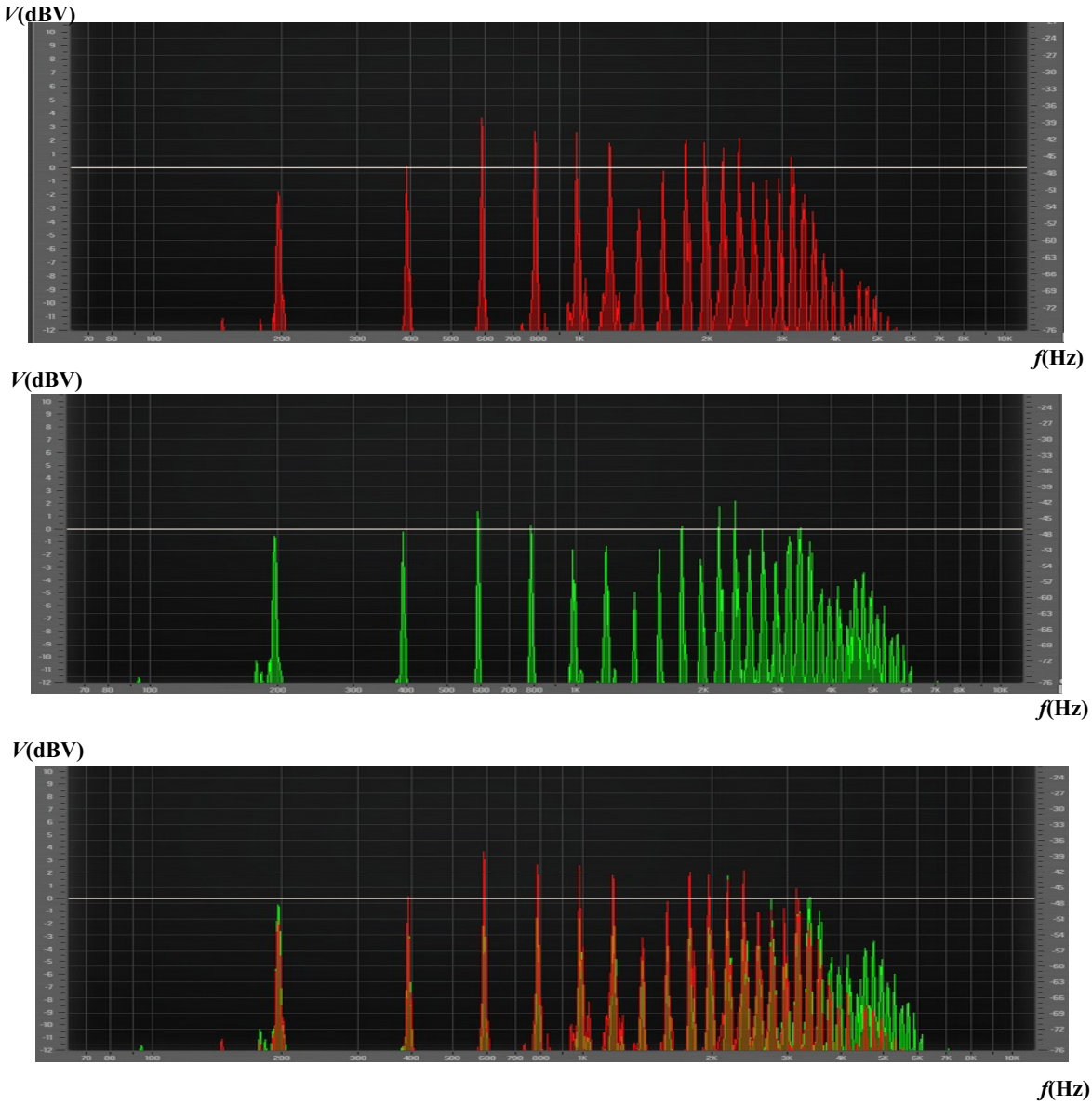


Slika 5.41. Spektar tona pri bass kontroli na poziciji 10 (zeleno) i spektar tona pri bass kontroli na poziciji 1 (ljubičasto)

Kao i kod ton blende na gitari, treble potenciometar u poziciji 10 propušta najveći broj frekvencija, a u poziciji 1 djeluje kao niskopropusni filter, i reže visoke frekvencije. Za razliku od gitare, pojačalo posjeduje bass kontrolu koja djeluje kao visoko propusni filter i smanjuje intenzitet niskih frekvencija. U našim mjerenjima vidimo da te frekvencije nisu u potpunosti odrezane, već su samo manjeg intenziteta, ali dovoljna je promjena da se ona uoči i slušno.

5.3.12. Metal i British mod distorzije

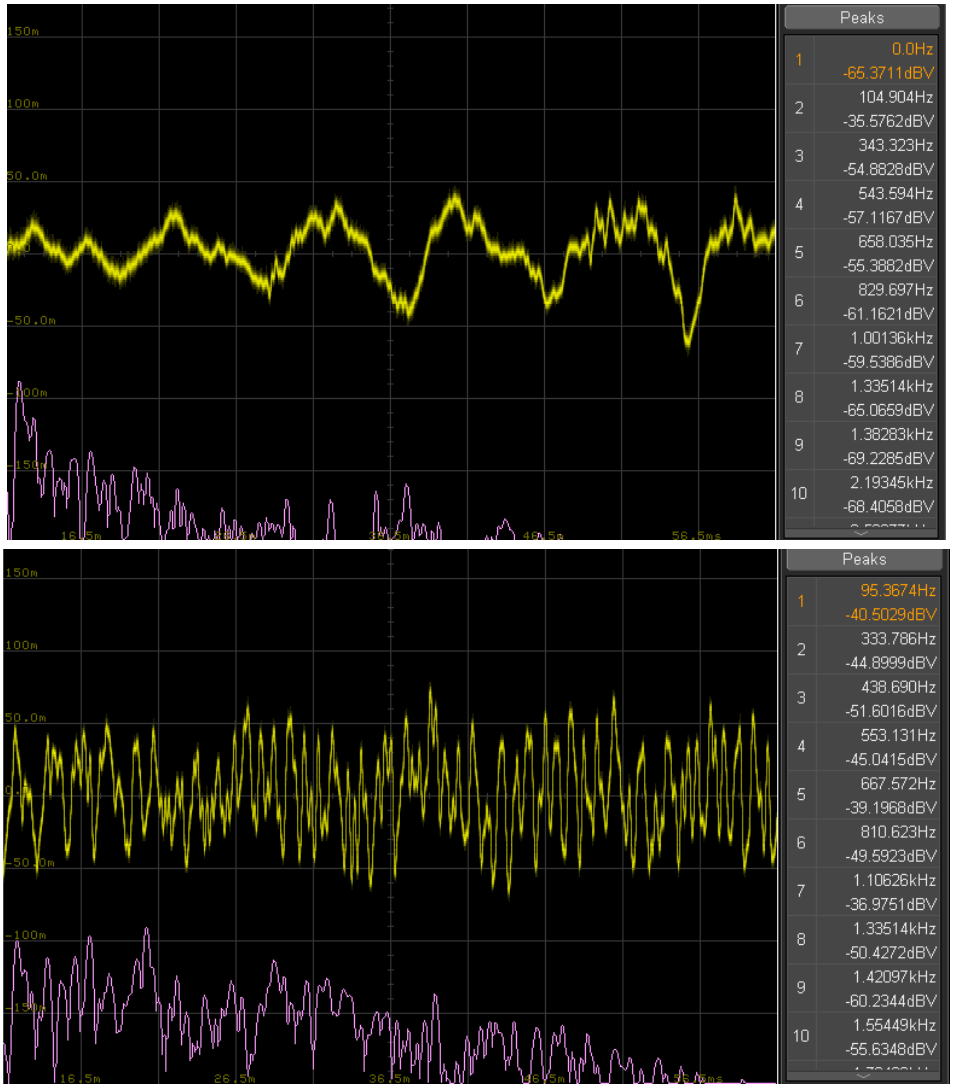
Konačno smo promotrili razlike između različitih modova na koje možemo postaviti drugi kanal pojačala. Primijenili smo *British* i *Metal* mod distorzije. Uočeno je da pri višim frekvencijama *Metal* mod generira više harmonika, te su intenziteti na nekim područjima drugačiji. To nam utječe na zvučnu sliku, te raspoznajemo razliku između ta dva moda. Nijedan od njih nije nužno bolji, lošiji, precizniji i slično. Već je samo pitanje koji od njih nam više odgovara u određenom tipu glazbe, pjesme ili situaciji. Ili jednostavno koji nam se subjektivno više sviđa.



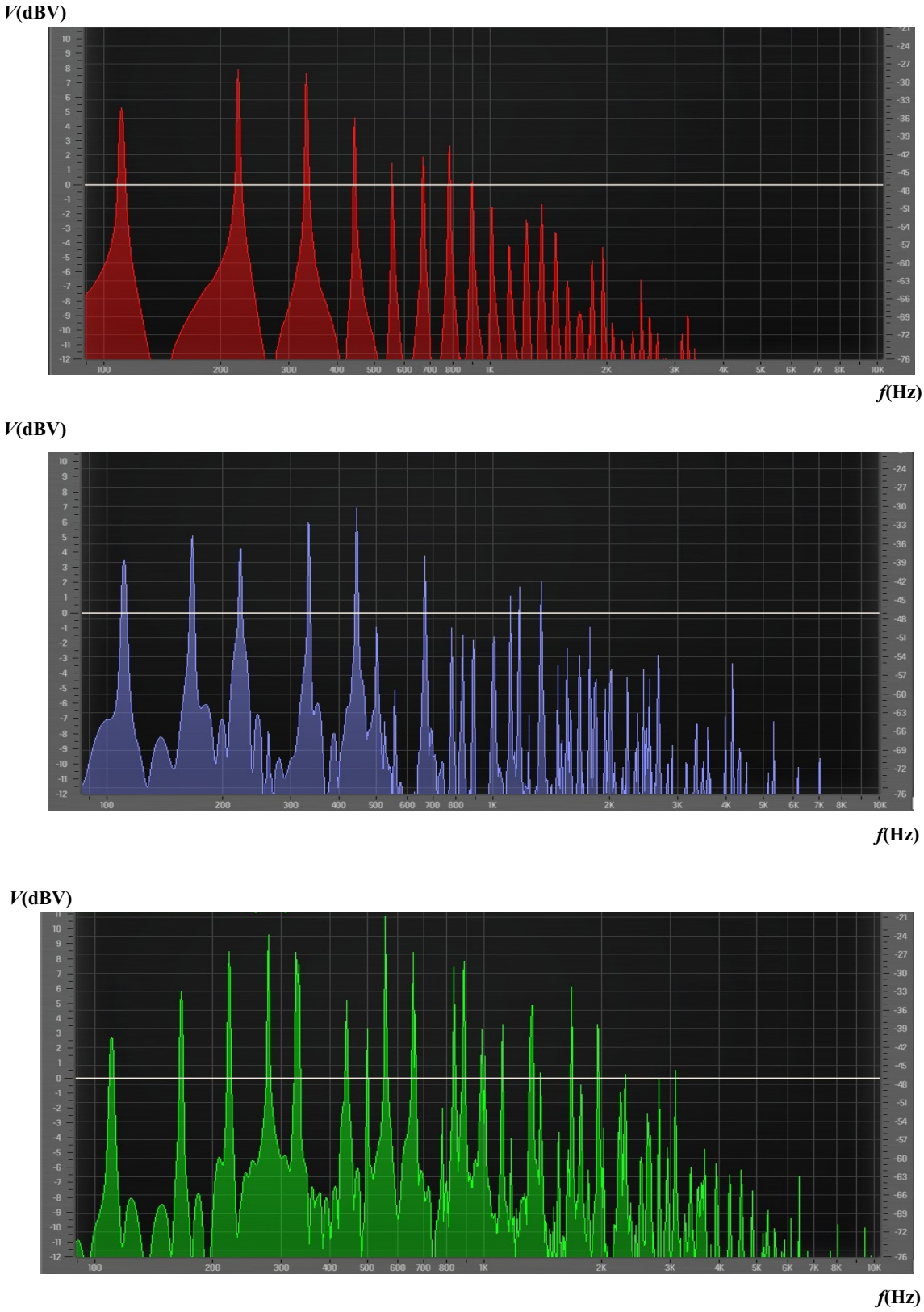
Slika 5.42. Spektar tona na koji je primijenjen *British* mod distorzije (zeleno) i *Metal* mod distorzije (crveno)

5.3.13. Powerchord

Sljedeća mjerenja prikazuju spektar i krivulju kada odsviramo cijeli akord. U ovom slučaju je to bio A akord (dur). On u sebi sadrži tonove E, A, e, c#', e', a'. Vidimo da je razlika spektara puno uočljivija kada je iskorišteno više tonova koji nose u sebi različite harmonike. Distorzija je zvučno dosta agresivna. To je razlog zašto se u rock i metal glazbi koriste tzv. power chord. On uključuje samo prva tri tona akorda (u ovom slučaju E, A, e). Ti tonove dijele neke od harmonika, te spektar nije toliko gust. Rock i metal glazba koriste puno distorzije (overdrive, fuzz...) te je zbog toga potrebno smanjiti broj tonova jer ćemo bojanje zvuka i bogat spektar dobiti samom distorzijom. Ako bi takvom spektru dodali još tonova dobit ćemo neugodan zvuk.

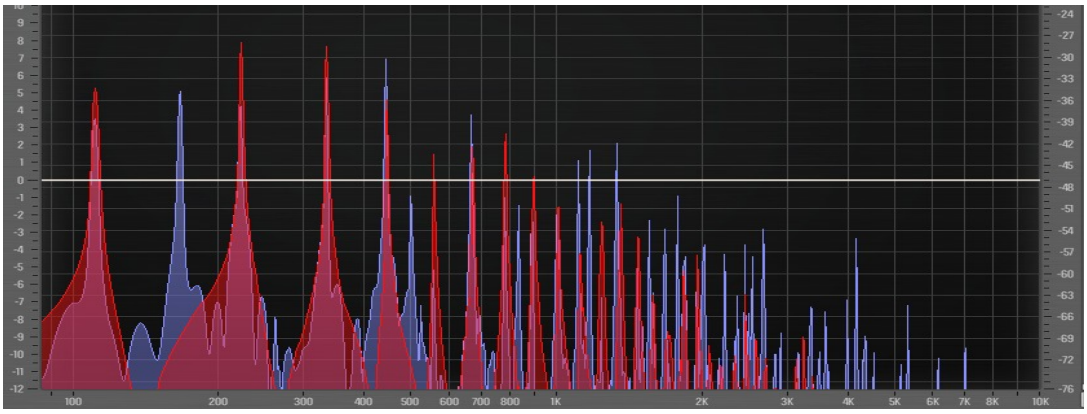


Slika 5.43. Spektri i valni oblici odsviranog A akorda, clean (lijevo) distorzija (desno)



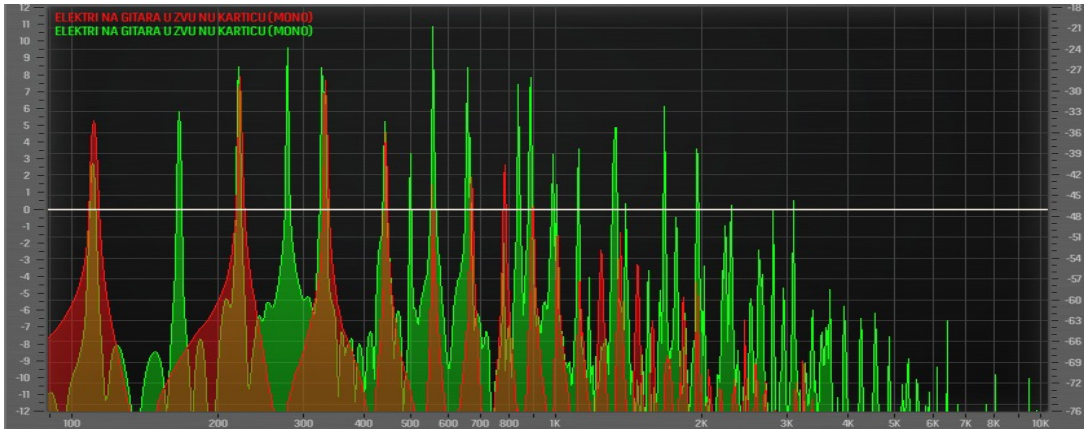
Slika 5.44. Spektar tona A (crveno), powerchord-a na tonu A (ljubičasto) i durskog A akorda (zeleno)

V(dBV)



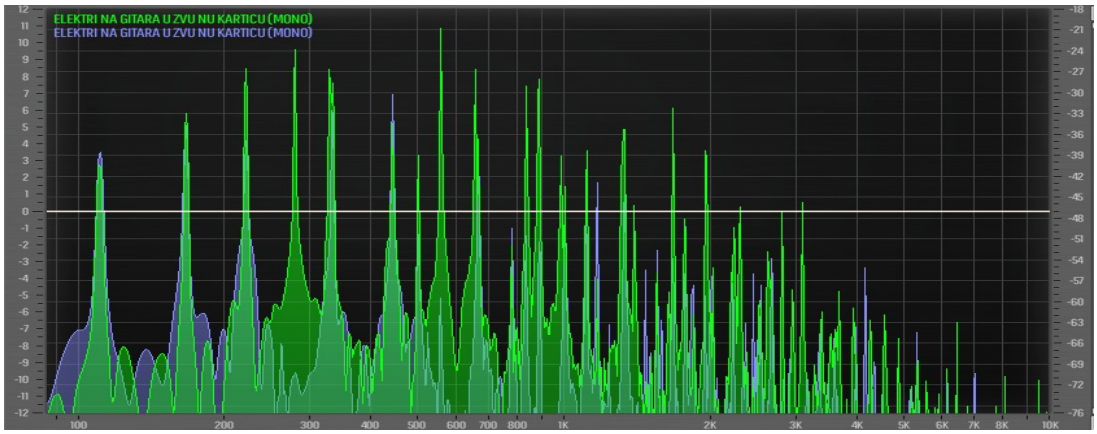
f(Hz)

V(dBV)



f(Hz)

V(dBV)



f(Hz)

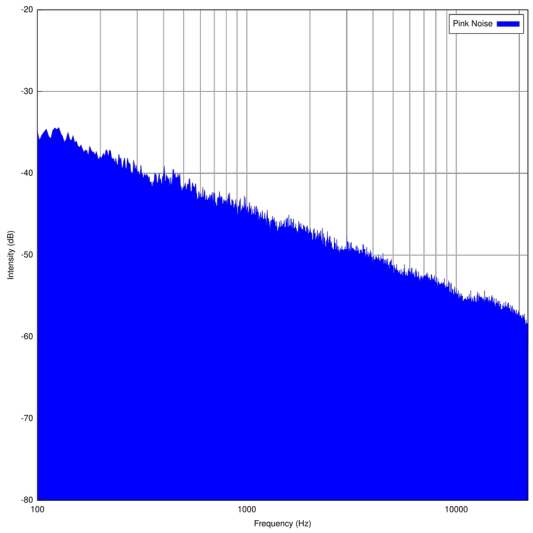
Slika 5.45. Preklopljeni spektri sa Slika 10.44. zbog usporedbe

6. Zaključak

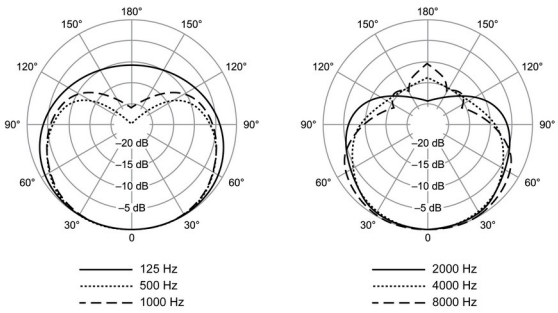
U ovom radu smo prikazali cijeli proces dobivanja tona električne gitare. Od titranja žice i nastanka izmjeničnog električnog signala elektromagnetskom indukcijom, do prolaska signala elektroničkim sklopovima unutar gitare. Zatim amplificiranje i obrade signala u pojačalu, te konačno pretvorbu električnog signala u mehanički unutar zvučnika. Pokazali smo koji faktori utječu na ton i karakter električne gitare. Također smo i definirali što je to ton, koje su njegove karakteristike i kako opisati pojam kao što je boja zvuka fizikalnim konceptima. Naglasak je konstantno bio na harmonijskoj analizi spektra, intenzitet viših harmonika, njihova količina i pozicija unutar frekvencijskog spektra. Te vrijednosti su opisivale ono što nazivamo karakterom ili bojom gitare, pojačala ili pickup zavojnice. Snimanjem spektara prikazali smo odnos fundamentalne frekvencije i viših harmonika, te njihov utjecaj na ton gitare. Mjerenjem mase, duljine žice i tenzije prikazali smo ovisnost fundamentalne frekvencije titranja žice o navedenim veličinama. Povećanjem tenzije povećavala se i frekvencija. Dok se povećanjem duljine žice i mase žice frekvencija smanjivala. Indirektno smo pokazali da materijali od kojeg je izrađena električna gitara punog tijela ne igra ulogu u formiranju tona. Za razliku od šupljih gitara koje se oslanjaju na rezoniranje tijela (rezonantne kutije), električne gitare svoj zvuk baziraju prvenstveno na pickup magnetima, a tijelo zapravo dobro prigušuje vibracije. Ono što utječe na ton je pozicija na kojoj trzamo žice, koju trzalicu koristimo, te da li sviramo prstima. Ulogu igraju i debljina i kvaliteta žice, te materijal od kojih su žice napravljene, te jesu li presvučene ili ne. Najvažniji dio je pickup. Različite zavojnice daju različitu transformaciju titranja u električni signal. Pickup je također dio električnog kruga, tako da broj navoja zavojnice, njen induktivitet, zatim otpor unutar strujnog kruga kao i kapacitet daju različite vrijednosti rezonantne frekvencije strujnog kruga, tj. pickup-a. Uz pickup još vežemo i poziciju na gitari. Ovisno o mjestu na kojem se on nalazi primijetit ćemo razliku u intenzitetu harmonika te i različite dijelove spektra u kojima se oni pojavljuju. Ton potenciometri oblikuju zvuk djelujući kao niskopropusni filtri. Pojačalo je uz magnet krucijalni dio oblikovanja tona. Gain potenciometar utječe na stvaranje saturacije, odnosno distorzije ako je efekt primijenjen agresivno. U ovom radu nismo promatrali kako rezonantna frekvencija različitih pickup zavojnice utječe na njen karakter, kao ni utjecaj različitih vrsta pickup zavojnica kao što su humbucker pickup-i. No to je svakako nešto što bi bilo zanimljivo proučavati. Također nismo promatrali utjecaj cijevnih pojačala i što ih u

konačnici fizikalno i zvučno razlikuje od tranzistorskih te na koji način postižemo distorziju u navedenim pojačalima. Uz navedene glavne karakteristike zvuka električne gitare možemo koristiti i neke sporedne elemente. To su primjerice i tremolo ručica čiji smo način upotrebe opisali, te različite efekt pedale (reverb, chorus, phaser, flanger, delay, itd.) koji nisu bili tema ovog rada.

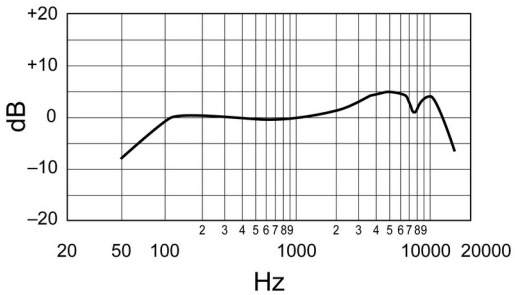
Dodatak



Slika 1. Pink noise (Preuzeto iz [18])



Slika 2. Polar pattern Shure SM58 mikrofona (Preuzeto iz [19])



Slika 3. Frekvencijske karakteristike Shure SM58 Mikrofona (Preuzeto iz [19])

Literatura

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_guitar

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure

[3] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/beat.html

[4] https://www.compoundchem.com/2015/11/24/guitar

[5] Young, H. D. and Freedman, R. A. (2008) University Physics with Modern Physics. Pearson Addison-Wesley, 13th edn., ISBN 0-321-50130-6.

[6] https://www.researchgate.net/publication/344300656_Translated_Physics_of_the_Electric_Guitar

[7] https://guitarscience.net/papers/guibook.pdf

[8] https://fourierstrings.neocities.org/

[9] http//e.math.hr/math_e_article/br19/matijevic

[10] Feynman, Richard P. (Richard Phillips), 1918-1988. The Feynman Lectures on Physics. Reading, Mass. :Addison-Wesley Pub. Co., 19631965.

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning

[12] https://northwoodsoboe.com/the-oboes-overtones-why-does-the-oboe-sound-so-unique/

[13] https://leilehualanzilotti.com/blog/2016/2/11/on-harmonics-waveforms-the-overtone-series

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Envelope_(music)

[15] Electric Guitar (2nd Edition), Helmuth Lemme, Elektor Internation Media B.V.,United Kingdom 2020, ISBN: 978-1-907920-87-5

[16] https://lawingmusicalproducts.com/dr-lawings-blog/how-does-a-pickup-really-work

[17] Purcell, E.M. (1965) Electricity and Magnetism. Berkeley Physics Course, Vol. 2, McGraw-Hill Book Company, New York. ISBN: 9780070049086

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/Pink_noise#

[19] https://www.shure.com/en-US/docs/guide/SM58

[20] https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html

[21]https://www.amplifiedparts.com/tech-articles/basic-electric-guitar-circuits-2-pots-tone-capacitors

[22] https://www.phy.pmf.unizg.hr/~dradic/OPFCS_skripta.pdf

[23] https://pcwww.liv.ac.uk/~goodhew/Student%20webs/Hylton%20electronics/Copamp.htm

[24] https://en.wikipedia.org/wiki/Intermodulation