

Konstrukcija klasične gitare i njezina karakteristična akustička svojstva

Gajski, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Academy of Music / Sveučilište u Zagrebu, Muzička akademija**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:116:424814>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**



Repository / Repozitorij:

[Academy of Music University of Zagreb Digital Repository - DRMA](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA
VI. ODSJEK

TOMISLAV GAJSKI

KONSTRUKCIJA KLASIČNE GITARE I NJEZINA AKUSTIČKA SVOJSTVA

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU MUZIČKA AKADEMIJA

VI. ODSJEK

KONSTRUKCIJA KLASIČNE GITARE I NJEZINA AKUSTIČKA SVOJSTVA

DIPLOMSKI RAD

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

Student: Tomislav Gajski

Ak. godina. 2023./2024.

ZAGREB, 2024.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

dr.sc. Kristian Jambrošić, red. prof.

Potpis

U Zagrebu, 14.5. 2024.

Diplomski rad obranjen 14.5.2024. ocjenom

POVJERENSTVO

1. _____

2. _____

3. _____

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICE
MUZIČKE AKADEMIJE

Zahvala:

Zahvaljujem kolegici Doris Brajković, kolegama Marku Kovačiću i Igoru Matavulju na ustupljenim gitarama. Najsrdačnije zahvaljujem mentoru, profesoru Kristianu Jambrošiću, na predanom vodstvu te na vremenu i trudu uloženom u oblikovanje ovog rada.

Sadržaj

Sažetak

1	ELEMENTI KLASIČNE GITARE	2
2	Stvaranje zvuka	3
2.1	Modovi vibracija glasnjače	3
2.2	Rezonantna kutija	5
2.3	Značenje pojedinih modova i njihov utjecaj na zvuk instrumenta	7
2.4	Žice kao generator frekvencija - tona	9
3	Karakteristična svojstva zvuka gitare	12
3.1	Uzlazno vrijeme / prijelazna pojava	12
3.2	Silazno vrijeme, vrijeme opadanja	12
3.3	Utjecaj kuta trzanja na ton	12
4	Utjecaj konstrukcije pojedinih elemenata na zvučnu sliku instrumenta	16
4.1	Glasnjača	16
4.2	Leđa i stranice	19
4.3	Vrat	20
4.3.1	Prstohvat i pragovi	20
4.3.2	Spoj vrata i tijela	22
4.4	Most i konjic	24
5	OBLIK I KONSTRUKCIJA TIJELA	26
5.1	Geometrijska konstrukcija oblika tijela	28
6	MATERIJAL ZA IZRADU KLASIČNE GITARE	32
7	Mjerenja akustičkih svojstva gitara	33
7.1	Mjerenje spektra pojedinog tona instrumenta	34
7.2	Mjerenja zvuka u vremenskoj domeni	37
7.3	Snimanje impulsnog odziva	38
8	Usporedba zvuka četiriju studentskih gitara	40
8.1	Rezultati mjerenja	42
8.2	Interpretacija dobivenih rezultata	48
8.2.1	Glasnoća instrumenata	48
8.2.2	Kvaliteta tona prve žice	48
9	Zaključak	49
10	Literatura	50

Sažetak

Ovaj rad opisuje nastanak zvuka na klasičnoj gitari, njegove karakteristike te utjecaj pojedinih konstrukcijskih elemenata gitare na njezin zvuk. Opisana su jednostavna akustička mjerenja kojima se mogu odrediti pojedina karakteristična svojstva instrumenta i navedeni su primjeri mjerenja. Mjerenja su provedena na četiri studentske gitare i na nekoliko gitara poznatih graditelja kojih su snimke preuzete s interneta. Rezultati mjerenja su obrađeni i na temelju njih na kraju rada je izneseno mišljenje o mogućnosti utjecaja pojedine konstrukcije na zvuk instrumenta.

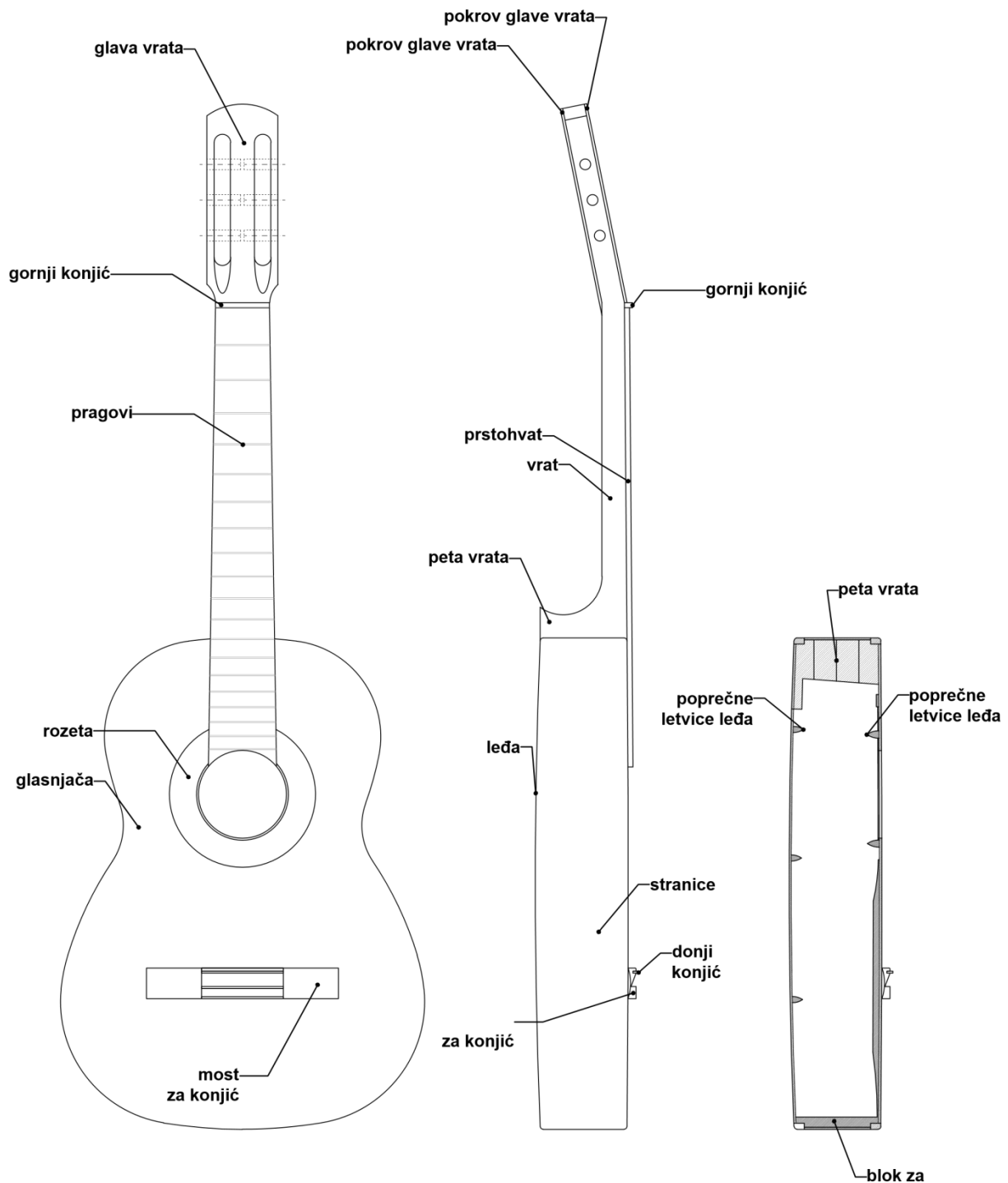
Ključne riječi: zvuk, konstrukcija, klasična gitara, graditelj.

Abstract

This thesis explores how sound is produced on a classical guitar, its characteristics, and how various design elements of the guitar affect its sound. It describes simple acoustic measurements that can identify specific properties of the instrument, along with examples of these measurements. The research was conducted on four of student's own guitars and several renowned builders' guitars- for which recordings were obtained from the internet. Based on the measurement results and subsequent analysis the thesis concludes with insights into how different constructions might influence the instrument's sound.

Key words: sound, construction, classical guitar, luthier

1 ELEMENTI KLASIČNE GITARE



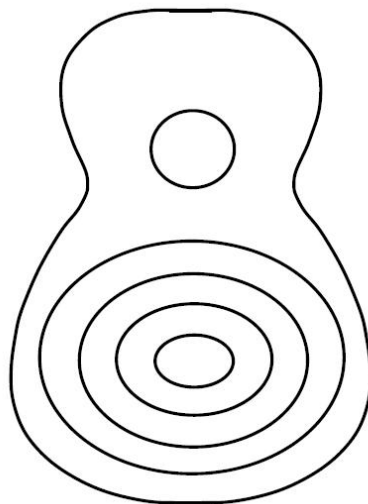
Slika 1. Dijelovi klasične gitare - predložak za nacrt (Bogdanovich, 2006)

2 Stvaranje zvuka

Klasična gitara, kao i njoj srodni žičani instrumenti (akustične gitare, mandoline, tambure i gudači) proizvodi zvuk vibracijom žica koje se prenose konjićem na glasnjaču, glasnjača titra odgurujući i privlačeći molekule zraka u svojoj okolini stvarajući zvučne valove. Zahvaljujući rezonantnoj kutiji koju čini glasnjača sa stranicama i leđima, zvuk se pojačava. Ovisno o konstrukciji ove kutije i elementima vezanim za nju ovisit će kakvoća zvuka instrumenta.

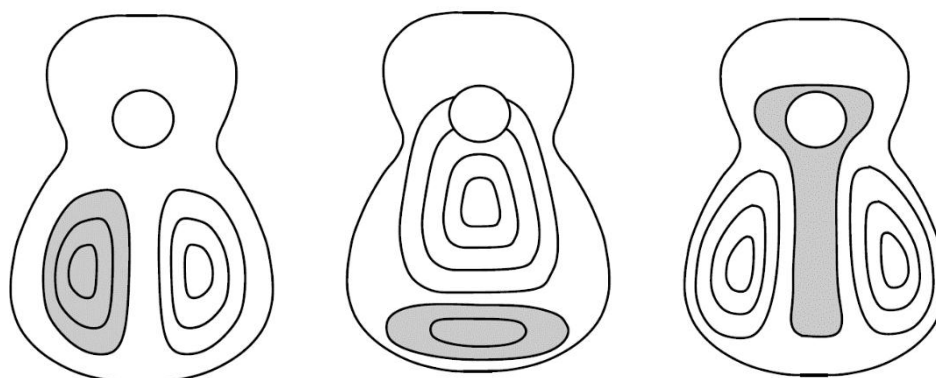
2.1 Modovi vibracija glasnjače

Kako bi se lakše shvatila uloga i značaj pojedinih elemenata rezonantne kutije gitare u stvaranju zvuka poslužit ćemo se rezultatima objavljenih istraživanja (Jansson, 2002), (Perry), (D.P.HESS, 2013). Za predodžbu o stvaranju zvuka određene boje tona i glasnoće prikladni su rezultati istraživanja u kojima su prikazani osnovni načini vibracija glasnjače i leđa, te rezonantne kutije u cjelini. Modovi vibracija glasnjače predstavljaju rezonantne frekvencije glasnjače (frekvencije na kojima ona najjače vibrira) i način njezinog titranja (uvijanja) na toj rezonantnoj frekvenciji. Značajni su jer na frekvencijama modova instrument može efikasno stvarati zvuk ili ga potisnuti. Snimljeni su na način da se glasnjača na mjestu konjića pobuđivala na vibracije različitim frekvencijama iz čujnog opsega i snimane su njene deformacije (uslijed vibracija), odnosno izgled njezine površine pri pobudi određenom frekvencijom. Krenulo se s pobudom od najnižih frekvencija koje može čuti ljudsko uho prema višima. Prvo značajno vibriranje glasnjače (tzv. prva rezonantna frekvencija), pojavljuje se na frekvenciji oko 190Hz (prazna 3. žica gitare - ton G3 je 196Hz). Snimka vibracija pokazuje da se na glasnjači pojavljuju vibracije u donjem dijelu (ispod zvučnog otvora) s maksimumom u središtu donjeg dijela, slika 2.



Slika 2. Mod T(1,1)

Linije kruga (elipse) prikazuju mjesta titranja jednakih amplituda. Najveća amplituda titranja je u središtu, dok na periferiji nema vibracija. Ovu pojavu možemo i sami snimiti pospemo li glasnjaču ravnomjerno, cijelom površinom, trunjem čaja ili zrcima pijeska (pijesak nije preporučljiv jer može oštetiti glasnjaču), a zvučnikom spojenim na pojačalo, pozicioniranim iznad konjića, reproduciramo sinusni ton iz signal generatora (ton koji sadrži samo osnovnu frekvenciju, tzv. čisti ton – bez harmonika/alikvota) krenuvši od 80Hz prema 200Hz, postepeno i polagano povisujući ga. Kako ćemo se približavati rezonantnoj frekvenciji glasnjače, trunje će početi sve jače poskakivati i početi se razmještati na mjesta u kojima se glasnjača ne miče. Rezonantnu frekvenciju prepoznat ćemo po tome što će na njoj vibracije biti najveće. Povećamo li ili snizimo frekvenciju generatora u odnosu na rezonantnu, trunje na glasnjači će slabije poskakivati. Ostavimo li frekvenciju generatora na rezonantnoj frekvenciji, nakon kratkog vremena trunje će se razmjestiti i zauzeti položaj sličan najvećoj elipsi na slici 2. Ako nastavimo povisivati pobudnu frekvenciju glasnjače, pojavit će se nove rezonantne frekvencije s drukčijim izgledom i razmještajem trunja čaja.



Slika 3. Mod T(2,1), Mod T(1,2) i Mod T(3,1)

Primijetit ćemo da se pojavljuje više odvojenih područja na kojima su prisutne vibracije i to takve da na nekim dijelovima glasnjača titra u suprotnim smjerovima – dok se na jednom dijelu uzdiže, na drugom se istovremeno spušta. Na slici 3. skicirani su različiti načini vibracija glasnjače sa sivo označenim područjima koja se uvijaju na suprotnu stranu, npr. bijelo područje se uvija prema van, a sivo prema unutrašnjosti rezonantne kutije. Prikazano je prvih nekoliko, tzv. osnovnih modova vibracija glasnjače koji se pojavljuju na frekvencijama ispod 800Hz. Prema dosadašnjim istraživanjima i zapažanjima većina autora smatra da su ovi osnovni modovi ključni za kakvoću zvuka instrumenta. Ključni su u smislu da, ovisno o tome na kojoj se frekvenciji pojavljuje pojedini mod, kako izgleda i u kojem je odnosu intenzitet njegovih vibracija prema drugim modovima, određuju zvučnu karakteristiku

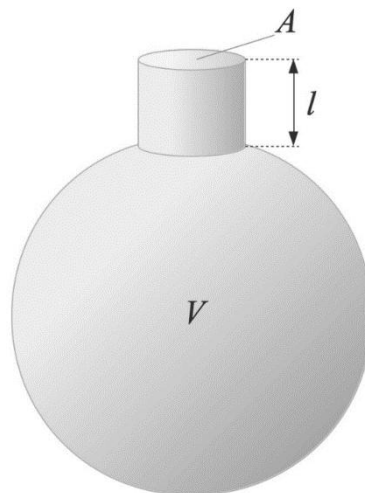
instrumenta. Mehaničkom konstrukcijom rezonantne kutije instrumenta – prvenstveno glasnjače - frekvencija i jačina vibracija pojedinih modova mogu se podešavati. Prilikom gradnje, usporedbom ovih karakterističnih modova s modovima drugog instrumenata, može se lakše sagraditi instrument sličnih zvučnih karakteristika. Također, ovakvim mjerenjima i usporedbama graditelji mogu osigurati bolju ujednačenost sagrađenih instrumenata, što je pokazatelj kvalitete gradnje. Za ove karakteristične rezonancije glasnjače uvedene su oznake – kao T(1,1), T(1,2) i sl. Slovo T se odnosi na „top“ (gornja ploča - glasnjača). (X,Y) – X označava koliko područja titranja ima na X osi glasnjače, dok Y označava to isto za Y os. Jednako tako vrijede oznake i za titranje leđa B(X,Y) – B kao bottom, dno.

2.2 Rezonantna kutija

Jednako kao što glasnjača ima karakteristične frekvencije (tonove) na kojima jako vibrira, tako i rezonantna kutija (korpus) ima svoju rezonantnu frekvenciju na kojoj zrak unutar nje izuzetno jako vibrira. Rezonantna kutija je slična Helmholtzovom rezonatoru (slika 4.) za koji vrijedi približan izraz za rezonantnu frekvenciju:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}$$

c je brzina zvuka,
A je površina otvora
l je efektivna duljina vrata rezonatora
V je volumen



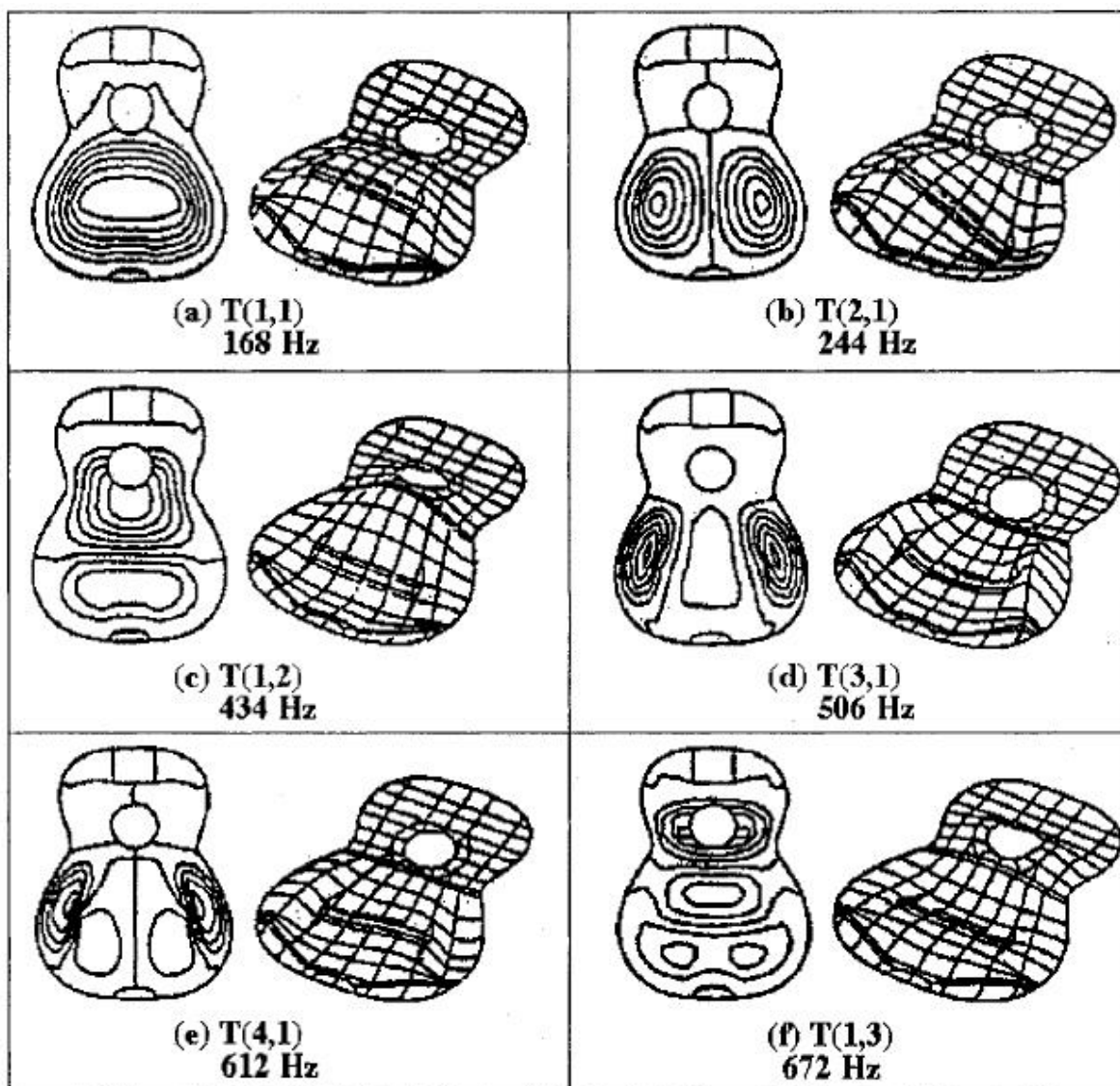
Slika 4. Helmholtzov rezonator

U slučaju gitare površina otvora je površina zvučnog otvora, duljina rezonatora je debljina stijenke glasnjače oko otvora, ali efektivna duljina otvora (ona koja se koristi za računanje Helmholtzove frekvencije) kod gitare je oko 1,7 puta veća od radijusa zvučnog otvora (Traube, 2004). Kada bi stijenke rezonantne kutije bile nepomične – idealno krute, najniža rezonancija rezonantne kutije kod klasične gitare bi odgovarala izračunatoj frekvenciji Helmholtzovog rezonatora i bila bi oko 120Hz, što je približno za kvintu ispod prve rezonancije glasnjače (Traube, 2004). Volumen rezonantne kutije gitare nije stalan već se dinamički mijenja kako se glasnjača i leđa pomiču uslijed vibracija. Zbog toga je frekvencija ove rezonancije nešto niža i ovisi o rezonantnoj frekvenciji leđa i glasnjače. Kod klasičnih gitara obično je u području 90Hz do 110Hz. Kao i glasnjača, rezonantna kutija ima i više modove rezonancija koji su slabiji, ali utječu na boju tona instrumenta.

Jednako kao što rezonancije glasnjače i leđa utječu na rezonanciju kutije, tako i kutija utječe na njihove rezonancije. Sve tri rezonancije su međusobno ovisne i matematički ih je teško opisati.

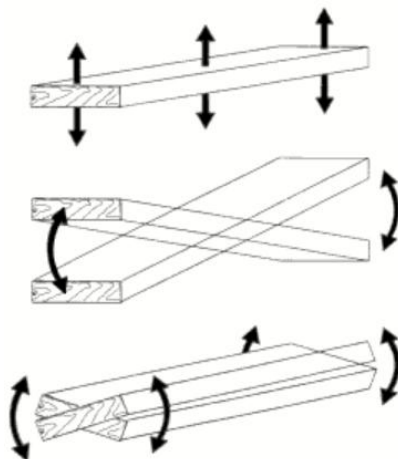
2.3 Značenje pojedinih modova i njihov utjecaj na zvuk instrumenta

U rezonantnim modovima (slika 5.) stvaraju se velike vibracije i gitara učinkovito stvara zvuk. Ovi modovi vibracija imaju izravan utjecaj na zvučni spektar instrumenta. Većina gitara ima po tri rezonancije tijela u području između 100Hz i 200Hz, zbog međusobne ovisnosti rezonancija glasnjače, leđa i zraka u rezonantnoj kutiji. Rezonancija zraka u rezonantnoj kutiji obično se u literaturi označava kao mod A0. Mod T(1,1), slika 5, a), – tzv. osnovni, obično zrači najjači zvuk i valne fronte se šire prema naprijed kao sfere. Mod T(2,1) slika 5, b), tzv. dipol, zrači u prostor dvije velike dijametralno suprotne polusfere. Na višim frekvencijama (kod viših modova) zračenje zvučnih valova je manje učinkovito i u skladu s time modovi visokih frekvencija ne pokazuju jake rezonancije, ali doprinose boji tona instrumenta (Traube, 2004).



Slika 5. Osnovni modovi dobiveni računalnom simulacijom metodom konačnih elemenata, slika preuzeta iz (Brooke, 1992)

Možemo primijetiti da u modu T(1,1) konjić gitare se giba gore-dolje (okomito na glasnjaču), u modu T(2,1) ljulja se oko uzdužne osi gitare (oko simetrane vrata), a u modu T(1,2) ljulja se oko svoje uzdužne simetrane (slika 6.).



Slika 6. Načini titranja konjića uslijed pobude žica, (Somogyi)

Iz ovoga proizlazi da način kojim titra konjić pobuđen žicama uvelike određuje koji će modovi vibracija biti pobuđeni i u kolikom udjelu. Time će biti određena glasnoća proizvedenog zvuka, njegova boja i dinamika. Iz ovoga se može zaključiti da će konjić i njegov položaj na glasnjači biti jedan od ključnih elemenata u stvaranju zvuka instrumenta.

Smjer u kojem se žica giba odredit će i način gibanja konjića odnosno glasnjače, ali jednako tako i elastičnost glasnjače će utjecati na gibanje žice. Žice i rezonantna kutija su dva međusobno zavisna sustava, a načinom trzanja žica može se djelovati na smjer i veličinu sila u žicama koje će djelovati na glasnjaču, odnosno pojedine modove titranja.

2.4 Žice kao generator frekvencija - tona

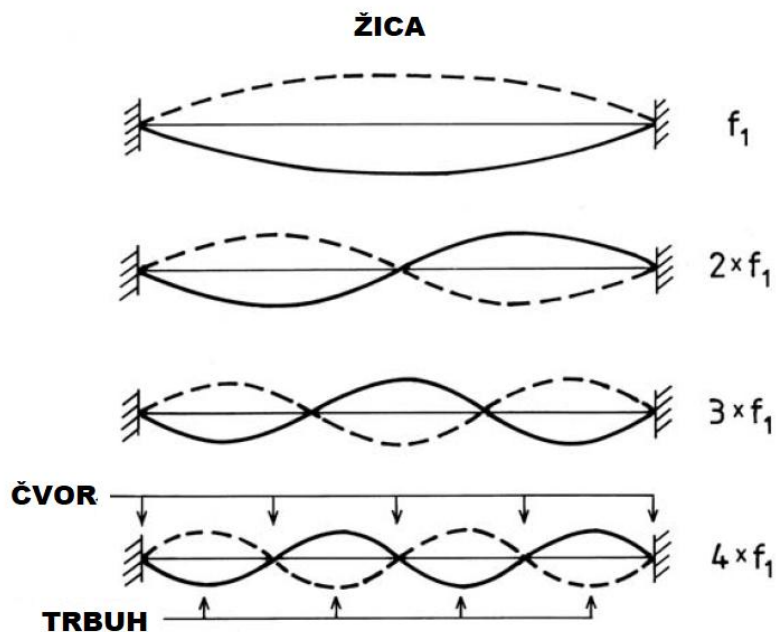
Klasična gitara ima šest žica koje su najčešće podešene na frekvencije tonova E_2 (82,41 Hz), A_2 (110 Hz), D_3 (146,83 Hz), G_3 (196 Hz), H_3 (246,94 Hz), E_4 (329,63 Hz). Često se koristi i štim u kojem je šesta (E žica) spuštena na ton D_2 (73,4 Hz). Raspon tonova koje instrument može proizvesti u tom slučaju proteže se od D_2 (73,42 Hz) do H_5 (987,77 Hz - prva E žica pritisnuta na 19. polju). Osim osnovnih frekvencija pojedinih tonova, gitara proizvodi i njihove više harmonike, alikvote, što tonu daje tzv. „boju tona“ i čini ga zanimljivim. Osim boje tona koju obilježavaju harmonici, svaki muzički instrument karakterizira i jedinstveni način nastajanja i nestajanja tona u vremenu. Zbog načina na koji zvuk nastaje, sadržaju harmonika, kako se mijenja njegov intenzitet (glasnoća) kroz vrijeme, razlikujemo pojedinu vrstu glazbenih instrumenata, a i pojedine instrumente međusobno unutar iste vrste.

Kod gitara, ton nastaje trzanjem žice koja se pobudi na titranje. Osnovna visina tona (frekvencija) određena je duljinom žice koja slobodno titra (duljina između gornjeg i donjeg konjića ako se radi o praznoj žici, odnosno dijelu žice koji titra između praga i donjeg konjića), specifičnoj masi žice, te njezinoj napetosti. Što je žica deblja ili napravljena od težeg materijala imat će niži ton uz istu napetost i duljinu, što je veća napetost žice i ton će biti viši, a što je žica dulja imat će niži ton uz istu napetost. Osim na frekvenciji osnovnog tona, žica će titrati i na frekvencijama koje su cjelobrojni višekratnici frekvencije osnovnog tona, na frekvenciji harmonika.

Na slici 7 skicirano je titranje žice na osnovnoj frekvenciji (f_1) i na 3 viša harmonika – drugom ($2 \times f_1$), trećem ($3 \times f_1$) i četvrtom ($4 \times f_1$). Kod gitare, polovica prazne žice je 12 prag. Iz Slike 7 možemo zaključiti da će žica gitare prilikom reprodukcije osnovnog tona (f_1) najjače titrati iznad 12 praga. Jednako tako, vidimo da kod reprodukcije drugog harmonika, na tom istom mjestu žica se neće pomicati, jer na tom mjestu val frekvencije drugog harmonika ima tzv. čvor.

Iz slike 7. zaključujemo da na poziciji iznad 12. praga nema titranja parnih harmonika osnovne frekvencije, dok su na frekvencijama neparnih harmonika pomaci žice najveći.

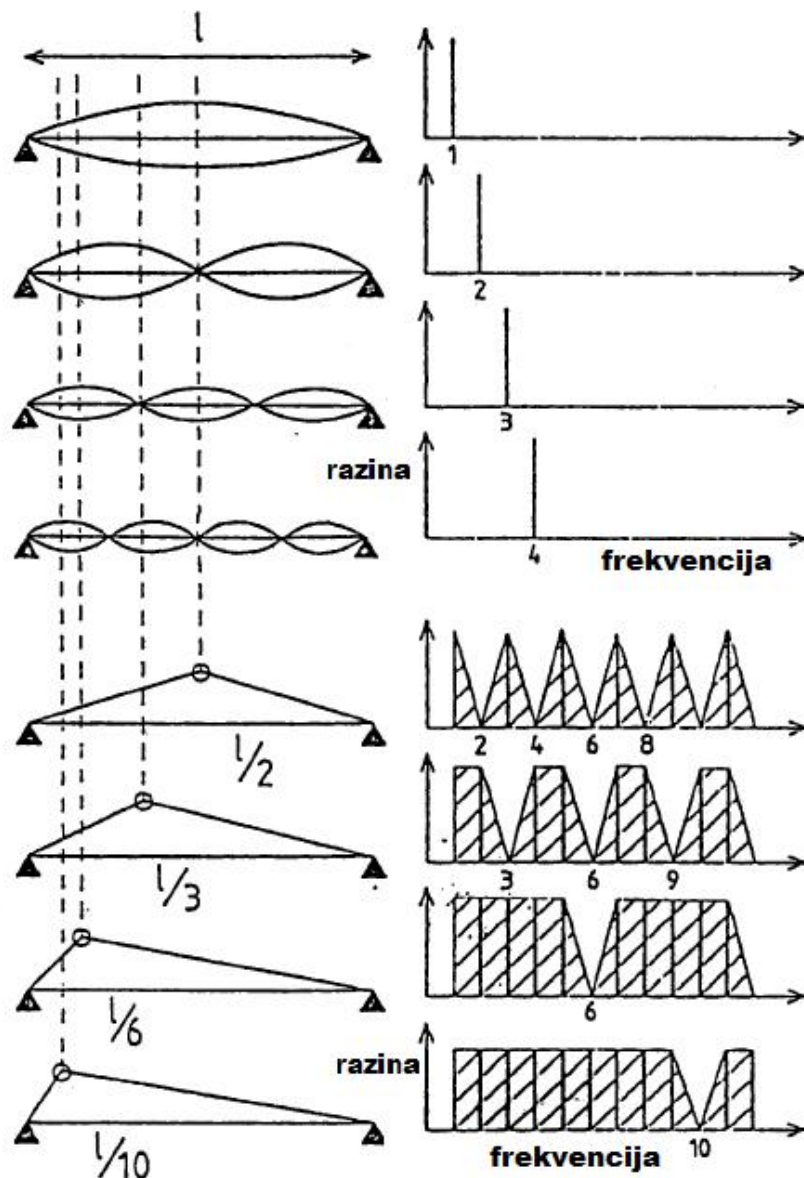
Trznemo li žicu na poziciji iznad 12. praga pobudit ćemo ju na najjače titranje osnovnim tonom i neparnim harmonicima, dok će reprodukcija svih parnih harmonika biti slaba, teoretski bi trebala izostati, jer parni harmonici nemaju pomake na tom mjestu. Tako odsvirani ton je „zaokružen“, sličan tonu harfe, a spektralnim sadržajem odgovara tonu klarineta koji zbog svoje konstrukcije teoretski može proizvesti samo osnovni ton i njegove neparne harmonike.



Slika 7. Prikaz titranja žice između konjića

Gitaristi intuitivno koriste ovu činjenicu trzajući žice na različitim pozicijama između donjeg konjića i 12. praga, mijenjajući na taj način boju tona. Ovisno o mjestu na kojem je žica trznuta - pobuđena, ovisit će sadržaj harmonika uz osnovni ton.

Na slici 8. prikazana je ovisnost harmonika osnovnog tona o mjestu na kojem se trzne žica. U gornjoj polovini slike prikazani su titraji žice (lijevo) i njihov frekvencijski spektar (desno) (Jansson, 2002) . Tako najgornji red slike prikazuje titranje žice duljine L na osnovnoj (najnižoj) frekvenciji (graf lijevo) i njezin frekvencijski spektar (sadržaj frekvencija) koji se sastoji od samo jedne frekvencije, okomite linije koja predstavlja osnovni ton (graf desno). Kada bi žica titrala samo na načine koji su nacrtani u prva 4 reda slike, onda bi sadržavala samo po jednu frekvenciju, kao što je prikazano na slikama. U prirodi su takva čista (sinusna) titranja rijetka i uglavnom se pojavljuju složeni titraji u kojima se uz osnovnu frekvenciju javljaju i njezini viši harmonici s različitim udjelima. U donjoj polovici slike 8 vidimo kako izgleda frekvencijski spektar, ovisno na kojem dijelu žicu trznemo. U četvrtom redu slike vidimo da kada bi žicu trznuli na njezinoj sredini ($L/2$), žica bi titrala samo frekvencijom osnovnog tona i njezinim neparnim harmonicima. Kada bi je trznuli na $1/3$ duljine (na mjestu u kojem 3. harmonik ima čvor), u stvorenom tonu žice ne bi bilo 3. harmonika (zato što smo 3. harmoniku uništili čvor, odnosno mogućnost da žica titra tom frekvencijom), kao i svih višekratnika 3. harmonika – šestog, devetog, dvanaestog itd. , jer i njihovi čvorovi nisu mogući na mjestu $L/3$. Slična je situacija kada trznemo žicu na udaljenosti $L/6$ od konjića. Tada smo žicu pomaknuli iz nulte pozicije na mjestu čvora (mirovanja) koju bi imao šesti harmonik. To znači da šesti harmonik nema mogućnost da se stvori na toj žici, kao ni njegovi višekratnici (dvanaesti, osamnaesti, dvadeset i četvrti itd.).



Slika 8. Ovisnost harmonika o mjestu trzanja žice

Trznemo li žicu na udaljenosti $L/10$ u spektru će izostati deseti harmonik i njegovi višekratnici.

Iz dosada izloženog možemo zaključiti da će ton gitare (njegov frekvencijski spektar) ovisiti o mjestu na kojem je žica trznuta i rezonantnoj kutiji koja će pojačati ili prigušiti pojedine frekvencijske komponente koje je žica proizvela. Kao što je već spomenuto, odnos između rezonantnih frekvencija u sustavima koji imaju interakciju je složen i nije ga moguće jednostavno matematički opisati, ali poznavanje ponašanja pojedinih njegovih dijelova može nam pomoći u predviđanju ponašanja sustava u cjelini.

Praktična primjena ovih spoznaja može nam pomoći npr. prilikom štimanja instrumenta. Štimamo li elektronskim štimerom klasičnu gitaru možemo se naći u situaciji da štimer ne može prepoznati ton koji podešavamo, već „divlja“. Trznemo li žicu iznad 7. praga ($1/3$ duljine žice), smanjit ćemo uvelike udio trećeg harmonika i njegovih višekratnika (šestog, devetog...) i štimer će lakše detektirati osnovni ton.

Ovu ovisnost frekvencija titranja žice o mjestu pobude možemo iskoristiti prilikom mjerenja karakteristike rezonantne kutije gitare. Mjerimo li spektar pojedinih tonova na načina da žice trzamo u čvorovima pojedinih harmonika, komponente koje se pojavljuju na mjestu potisnutih harmonika jesu komponente nastale negdje u rezonantnoj kutiji.

3 Karakteristična svojstva zvuka gitare

3.1 Uzlazno vrijeme / prijelazna pojava

Tijelo gitare ne počinje titrati istovremeno s titranjem žica, već titra na složen način i proizvedeni ton možemo razdijeliti u dva vremenska razdoblja – uzlazno vrijeme s tzv. prijelaznom pojavom i silazno vrijeme titranja. Uzlazno vrijeme karakterizira vrijeme brzine porasta glasnoće tona. U usporedbi s drugim instrumentima, ovaj porast je kod gitara neuobičajeno brz. Kod trzalačkih instrumenata glasnjača ne započinje svoje titranje iz položaja ravnoteže, već započinje svoje gibanje iz položaja u koji je dovedena nategnutom žicom trenutak prije njezinog otpuštanja (istrzaja). Nakon oslobađanja žice glasnjača započinje titranje, ne na frekvencijama žice, već na frekvenciji vlastitog moda u koji je dovedena početnom deformacijom, a tek nakon toga počinje titrati pod prisilnim vibracijama žice na frekvencijama koje su određene titranjem žice. Iz izloženog se može primijetiti da će položaj prsta i nokta desne ruke utjecati na način deformacije žice, time i glasnjače, što će bitno utjecati na karakteristiku uzlaznog dijela tona.

3.2 Silazno vrijeme, vrijeme opadanja

Prijelazna pojava nestaje čim žica prisili glasnjaču na titranje frekvencijama žice, a ne njezinih vlastitih. Stabilno stanje nikada ne nastaje, jer čim ton dosegne najveću amplitudu, počinje padati. Kada bi bila sama – bez utjecaja glasnjače, žica bi titrala više-manje normalno, ali ovako spregnuta s glasnjačom preko konjića, njezine vibracije su pod utjecajem glasnjače. Razine pojedinih alikvota padaju različitim brzinama – amplitude nižih frekvencije padaju sporije od onih viših.

Glavni parametri koji određuju izgled spektralne ovojnice jesu izbor žica, pozicija trzanja i smjer trzanja. Ako izuzmemo žice, najefektivniji način promjene boje tona je promjena pozicije na žici u kojoj se žica trza.

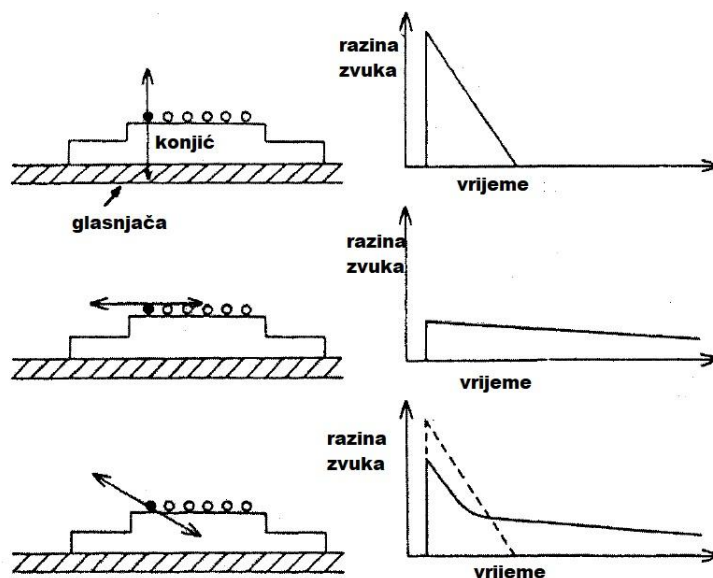
3.3 Utjecaj kuta trzanja na ton

Kut otpuštanja žice utječe na spregu između žica i modova vibracija, kao i na jačinu njihove pobude. Gitaristi kutem pod kojim napinju žicu, njezinom horizontalnom (paralelno s glasnjačom) i vertikalnom komponentom gibanja (okomito na glasnjaču), određuju koliko će jako žica titrati u horizontalnoj i okomitoj ravnini. Poznato je da će horizontalno trzanje (u ravnini s glasnjačom) proizvesti ton

ravnomjernijeg i duljeg trajanja od okomitog trzanja, koje će proizvesti eksplozivan ton koji će brzo nastati i brzo nestati (slika 9).

Gitaristi koriste ova svojstva prilikom korištenja tehnika apoyando i tirando. Apoyando proizvodi više vertikalnog gibanja žice od tiranda i sukladno tome ton ima eksplozivniji karakter u odnosu na tirando, kod kojeg je ton ravnomjerniji.

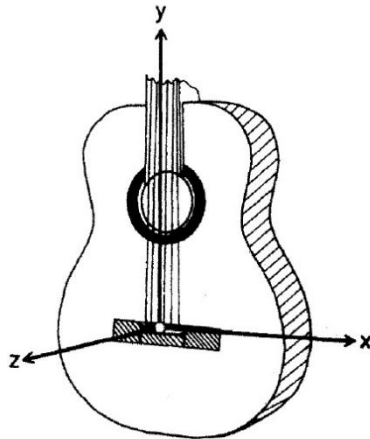
Titranje žice okomito na ravninu glasnjače efikasno pobuđuje glasnjaču, obzirom da je ona velike površine, a u poprečnom presjeku tanka. Energija titranja žica se brzo troši i nastaje glasan i grub ton. Paralelno titranje žica slabije pobuđuje glasnjaču, jer je ona u tom smjeru zbog debljine materijala kruća, zbog čega se energija žica sporije troši. Sukladno tome nastaje tiši i mekši ton koji duže traje. Prilikom muziciranja žice titraju pod većim ili manjim kutem u odnosu na ravninu glasnjače, što ovisi o načinu trzanja. Proizvedeni tonovi su kombinacija okomite i horizontalne



komponente titranja (slika 9).

Slika 9. Vremenski prikaz glasnoće tona u ovisnosti o kutu trzanja

Zbog važnosti za razumijevanje nastajanja tona i njegove povezanosti s vlastitim modovima vibracija instrumenta, a time i njegove konstrukcije, ovdje navodimo detaljnija pojašnjenja prema Jansson-u (Jansson, 2002). Kut nokta, odnosno „lansirna rampa za žicu“ koju nokat stvara je vrlo važna za određivanje brzine i smjera u kojem će žica putovati kada napusti prst. Kako bi opisao smjer trzanja, Jansson je uveo trodimenzionalni koordinatni sustav s ishodištem u središtu konjića (slika 10).



Slika 10. Koordinatni sustav za opisivanje kretanja žice prema Jansson-u

X os je paralelna s glasnjačom i okomita na žice.

Y os je paralelna s glasnjačom i žicama.

Z os je okomita na glasnjaču i žice.

Na frekvencijski spektar tona utječu kut prsta ili nokta u X-Y ravnini i kut pod kojim je nategnuta žica u X-Z ravnini. Jansson je pokazao da, obzirom na nastale sile u ova tri smjera nastaju pomaci glasnjače:

TD1 – kada se žica napne u smjeru Z osi konjić titra kao cjelina u tom smjeru i tome odgovara vlastiti mod vibracija glasnjače $T(1,1)$ tipične vrijednosti oko 150Hz.

TD2 – kada se žica nategne u X smjeru. Konjić se ljulja oko svoje središnjice koja je paralelna sa žicama, a njegove uške naizmjenično putuju gore-dolje. Ovaj mod odgovara vlastitom modu vibracija glasnjače $T(2,1)$ i tipične je vrijednosti oko 235Hz.

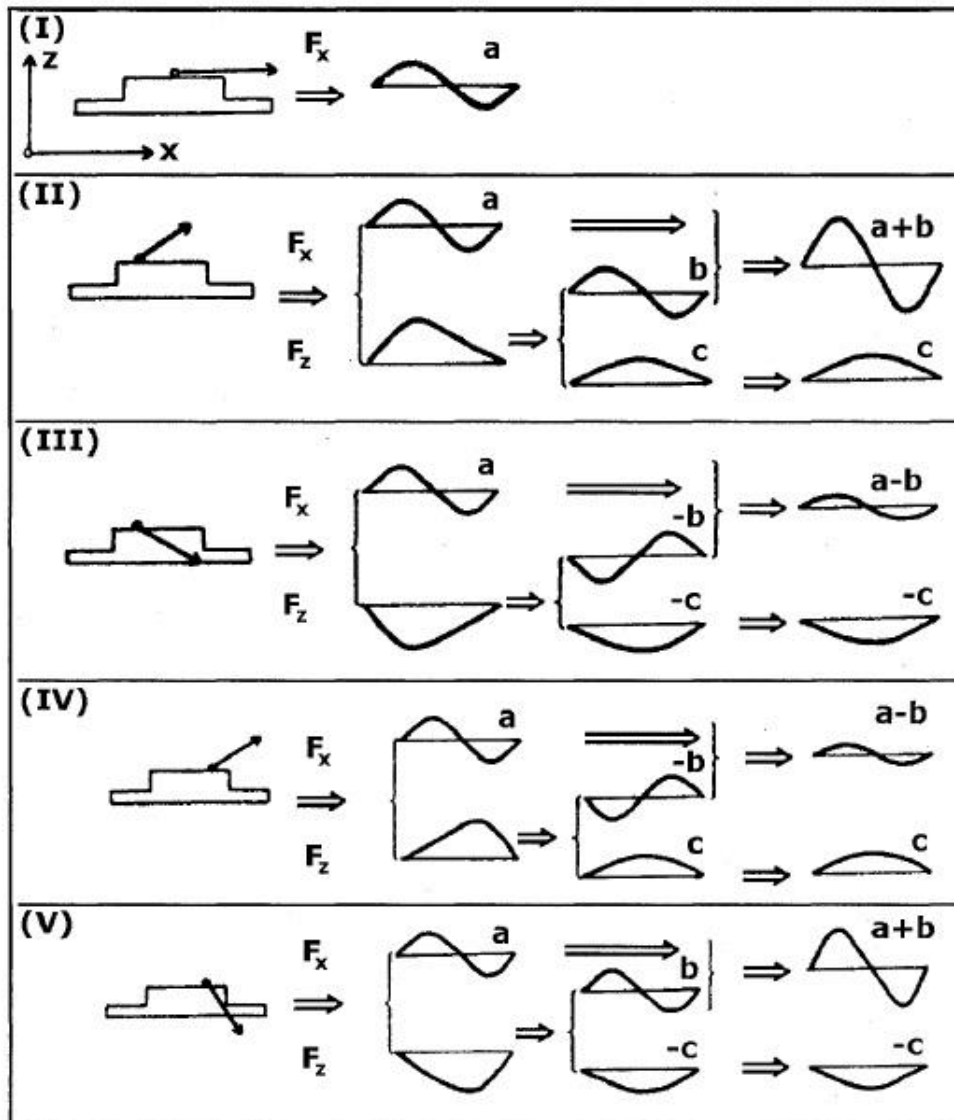
TD3 – ovaj pomak nastaje kada se žica nategne u smjeru Y osi. Konjić se ljulja oko uzdužne osi konjića paralelne s njegovom dužinom (okomito na žice). Ovi pomaci su zanemarivi u odnosu na TD1 i TD2, obzirom da je potrebna najmanje četiri puta veća sila koja bi proizvela pomake velike kao TD1. TD3 odgovara modu $T(1,2)$.

Gibanje žice u smjeru Z osi proizvodi kombinaciju pomaka TD1 i TD2, pogotovo ako je žica smještena daleko od centra konjića. Većina pomaka mogu se opisati kao kombinacije kretanja žice u tri smjera X, Y i Z i sukladno tome će deformacije glasnjače odgovarati kombinaciji ova tri moda TD1, TD2 i TD3.

Frekvencije TD1 i TD2 zajedno s Helmholtzovom (zračni mod A_0) su prisutne u uzlaznom dijelu tona. Uvijek kada se pobudi mod TD1, tada je u tonu prisutna i komponenta zračnog moda A_0 . Udio šuma u uzlaznom - prijelaznom dijelu tona mijenja se ovisno o kutu napetosti žice prije otpuštanja. Jednako tako, udio šuma u uzlaznom dijelu tona je manji što se žica trza na mjestu udaljenijem od konjića.

Na slici 11, slučaj I, zadebljanom linijom (crtež desno) je prikazana deformacija glasnjače prilikom trzanja žice u smjeru osi X. Radi se o modu TD2. Trzanjem jedne od bas žica, palcem, tirando, približno pod kutem od 30° (slučaj II na slici 11), nastaje kombinacija TD1 i TD2 pri čemu se ukupna deformacija može rastaviti na:

- a) TD2 nastao uslijed X pomaka žice
- b) TD2 nastao uslijed Z pomaka
- c) TD1 nastao uslijed Z pomaka



Slika 11. Prikaz modova u ovisnosti o smjeru trzanja žice

Primjer III na slici 11 prikazuje kakva deformacija nastaje ako se ista žica trza tehnikom apoyando. Z komponenta je tada negativna (žica je nategnuta u suprotnu stranu), što mijenja izgled nastale deformacije. Dio glasnjače koji je prilikom tiranda

bio izdignut sada se uvukao prema leđima, što je označeno s -b. Ukupni pomak TD2 nastaje zbrajanjem pomaka nastalih uslijed X komponente i Z komponente (na slici je prikazan s a-b) i zbog negativnog predznaka pomaka b znatno je manji u odnosu na tirando iz prethodnog primjera (II). Na primjerima IV i V prikazani su pomaci glasnjače prilikom trzanja melodijskih žica pod kutem od 30° (IV) i -30° (V).

4 Utjecaj konstrukcije pojedinih elemenata na zvučnu sliku instrumenta

4.1 Glasnjača

Klasična gitara potekla od Antonia Torresa (19. stoljeće, utemeljitelj moderne gitare) još uvijek se istražuje i mijenja. Prema Torresu za ton gitare isključivo je odgovorna glasnjača. Za glasnjače koncertnih gitara do 70-tih godina 20. stoljeća upotrebljavala se je rezonantna smreka, a od 70-tih godina počeli su se koristiti cedar i sekvoja, ali i kombinacije rezonantnih drva s kompozitnim materijalima, kao što su karbon i kevlar.

Debljina glasnjača Torresovih gitara bila je oko 2,4mm središnjim dijelom i oko 1,4mm na rubovima. Za španjolske graditelje Santos Hernandeza (1870-1943), Hernandeza (1895-1975) i Aguada (1897-1982), karakteristične su glasnjače od smreke debljine oko 2mm. Španjolac Ignacio Fleta (1897-1977) za glasnjače je koristio cedar debljine 2,6mm u središnjem dijelu i 2,1mm na rubovima. Za to vrijeme gitare su mu bile izuzetno glasne. Nijemac Herman Houser (1882-1952), na čijoj gitari je koncertirao Segovija, koristio je rezonantnu smreku iz bavorskih šuma debljine 2,5mm do 3mm, što je bilo izrazito deblje od gitara španjolskih graditelja tog vremena. Jedan od najcjenjenijih francuskih graditelja Robert Bouchet (1898-1986) radio je glasnjače od smreke 2mm do 2,1mm. Francuz Daniel Friederich (1932 – 2020) smatran jednim od najvećih graditelja današnjice, za glasnjače je uspješno koristio smreku i cedar. Osobnost njegovih glasnjača je da su u središtu tanje nego na rubovima. One od cedra su debljine 2,1mm u središtu, 2,2mm oko rubova i 2,4mm do 2,5mm u gornjoj polovici glasnjače. Glasnjače od smreke su bile nešto tanje. Jose Romanillos (1932 – 2022) slavni španjolsko-engleski graditelj kojeg je proslavio gitarist Julian Bream, svoje glasnjače je tanjio na 2,5 do 2,7mm u središtu i 1,9mm do 2,2mm na rubovima. Prema (Courtnall, 1993)

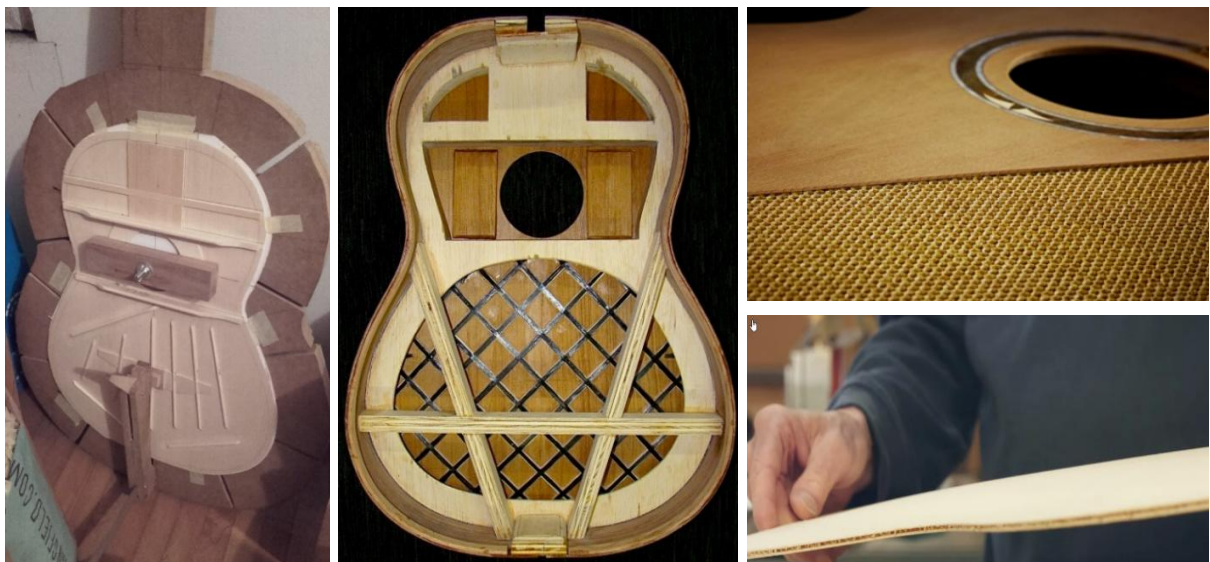
Iz izloženog se može zaključiti da su debljine glasnjača u području 1,9mm do 3mm, kod gitara građenih klasičnom gradnjom (bez kompozitnih materijala). Zbog potrebne čvrstoće, kako bi izdržala napetost žica, glasnjača je pojačana letvicama od smreke ili cedra. O letvicama, njihovim svojstvima, dimenzijama i položaju na glasnjači ovisi kakva će biti glasnoća i boja tona instrumenta. U načelu što je masa glasnjače s letvicama manja, a glasnjača čvršća (da joj se površina ne uvija), instrument će biti glasniji i bojom zvuka tamniji. Ovo iz razloga što će titranje žica lakše pobuditi glasnjaču na vibracije kada je ona lakša, a što je čvršća, titrat će istovremeno većom površinom, bez uvijanja pojedinih dijelova (biti će dominantni niži modovi A0, T(1,1) i T(2,1)), što će rezultirati većim udjelom osnovnog i prvih nižih harmonika u

cjelokupnom frekvencijskom spektru (manji udio alikvota) te time proizvesti glasniji i tamniji ton.

Sredinom 70-tih godina prošlog stoljeće Australac Greg Smallman napravio je gitaru s glasnjačom od cedra, debljine cca 0,8mm, koja je bila ukrućena letvicama od balze (balsa, balzovina – tropsko, najlakše drvo), koje su zbog pojačanja presvučene karbonskim nitima. Smallmanova konstrukcija glasnjaču ukrućuje cijelom površinom osim na rubovima, što glasnjači daje sličnost membrani zvučnika. Kako bi smanjio rasipanje pobudne energije žica u nepotrebne vibracije dijelova instrumenta – osim vibracija glasnjače - glasnjača je učvršćena na okvir od debele šperploče, a stijenke i leđa instrumenta su napravljeni iz laminiranih furnira, kako bi bili čvršći i krući. Gitara je imala neusporedivo veću glasnoću u odnosu na gitare građene klasičnom gradnjom. Smallmanovu gitaru, a time i novu konstrukciju gitara, svijetu je predstavio gitarist John Williams. Gitare takvih konstrukcija popularno se nazivaju Smallman gitare ili „latice braced“ gitare (raspored letvica ispod glasnjače je u obliku rešetke). Gitare ovakve konstrukcije su najglasnije, ali i najteže (masa se kreće od 3,4kg starije do 2,2kg kod novijih s karbonskim elementima vrata – gitare tradicionalne gradnja mase su oko 1,3kg).

Kako bi glasnjaču napravili lakšom i čvršćom, krajem 80-tih godina, gotovo u isto vrijeme Nijemci Mathias Damman i Gernot Wagner razrađivali su konstrukciju glasnjače koja se sastoji od dvije ekstremno tanke glasnjače (0,6mm), između kojih je u sendviču šupljikavo saće. Gitare s ovakvim glasnjačama također su izuzetno glasne, gotovo kao Smallmanove, ali bojom tona su sličnije klasično građenima. Nazivaju se „double top“ gitarama.

Na slici 12. prikazane su glasnjače tradicionalne, lattice braced i double top konstrukcije.



Slika 12.

Tradicionalna
gradnja

Lattice braced

Double top

Koncertni instrumenti građeni su kao i trkaći automobili – svaki element je doveden do krajnjih granica izdrživosti materijala s ciljem željenog zvuka. Konstrukcija glasnjače svojstvena je za svakog graditelja. Struktura letvica samo u grubo određuje zvučnu sliku instrumenta, obzirom da položaj letvica djelomično određuje izgled pojedinih modova. Detalji kao što su raspored mase i elastičnosti pojedine letvice bitno utječu na konačnu zvučnu sliku. Pri tome, za ostvarenje željenih ciljeva često se koriste statička mjerenja progiba glasnjače pod opterećenjem na pojedinim dijelovima kako se ne bi prešle granice izdržljivosti materijala. Ovim mjerenjima je moguće utvrditi i podešavati zone na glasnjači koje će se više ili manje uvijati kako bi se istaknuli ili potisnuli pojedini modovi rezonancija. Također, ovako je moguće međusobno uspoređivanje pojedinih instrumenata kako bi proizveli što sličniju zvučnu sliku. Uz mehanička mjerenja korisna su i akustička mjerenja kojima se mogu vidjeti pojedini modovi rezonancija. U svemu tome je presudno iskustvo i vještina.

Materijal za izradu glasnjače poželjno je da ima što veći odnos čvrstoće i težine, da što manje prigušuje vibracije i da se zvuk kroz njega širi što brže. Tradicionalni materijali za izradu glasnjače i letvica jesu rezonantna smreka, cedar, sekvoja i rezonantna jela.

Rezonantna smreka je posebna vrsta smreke koja raste u gorskim predjelima i odlikuje se velikom čvrstoćom u odnosu na masu i velikom brzinom širenja zvuka (cca 3600 m/s u smjeru godova). Tradicionalno je najrašireniji materijal za izradu glasnjača svih gudačkih i trzalačkih instrumenata. Mase je 360 do 380 kg/m³ pri vlazi od 9%. Godovi su raspoređeni 7 do 10 godova po cm. Za izradu glasnjače gitare koriste se daske cca 5mm debljine s isključivo okomitim godovima na površinu. Godovi uzduž daske ne smiju biti prekinuti kako bi se zadržala čvrstoća i brzina širenja zvučnih vibracija. U tu svrhu najbolje su daske koje se dobivaju radijalnim klanjem trupca, jer na taj način drvo puca uzduž godova i osigurava se njihova neprekinutost. Piljenjem je teško ostvariti da se ne zahvati god, ali većina dasaka koje se mogu naći na tržištu dobivaju se piljenjem iz trupaca, a glazbalari pažljivo procjenjuju i odabiru najbolje od njih. Svakako, loša konstrukcija može pokvariti najbolju dasku, kao što dobra konstrukcija može nadoknaditi manje joj nedostatke. Kod modernih konstrukcija kao što su „lattice braced“ i „double top“ gitare, ove manje nesavršenosti drva ne dolaze do tolikog izražaja zbog velikog utjecaja ostalih elemenata u konstrukciji glasnjače.

Cedar je u prosjeku nešto lakši od rezonantne smreke, 320 do 390 kg/m³, a brzina širenja zvuka u smjeru godova je oko 4100 m/s. Zbog ovih karakteristika popularan je materijal za izradu glasnjača. Prema iskustvu graditelja, s cedrom je lakše napraviti glasniju gitaru, cedar više filtrira više harmonike tona pa je na gitari s glasnjačom od cedra lakše proizvesti čisti ton u kojem se ne čuje „zvuk noktiju“. Prema iskustvu glazbenika, glasnjača od cedra se tonski brže razvije u odnosu na glasnjaču od smreke (nakon izgradnje instrumenta potrebno je neko vrijeme da se glasnjača stabilizira, rasvira - razvije svoje pune tonske sposobnosti).

Rezonantna jela je po svim mehaničkim svojstvima vrlo slična karakteristikama rezonantne smreke. Obradene daske vizualno je teško razlikovati. Dok su svježe

odsječene, najlakše ih je razlikovati po mirisu. Jela ima neugodan miris, dok smreka miriše aromatično po smoli. Za razliku od smreke, jela nema smolenice, pa je prigušenje zvuka u njoj manje. Brzina zvuka u smjeru godova je nešto veća, dok je u poprečnom smjeru nešto manja u odnosu na smreku. Glazbalari je rijetko koriste, za što nema vidljivih razloga. Ton jelove daske u odnosu na jednaku smrekovu dasku je viši, što se može objasniti manjih prigušenjem visokih frekvencija zbog nedostatka smole.

Glasnjača se obično izrađuje lijepljenjem dviju dasaka po širini, obzirom da jedna daska najčešće nije dovoljno široka. Pri tradicionalnoj gradnji tako spojene daske se blančaju ili bruse na debljinu oko 2,4mm. Graditelji debljinu određuju iskustveno, ovisno o svojstvima ploče – savijajući je ispituju elastičnost, kuckaju osluškujući zvukove, mjere i sl. Ploča se obrezuje na oblik tijela, ugrađuje se rozeta, izrezuje rupa i lijepe letvice. Tradicionalno glasnjači se daje blagi oblik kupole sa središtem u središtu konjića, zbog povećanja čvrstoće. Kupola je takva da je središte konjića od rubova glasnjače izdignuto 1mm do 3mm. Oblik kupole, kao i način na koji se on postiže, razlikuju se od graditelja do graditelja. Jedan od načina je da se prilikom lijepljenja letvica, glasnjača položi na dasku s udubljenjem u obliku željenog oblika kupole, a stegama se letvice i glasnjača utisnu u nju. Zalijepljene letvice se oblikuju dlijetima i brusnim papirom kako bi se postigla željena čvrstoća, elastičnost i ton. Pri oblikovanju letvica, ako se želi sniziti frekvencija tona glasnjače smanjuje se visina letvica. Smanjenje visine malo smanjuje masu, ali znatno više smanjuje krutost. Rezonantna frekvencija letvica, kao i ploča ovisi o masi i krutosti – veća masa spušta rezonantnu frekvenciju, dok je veća krutost podiže. Želi li se povisiti frekvencija glasnjače, letvice se stanjuju na krajevima kako bi im se što više smanjila masa, a malo promijenila krutost, a time i krutost glasnjače. Podešavanja glasnjače graditelji obično rade u fazama, paralelno s gradnjom instrumenta. Tako prije zatvaranja kutije (korpusa) podešavaju letvice i glasnjaču na neki ton ili krutost, ali jednako tako ih ponovno podešavaju nakon zatvaranja kutije. Radeći u fazama lakše je pratiti i kontrolirati kako se glasnjači mijenjaju tonska i mehanička svojstva.

4.2 Leđa i stranice

Osim za stvaranje rezonantne kutije, zadaća leđa i stranice je da osiguraju mehaničku stabilnost instrumenta rasterećujući glasnjaču od sila koje na njoj stvaraju žice. Gitara se drži za vrat i dio tijela koji tvore leđa i stranice. To su dijelovi instrumenta najizloženiji habanju. Iz tih razloga, drvo koje se koristi za stranice i leđa znatno je tvrđe od drva za glasnjaču. Leđa i stranice obično su od jednakog materijala koji je tradicionalno palisander, javor, čempres, orah ili mahagonij. Ovi elementi uvelike određuju izgled instrumenta, pa se uz navedena mogu susresti i mnoga druga egzotična drva sa zanimljivim izgledom godova i sličnim svojstvima.

Sa stanovišta zvuka, stranice i leđa ne smiju gušiti zvučne valove nastale u kutiji, kao ni titranja glasnjače. Da bi to postigli, poželjna je velika masa i krutost. Tradicionalno, stranice su debljina cca 1,8mm kako bi se mogle savijati. Ova debljina ne osigurava veliku krutost ni masu. Da bi poboljšali efikasnost (glasnoću) instrumenta graditelji često lameliraju stranice od 2 ili 3 dijela jednakog ili s unutarnje strane lakšeg drva.

Kod modernih gradnji, kako bi se stranice ukrutile, a da se bitno ne poveća ukupna težinu instrumenta, stranice su ojačane karbonskim nitima ili platnom. U zvučnom smislu, konstrukciju leđa možemo podijeliti u dvije skupine – leđa koja vibriraju i leđa koja ne vibriraju. Leđa koja vibriraju doprinose boji zvuka instrumenta stvarajući zanimljiviji zvuk. Rezonantna frekvencija takvih leđa u odnosu na rezonanciju glasnjače T(1,1) je razmaknuta od jednog do nekoliko polutonova. Neki graditelji navode razmak od pola tona ispod ili iznad T(1,1) (npr. ako je glasnjača podešena na G, leđa se podešavaju na F# ili G#). Australški graditelj Trevor Gore u svom intervjuu s Robert O'Brienom (Intervju s graditeljem Trevor Gore, 2022) navodi razliku od 4 polutona iznad frekvencije glasnjače. Teška i kruta leđa ne vibriraju i takva leđa doprinose povećanju efikasnosti (glasnoći).

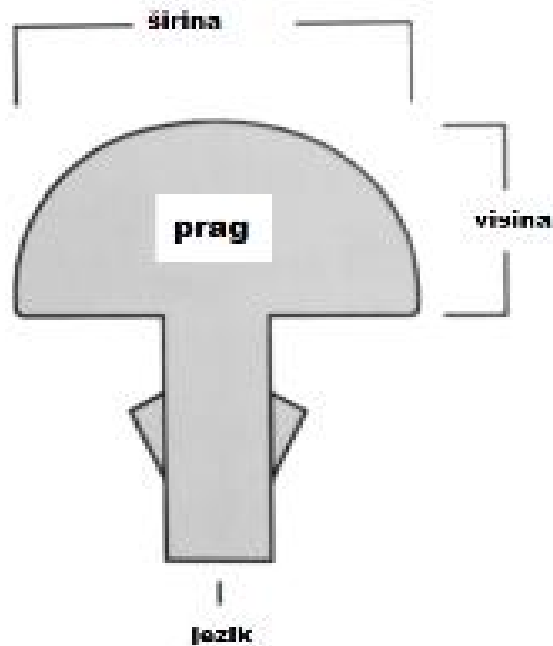
4.3 Vrat

Vrat gitare je dio instrumenta preko kojeg su napete žice i na kojem se nalaze pragovi (prečnice ili kote). Vrat mora biti vremenski postojan, ne smije se kriviti niti uvijati pod utjecajem sila žice, kao niti pri promjenama temperature ili vlage u zraku. O njegovom obliku ovisi „svirljivost“ instrumenta. Graditelji često grade vratove gitare prilagođene svojim klijentima, muzičarima. S akustičkog stanovišta vrat mora biti dovoljno čvrst i težak kako ne bi vibrirao i trošio energiju žica. Tradicionalni materijal za izradu vrata je drvo honduraškog mahagonija, španjolskog cedra ili javora. Od navedenih materijala mahagonij se najmanje uvija s promjenom vlage i temperature, dok je cedar najlakši. Osim navedenih, koriste se i druge postojeće vrste drva, a sve češće se za dugotrajnost i stabilnost koriste kombinacije drva i kompozitnih materijala, kao što je karbon. Sa stanovišta zvuka, neki graditelji skloniji su mahagoniju i njegovoj većoj masi, jer smatraju da doprinosi većoj efikasnosti instrumenta u cjelini. Manje energije žica se gubi u titranju vrata, a više se prenosi u titraje glasnjače.

4.3.1 Prstohvat i pragovi

Prstohvat je površina vrata na kojoj se nalaze pragovi. Kod klasičnih gitara to je posebna drvena daščica zalijepljena na vrat. Njezina uloga je dvostruka – povećava stabilnost vrata i sprječava njegovo habanje, obzirom da se površinom prstohvata neprestano klizi prstima, koji su često znojni. Pragovi su postavljeni u proreze na prstohvatu. Iz navedenih razloga za prstohvat se koriste čvrste, tvrde i postojeće vrste drva kao što su ebanovina i palisander. Uobičajena debljina prstohvata je 5mm do 7mm. Pragovi kod klasičnih gitara rade se od žice koja je najčešće legura bakra i nikla (12% do 18%). Pragovi neznatno utječu na zvuk instrumenta, ali ako nisu postavljeni na prava mjesta ili su istrošeni, instrument neće imati dobru intonaciju, a kod istrošenih pragova odsvirani tonovi mogu zujati. Važno je da su od tvrdog materijala, kako ne bi prigušivali ton i da osiguravaju sigurnu, jedinstvenu prijelomnu liniju kako bi žica ispred praga prestala titrati, a iza njega – prema konjicu glasnjače, slobodno titrala. Pragovi, kao i vratovi gitara mogu biti različitih dimenzija i jednako tako utječu na lakoću sviranja. Širi i viši pragovi omogućuju lakše dobivanje čistog tona, kao i teoretski dulji vijek trajanja, ali s njima se teže svira (potreban je jači

pritisak i usporavaju brzo klizanje prstiju preko pragova). Kada se potroše, kod širih pragova mogućnost pogrešne intonacije je veća obzirom da linija loma žice može biti više pomaknuta od središnjice, nego što je to slučaj kod uskog praga. Žica za pragove ima poluokrugli vrh koji se naziva „kruna praga“ i ravni dio s kojim sjeda na prstohvat.



Slika 13. Presjek žice praga

Osnovne mjere praga su visina i širina krune. Donji dio praga naziva se „jezik“ i služi za učvršćenje praga u prorezu prstohvata. Bočno na jeziku nalaze se mali izdanci – bodlje koje pomažu učvršćenju praga u prorezu (Slika 13.).

Sve češće se koriste pragovi od nehrđajućeg čelika kao i pragovi koji se rade od legure bakra, kositra i željeza – bez nikla. Obje vrste pragova su veće tvrdoće od onih s niklom, što im omogućava dulji vijek trajanja, ali graditeljima je s njima teže raditi, jer su teški za obradu i brzo tupe alate. Pragovi bez nikla pogodni su za glazbenike koji su alergični na nikl.

Uobičajene dimenzije pragova za klasične gitare jesu visina 0,9 do 1,4mm, te širina 2 do 2,2mm.

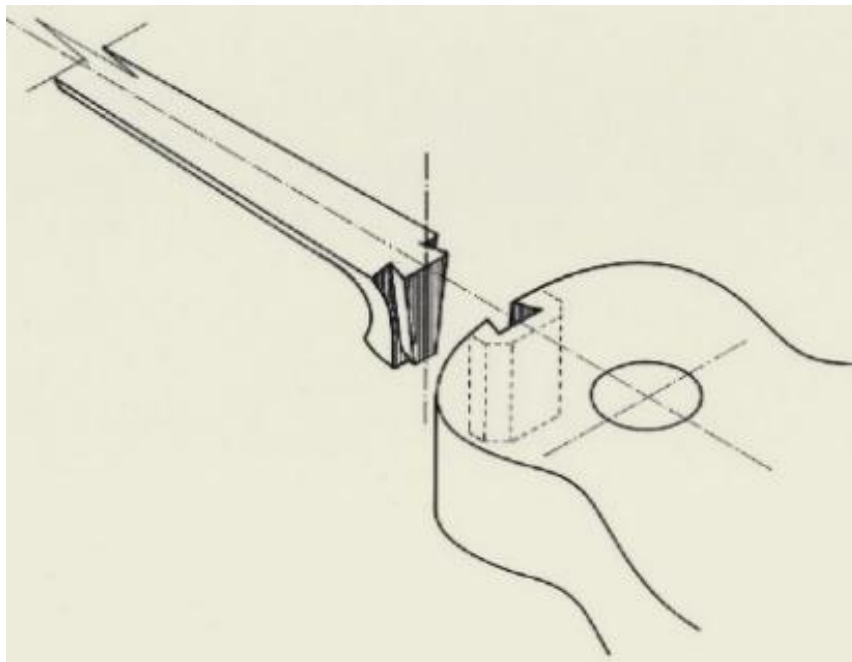
4.3.2 Spoj vrata i tijela

Tradicionalan spoj vrata i tijela kod klasičnih gitara je tzv. „španjolska peta“. To je spoj kod kojeg se na peti vrata urežu utori u koji se umetnu i zalijepu stranice. Glasnjača i leđa se lijepe za vrat zbog čega je zamjena vrata vrlo zahtjevan i rizičan posao, jer je potrebno odlijepiti prstohvat, glasnjaču, leđa i stranice od vrata.



Slika 14. Tradicionalan spoj vrata i tijela

Drugi način spoja tijela i vrata koji je uobičajen kod akustičnih gitara, a susrećemo ga i kod klasičnih gitara je „spoj na klin“ (Slika 15.). Kod ovog spoja tijelo i vrat se spajaju s kutijom (korpusom) nakon što su tijelo i vrat završeni.

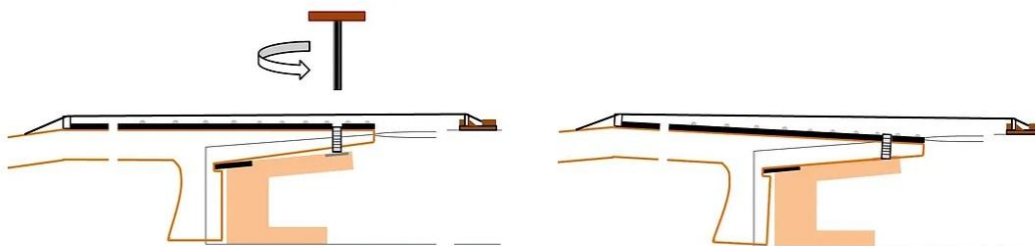


Slika 15. Spoj na klin [8]

Ovakva konstrukcija olakšava izvedbu vrata strojevima, a eventualni popravak vrata je nešto jednostavniji, jer je za njegovo odvajanje od kutije potrebno odlijepiti samo prstohvat i rastaviti klin. Kod navedenih konstrukcija i dalje ostaje problem prilikom promjene pragova koji se zakucavaju čekićem ili pritišću u urezane žljebove, što je nezgodno iznad tanke glasnjače, koja može puknuti uslijed udara ili pritiska. Promjena kuta vrata ili stvaranje luka do kojih dolazi s vremenom zbog napetosti žica, vrlo je česta pojava na starijim instrumentima. Problem se očituje u povećanoj visini žica i međusobnom približavanju konjića (konjića na vratu i konjića na glasnjači), što je obično popraćeno krivom intonacijom instrumenta. Manji problemi se rješavaju smanjenjem visine konjića na glasnjači, ako je moguće, ali pravo rješenje je poravnavanje ili zamjena vrata. Promjena visine konjića kod vrhunskih koncertnih gitara najčešće nije prihvatljiva, jer direktno utječe na glasnoću i boju tona instrumenta (visina konjića direktno utječe na pobudu pojedinih modova glasnjače).

Iz navedenih razloga, poželjna konstrukcija vrata je ona kod koje se vrat i tijelo mogu jednostavno rastaviti. Sve više se susreću koncertne gitare koje imaju vrat odvojiv od tijela i omogućuju jednostavno podešavanje visina žica (graditelji Smallman, Garrett, Schramm).

Tome u prilog idu istraživanja koja pokazuju da u frekvencijskom području ispod 1kHz nema značajnijih razlika u zvuku obzirom na način pričvršćenja prstohvata za glasnjaču - da li je lijepljen u jednoj ili više točaka ili ako uopće nema kontakt s glasnjačom (Perry) . Na slikama 16. i 17. prikazan je rastavljivi spoj vrata i tijela s mogućnošću podešavanja visine žica.



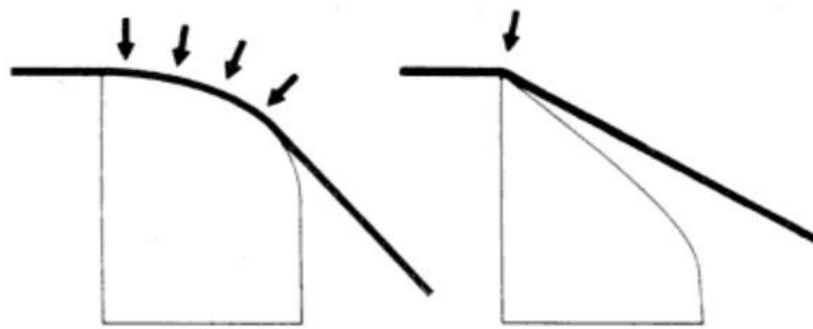
Slika 16. Princip podešavajućeg kuta vrata (visina žica) - izvor Garrett Lee



Slika 17. Vrat i tijelo na rastavljanje - izvor Garrett Lee

4.4 Most i konjić

U stvaranju zvučne slike instrumenta konjić i most (često se zajednički nazivaju samo konjić) je jedan od najznačajnijih elemenata. On mora prenijeti vibracije žica na glasnjaču uz što manje gubitaka. Zbog toga je važno da je čvrst, krut i lagan. Kod klasičnih gitara most je zalijepljen za glasnjaču. U mostu je urezan utor širine 2mm do 4mm u koji je utaknut konjić. Tradicionalno, kao materijal za konjić se koristi goveđa kost, a u novije vrijeme i karbon. Materijal za most najčešće je palisander, ebanovina ili javor. O visini konjića, kao i dimenzijama mosta (duljini, širini i masi) ovisi koji mod glasnjače i koliko jako će biti pobuđen. Osim upliva na zvučnu sliku, most i konjić određuju lakoću sviranja instrumenta i točnost njegove intonacije. Svaki graditelj ima svoj „recept“ za izvedbu konjića. Ono što možemo navesti kao zajedničko za mostove i konjiće klasične gitare jest: da je visina žica iznad glasnjače 8mm do 14mm, duljina mosta 170mm do 190mm, širina mosta 26mm do 30mm, visina središnjeg dijela mosta u kojem je smješten konjić 7mm do 8mm, a debljina mosta kod krilca 3 do 4mm s kosinom na krajevima. Kod izvedbe mosta i konjića potrebno je paziti na detalje. Konjić i žice koje se pregibaju preko njega moraju imati ispravan nagib i dovoljnu dodirnu površinu kako bi imale sigurnu prijelomnu točku i dovoljnom silom ga pritiskale prema glasnjači (slika 18.). Žica treba titrati ispred konjića i njezino titranje treba pomicati konjić s mostom i glasnjačom kao cjelinu. Kost treba imati optimalno tijesan dosjed u mostu kako ne bi nastali gubici prijenosa vibracija i parazitno zujanje. Ne smije biti zračnosti između stijenki mosta i konjića - na stranicama ni na dnu (konjić ne smije ispasti ako se instrument bez žica okrene glasnjačom prema zemlji). S druge strane, dosjed ne smije biti previše tijesan, kako ne bi napinjao prednju stijenku mosta, koja bi zbog svoje tankosti (2- do 4mm) mogla puknuti.



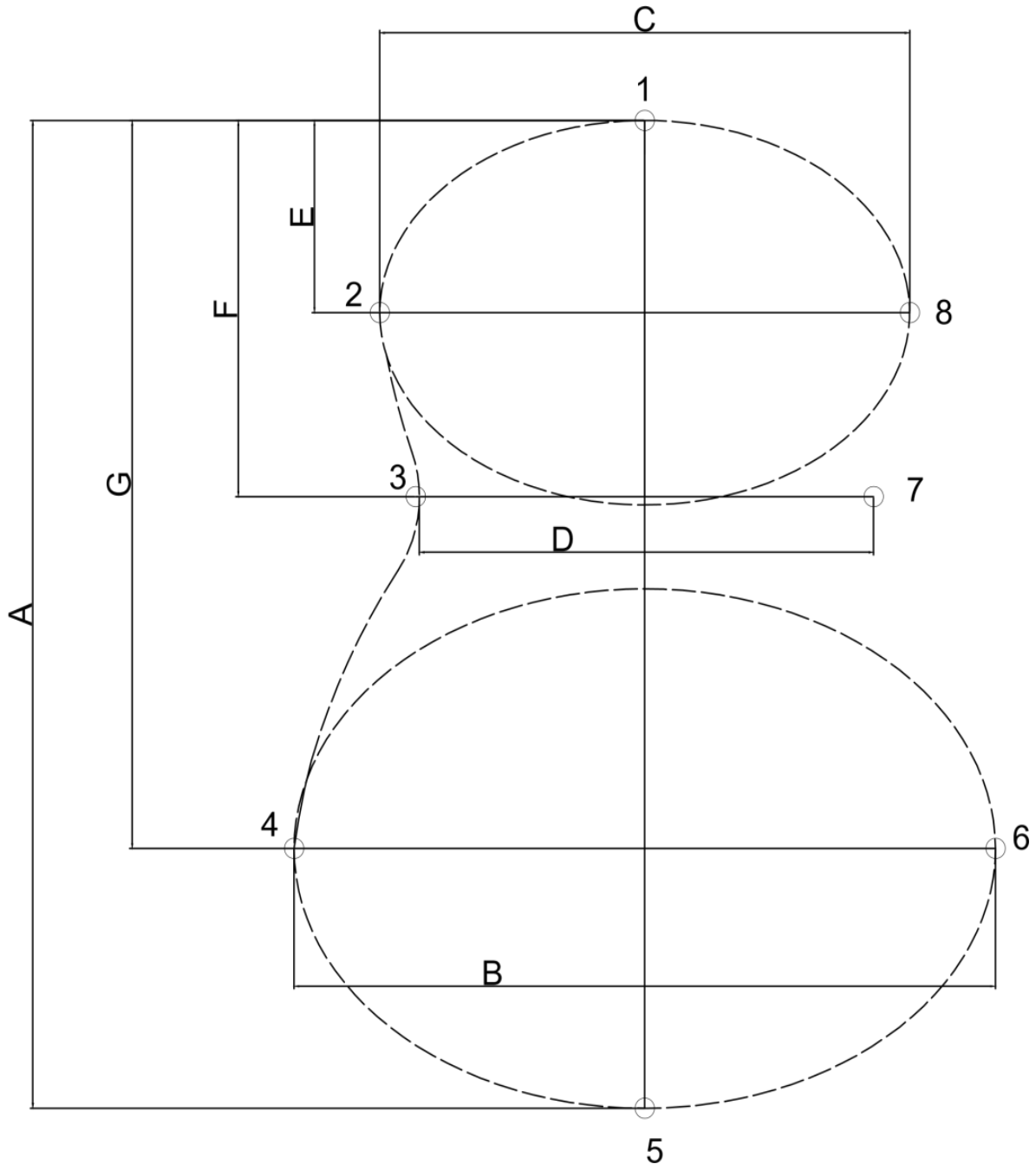
Slika 18. Efikasna (lijevo) i neefikasna (desno) izvedba konjića - izvor Ervin Somogyi

Kako bi osigurali potreban nagib žica, neki graditelji koso buše rupe za žice na mostu (ulaz provrta je viši u odnosu na glasnjaču od izlaza provrta unutar mosta) i sukladno tome rade nagnuti stražnji dio mosta oko kojeg su pričvršćene žice (niži je dio unutar mosta, dok je viši na stražnjem dijelu mosta). Dno mosta se prije lijepljenja na glasnjaču mora oblikovati prema kupoli glasnjače, kako bi se most na glasnjaču zalijepio bez imalo zračnosti. Ovo je jedan od kritičnijih spojeva na instrumentu i česta je pojava na starijim instrumentima da se uslijed sile natezanja žica most djelomično odlijepi, stražnji dio mu se izdigne, a konjić se približi vratu, što može rezultirati pogrešnom intonacijom, gubitkom glasnoće i mogućim nepoželjnim zujanjima.

5 OBLIK I KONSTRUKCIJA TIJELA

Klasična, španjolska gitara ima svoj prepoznatljiv izgled, ali gitare svakog graditelja su različite. Od izvorne Torresove gitare, svaki graditelj je nešto promijenio, što slučajno, što namjerno i ne postoji standard koji određuje dimenzije instrumenta.

Niže je slika 19. i tablica s dimenzijama gitara nekih od slavni graditelja tog instrumenta.



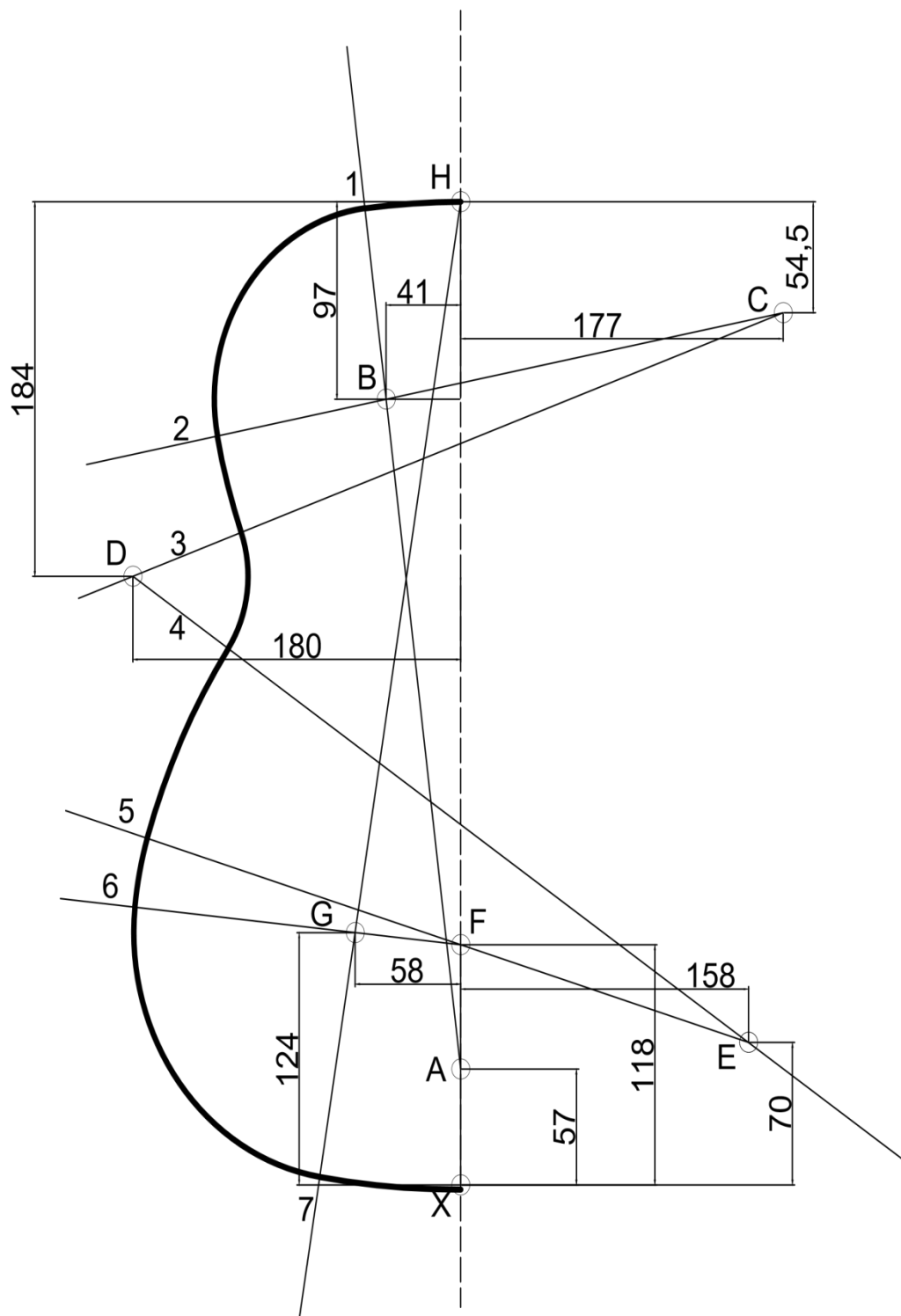
Slika 19. Dimenzije tijela s oznakama prema tablici 1 – preuzeto iz (Tenllado, 2012)

Dimenzije gitara vezane uz sliku 1	A - visina tijela	B - širina bokova	C - širina ramena	D - širina struka	E	F	G
Antonio de Torres	481	360	272	235	94	184	356
Santos Hernández	485	363	274	236	100	186	346
Hermann Hauser	482	357	271	230	92	188	356
Hernández Aguado	490	372	278	245	110	194	360
Ignacio Fleta	497	361	288	242	102	194	354

Tablica 1. Dimenzije tijela gitara slavnih graditelja. Oznake su povezane uz sliku 19. preuzeto iz (Tenllado, 2012)

5.1 Geometrijska konstrukcija oblika tijela

Nekada su graditelji oblik instrumenta zacrtavali slobodnom rukom i uz pomoć krivuljara. Tijelo gitare se može konstruirati i uz pomoć geometrijskih tehnika – geometrijskim priborom ili računalom. Na slici 20. je prikazana konstrukcija oblika tijela gitare graditelja Torresa.



Slika 20. Konstrukcija oblika tijela -preuzeto iz (Tenllado, 2012)

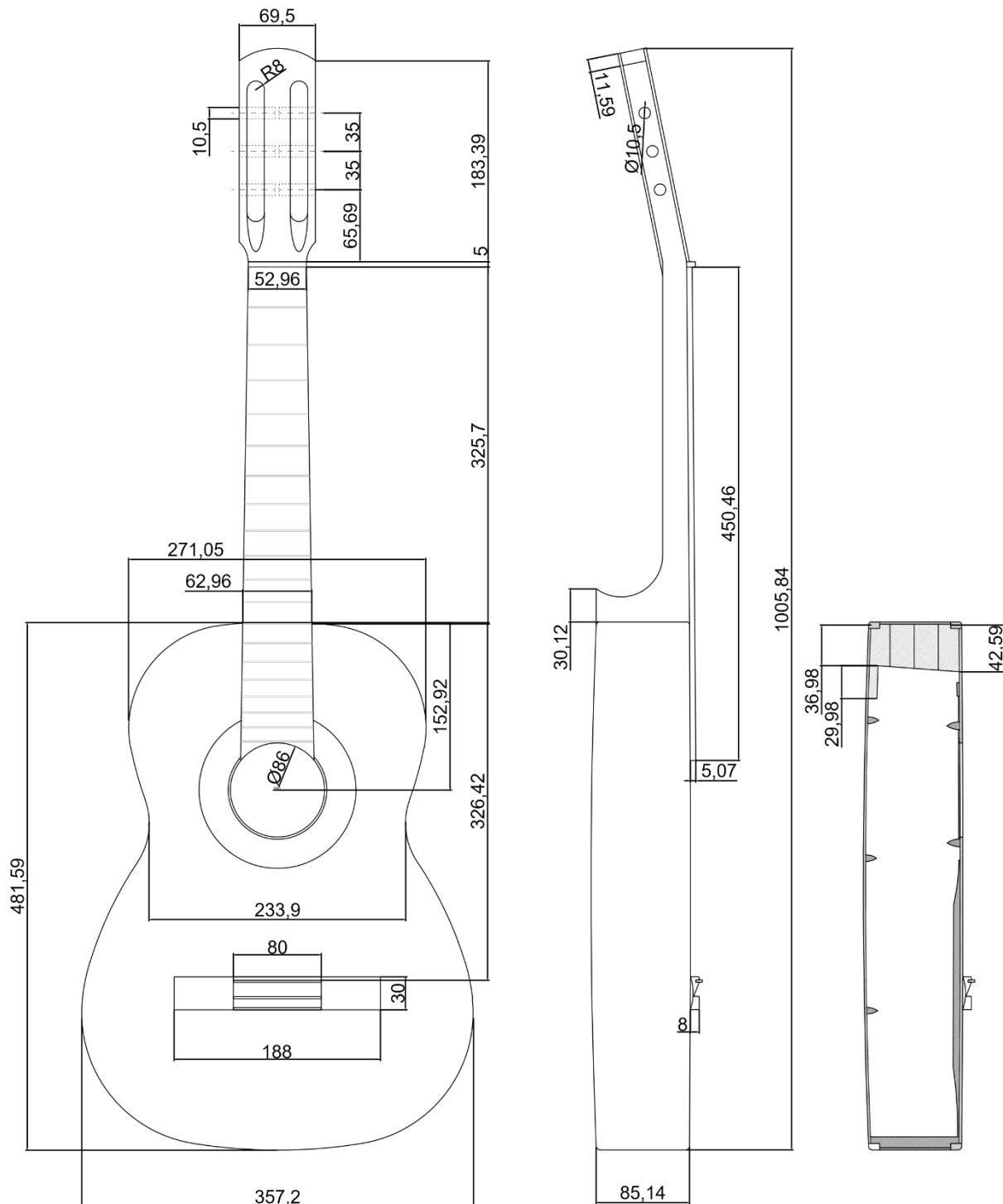
1. Negdje oko sredine papira nacrtamo simetralu glasnjače i na njoj dvije točke X i H međusobno udaljene 481mm. Točka X je na dnu, a točka H na vrhu.
2. Kroz točke X i H konstruiramo okomice na simetralu.
3. Označimo centar A 57mm iznad točke X.
4. Označimo centar B 41mm lijevo od simetrane i 97mm ispod okomice kroz točku H.
5. Označimo centar C 177mm desno od simetrane i 54,5mm ispod okomice kroz točku H.
6. Označimo centar D 180mm lijevo od simetrane i 184mm ispod okomice kroz točku H.
7. Označimo centar E 158mm desno od simetrane i 70mm iznad okomice kroz točku X.
8. Označimo centar F na simetrali 118mm iznad točke X.
9. Označimo centar G 58mm lijevo od simetrane i 124mm iznad okomice kroz točku X.
10. Centar H je već postojeća točka na gornjem dijelu simetrane.
11. Spojimo točke A-B, B-C, C-D, D-E, E-F, F-G i G-H, s linijama koje su označene brojevima 1,2,3,4,5,6 i 7 u svom produžetku.

Sada imamo postavljene granice krivulja koje će imati pojedine polumjere.

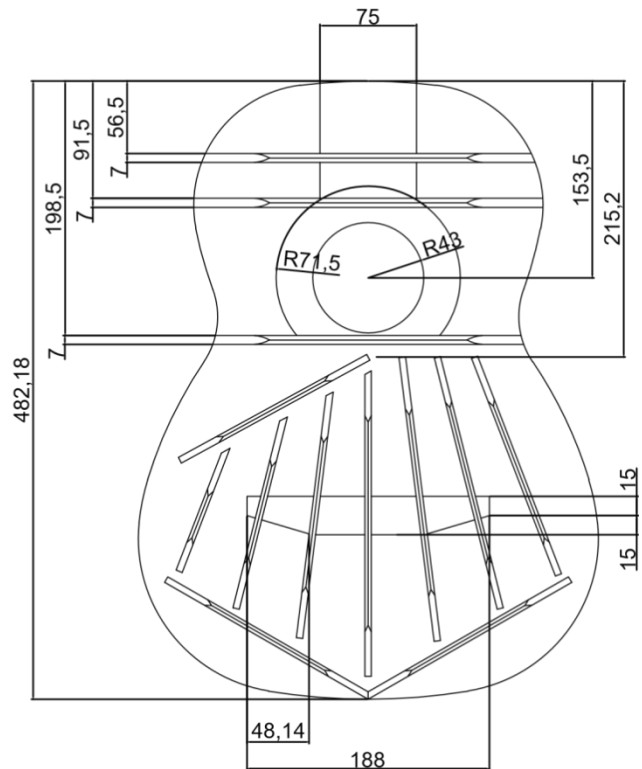
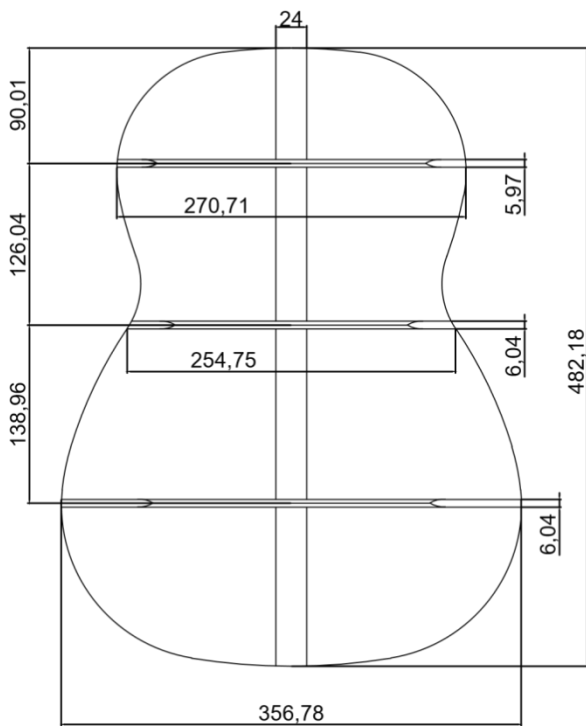
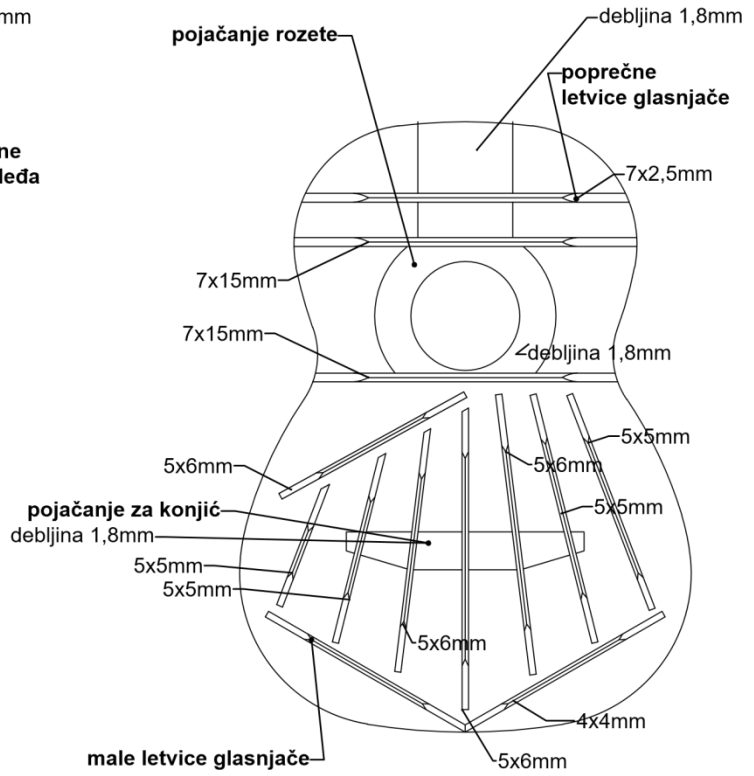
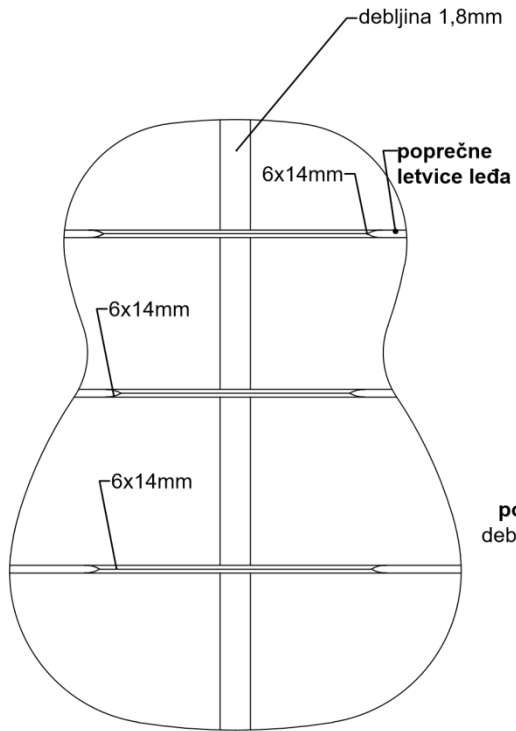
12. Sa središtem u točki A crta se luk od točke H do linije 1, radijusom 424mm.
13. Sa središtem u točki B crta se luk od linije 1 do linije 2, radijusom 95mm.
14. Sa središtem u točki C crta se luk od linije 2 do linije 3, radijusom 317,5mm.
15. Sa središtem u točki D crta se luk od linije 3 do linije 4, radijusom 62mm.
16. Sa središtem u točki E crta se luk od linije 4 do linije 5, radijusom 344mm.
17. Sa središtem u točki F crta se luk od linije 5 do linije 6, radijusom 178,5mm.
18. Sa središtem u točki G crta se luk od linije 6 do linije 7, radijusom 120mm.
19. Sa središtem u točki H crta se luk od linije 7 do točke X, radijusom 481mm.

(Izvor (Tenllado, 2012))

Na slikama 21. i 22. prikazani su nacrti tipične španjolske gitare, a u poglavlju 6, tablici 2 specificiran je potreban materijal za izradu.



Slika 21. Dimenzije tipične klasične gitare (predložak za nacrt (Bogdanovich, 2006))



Slika 22. Prikaz leđa i glasnjače gitare građene u španjolskom stilu (predložak za nacrt (Bogdanovich, 2006))

6 MATERIJAL ZA IZRADU KLASIČNE GITARE

Tablica 2. Popis materijala potrebnog za gradnju klasične gitare

7 Mjerenja akustičkih svojstva gitara

Kako bi se bilo koja stvar ili naprava u ljudskom okruženju mogla napraviti, a naročito unaprijediti, potrebno je poznavati njezina svojstva koja su objektivna - mjerljiva i usporediva. U gitarističkom okruženju poželjna svojstva instrumenta definiraju umjetnici, a glazbalari pokušavaju udovoljiti njihovim zahtjevima. Unatrag 30-tak godina glazbalari su imali na raspolaganju uglavnom instrumente i alate za mehanička mjerenja. Mjerali su fizička svojstva i dimenzije drva koje su obrađivali. Akustička svojstva instrumenta ocjenjivala su se slušanjem. Mjerenja vibracija i zvuka bila su dostupna rijetkima i obavljala su se uglavnom u svrhu znanstvenih radova. Danas, zahvaljujući tehnologiji, graditelji mogu mjeriti i uspoređivati akustička svojstva sagrađenih instrumenata u vlastitim radionama. Na internetu se mogu pronaći zvučni zapisi brojnih vrhunskih instrumenata iz kojih se mogu saznati neka od njihovih akustičkih svojstva. Ona mogu poslužiti graditelju kao reference kojima teži prilikom gradnje instrumenta. Potrebni alati mogu se nabaviti za vrijednost jednog ili dva sagrađena instrumenta i potrebno je uložiti nešto vremena za učenje kako bi se razumjela problematika mjerenja. U ovom radu pokušat ćemo opisati metode mjerenja akustičkih svojstva gitare koja se mogu jednostavno izvesti. Za mjerenje je potreban mikروفon, osobno računalo s muzičkom karticom i program za analizu zvuka. O kvaliteti korištene opreme ovise rezultati mjerenja, ali za mjerenja uspoređivanjem svojstava, pri istim uvjetima mjerenja zadovoljit će i ugrađena muzička kartica računala i mikروفon za kućnu upotrebu.

U mjerenjima je korišten kondenzatorski mikروفon Behringer B2, muzička kartica Focusrite Scarlett 2i4, prijenosno računalo HP s WIN 10 i program za analizu zvuka Audacity V2.3 (Slika 23.).

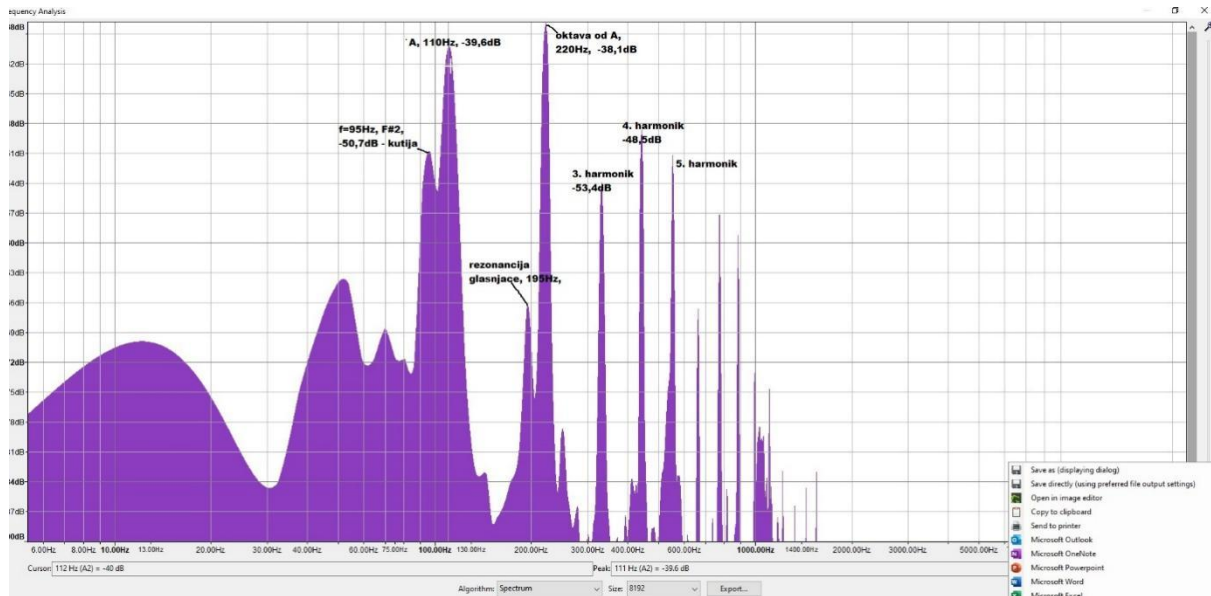


Slika 23. Mjerna oprema korištena za snimanje: prijenosno računalo, audio sučelje Focusrite Scarlett 2i4 i kondenzatorski mikروفon Behringer B-2 Pro

7.1 Mjerenje spektra pojedinog tona instrumenta

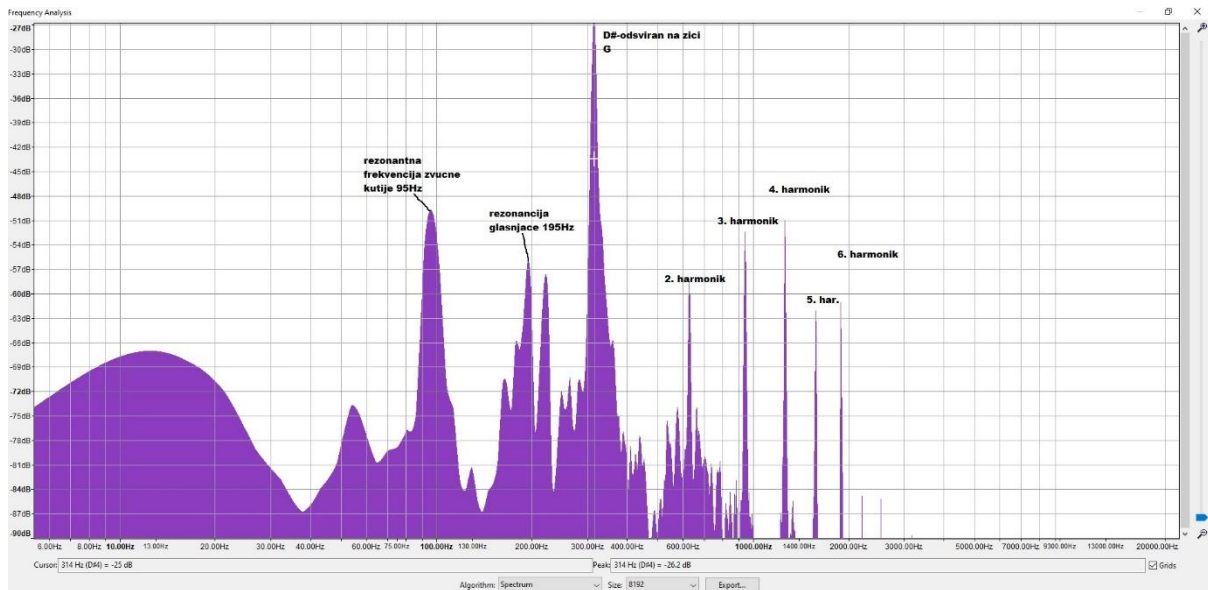
Ovim mjerenjem može se vidjeti kakav je spektralni sastav pojedinog tona instrumenta, kakav je odnos osnovnog tona i njegovih harmonika – alikvota. Slušanjem tona nekog instrumenta, snimanjem istog i njegovom frekvencijskom

analizom možemo steći iskustvo za vezu između onog što čujemo i onog što izmjerimo. Slično učenju solfeggia, kada naučimo vezu između onoga što čujemo i notnog zapisa. Analizom snimki pojedinog tona instrumenta možemo vidjeti da li u tom tonu ima nepoželjnih zvučnih komponenti i pretpostaviti što bi ih moglo proizvesti. U spektru pojedinog tona vidljive su i karakteristične rezonantne frekvencije instrumenta.



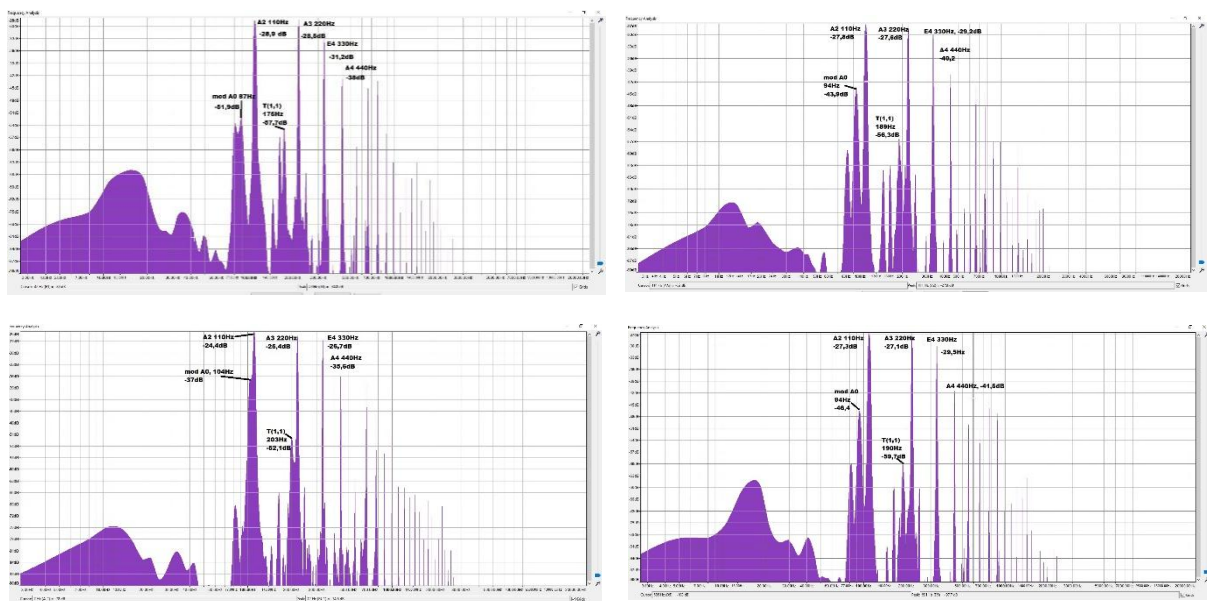
Slika 24. Spektr ton prazne žice A na gitari 111 graditelja Friedericha

Na slici 24. prikazan je primjer snimljenog spektra tona A dobivenog trzanjem prazne žice A iznad zvučnog otvora. Iz slike spektra se saznaje da, uz odsvirani ton A frekvencije 110Hz imamo prisutnu oktavu tog tona koja je glasnija za 1,5dB (stvara zvučni tlak veći 1,18 puta). Vidimo prisutnost i iznos 3., 4. i 5. harmonika tona A, ali i prisutnost nekih drugih frekvencija koje nisu harmonici odsviranog tona. Jasno uočljiva je frekvencija 95Hz, frekvencija rezonantne kutije kao Helmholtzovog rezonatora. Ovo je najniža rezonantna frekvencija gitara i kao što je već navedeno, kod klasičnih gitara ona je obično između 90 i 110Hz. Klasične gitare koje imaju frekvenciju višu od 110Hz ne zvuče dobro (ne zvuče očekivano, gitaristički), a one ispod 90Hz rijetke su, jer je tako nisku rezonantnu frekvenciju teško postići. Frekvencija 195Hz jedna je od rezonantnih frekvencija glasnjače. Iznosom ona pripada tonu G i moglo bi se pomisliti da je u spektru prisutna uslijed parazitnih vibracija prazne žice G. Iz spektralnih slika ostalih tonova odsviranih na istom instrumentu, osobito tonova odsviranih na žici G, može se vidjeti da je ova frekvencija prisutna kod gotovo svih odsviranih tonova, što nalaže zaključak da je jedna od rezonancija glasnjače, a ne ton „prazne“ žice G. Navedena situacija je prikazana na slici 25.



Slika 25. Spektar tona D# odsviranog na žici G – gitara 111 Friederich

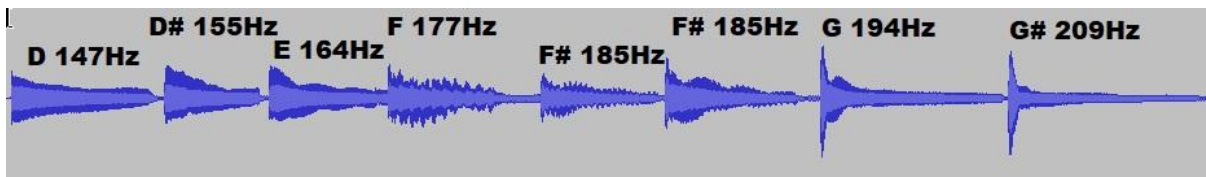
Usporedimo li spektre jednako odsviranog tona, na različitim gitarama vidjet ćemo da su različiti (slika 26.).



Slika 26. Frekvencijski spektri tona A na 4 studentske gitare: gore lijevo double top – španjolski stil, gore desno double top – lattice braced, dolje lijevo tradicionalna gradnja cedar, dolje desno tradicionalna gradnja smreka

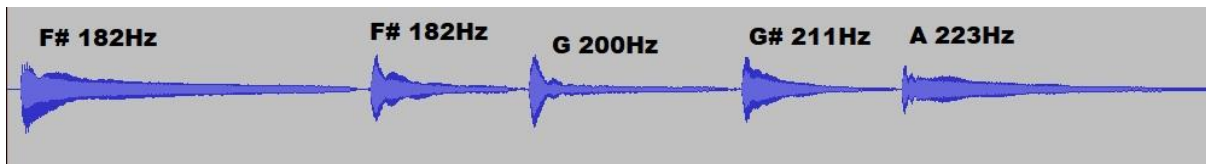
7.2 Mjerenja zvuka u vremenskoj domeni

Prikaz zvuka u vremenskoj domeni je osnovni i najjednostavniji prikaz mjerenja, koji prikazuje kako se zvučni tlak (glasnoća) mijenja u vremenu. U većini programa za snimanje i analizu zvuka to je prvi i glavni prikaz koji se prikazuje na ekranu. Iz tog prikaza, odnosno podataka koji opisuju promjenu zvučnog tlaka kroz vrijeme, matematičkim izračunima dobivaju se i ostali prikazi, kao što je spektralni prikaz. Iz vremenskog prikaza zvuka mogu se otkriti zanimljivi podaci o instrumentu kao što su npr. glasnoća pojedinog tona, njegovo trajanje, ujednačenost tonova, rezonantne frekvencije instrumenta i kako one utječu na ton.

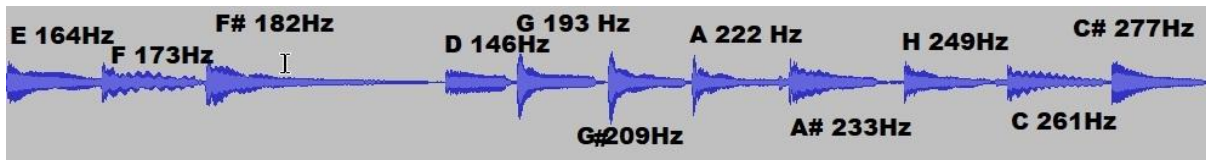


Slika 27. Vremenski prikaz uzastopno sviranih tonova na D žici – gitara Smallman 2014

Na slici 27. prikazan je vremenski prikaz uzastopno snimljenih tonova na žici D do tona Gis. Na slici se može vidjeti karakterističan izgled odsviranog tona kojem je frekvencija bliska rezonantnoj frekvenciji gitare. Na slici je to ton Gis. Ako usporedimo izgled ovojnice tona D i Gis možemo uočiti jasnu razliku – početak ovojnice tona D ima amplitudu približne veličine kao i susjedni tonovi i blagi gotovo linearan pad, dok ton Gis ima na početku izrazit šiljak i nakon toga vidljivo nižu prosječnu razinu u odnosu na većinu ostalih tonova. Spektralna analiza ostalih tonova (nije prikazana na ovim slikama) pokazuje da instrument ima jednu od rezonancija na frekvenciji Gis3 208Hz. Kao što je ranije opisano, odsvirani ton kojem se frekvencija podudara s frekvencijom nekog od prvih rezonantnih modova ($A_0, T(1,1), T(2,1)$) ima brzi porast i veliku amplitudu, ali mu se energija brzo potroši, pa intenzitet zvuka brzo padne, što može rezultirati da je tiši u odnosu na ostale. O tome da li rezonantne frekvencije gitare trebaju biti između tonova skale ili se s njima poklapati, postoje različiti stavovi. Renomirani francuski graditelj Dominique Field u svom intervju za gitaristički časopis Orfeo navodi da ne vodi posebno računa o rezonantnoj frekvenciji glasnjače u smislu da je podesi na neku koja je u točnoj relaciji s nečim, obzirom da se ona mijenja kako instrument stari. Priznati graditelj trzalačkih instrumenata Roger H. Siminoff u knjizi „The Luthier’s Handbook“ navodi da se rezonancije instrumenta moraju poklapati što točnije s tonovima skale, u protivnom ako su one između tonova skale dolazi do podrhtavanja tona i povlačenja frekvencije odsviranog tona prema rezonantnoj frekvenciji i pogrešne intonacije. Dosta graditelja, uključujući renomiranog australskog graditelja Trevora Gore, navodi upravo suprotno – da je rezonantne frekvencije instrumenta potrebno smjestiti između tonova skale kako bi što manje utjecale na odsvirani ton. Analize snimki nekoliko gitara priznatih graditelja pokazale su da svaki od instrumenata ima barem jednu rezonantnu frekvenciju koja se podudara ili vidljivo utječe na odsvirani ton. Očito je da ovaj utjecaj nije presudan za ukupnu zvučnu kvalitetu instrumenta, a moguće je da i u nekim situacijama pogoduje.



Slika 28. Tonovi na A žici, rezonancija 195Hz - gitara Simon Marty 2019



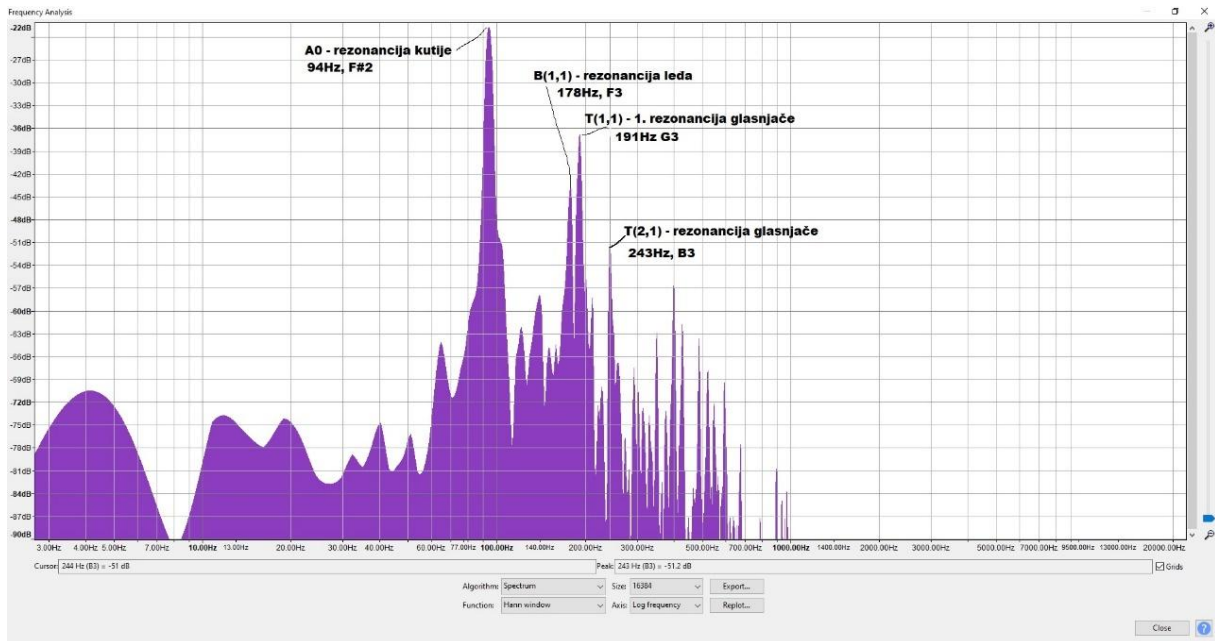
Slika 29. Tonovi na D žici, rezonancija 197Hz, gitara Redgate 2020

Na slici 29. vidljiva je valovitost tona F do koje je došlo zbog interferencije s prethodno odsviranim tonom E 164Hz, koji je pak pobudio praznu šestu žicu E (84Hz) na oktavu 164Hz i ona je nastavila titrati za vrijeme trajanja tona F (173Hz). Ovdje je vidljivo koliko je ovaj instrument osjetljiv i kako se lagano pobuđuje na vibracije. Jednako tako je vidljiva i valovitost u tonu C 261Hz koji je interferirao s tonom prazne žice H, a koja je pobuđena na vibracije prethodno odsviranim tonom H 249Hz. Na slici se može prepoznati utjecaj rezonancije glasnjače na tonove G i Gis. Rezonancija glasnjače je 197Hz, što je gotovo jednako tonu žice G (196Hz).

7.3 Snimanje impulsnog odziva

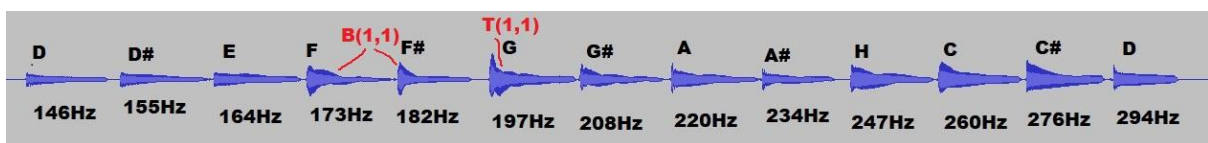
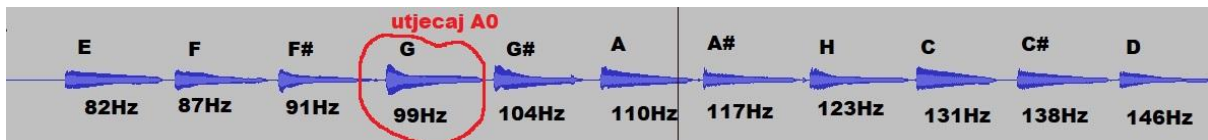
Korisne i zanimljive podatke o instrumentu možemo dobiti kucnemo li batićem ili rukom po glasnjači na mjestu konjića i dobiveni zvuk snimimo. Tako snimljeni zvuk u tehničkoj literaturi naziva se impulsni odziv. Odavno je poznato da vrlo kratak i snažan udarac, impuls, će pobuditi ploču vibracijama svih mogućih frekvencija, teoretski od 0Hz do beskonačne (u slučaju kada bi impuls bio beskonačno kratak). U stvarnosti, udarcem batića po glasnjači proizvest ćemo vibracije dovoljno širokog spektra frekvencija da pokriju frekvencijsko područje gitare. U tom slučaju, elementi gitare zatitrat će na vlastitim frekvencijama, onima iz pobudnog signala čija se frekvencija poklapa s vlastitim rezonantnim frekvencijama pojedinih dijelova gitare. Iz tako snimljenog signala, računalnim programom možemo otkriti rezonantne frekvencije instrumenta i njihov međusobni odnos. Snimamo li takve odzive udarajući batićem na različitim dijelovima glasnjače, primijetit ćemo da se veličina vibracije pojedinih frekvencija mijenja u ovisnosti o mjestu udarca. Na ovaj način možemo otkriti kojem karakterističnom modu vibracija pripada pojedina rezonancija. Također, prilikom gradnje instrumenta, podešavanjem debljine glasnjače i/ili letvica, na ovaj način možemo pratiti kako se mijenjaju frekvencije i jačina vibracija pojedinih modova. Slika 30. prikazuje snimljen impulsni odziv studentske gitare pobuđene kucanjem batića na rubu konjića, ispod melodijske žice E1. Kucnuta je na rubu konjića, kako bi se uz monopolne modove (A0, T(1,1), B(1,1)) pobudio i mod T(2,1). Ovo iz razloga što mod T(2,1) ima čvor oko sredine konjića i da smo udarili u sredinu konjića znatno

slabije bi ga pobudili nego na ovaj način kada smo ga pobudili na mjestu, na kojem već ima neku znatniju amplitudu titranja.



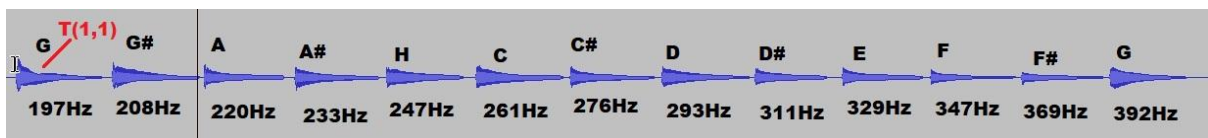
Slika 30. Impulsni odziv studentske gitare

Kako bi bolje povezali značenje impulsnog odziva, pojedinih rezonantnih modova i tona instrumenta, prikazat ćemo kako izgledaju snimke pojedinih tonova odsviranih na ovoj istoj studentskoj gitari, u vremenskoj domeni.



Slika 31. Pojedini tonovi odsvirani na studentskoj gitari, na bas žici E6

Slika 32. Tonovi odsvirani na studentskoj gitari, žici D



Slika 33. Tonovi odsvirani na studentskoj gitari, žici G

Iz snimki pojedinih tonova (slike 31. 32. i 33.), jasno se može uočiti utjecaj modova A0 i T(1,1) na proizvedene tonove. Vidi se kako odsvirani tonovi koji su po frekvenciji

bliski frekvencijama modova dobivenih impulsnim odzivom, imaju izražen šiljak u snimci signala. Ovaj šiljak predstavlja brzi porast glasnoće tona, koji jednako tako brzo i pada. Konstrukcijski bi bilo poželjno ovakve tonove na instrumentu izbjeći, jer se čujno razlikuju od ostalih, ali kao što je već ranije spomenuto, to je moguće provesti samo djelomično i svaki graditelj ima svoj način ublažavanja ove pojave. Nije na odmet još jednom napomenuti kako se i iz vremenske snimke pojedinog tona može dobiti njegov frekvencijski spektar, u kojem se uz harmonike (aliquote) mogu uočiti pojedine rezonantne frekvencije instrumenta – najčešće samo one prve A0 i T(1,1). Ovo je primijenjeno u ranijim primjerima gdje su analizirane snimke s YouTube servisa i iz vremenskog zapisa pojedinih tonova, pronađeni su njihovi frekvencijski spektri, a u njima su pronađene i rezonantne frekvencije instrumenta.

8 Usporedba zvuka četiriju studentskih gitara

Nakon što smo se upoznali s osnovama nastajanja zvuka gitare, njezine konstrukcije i akustičkim mjerenjima, pokušano je mjerenjima na 4 odabrane studentske gitare i usporedbom dobivenih rezultata, povezati izmjerene rezultate s karakterističnim zvučnim elementima koji se čuju na tim instrumentima i s njihovom konstrukcijom. Snimane su 4 studentske gitare od kojih su dvije double top konstrukcije. Preostale dvije imaju glasnjače od čistog drva. Prvi double top („DT1“) ima tradicionalno raspoređene potporne letvice glasnjače, kao u tipičnoj španjolskoj gradnji, dok drugi double top („DT2“) ima letvice posložene u formi rešetke - „latice braced“ konstrukcija. Treća gitara („cedar“) ima glasnjaču od cedra s letvicama složenima u španjolskom stilu s dodanim letvicama za poprečno ukrućenje. Četvrta gitara („smreka“) ima glasnjaču od smreke s letvicama složenima kao kod španjolske gradnje s izuzetkom dodane poprečne letvice ispod konjića, koja glasnjaču dodatno poprečno ukrućuje.

Provedene su 4 grupe snimanja-mjerenja:

1. Snimljeni su impulsni odzivi nastali pobudom glasnjače kuckanjem na mjestu konjića. Analiziran je spektar snimljenih odziva i rezultati su zapisani u tablice. Svrha mjerenja je pronalaženje karakterističnih rezonantnih frekvencija pojedinog instrumenta, prvenstveno A0 i T(1,1).

Zbog provjere valjanosti očitavanja frekvencije moda T(1,1) dobivenog iz impulsnog odziva, na dva instrumenta mod T(1,1) je provjeren i zvučnom pobudom glasnjače posute mrvicama „Čokolina“ (pojačalo, zvučnik i signal-generator) (Slika 34.). Raspored mrvica nastao na frekvenciji očitanoj iz impulsnog odziva odgovarao je modu T(1,1).



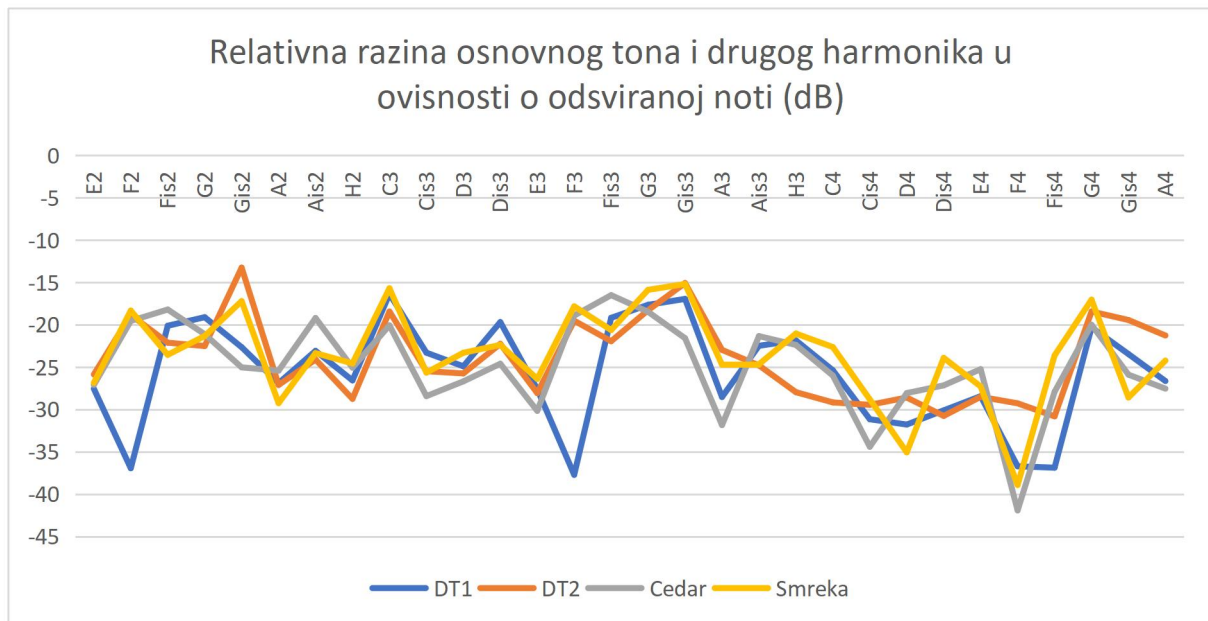
Slika 34. Provjera moda $T(1,1)$ pobudom glasnjače sinusnim signalom frekvencije 191Hz iz zvučnika

2. Snimljeni su tonovi nota odsviranih na prve 4 pozicije svih žica, uključujući i note praznih žica. Na prvoj žici E1 snimani su tonovi do 12. pozicije. Prilikom snimanja mikrofona je bio postavljen na visinu 1,30m, na udaljenosti 2,5m, ispred svirača. Analiziran je spektar snimljenih tonova i zapisan u tablice. Očitane su efektivne vrijednosti svakog snimljenog tona (program Audacity ima ugrađenu tu funkcionalnost) i zapisane u tablice. Svrha mjerenja je pokušati pronaći komponente u spektru koje karakteriziraju pojedini instrument i usporediti glasnoće instrumenata.
3. Snimljeni su tonovi odsvirani na prvih 12 pozicija svih žica, uključujući i tonove praznih žica. Mikrofona je bio smješten na udaljenosti 25cm od glasnjače, poravnat sa središtem konjića u ravnini paralelnoj glasnjači. Analiziran je spektar pojedinih tonova i zapisan u tablice.
Svrha mjerenja je pronaći pokazatelje kvalitete reprodukcije tonova na prvoj žici (E1) i provjeriti utjecaj smještaja mikrofona na rezultate mjerenja spektra i mjerenja glasnoće.
4. Snimljeno je pet akorda E,F,G,A i D. Pozicija mikrofona je kao i kod mjerenja 2, na udaljenosti 2,5m. Svrha mjerenja je provjera podudarnosti dobivenih glasnoća s rezultatima mjerenja glasnoća dobivenih mjerenjem pojedinačnih tonova (mjerenja pod 2).

Prostorija u kojoj je snimano volumena je cca 58m^3 , površine 4m x 5m, s namještajem. Prilikom snimanja, između gitare i mikrofona nije bilo zvučnih prepreka. Ideja je bila provjeriti mogućnost mjerenja u normalnom prostoru, sa standardnom opremom i uvjetima kakve je moguće ostvariti u radioni graditelja ili nekom drugom prikladnom prostoru, a koji nije specijaliziran za akustička mjerenja. Snimke pojedinačnih tonova gitara međusobno su „sinkronizirane“ na način da se prvo snimio referentni zapis u prozoru programa, a gitarist je slušajući zapis na slušalice ponavljao istu sekvencu na sve 4 studentske gitare. Na ovaj način sve 4 gitare snimljene su u istom prozoru programa, sa zapisima istih tonova u ravnini, jedan ispod drugog. Jednako su snimljeni i akordi. Ovo je važno za uspoređivanje efektivnih vrijednosti glasnoća i frekvencijskih spektara kod kojih vremenski prozor u kojem se analizira signal mora biti jednak, inače rezultati analize nisu usporedivi.

8.1 Rezultati mjerenja

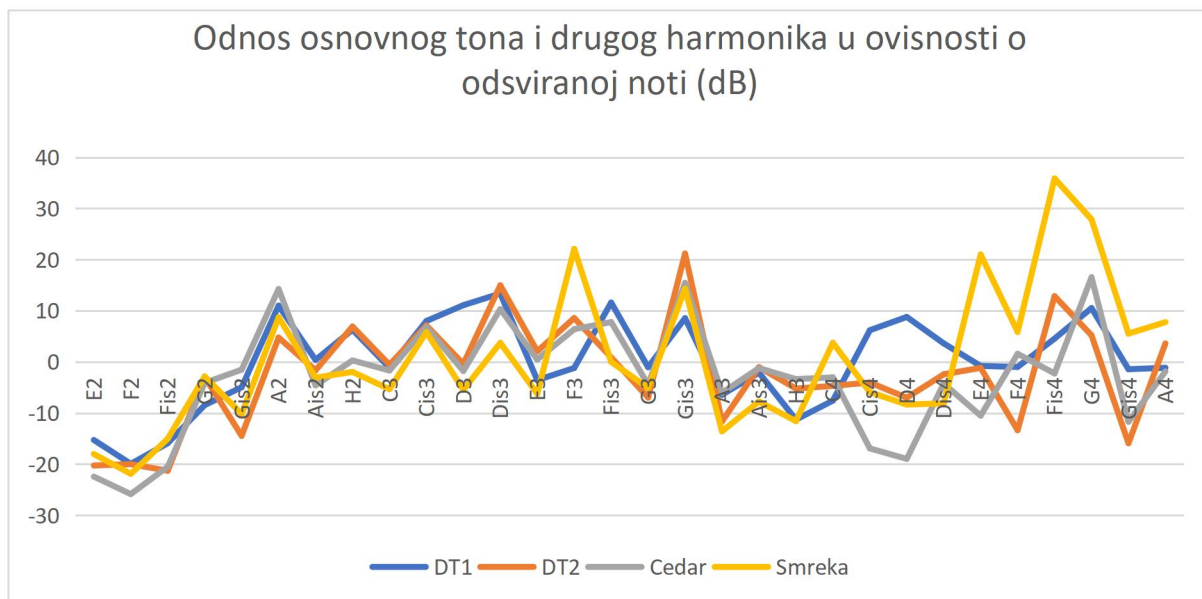
U impulsnom odzivu, u spektru pojedinih tonova kao i spektru snimljenih akorda možemo uočiti potpis svakog instrumenta, koji se očituje u jasno izraženim frekvencijama modova A0 i T(1,1).



Slika 35. Relativne razine osnovnog tona i njegovog drugog harmonika u ovisnosti o odsviranoj noti

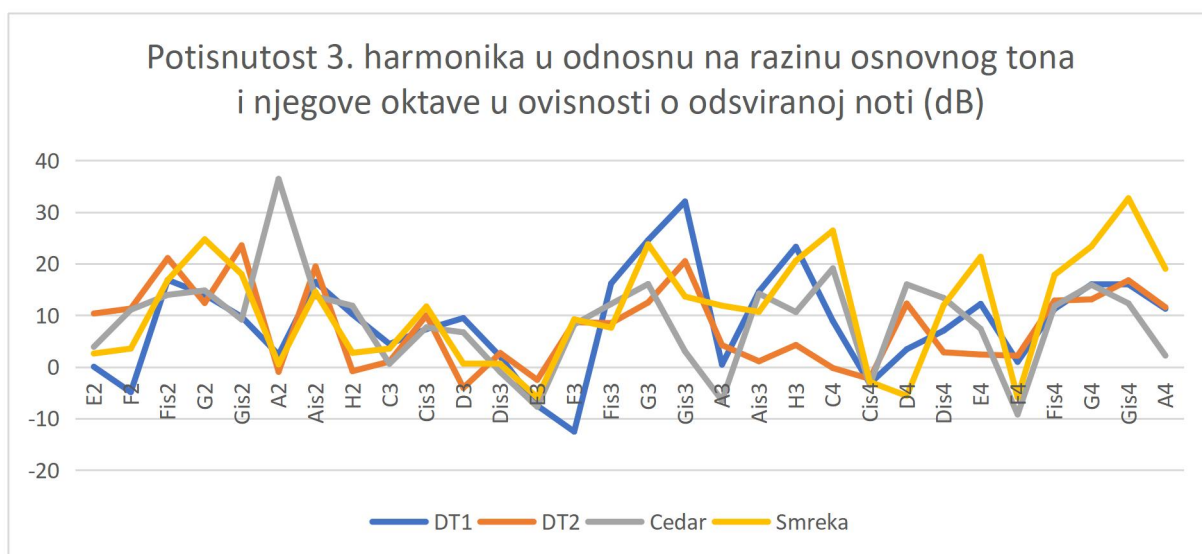
Na slici 35. prikazani su rezultati snimanja pojedinačnih tonova (snimanje pod 2.) i iz spektralne analize izvučene relativne razine zbroja osnovnog tona i njegovog drugog harmonika u ovisnosti o odsviranoj noti. Osnovni ton i drugi harmonik su zbrojeni (kao efektivne vrijednosti $U_{\text{tona}}^2 = U_{f0}^2 + U_{f2}^2$) kako bi predstavljali razinu odsvirane note, obzirom da je kod gitara drugi harmonik često veće razine od osnovnog tona.

Vidljivo je kako oko rezonantnih frekvencija A0 i T(1,1) gitare znatno slabije reproduciraju odsvirane note. To je najuočljivije kod instrumenta DT1, kod kojeg su rezonantne frekvencije A0 (87Hz) i T(1,1) 177Hz. U grafu se može primijetiti kako gitare DT2 i Smreka imaju vrlo sličan odziv u području od note E2 do note A3. Gitara DT2 je latice braced double top konstrukcije, dok je „smreka“ klasične građe. Ova dva instrumenta imaju jednake frekvencije A0 (94Hz) i T(1,1) (190Hz), ali različito zvuče i u notama kod kojih imaju sličan odziv ($f_0 + 2f_0$). Razlika je zbog različitog udjela viših spektralnih komponenti, što se može vidjeti u narednim grafovima.



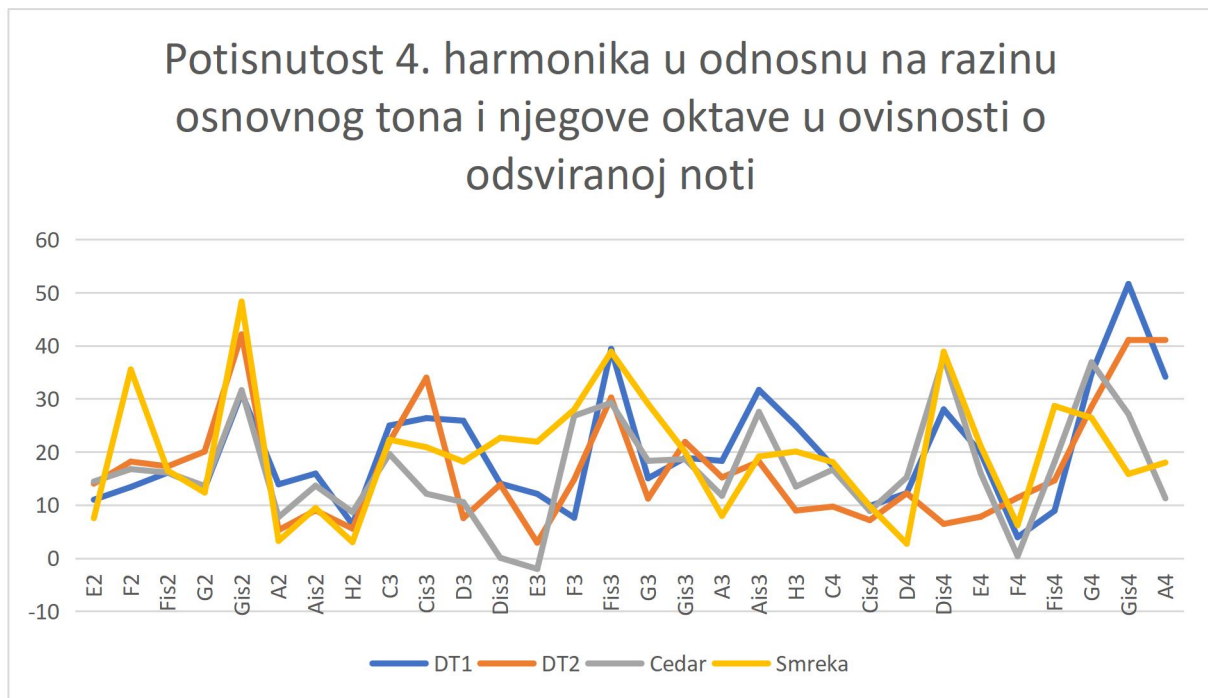
Slika 36. Odnos razine osnovnog tona i njegovog 2. harmonika u ovisnosti o odsviranoj noti

Na slici 36. je prikazan odnos zvučnog tlaka osnovnog tona i zvučnog tlaka njegovog drugog harmonika (aliquote), u ovisnosti o odsviranoj noti. Odnos je prikazan u dB (-20dB predstavlja 1/10). Možemo primijetiti da je kod tri najdublje note E2, F2 i Fis2, kod sve 4 gitare, drugi harmonik (aliquota) znatno veći od osnovnog tona. Ovo se može objasniti činjenicom da je najniža rezonancija rezonantne kutije gitara (zraka u rezonantnoj kutiji) iznad note F2, ali zrak u rezonantnoj kutiji se pobuđuje na vibracije indirektno preko glasnjače kojoj je najniža frekvencija T(1,1) na dvostrukoj frekvenciji A0 ili frekvenciji višoj od dvostruke A0. Iz akustike nam je poznato da efikasnost reprodukcije zvučničke kutije brzo pada ispod njezine rezonantne frekvencije, a u ovom slučaju bi to bila frekvencija T(1,1). Gitara „smreka“ ima znatno manji udio 2. harmonika u tonu nota na prvoj E žici u odnosu na ostale tri. Slušno, ova gitara je nešto slabija u reprodukciji nota na 1. žici, teže je dobiti puni ton u odnosu na ostale 3.



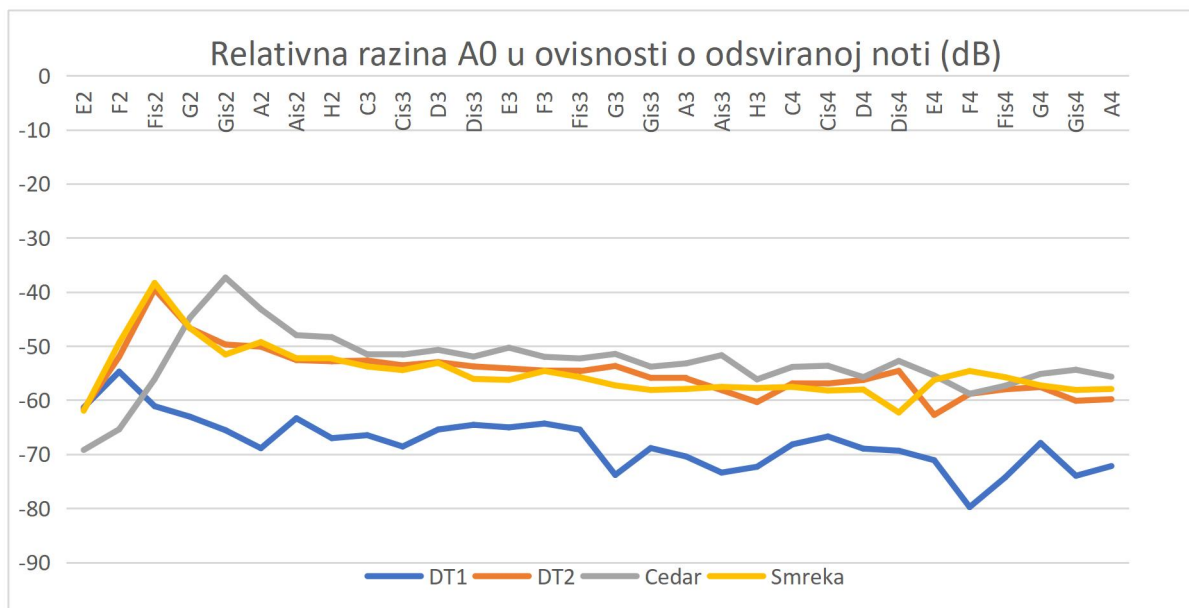
Slika 37. Potisnutost 3. harmonika u odnosu na osnovni ton i drugi harmonik u ovisnosti o odsviranoj noti

Na slici 37. vidimo koliko je decibela niža razina 3. harmonika u odsviranoj noti u odnosu na razinu osnovnog tona i oktave. Uočavamo znatnije razlike između instrumenata, u odnosu na prethodna dva grafa. Ovo je u skladu s činjenicom da boju tona, a time i razliku između pojedinih gitara određuju viši harmonici.



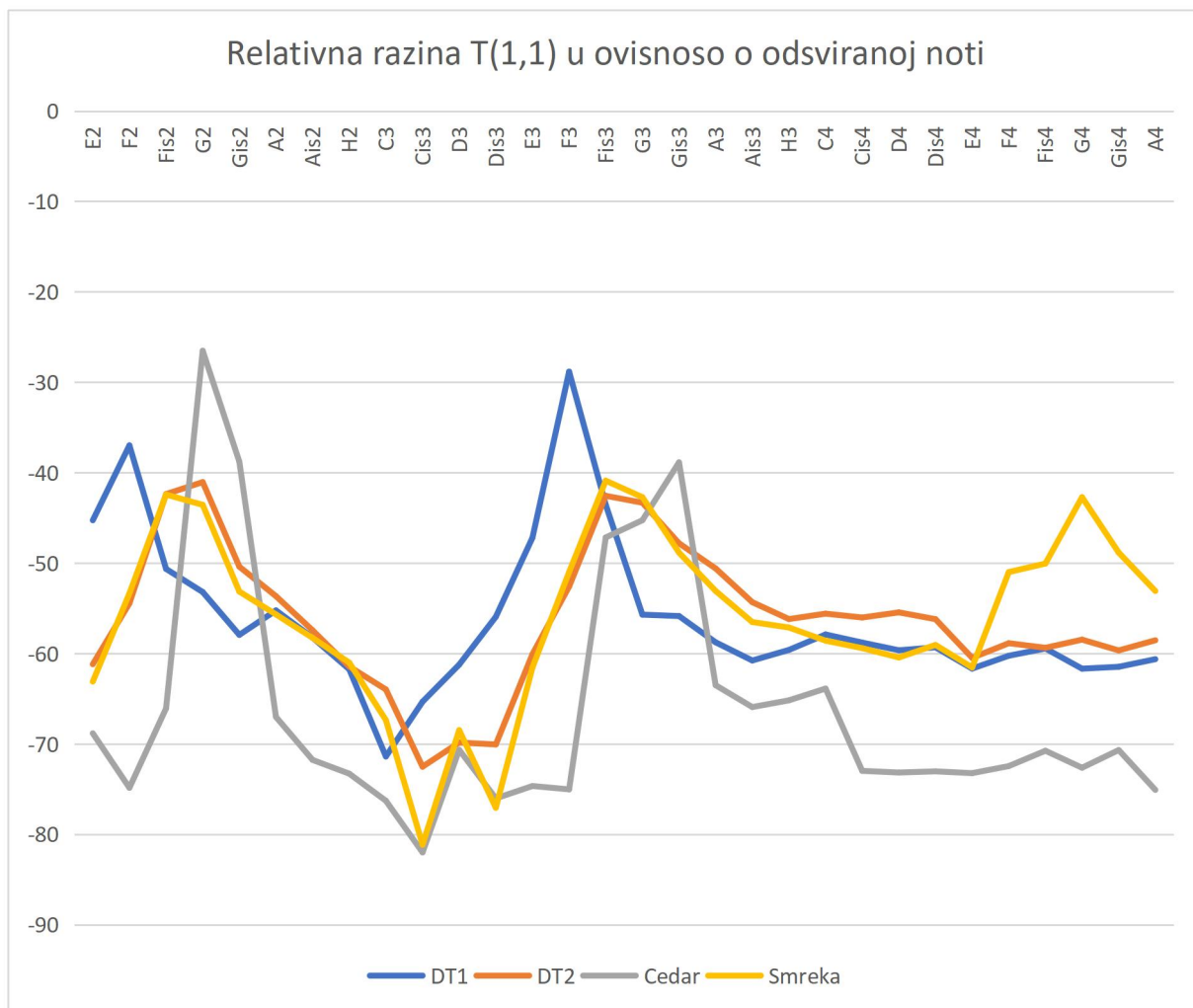
Slika 38. Udio četvrtog harmonika u odnosu na osnovni ton i oktavu u ovisnosti o odsviranoj noti

Na slici 38. prikazano je koliko je 4. harmonik osnovnog tona slabiji u odnosu na zbroj osnovnog tona i njegove oktave. Ovdje Smreka ima u prosjeku najmanje potisnut 4. harmonik na E1 žici u usporedbi s ostale tri gitare.



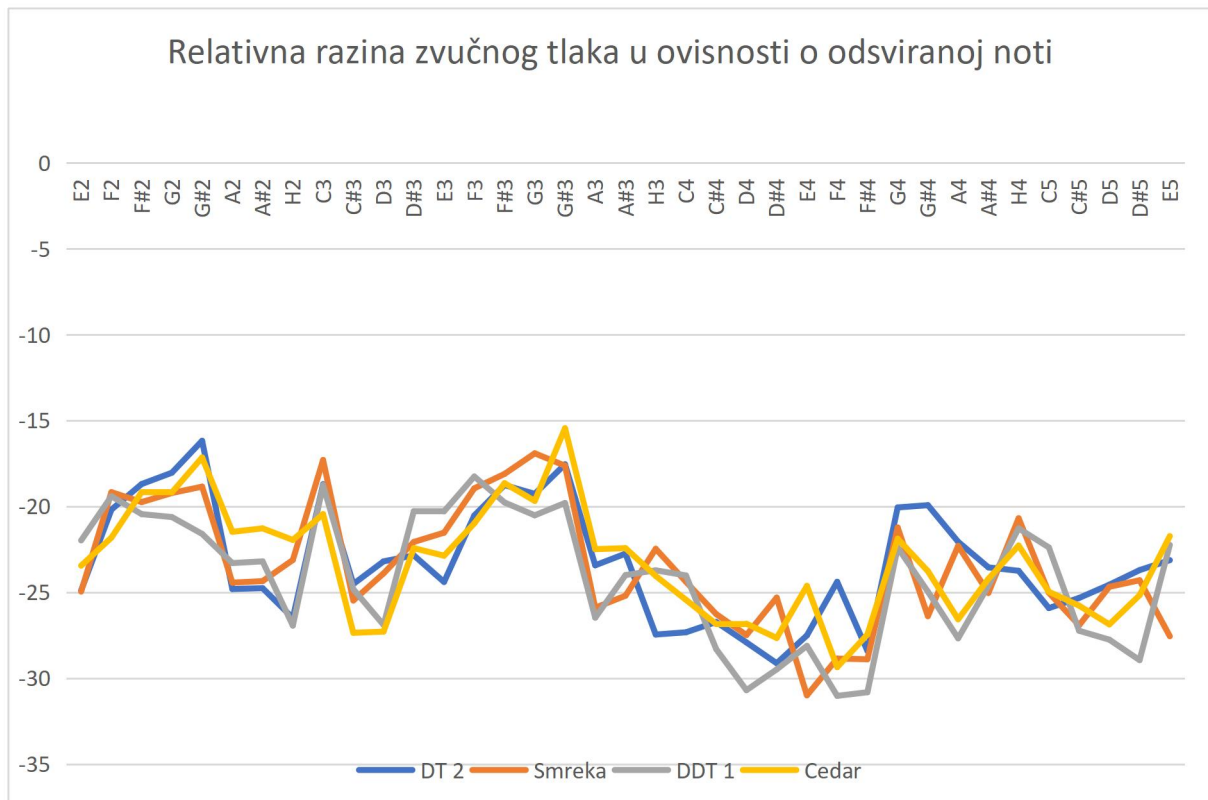
Slika 39. Relativna razina moda A0 u ovisnosti o odsviranoj noti

Na slici 39. prikazana je relativna razina zvučnog tlaka nastalog na frekvenciji A0 u ovisnosti o odsviranoj noti. Ovdje se jasno vide rezonantne frekvencije A0 pojedinog instrumenta – šiljci nastali kod nota F(DT1), Fis(DT2 i smreka) i G(cedar). Zanimljivo je kako gitara DT1 ima znatno manji udio A0 od ostale 3 gitare. Ovo ukazuje na slabiju spregu između vibracija glasnjače i zraka u kutiji (korpusu). Iz grafa je vidljivo kako udio moda A0 slabi s višim notama.



Slika 40. relativna razina zvučnog tlaka nastalog na frekvenciji T(1,1) u ovisnosti o odsviranoj noti

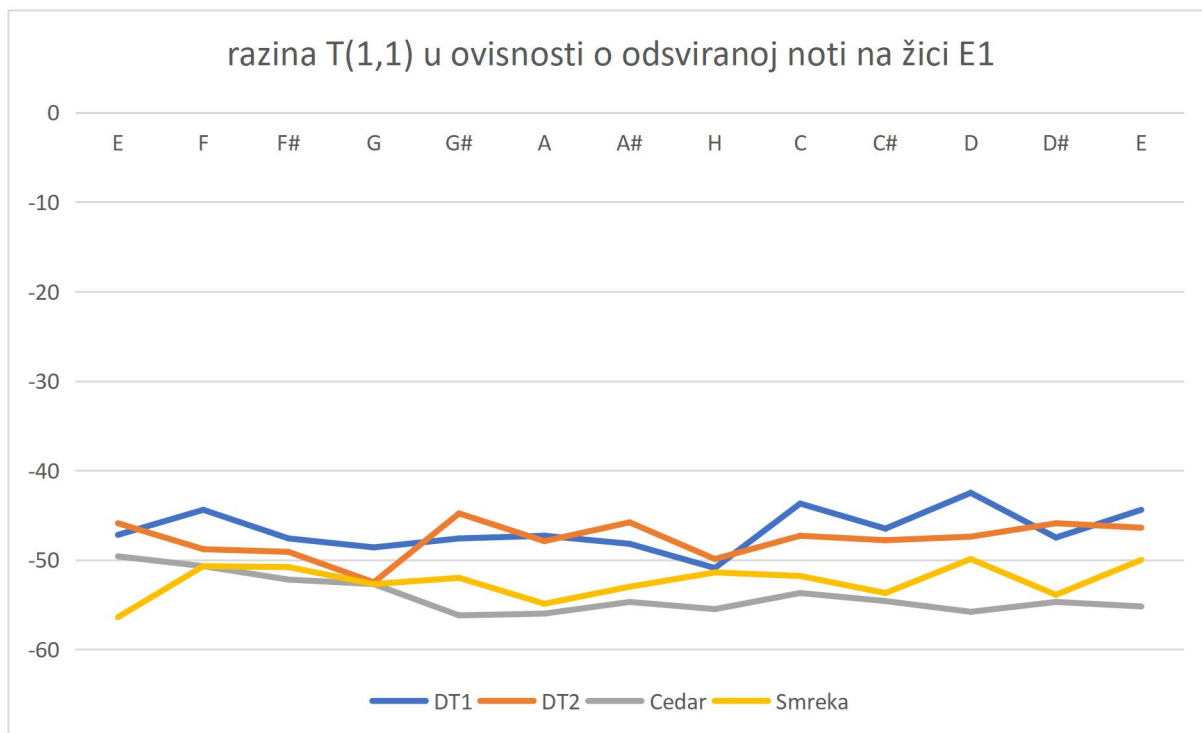
Na slici 40, koja prikazuje razinu zvučnog tlaka na frekvenciji moda T(1,1) u ovisnosti o odsviranoj noti, možemo prepoznati rezonantne frekvencije T(1,1) pojedinog instrumenta (drugi najveći vrh na pojedinoj krivulji). Također, možemo primijetiti da subharmonik, odnosno nota dvostruko niže frekvencije, pobuđuje mod T(1,1) na vibracije. Ovo dodatno pojašnjava zašto je drugi harmonik odsvirane „duboke“ note jači od osnovnog tona.



Slika 41.

Na slici 41. su prikazane relativne efektivne vrijednosti zvučnog tlaka u ovisnosti o odsviranoj noti (nije poznata stvarna - apsolutna vrijednost proizvedenog zvučnog tlaka, već se uspoređuju zvučni tlakovi koje je proizveo pojedini instrument). Iz slike je vidljivo da svaka gitara ima nota u kojima je tiša ili glasija od ostalih. Iz slike je teško zaključiti koji je instrument glasiji. Kako bi se to utvrdilo, izračunata je prosječna glasnoća svih tonova. Razlika između prosječne glasnoće najglasnije i najtiše gitare je 0,87dB, što je smatrano nedovoljnim da bi se sa sigurnošću odabrala najglasnija. Pokušalo se utvrditi koja je gitara prosječno glasija u pojedinoj oktavi (E2,E3), (E3,E4), (E4 i E5). Razlike su također bile zanemarive, osim u najvišoj oktavi (E4, E5) u kojoj je DT2 za 2dB bila glasija od najtiše (proizvodi 1,58 puta veću zvučnu snagu). Prilikom usporedbe prosječne glasnoće odsviranih akorda, ova gitara je u odnosu na najtišu ponovno bila glasija za 2dB.

Pokazatelji kvalitete reprodukcije nota prve žice pokušali su se pronaći analizom frekvencijskog spektra tonova prve žice snimljenih u neposrednoj blizini glasnjače (mjerjenje 3). Ovakvo snimanje je napravljeno svjesno sa spoznajom da zvučna slika neće vjerno predstavljati zvuk gitare, ali pretpostavljeno je da za reprodukciju tonova prve žice utjecaj zraka iz rezonantne kutije gitare je malen i da će ovako smješten mikروفon bolje snimiti zvučni tlak nastao vibracijama glasnjače. Analiza snimki pokazuje zanimljive rezultate: oba double top instrumenta imaju veću prosječnu glasnoću zbroja osnovnog tona i drugog harmonika i znatno veću prosječnu prisutnost frekvencije moda T(1,1) u odsviranoj noti. Pretpostavka za to je lakša i manje prigušena glasnjača double top gitara u odnosu na tradicionalne, koja se lakše pobuđuje na vibracije i jače vibrira na svim frekvencijama, pa tako i na frekvenciji T(1,1) koja je gotovo oktavu ispod frekvencije najniže note žice E1 (330Hz).



Slika 42.

8.2 Interpretacija dobivenih rezultata

8.2.1 Glasnoća instrumenata

Mjerenja „buke“ nastale sviranjem pojedinačnih tonova (mjerenja 2.) u rasponu od E2 do E5, kao i „buke“ koju su stvorili akordi (mjerenja 4.) nisu ponudila argumente koji upućuju da su double top instrumenti glasniji od tradicionalno građenih, što je uobičajena pretpostavka. Subjektivnom, slušnom procjenom u istoj prostoriji u kojoj je snimano, nije se moglo procijeniti koji je instrument glasniji. Moguće da bi snimanje u drugačijem prostoru pokazalo veću razliku u glasnoći gitara i proizvelo drugačiji zaključak.

Broj instrumenata na kojima su provedena mjerenja nije dovoljan da se na temelju rezultata mjerenja i korelacije s pojedinom konstrukcijom može donijeti sud o utjecaju konstrukcije na svojstva zvuka.

8.2.2 Kvaliteta tona prve žice

Oba double top instrumenta imaju veću prosječnu glasnoću tona prve žice (kod snimanja na blizu) i veći prosječni udio frekvencije moda T(1,1) u odnosu na tradicionalno građene. Poredak instrumenta po prosječnoj glasnoći nota prve žice i prisutnosti frekvencije moda T(1,1) u spektru se poklapaju sa slušnim doživljajem

kvaliteta tonova prve žice. Ovo stvara pretpostavku da bi ovi parametri mogli biti pokazatelji mogućnosti reprodukcije tonova prve žice.

9 Zaključak

Konstrukcija gitare neupitno utječe na njezinu zvučnu sliku. Zadatak graditelja je napraviti što glasnjiju gitaru koja će zvukom očarati slušatelje i nadahnuti izvođača. Prema općem uvjerenju, gitare double top konstrukcije jesu glasnije i lakše proizvode glasan, puni ton, na prvoj žici u odnosu na tradicionalno građene. U provedenim mjerenjima uspoređene su dviju double top gitare s dvije tradicionalno građene, te pri tome nisu izmjerene značajne razlike u glasnoći. Razlika u rezultatima mjerenja koja je uočena između double top i tradicionalne gradnje, a koja bi mogla ukazivati na mogućnost dobivanja dobrog tona prve žice, je veća prisutnost frekvencije T(1,1) u spektru tonova prve žice. To se poklapa i s analizom zvuka gitara s You Tube servisa, kod koje je primijećeno da su moderni, vrhunski instrumenti jako „osjetljivi“ i lagano se pobuđuju na vibracije svih frekvencija, pa tako i frekvenciju T(1,1). Pretpostavka za to su veliki odnos krutosti (čvrstoće) i mase glasnjače, kao i mali faktor prigušenja vibracija u glasnjači koji se upotrebom drva prosječne kvalitete lakše postižu kod double top konstrukcija. Rezonantne frekvencije modova na nekim instrumentima su na frekvencijama tonova, na nekima između, ali to očito nije ključan razlog da se neki instrument ne svrsta u vrhunski. Najniže rezonantne frekvencije A0, svih snimljenih gitara bile su u području 87 do 105Hz i nije primijećeno da popravljaju ili kvare zvučnu sliku. Svaki instrument ima područja slabije i bolje reprodukcije.

Rezultatima mjerenja nije otkriveno ništa novo, ali se željelo ukazati na mogućnosti unapređenja gradnje gitara koju pruža tehnologija.

Gitara je kao alat važan čimbenik u umjetničkoj interpretaciji, ali ključan je izvođač. U rukama vrhunskog glazbenika svaka gitara zvuči čarobno, bila ona double top, latice braced ili tradicionalne gradnje.

10 Literatura

- Bogdanovich, J. S. (2006). *Classical Guitar Making*. New York: Sterling.
- Brooke, M. (1992). *Numerical Simulation of Guitar Radiation Fields using the Boundary Element Method*.
- Courtnall, R. (1993). *Making Master Guitars*. London: Robert Hale.
- D.P.HESS. (2013). Frequency Response Evaluation of Acoustic Guitar Modifications. *Savart*.
- Intervju s graditeljem Dominique Fieldom. (Spring 2016). *Orfeo Magazine #7*.
- Intervju s graditeljem Trevor Gore*. (2022). Dohvaćeno iz You Tube: <https://www.youtube.com/watch?v=ETJsZ05IDKA>
- Jansson, E. (2002). *ACOUSTICS FOR VIOLIN AND GUITAR MAKERS*.
- Natelson, W. R. (1993). *Guitarmaking Tradition and Technology*. San Francisco: Chronicle Books.
- Perry, I. (n.d.). *SOUND RADIATION MEASUREMENTS ON GUITARS AND OTHER STRINGED MUSICAL INSTRUMENTS*.
- Siminoff, R. H. (2002). *The Luthier's Handbook*. Milwaukee: Hal Leonard.
- Somogyi, E. (n.d.). SOME PRINCIPLES OF 'FINE-TUNING' GUITAR SOUND: PART 1 of 4.
- Tenllado, J. A. (2012). *La Guitarra en la Luteria*. Sevilla: Consejerija de Turismo i Comercio Junta de Andalucia.
- Traube, C. (2004). *An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar*. Montreal: Technology Department of Theory, Faculty of Music, McGill University.