

# Utjecaj konstrukcijske modifikacije pri mehaničkoj obradi elemenata akustične gitare na njena akustična svojstva

---

**Cigula, Martin**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:161443>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-06**



*Repository / Repozitorij:*

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE  
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK  
ZAVOD ZA NAMJEŠTAJ I DRVO U GRADITELJSTVU**

**DIPLOMSKI STUDIJ**

**OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA**

**MARTIN CIGULA**

**UTJECAJ KONSTRUKCIJSKE  
MODIFIKACIJE PRI MEHANIČKOJ OBRADI  
ELEMENATA AKUSTIČNE GITARE NA  
NJENA AKUSTIČNA SVOJSTVA**

**DIPLOMSKI RAD**


ZAGREB, 2022






## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Utjecaj konstrukcijske modifikacije pri mehaničkoj obradi elemenata akustične gitare na njena akustična svojstva
Autor:	Martin Cigula
Adresa autora:	Zagorska 1, 44320 Kutina
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Diplomski rad
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Goran Mihulja
Komentor:	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Godina objave:	2022.
Opseg:	I-VII + 52 str., 56 slika, 2 tablice i 12 navoda literature
Ključne riječi:	Akustična gitara, zvučna ploča, x-ukruta, akustična svojstva, mehanička obrada
Sažetak:	<p>Odabir drvne sirovine, konstrukcijska izvedba i mehanička obrada najbitniji su faktori koji utječu na svojstva akustične gitare. Unutar konstrukcije upravo je oblik ukrute zvučne ploče ključni segment rezonantnog tijela gitare kojim se energija vibracije žica pretvara u odgovarajući zvuk instrumenta.</p> <p>Cilj ovog rada je modifikacija poznatog konstrukcijskog oblika x-ukrute akustične gitare (engl. x-braceing), na način da se na unutarnjim elementima konstrukcije zvučne ploče izvedu poprečni provrti, te se ispita utjecaj ovakve modifikacije na akustična svojstva gitare.</p>

	<b>IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	The influence of structural modification during the mechanical processing of acoustic guitar elements on its acoustic properties
Author:	Martin Cigula
Adress of Author:	Zagorska 1, 44320 Kutina
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Master's thesis
Supervisor:	izv. prof. dr. sc. Goran Mihulja
Co-Supervisor	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Publication year:	2022.
Volume:	I-VII + 52 pages, 2 tables, 56 figures and 12 references
Key words:	Acoustic guitar, soundboard, x-braceing, acoustic properties, mechanical processing
Abstract:	<p>The choice of raw wood material, structural performance and mechanical processing are the most important factors that influence the properties of an acoustic guitar. Inside the structure, the shape of the stiffened soundboard is the key segment of the guitar's resonant body, which converts the energy of the vibrating string into the appropriate sound of the instrument.</p> <p>The aim of this work is to modify the well-known structural form of the x-stiffened acoustic guitar (eng. x-braceing), in such a way that transverse holes are made on the internal elements of the soundboard construction, and the influence of such modifications on the acoustic properties of the guitar is examined.</p>

	<b>IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI</b>	<b>OB ŠF 05 07</b>
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.“

Zagreb, 10.10. 2022. godine

---

*vlastoručni potpis*

## SADRŽAJ

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA.....	I
BASIC DOCUMENTATION CARD.....	IV
1. UVOD.....	1
1.1. Analiza problema .....	1
2. GRAĐA GITARE.....	3
2.1. Način na koji gitara proizvodi zvuk .....	4
2.2. Dosadašnja istraživanja .....	6
2.2.1. Povijesni razvoj.....	6
2.2.2. Vrste i oblici unutarnjih konstrukcija .....	7
2.2.3. Ukruta u obliku ljestvi (engl. ladder braceing) .....	8
2.2.4. Ukruta u obliku lepeze (engl. fan braceing) .....	8
2.2.5. X- ukruta.....	9
2.3. Metode i rezultati dosadašnjih istraživanja .....	13
2.3.1. Utjecaj frekvencijskih režima na vibracijska svojstva gitare.....	15
2.3.2. Rezonantni modovi gitare .....	15
2.3.3. Chladnijeve figure.....	16
3. CILJ RADA .....	18
4. MATERIJALI I METODE .....	19
4.1. Indeks dizajna.....	19
4.2. Materijal izrade i njegove karakteristike.....	22
4.3. Proces i metode izrade eksperimentalne gitare.....	27
4.4. Metode ispitivanja .....	40
Modalna analiza .....	40
Subjektivni doživljaj sviranja i slušanja instrumenta .....	47
5. REZULTATI I RASPRAVA .....	50
6. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA .....	52



**POPIS SLIKA**

- Slika 1. Dijelovi gitare (Izvor: Courtnall, 1993; Pristupljeno: 9.7.2022.)
- Slika 2. Ukruta u obliku ljestvi (Izvor: Ed Lazano, 2022.)
- Slika 3. Ukruta u obliku lepeze (Izvor: Ed Lazano,2022.)
- Slika 4. X-ukruta (Ed Lazano,2022.)
- Slika 5. Skalopirana X-ukruta (Ed Lazano,2022.)
- Slika 6. Prikaz nacrtu zvučne ploče sa skalopiranim letvicama (C.Greliner, 2007.)
- Slika 7. Primjer Neskalopirane i skalopirane potporne letvice ukrute prednje ploče gitare (Guy D'haenens, 2017.)
- Slika 8. Poprečni presjek elemenata ukrute (Guy D'haenens, 2017.)
- Slika 9. Slikovni prikaz Helmholtz-ova rezonatora (Joe Wolfe,2017.)
- Slika 10. Chladnijeve figure „slobodne“ ploče gitare (Ra Inta, 2007.)
- Slika 11. Moderni model Martin OM-28 gitare (C.F. Martin & Co., 2022)
- Slika 12. CAD model gitare
- Slika 13. CAD model gitare
- Slika 14. CAD model gitare
- Slika 15. Popis naručenog materijala za izradu eksperimentalne gitare
- Slika 16. Isporučeni materijal za izradu eksperimentalne gitare
- Slika 17. Odnos Gustoće i Youngovog modula elastičnosti (Ulrike G.K. Wegst (2006.))
- Slika 18. Odnos gustoće i brzine širenja zvuka (Ulrike G.K. Wegst (2006.))
- Slika 19. Odnos koeficijenta gubitka i koeficijenta zvučnog zračenja (Ulrike G.K. Wegst (2006.))
- Slika 20. Utjecaj različitih vrsta drva, uobičajenih za izradu stražnje ploče i bočnih stranica gitare na subjektivni doživljaj tona (Anonimni autor, 2022.)
- Slika 21. Zvučna ploča prije spajanja
- Slika 22. Zvučna ploča nakon lijepljenja i oblikovanja elemenata ukrute
- Slika 23. Zvučna ploča nakon bušenja poprečnih provrta na elementima ukrute, te izrade zvučne rupe
- Slika 24. Izrada kalupa za savijanje bočnih stranica
- Slika 25. Savijanje i oblikovanje konture bočnih stranica
- Slika 26. Učvršćivanje bočnih stranica u kalup
- Slika 27. Lijepljenje savitljive drvene trake na bočne stranice nakon njihovog sastavljanja
- Slika 28. Obilježavanje radijusa elemenata ukrute stražnje ploče
- Slika 29. Lijepljenje elemenata ukrute na stražnju ploču gitare
- Slika 30. Postupak Izrade kutnog spoja glave i vrata gitare (Peter Wojcieszek, 2022.)
- Slika 31. CNC obrada vrata gitare
- Slika 32. CNC obrađen segment pete vrata
- Slika 33. Prikaz ekrana post procesor programa „Mach 3“ u izradi elementa
- Slika 34. CNC bušenje rupa na glavi gitare
- Slika 35. Slika vrata i segmenta pete gitare nakon CNC obrade
- Slika 36. CNC glodanje utora za pragove na hvataljci gitare
- Slika 37. Priprema elemenata gitare prije sklapanja

- Slika 38. Sklopljena stražnja stranica gitare sa bočnim stranicama
- Slika 39. Izrada dosjeda vrata gitare s tijelom
- Slika 40. Postavljanje pragova na hvataljku gitare
- Slika 41. Sklopljena eksperimentalna gitara – prednja strana
- Slika 42. Sklopljena eksperimentalna gitara – stražnja strana
- Slika 43. 3D model zvučne ploče korištena u analizi (klasično izvedena X-ukruta)
- Slika 44. 3D model zvučne ploče s dodanim provrtima na elementima ukrute
- Slika 45. Stojni valovi na primjeru žice ( V.H. Bartolić, P. Kulušić, 2004.)
- Slika 46. Prvi mod – klasično izvedena zvučna ploča
- Slika 47. Prvi mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije
- Slika 48. Drugi mod – klasično izvedena zvučna ploča
- Slika 49. Drugi mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije
- Slika 50. Treći mod – klasično izvedena zvučna ploča
- Slika 51. Treći mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije
- Slika 52. Četvrti mod – klasično izvedena zvučna ploča
- Slika 53. Četvrti mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije
- Slika 54. Peti mod – klasično izvedena zvučna ploča
- Slika 55. Peti mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije
- Slika 56. Subjektivno ispitivanje instrumenta

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prikaz značajnih povijesnih događaja u razvoju moderne gitare (Izvor: Ra Ina, The acoustics of the steel string guitar (2007.))

Tablica 2. Odnos rasponi frekvencija gitare i njihovo pobuđivanje vibratornih dijelova (Izvor: Ra Ina, Akustika gitare sa metalnim žicama, 2007.)

### 1. UVOD

Ovaj rad, nastao je iz interesa za bolje razumijevanje utjecaja konstrukcijskih dijelova gitare na njena zvučna svojstva. Rad se ponajviše koncentrira na konstrukciju zvučne ploče gitare, odnosno utjecaja konstrukcijske modifikacije i mehaničke obrade na njena akustična svojstva.

Svakako, presudan faktor za izradu ovog rada je inspiracija koja je crpljena iz prirode, odnosno impresije stablima iz kojih je nastalo drvo kao materijal, koje je za vrijeme svog biološkog života u prirodi, kao i glazbeni instrument bivalo pobuđeno silama iz vanjskih izvora, primjerice vjetra i oborina te bi tako njegovo šuštanje lišća ili njihanje grana stvaralo umirujuće prizvuke uz pomoć blagog proljetnog povjetarca ili dramatične zvukove škripanja i izvijanja grana, odnosno otpora vjetru prilikom njegovih jakih udara u oluji i vremenskim nepogodama.

Upravo je drvo materijal koji je svojim svojstvima omogućio stvaranje glazbenih instrumenata bez kojih je teško zamisliti klasičnu ili bilo koju drugu vrstu glazbe. Osim toga, drvo je vjerojatno oduvijek bilo povezano s glazbom. Prvi bubnjevi izrađivani su od šupljeg debla na koje je bila razapeta membrana od životinjske kože te se po njoj udaralo također drvenim štapovima.

Ovaj materijal, usprkos svim današnjim kompozitnim i inim materijalima, još uvijek je gotovo nezamjenjiv u izradi glazbenih instrumenata, te još uvijek svojim svojstvima pruža nebrojene mogućnosti, mami pozornost i otkrivanje svojih tajni u znanstvenim istraživanjima.

Stoga, ovaj rad obrađuje kompleksnu tematiku zvučnih svojstava akustične gitare, faktorima koji na nju utječu, teorijama koje stoje iza nje, te se bavi definiranjem utjecaja konstrukcijskih modifikacija uslijed mehaničke obrade zvučne ploče (glasnjače) gitare na njena akustična svojstva.

#### 1.1. Analiza problema

Razmatrajući ideju da se akustična svojstva gitare poboljšaju u vidu glasnoće instrumenta, mnogi će reći da se to može riješiti elektroakustikom, odnosno ozvučavanjem gitare. Istina je da i može, u toj točki razvoja gitare, akustična gitara i njena „prirodna svojstva“ možda su danas pomalo i zasjenjena.

Ipak, u akustički projektiranim prostorima, kao što su manje koncertne dvorane, glazbene škole, crkve i slična mjesta, gdje se glazba izvodi u orkestrima, zborovima ili solistički još uvijek dolazi do izražaja „prirodni“, odnosno neozvučeni zvuk gitare koji proizlazi iz samog instrumenta.

Gitaristi obično teže savršenom omjeru glasnoće instrumenta i kvalitete tona (uključujući održivost tona i intonaciju). Stoga, ovaj je rad težio tim svojstvima instrumenta te modifikacijom u vidu konstrukcije zvučne ploče, pokušalo se pozitivno utjecati na ova akustična svojstva instrumenta.

Za potrebe ovoga rada bilo je nužno napraviti prototip gitare sa navedenim izmjenama na standardiziranome obliku konstrukcije prednje ploče gitare.

Da bi rezultat gradnje instrumenata bio što je moguće bolje izveden, bilo je potrebno konzultirati se sa iskusnim graditeljima instrumenata - majstorima zanata, pronaći informacije o metodama i načinima gradnje svih elemenata instrumenta, te nabaviti originalne nacрте gitare po kojoj će model eksperimentalne gitare biti izrađen. Također, odabir i nabava odgovarajućih materijala bili su jedan od ključnih elemenata za izvedivost ovoga rada.

Kod izrade instrumenata, kojima je drvo primarni gradbeni materijal, nije moguće izgraditi dva potpuno identična instrumenta, svako stablo, a na kraju i svaki komad drva je jedinstven. Ne postoje dva identična komada, pa gotovo niti oni koji su u istom stablu rasli jedan do drugoga, nisu isti.

Stoga, nije moguće napraviti dvije identične gitare, posebice ako su one proizvedene od strane dvaju različitih graditelja, no neke odlike gitara biti će vrlo slične ukoliko su one proizvedene od istog materijala, oko kojega će više riječi biti kasnije u radu.

### 2. GRAĐA GITARE

Da bi se krenulo u pokušaj unaprjeđenja akustičnih svojstava gitare, prvotno je potrebno istražiti i razumjeti konstrukciju gitare i način na koji ona proizvodi zvuk.

Dijelovi gitare prikazani su na slici 1. Gitara se sastoji od sljedećih dijelova:

#### 1. Tijelo

Sastoji se od prednje (zvučne ploče), bočnih stranica i stražnje ploče.

Na prednjoj i stražnjoj ploči nalaze se elementi ukrute koje služe kao konstrukcijska ukruta gitare bez koje ne bi bilo moguće na gitaru napeti žice, odnosno debljina prednje ploče (2-3 mm) ne bi bez trajnih deformacija podnijela silu od oko 400-850 N napetosti žica. Stranice gitare iznutra su obrubljene savitljivom drvenom trakom koja služi kao konstrukcijski element za povećanje površine lijepljenja prednje i stražnje ploče na stranice gitare. Također, na gornjem i donjem dijelu tijela (spojevi lijevog i desnog dijela bočnih stranica) nalaze se drveni blokovi koji služe kao spojni dio stranica tijela, te osim toga, gornji dio služi kao spojni element vrata gitare sa tijelom. Na zvučnoj ploči gitare nalazi se i zvučna rupa, te most i sedlo koji omogućava učvršćivanje žica na tijelo gitare, odnosno prenošenje njenih vibracija na zvučnu ploču.

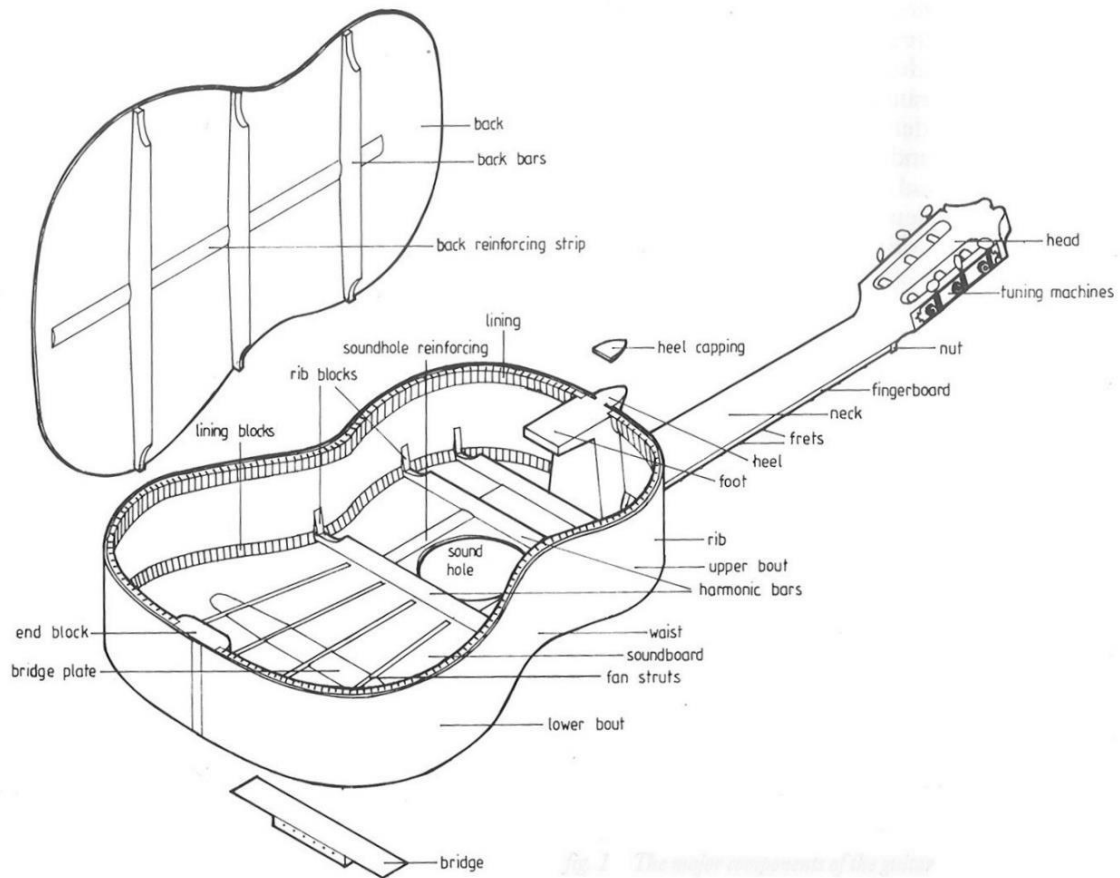
#### 2. Vrat

Sastoji se od stražnjeg dijela vrata na kojem se nalazi peta koja spaja vrat i hvataljku sa tijelom gitare. Na hvataljku gitare učvršćeni su metalni pragovi koji kod sviranja skraćuju duljinu žica i omogućuju dobivanje viših tonova. Svaki prag u odnosu na prethodni, tonski je odmaknut za pola tona. Akustične moderne gitare sa metalnim žicama u vratu imaju i ugrađenu metalnu šipku koja se sastoji od jednog ili dva dijela koja dodatno učvršćuje vrat i omogućuje podešavanje vrata, ako s vremenom na njemu nastane progib koji je svakako nepoželjan.

#### 3. Glava

Na glavu gitare učvršćene su mašnice (žarg. čivije) koje omogućuju ugađanje gitare, obično se glava gitare izrađuje pod kutom od 10-20° u odnosu na vrat gitare, te se na početku glave, iznad hvataljke nalazi most koji sa donjim sedlom (na tijelu gitare) određuje duljinu, visinu i razmak žica na gitari.

Danas postoje stotine različitih modela gitara i načina na koje su pojedini njeni konstrukcijski elementi različito izvedeni.



**Slika 1.** Dijelovi gitare (Courtnall, 1993.)

### 2.1. Način na koji gitara proizvodi zvuk

Da bi se krenulo u pokušaj unaprjeđenja akustičnih svojstava gitare, prvotno je potrebno istražiti i razumjeti način na koji gitara proizvodi zvuk.

Gitara se, kao što se na slici 1 može primijetiti sastoji od dugog vrata, zračne šupljine okružene tijelom, odnosno zvučne kutije koju čini pet ili šest ploča, oblikovanih i zalijepljenih zajedno.

Žice koje su napete između glave i tijela gitare prenose energiju titranja žice, odnosno zvučnih (longitudinalnih) valova preko zvučne ploče na tijelo gitare. Prijenos valova odvija se preko sedla, odnosno mosta gitare gdje su žice učvršćene na tijelo, potom zvučna ploča počinje titrati rezonantno sa žicama, te tako pobuđuje zrak unutar tijela gitare, čija se energija prenosi djelomično na stražnju ploču, no glavina pobuđenog zraka konačno izlazi kroz zvučni otvor gitare.

Dakle, zvuk gitare ponajviše ovisi o slijedećim faktorima:

1. Materijalu, obliku konstrukcije i debljini zvučne i stražnje ploče
2. Materijalu bočnih stranica gitare
3. Žicama – njihovoj debljini, materijalu izrade i dužini
4. Veličini i obliku tijela gitare
5. Materijalu izrade mosta, sedla i dimenzijama premosne ploče s unutarnje strane mosta

Svi navedeni faktori, odnosno dijelovi gitare različito utječu na njen zvuk. Ovaj rad, posvećen je ponajviše utjecaju zvučne ploče i njenih dijelova na akustička svojstva gitare, te će se rad u nastavku uglavnom koncentrirati na ovaj element.



### 2.2. Dosadašnja istraživanja

“Moja tajna je ona kojoj ste svjedočili mnogo puta i ona koju ne mogu ostaviti potomstvu, ona s mojim tijelom mora otići u grob, jer se sastoji od taktilnog osjetila u mojim jastučićima prstiju, u mom palcu i kažiprstu koji govore inteligentnom graditelju je li zvučna ploča dobro napravljena ili nije i kako je treba tretirati da bi se dobio najbolji ton iz instrumenta”—Antonio de Torres Jurado (1817.-1892.) (Romanillos, 1987.)

#### 2.2.1. Povijesni razvoj

Moderna gitara, razvila se iz glazbala za koje se smatra da joj porijeklo pripada u stari vijek, no prvi pisani tragovi koji spominju oblik gitare potječu iz 13. stoljeća kada su je u Europu donijeli Arapi za vrijeme njihovih osvajanja.

Kroz povijest, gitara je sigurno doživjela velike transformacije u obliku tijela, načinu izrade, broju žica, konstrukciji i ostalim njenim obilježjima. Hrvatska riječ „gitara“ izvedenica je iz nekoliko jezika, no za pravi korijen riječi smatra se riječ „tar“ iz perzijskog jezika, što znači žica.

Preteča moderne gitare vjerojatno je bila lutnja (engl. luth) iz srednjeg vijeka koja je sadržavala puno veći broj žica od gitare, čak i do 30, a od lutnje potječe i naziv za graditelje instrumenata koje se popularno naziva luthierima.

Gitare slične današnjima nastaju u 15. stoljeću u Španjolskoj otkuda i potječu nazivi „španjolska“ ili „flamenco“ gitara.

Do akustične gitare kakvu danas poznajemo dolazimo nakon što su gitare evoluirale u smislu da je njihova konstrukcija mogla podnijeti napetost koju stvaraju na njoj razapete metalne žice. Prije metalnih žica, žice su se izrađivale od životinjske utrobe (krava, ovaca pa čak i mačaka), kasnije su zamijenjene najlonskim žicama, koje se danas koriste kod „klasičnih“ gitara, a potom i metalnim koje su postale standard za „akustične“ gitare.

Ključan moment prelaska na metalne žice odvijao se 1840-ih godina od strane njemačkih imigrantskih proizvođača u Americi. U to vrijeme, postojali su drugačiji konstrukcijski tipovi ukruta prednjih ploča koji su navedeni u sljedećem pod poglavlju. Takvi tipovi ukruta rezultirali su manjom glasnoćom gitara, a osim toga bili su nedostatni za podnijeti „teret“ napetih metalnih žica. Da bi doskočili tom problemu, graditelji su osmislili x-učvršćivanje prednjih ploča gitare, tzv. glasnjača. Konačno, C.F. Martin 1843. godine gradi gitaru za u to vrijeme jednu od najpopularnijih gitaristica toga vremena Madame Dolores N. de Goni koja biva oduševljena gitarom. De Goni zaključuje kako su Martin gitare „superiorni instrumenti u toj vrsti“ od svih koje je do tada imala priliku vidjeti i svirati u SAD-u i Europi „po tonu, vještini i umijeću izrade“. Upravo ta gitara bila je

prva dokumentirana gitara s x-ukrutom (engl. x-bracing) prednje ploče gitare nakon koje je x-ukruta standardizirana.

Iste godine, C.F. Martin započinje masovnu proizvodnju gitara sa X-ukrutom koja se odvija još i danas, ne samo u C.F. Martin-ovoj proizvodnji već u proizvodnji inih gitara gotovo svih poznatih i manje poznatih proizvođača. (anonimni autor, 2019.).

Ovom konstrukcijskom izmjenom prednje ploče gitare otvara se put koji je vodio uporabi metalnih žica zbog puno čvršće konstrukcije kojoj više nije bio problem izdržati napetost metalnih žica.

**Tablica 1.** Prikaz značajnih povijesnih događaja u razvoju moderne gitare (*Izvor: Ra Ina, The acoustics of the steel string guitar (2007.)*)

Godina	Događaj
1265	Gitara spomenuta u "Ars Musica" (Juan Gil of Zamora)
1306	Glazba izvođena na gitari na gozbi Westminster-u.
1400's	Razvijena Vihuela (španjolski žičani instrument).
1600-1650	Sve više se počinje pisati glazba prilagođena gitari. Popularnost gitare postaje usporediva s lutnjom.
1770-1800	Dodana 6-ta žica na gitari, snopovi žica zamijenjeni su jednom žicom.
1800-1850	Gitara postaje popularna u javnim nastupima.
1850	Razvijena skalopirana x-ukruta gitare. (C. F. Martin)
1850-1892	Moderniziran oblik tijela gitare. (Torres)
1900	Prva uporaba metalnih žica na gitari.
1902	Razvijen OOO model gitare. (C. F. Martin & Co.)
1916	Prvi javni nastup na gitari u koncertnoj dvorani. (Segovia)
1928	Predstavljena prva električna gitara.
1929	Produžena skala gitare, 14-to polje na spoju tijela gitare s vratom. (OM-28 model, C. F. Martin & Co.)
1948	Žice životinjskog podrijetla u potpunosti zamijenjene najlonskim. (djelomično zaslugom Segovia-e)
1980	Carbonska vlakna korištena u izradi ljestvičaste ukrute zvučne ploče.

### 2.2.2. Vrste i oblici unutarnjih konstrukcija

Tri su osnovna tipa krute zvučne ploče gitare, a to su:

1. Ukruta u obliku ljestvi
2. Ukruta u obliku lepeze
3. X-ukruta

### 2.2.3. Ukruta u obliku ljestvi (engl. ladder braceing)

Ovaj oblik ukrute naziva se još i ravno ili transverzalno učvršćenje. Ovakav tip ukrute izumio je graditelj George Fullerton na samom početku 20. stoljeća. Oblik se sastoji od tankih, paralelnih drvenih podupirača (letvica) zalijepljenih za unutrašnjost prednje ploče. Ovakav dizajn pomaže u stvaranju stabilnijeg zvuka gitare te ovakva konstrukcija može izdržati slabiju napetost žica kakvu zahtijevaju klasične gitare, odnosno klasični i nježan stil sviranja.

Početak ljestvičastog načina ukrute seže u 16. stoljeće u Španjolskoj i od tada se razvilo nekoliko varijacija takvog modela ukrute. Ovaj oblik i danas se koristi na klasičnim gitarama te je smatran ključnim elementom za stvaranje „artikuliranog“ zvuka gitare. Upravo ova vrsta ukrute korištena je i u ranim pokušajima uporabe metalnih žica. Letvice ukrute postavljene su okomito na žicu zvučne ploče i međusobno su paralelne, no nekada su i malo pomaknute na kut nešto veći ili nešto manji od 90° u odnosu na žicu drva prednje ploče.

Čvrstoća ovakve konstrukcije ipak ne pruža dovoljnu čvrstoću za silu napetih metalnih žica, stoga se danas kod akustičnih gitara uglavnom još koriste samo kod ukrute stražnje ploče gitare.



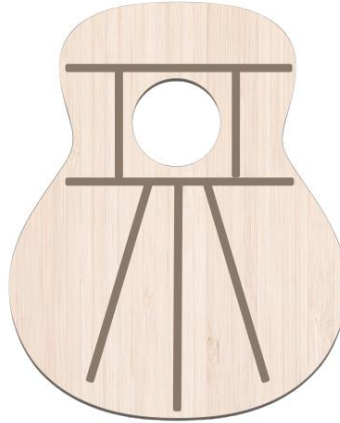
**Slika 2.** Ukruta u obliku ljestvi ((Ed Lazano,2022.)

### 2.2.4. Ukruta u obliku lepeze (engl. fan braceing)

Učvršćenje konstrukcije u obliku lepeze dobar je način ukrute za klasične gitare s najlonskim žicama, no ovakav oblik konstrukcije ne može podnijeti napetost koju stvaraju metalne žice.

Početak 19. stoljeća majstori su koristili tri, četiri ili pet potpornih letvica u uzorcima sličnim današnjem načinu lepezaste ukrute. Sredinom 19. stoljeća, španjolski proizvođač gitara, Antonio Torres, eksperimentirao je s dizajnom koristeći sedam potpornih letvica ukrute, a verzije ovog sustava rade se i dan danas. (Ed Lazano,2022.)

Konstrukcija je postavljena uglavnom paralelno sa smjerom žice drva, elementi nisu postavljeni okomito kao kod ljestvičastog oblika ukrute. Ovakav oblik ukrute omogućuje većem tijelu gitare i zvučnoj ploči da proizvedu topao, organski zvuk sa vrlo dobrim odazivom basa po kojem su poznate klasične gitare.



**Slika 3.** Ukruta u obliku lepeze (Ed Lazano,2022.)

### 2.2.5. X- ukruta (x-braceing)

Kao što je već ranije spomenuto, sredinom 19. stoljeća C. F. Martin razvija sustav x- ukrute zvučne ploče, a do kraja 19. stoljeća, Martinove akustične gitare isključivo su koristile X način ukrute u konstrukcijama njihovih gitara i to prije upotrebe čeličnih žica.

x-ukruta i njezine varijacije sada su već tradicionalno učvršćenje i najrašireniji tip ukrute prednjih ploča današnjih akustičnih gitara. Ova konstrukcija ime je dobila po dvije glavne letvice ukrute koje se međusobno križaju i tvore oblik slova „X“ ispod zvučnog otvora gitare te se pružaju do bočnih stranica instrumenta. Također je raširena varijanta ove konstrukcije sa nekoliko sekundarnih, poprečnih ravnih elemenata koji variraju svojim dimenzijama, pozicijama na koje su postavljeni i kutovima koje tvore sa glavnim „X“ letvicama.

Formacija X konstrukcije koristi dva donja kraka za podupiranje mosta gitare na kojemu se nalaze provrti za prihvat žica na tijelo gitare. Premosna ploča od tvrdog drva postavljena je sa unutrašnje strane ploče, ispod mosta, kako bi dodatno povezala i učvrstila konstrukciju zvučne ploče, ali i zbog prijehvata kugličastih krajeva žica i prijenosa energije titranja žica na zvučnu ploču.

Ovaj tip ukrute donio je revoluciju i vrlo je brzo prihvaćen, a gitare su postale znatno glasnije, posebice nakon uvođenja metalnih žica što je promijenilo industriju i donijelo novu dimenziju gitare.



**Slika 4.** X-ukruta (Ed Lazano,2022.)

Ovakav oblik ukrute, kao i svi do sada navedeni, imaju širok spektar svojih varijacija. Treba spomenuti da postoje još desetci tipova ukruta zvučne ploče i njihovih izvedenica, no ovdje će se naglasak staviti na najrašireniju x-ukrutu. Kao što se iz citiranog teksta Antonia de Torres Jurada na početku ovog poglavlja može iščitati, te varijacije uvelike ovise o znanju, iskustvu, intuiciji i osjetu graditelja instrumenata. Vjerojatno najpoznatija varijanta ovakve ukrute je skalopirana ukruta (engl. scalloped braceing) prikazana na *slici 5*. Ovakva verzija ukrute sadrži više podupirućih letvica koje su okomite ili zamaknute pod nekim kutom u odnosu na glavne krakove x-ukrute. Također, one su nakon lijepljenja na zvučnu ploču oblikovane ručno, dljetom, ili ručnom blanjalicom.



**Slika 5.** Skalopirana X-ukruta (Ed Lazano,2022.)

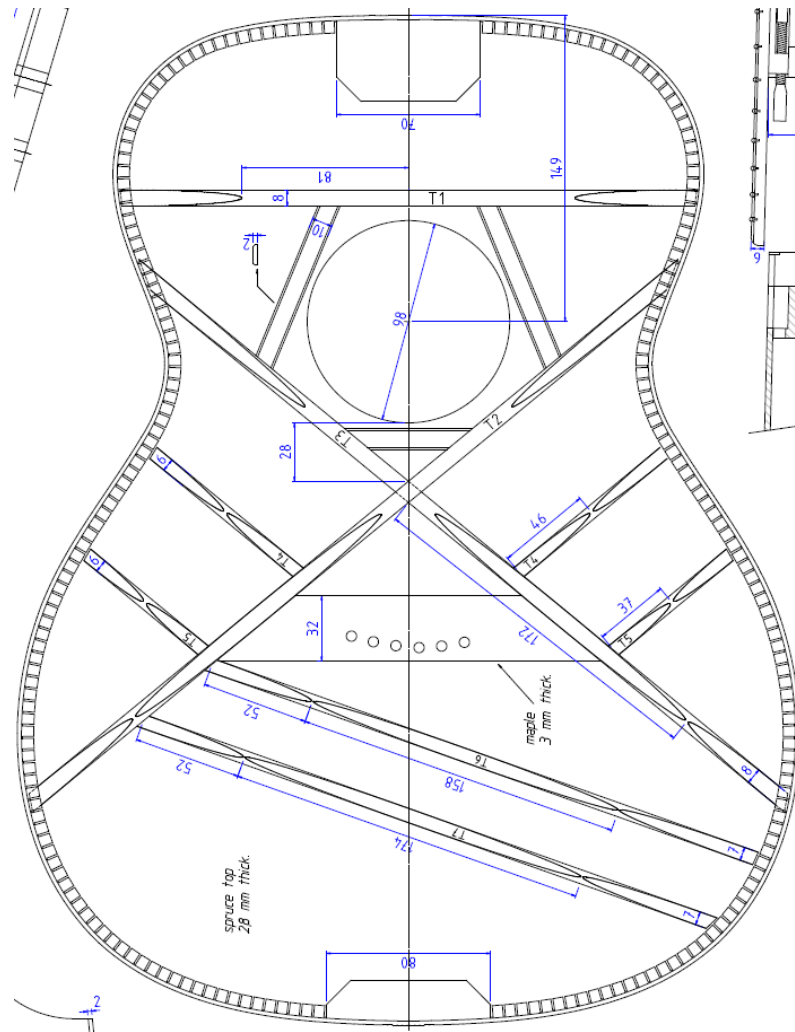
Ovo je vrsta ukrute na koju se naslanja ovaj rad, odnosno praktični i istraživački dio ovoga rada, stoga je bitno naglasiti njene karakteristike.

Ideja skalopiranih potpornih letvica X- ukrute počiva na smanjivanju mase prednje ploče, odnosno stanjivanju potpornih letvica što ih čini lakšima i fleksibilnijima.

Prednosti ovakve ukrute su veća fleksibilnost koja dopušta da zvučna ploča slobodnije vibrira, što svakako doprinosi glasnoći instrumenta.

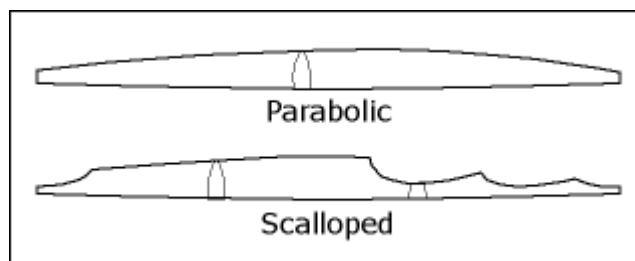
Nedostatak je smanjivanje krutosti zvučne ploče, odnosno njezine mehaničke čvrstoće, što može dovesti do savijanja, odnosno pretjeranog odizanja zvučne ploče i stvaranja nepoželjnog „trbuha“ na tijelu gitare između mosta i zvučnog otvora. Ovaj problem bio je prisutan kod prvotnih modela gitara izrađenih s ovom vrstom oblikovanja letvica ukrute. Da bi doskočili ovom problemu, tvrtka C.F. Martin & Co. modificirala je poziciju ukrute na zvučnoj ploči gitare. Stoga, Martin gitare imaju 3 verzije pozicioniranja glavnih X-krakova na zvučnu ploču gitare, a to su:

1. Standardno pozicioniranje
2. Pozicija X krakova pomaknuta od zvučnog otvora prema donjem dijelu tijela za oko 12,5 mm kako bi povećala odaziv bas tonova.
3. Pozicija X krakova pomaknuta prema zvučnoj rupi za oko 8,5 mm kako bi poboljšala akustičku projekciju zvuka.



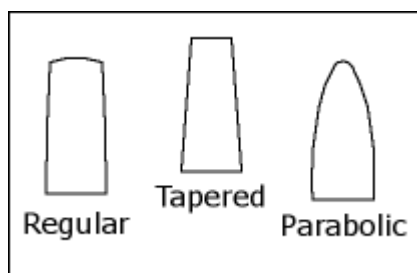
**Slika 6.** Prikaz nacrtu zvučne ploče sa skalopiranim letvicama (C.Greliner, 2007.)

Mnoga istraživanja ukazuju kako stanjivanje elemenata ukrute pruža najbolji sveukupni zvuk instrumenta, te da, ako je ovakva konstrukcija prednje ploče pravilno izvedena, ona omogućuje optimalan omjer potrebne mehaničke čvrstoće prednje ploče i razine slobodnog titranja.



**Slika 7.** Primjer Neskalopirane i skalopirane potporne letvice ukrute prednje ploče gitare (Guy D'haenens, 2017.)

Sve vrste ukruta, također mogu varirati i po obliku poprečnog presjeka elemenata ukrute. Ovi oblici također ovise o graditelju, odnosno proizvođačima instrumenata. A neki od najčešćih, prikazani su u slici 6.



*Slika 8. Poprečni presjek elemenata ukrute (Guy D'haenens, 2017.)*

### 2.3. Metode i rezultati dosadašnjih istraživanja

Istraživanje akustičkih svojstava glazbenih instrumenata, jedna je od najstarijih matematičkih znanosti. Postoje indicije da su sljedbenici Pitagore bili nadahnuti traženjem matematičkog reda u prirodi zbog njihovih istraživanja harmonijskih odnosa titraja struna, odnosno vjeruje se kako je to bio prvi poznati eksperiment fizike (Sedgwick and Tyler, 1917., Prema Ra Inta 2007.).

Velik dio znanstvenih i eksperimentalnih istraživanja vezanih za druge glazbene instrumente kao što je violina, mogu se primijeniti na svojstva akustične gitare, no jedan od sveobuhvatnih radova vezanih za akustična svojstva akustične gitare sa metalnim žicama, svakako je „Akustika gitare sa metalnim žicama“ autora Ra Inta, 2007.

Jedna od poznatijih, „drevnih“ metoda za ispitivanja zvučnih ploča instrumenata je svakako metoda „kuckanja“, odnosno laganog udaranja zvučne ploče za koju se smatra kako potječe od poznatih glazbalarskih obitelji (Amati, Stradivari i Guarneri) u Italiji, iz 16. stoljeća. Ova metoda korištena je kako biiskusni graditelji optimizirali oblik i obradu zvučne ploče instrumenta prije sastavljanja, te kako bi ona poprimila željena akustična svojstva. Svaki graditelj je imao svoju intuitivnu predodžbu o tonu koji se dobiva lupkanjem po ploči, te tako ova metoda nije determinirana. Metoda „kuckanja“ vjerojatno je začetnica metoda modalne analize koja će se više spominjati u nastavku rada. No, ideja je bazirana na slušanju zvuka koji nastaje lupkanjem po glasnjači instrumenta kako bi se čule različite frekvencije pobuđene udarcem po ploči na različitim mjestima.

Uzevši kao pretpostavku značaj metode graditelja da lupkanjem po zvučnoj ploči odredi rezonantna svojstva gotovog instrumenta, istim načelom, u ovom radu pridala se važnost i metodama za determiniranje rezonancije zvučne ploče, bilo da je ona ispitivana kao „slobodna“ ili kao element gotovog instrumenta.

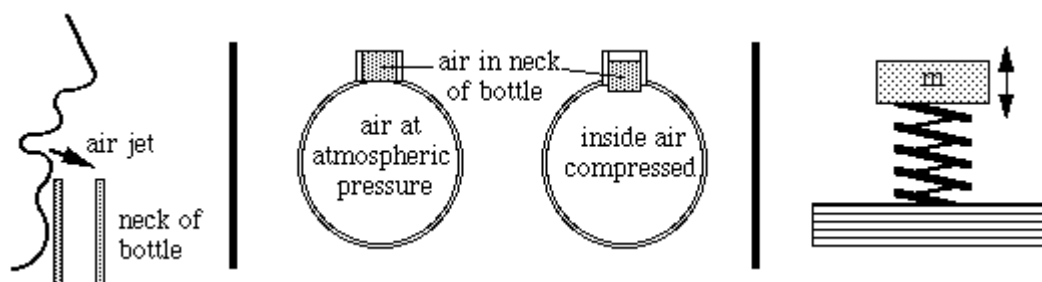


Općenito se žičani glazbeni instrumenti sastoje od zvučne ploče koja služi kao vibrirajuća membrana koja u sklopu sa ostalim dijelovima instrumenta obavija zračnu šupljinu. Tijelo je sastavljeno od relativno tankih ploča koje zajedno utječu na „karakter“ i „ponašanje“ instrumenta, no ipak, zvučna ploča, njena konstrukcija i njena svojstva daju glavinu akustičkih svojstava nekog instrumenta.

Kada govorimo o zvučnoj ili stražnjoj ploči instrumenta, važno je uzeti u obzir da se ovdje ne govori o ravnoj ploči, određene debljine, već konstrukcijskom sklopu sastavljenom od dva dijela tanke drvene ploče (cca 1,5 - 3 mm) za gitaru, te drvenim elementima ukrute zvučne ploče izvedenih lijepljenim spojem s unutarnje strane ploče. Govoreći o takvom sklopu, vrlo je važno poznavati svojstva materijala kao što su modul elastičnosti, gustoća i faktor ili stupanj prigušenja.

Thomas Rossing ispitao je vibracijsko ponašanje gitarskih zvučnih ploča prije i nakon dodavanja elemenata ukrute, otkrivši da se, bez ukrute, zvučna ploča ponaša poput jednostavne pravokutne ploče, koja dodavanjem ukrute dobiva neusporedivo veću kompleksnost (Rossing, 1982. ). Načini sviranja gitare vrlo su osjetljivi na promjene napravljene u ukrućenju zvučne ploče i uvelike utječu na to kako žice pokreću tijelo (Lewney, 2000.) (prema Ra Inta, 2007).

Kretanje zraka, također je ključno u proizvodnji zvuka. Na niskim frekvencijama zrak u unutarnjoj šupljini gitare sličan je zraku Helmholtzova rezonatora, gdje 'čep' zraka vibrira u grlu krute posude koja obuhvaća volumen zraka. Drugim riječima, kada zrak ulazi u šupljinu, tlak se povećava, te kada se vanjska sila koja gura zrak u šupljinu ukloni, zrak pod višim tlakom iznutra će izlaziti van. Zbog inercije zraka koji se kreće, šupljina će ostati pod tlakom nešto nižim od vanjskog, uzrokujući da se zrak uvuče natrag. Ovaj se proces ponavlja, s amplitudom oscilacija tlaka koja se asimptotski povećava i smanjuje proporcionalno sa intenzitetom zvuka.



**Slika 9.** Slikovni prikaz Helmholtz-ova rezonatora (Joe Wolfe,2017.)

Ako zamislimo da je zvučna rupa gitare grlo posude, dok je cijela unutrašnjost tijela gitare volumen te posude, a žice su kao osoba koja upuhuje zrak u grlo posude, možemo približiti sliku stvaranja zvuka gitare. Stvar je utoliko drugačija što osoba ne upuhuje zvuk u rezonantnu kutiju gitare, već žice svoju energiju vibracije prenose preko mosta, odnosno zvučne ploče na zrak unutar tijela gitare.

### 2.3.1. Utjecaj frekvencijskih režima na vibracijska svojstva gitare

Gitara ima različit odaziv na različitim frekvencijama pobude. Ove Christensen je pokazao da se većina akustične energije koja zrači iz tijela gitare u klasičnoj gitarskoj glazbi javlja između 200 Hz i 800 Hz u prosječnom vremenskom izlaznom spektru (Christensen, 1983). Međutim, s obzirom da je ljudsko uho najosjetljivije u području 1000 → 5000 Hz, ne treba zanemariti važnost viših modova. Na primjer, vjerojatno je da se osjećaj 'svjetline' uglavnom određuje u frekvencijskom rasponu 1 – 3kHz [Jansson, 2002]. Frekvencijski rasponi navedeni u nastavku su približne vrijednosti i ovise o određenom instrumentu koji se proučava.

Na vrlo niskim frekvencijama ( $\approx 0 \rightarrow 90$  Hz) načini vibracije uključuju vibraciju cijele gitare, uključujući i vrat. Na niskim frekvencijama ( $\approx 90 \rightarrow 250$  Hz) važno je skupno gibanje tijela i tu je najveća interakcija s zvučnom pločom i Helmholtzovim gibanjem unutarnje zračne šupljine. Umjerene frekvencije ( $\approx 200 \rightarrow 600$  Hz) uključuju veliko pomicanje zvučne ploče i, posljedično, ovdje se izvodi većina studija gitare kao gotovog proizvoda, tehnikom Chladnijevih figura. Neke rezonancije u ovom frekvencijskom području nastaju zbog sprege između rezonancija osnovne ploče i viših modova unutarnje zračne šupljine [Jansson, 1977]. Više frekvencije ( $\approx 600 \rightarrow 1200$  Hz) odgovaraju prilično lokaliziranom kretanju zvučne ploče. Visoke frekvencije ( $\approx 1200 \rightarrow 10000$  Hz) uključuju prilično kompliciranije interaktivne pokrete koji uključuju zvučnu ploču, most i druge elemente. Pregled je prikazan u tablici 2. (Izvor: Ra Inta, Akustika gitare sa metalnim žicama, 2007.)

**Tablica 2.** Odnos rasponi frekvencija gitare i njihovo pobuđivanje vibratornih dijelova  
(Izvor: Ra Inta, Akustika gitare sa metalnim žicama, 2007)

Opis	Frekvencijsko područje (Hz)	Elementi koji vibriraju
Vrlo nisko	0 → 70	Cijeli instrument, uključujući vrat
Nisko	70 → 150	Tijelo /zrak
Umjereno	150 → 600	Velika zvučna ploča/zrak
Visoko	600 → 1200	Mala zvučna ploča
Vrlo visoko	1200 → 10000	Most/Zvučna ploča

### 2.3.2. Rezonantni modovi gitare

Gitara se može promatrati kao sustav povezanih oscilatora, a učinkovit prijenos energije sa žica na zvuk, odnosno na zrak ovisi o iskorištavanju rezonancija. Da bi se okarakteriziralo vibracijsko ponašanje gitare, potrebno je proučiti korelacije pojedinih elemenata i kako se elementi međusobno odnose. (Inta, 2007).

Pod pretpostavkom da su važni elementi dobro spojeni mehanički (kao što su zvučna ploča/stranice, veza mosta/zvučne ploče i spoj vrat/tijelo), te da su žice optimalno povezane s tijelom, najvažniji vibracijski element gitarskog sustava je zvučna ploča (Caldersmith, 1978). Postoje radovi koji su se koncentrirali na pronalaženje veze između frekvencijskog odaziva "slobodne" rezonantne ploče (prije sklapanja sa stražnjom i bočnim stranicama) i ploče pričvršćene za stražnju i bočne stranice, ali do sada s ograničenim uspjehom (Schleske, 2000). Razlog tomu je problematično određivanje učinkovitosti spoja stranica te komplikacije uzrokovane interakcijama sa zatvorenom zvučnom šupljinom i drugim elementima (Caldersmith, 1985, Christensen i Vistisen, 1980, Fletcher i Rossing, 1998).

Postoji mnogo načina za određivanje normalnih modova vibracijskih sustava. Najjednostavnije metode uključuju ljudski senzorni sustav: vizualni, slušni i taktilni sustavi mogu biti prilično dobri u otkrivanju relativne amplitude rezonancija, iako je to teško objektivno opisati. Još jedna jednostavna metoda je ona koju je izvorno primijenio Chladni (1787).

### 2.3.3. Chladnijeve figure

Ako se ploča kontinuirano pobuđuje na frekvenciji vibracijskog moda, prostorni položaj maksimuma i minimuma vibracije postaje neovisan o vremenu. Chladni je ovaj fenomen pokazao uzbuđujući metalnu ploču na kojoj se nalazio pijesak, te je taj pijesak, ovisno o frekvenciji pobude, tvorio različite geometrijske oblike, poznate kao Chladnijeve figure, odnosno raspoređivao se po ploči na mjesta koja imaju najmanju razinu vibracije, ova mjesta nazivaju se nodalne linije.

Ako je materijal laganih čestica suviše fine granulacije, može se događati suprotno, kao što je primijetio Savart s lycopodium prahom. Nodalne linije nisu nužno područja nulte vibracije; nego se sastoje od lokalnih vibracijskih minimuma. Neki od nižih frekvencija Chladni modova zvučne ploče gitare nisu stojni valovi ploče, već središnje područje zvučne ploče prolazi kroz 'membransko' kretanje. U ovom slučaju materijal čestica se uklanja iz središnjeg područja, ali se granica nakupljenog materijala čestica mijenja ako se promijeni amplituda pobude (Inta, 2007).

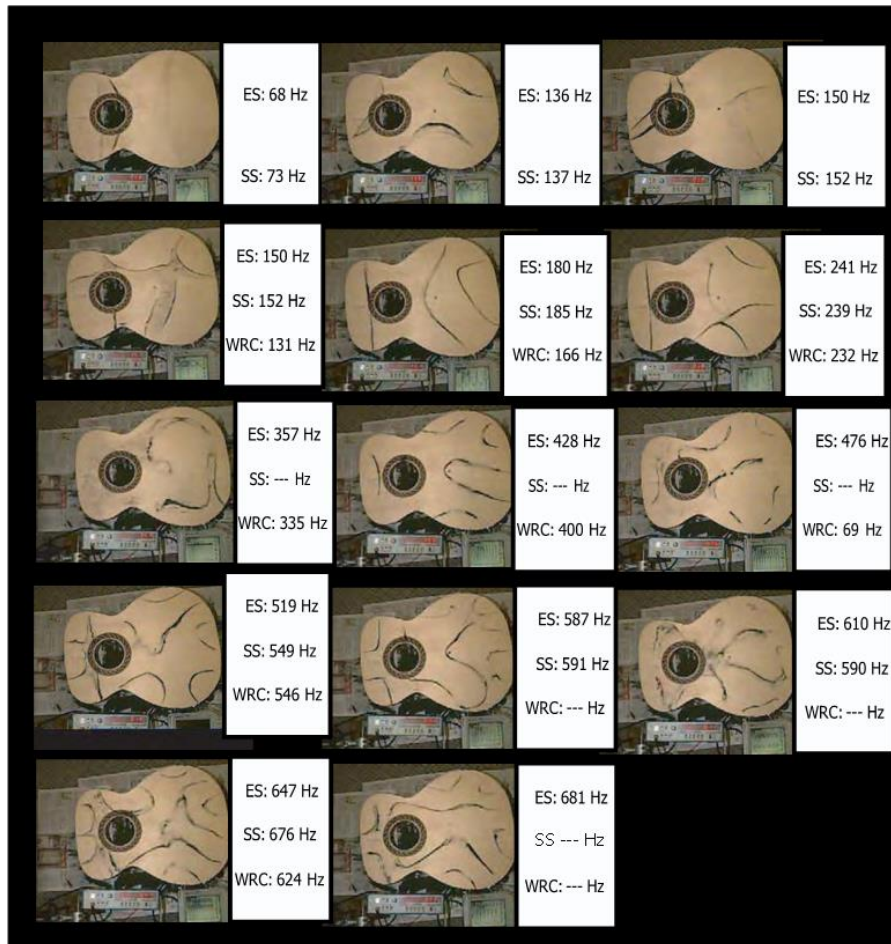
Nedostatak ove tehnike je taj što se ploče moraju poduprijeti vodoravno i mogu se mjeriti samo relativno ravni objekti, ali je lako primjenjiva na instrumente s ravnim pločama kao što je gitara (Erndl, 1999) i ploče s ograničenom zakrivljenosti u okomitom smjeru, kao što je slobodna ploča violine (Bossy i Carpentier, 1998) (Inta, 2007).

Srodna tehnika, hologrfska interferometrija (Jansson, 1971, Richardson, 1988) izdvaja slične vibracijske informacije o prostornoj distribuciji vibracijskih modova, iz interferencije koherentnih monokromatskih izvora svjetlosti, ali nije ograničen istim gravitacijskim ograničenjima ili jakom zakrivljenošću površine i nesavršenostima (Rossing, 2000). Ovom se metodom također dobivaju neke informacije o relativnoj amplitudi vibracija. Nedostatak hologrfske interferometrije

## 2. GRAĐA GITARE

je taj što zahtijeva relativno sofisticiranu i skupu aparaturu i često je potrebno dugo vremena za ispravnu pripremu, zbog čega ju je za većinu majstora nemoguće rutinski koristiti u radionici.

Zbog jednostavnosti metode Chladnijeve figure, mnogi majstori je koriste za određivanje pločastih svojstava instrumenta tijekom i nakon izrade.



**Slika 10.** Chladnijeve figure „slobodne“ ploče gitare (Inta, 2007.)

### 3. CILJ RADA

Bit ovoga rada je pokušaj unaprjeđenja zvučne ploče gitare bez izmjena najčešće upotrebljavanog oblika unutarnje konstrukcije, odnosno x-ukrute (engl. x-braceing-a), ali sa izmjenama u elementima konstrukcije, na način da su na određenim mjestima elemenata bočno izvedeni provrti različitih dimenzija.

Ideja je začeta na temelju dosadašnjih eksperimenata koji za sada još nisu laboratorijski ispitani, no postoje neki slični eksperimentalni radovi kojima su glazbalari sa ovakvim načinom pokušali poboljšati neka akustična svojstva gitare, kao što je „odgovor“ ili „odaziv“ (engl. response) i naravno rezonancija gitare u kombinaciji sa prethodno navedenim svojstvom, te glasnoća instrumenta u odnosu na istu razinu pobude žice. No, ovakva modifikacija u komercijalnoj, masovnoj proizvodnji, zasada nije prihvaćena niti ustaljena praksa.

Sukladno cilju pretpostavljeno je da će predviđena modifikacija uzrokovati promjene akustičnih svojstava koje će rezultirati većom razinom zvuka bez značajnog utjecaja na ostala akustična svojstva gitare.

### 4. MATERIJALI I METODE

“Ponekad se razlika može čuti...smanjivanjem samo 0,1 mm debljine drva sa jednog kvadratnog centimetra zvučne ploče (violine) prosječne debljine 3 mm.” – M.E. McIntyre and J. Woodhouse, 1978

#### 4.1. Indeks dizajna

Izrada prototipa akustične gitare započela je istraživanjem postojećih rješenja na tržištu i odabiranjem dizajna na kojemu se temelji ovaj rad.

Budući da je tvrtka C.F. Martin & Co. zaslužna za standardiziranje i razvoj X-ukrute gitare, kao temeljna inspiracija za ovaj rad izabran je “kultni” model gitare Martin – OM28 iz 1929 godine.

Ova gitara poznata je kao prva gitara gdje se 14-ti prag nalazi paralelno sa gornjim rubom tijela gitare dok su dotadašnje gitare imale manji raspon duljine žica te je paralelni prag sa gornjim rubom tijela bio 12-ti. Ova izmjena olakšala je sviranje gitare na višim pozicijama. Osim toga, produljenje raspona žica na gitari u kombinaciji sa x-ukrutom, omogućilo je dodatnu napetost žica što se pokazalo povoljnim utjecajem na dinamiku, rezonantna svojstva i akustičnu projekciju zvuka instrumenta.

Nakon pozitivnih učinaka u konstrukcijskim i dimenzijskim značajkama, ubrzo se ove izmjene ustaljuju u proizvodnji drugih modela gitara.

Također, ova gitare je odabrana i iz osobnih preferencija funkcionalnih značajki, a jedna od njih je manja debljina tijela gitare u odnosu na većinu ostalih modela akustičnih gitara.



**Slika 11.** Moderni model Martin OM-28 gitare (C.F. Martin & Co., 2022)

Uzorom na ovu gitaru, prije procesa same izrade, izrađen je CAD model gitare. CAD modeliranje i dizajniranje gitare, bilo je vođeno načelima pojednostavljenja dizajna, odnosno minimalističkog pristupa dizajnu gitare kako bi se zadržala konstrukcijska svojstva gitare, njen oblik, materijali izrade te na kraju kako bi akustična svojstva bila približno usporediva, no, također kako bi se pojednostavila njena izrada, obzirom na vremensku ograničenost ovoga rada.

U dizajnu eksperimentalne gitare, izmijenjeno je nekoliko manjih estetskih detalja kao što je piramidalni ukras na stražnjoj strani glave gitare, detalj donjeg dijela hvataljke sa odrezanim bridovima pod kutem od 45°, te u materijalu izrade. Umjesto plastične zaštite tijela gitare od trzalice i umjesto furniranog prednjeg dijela glave gitare furnirom ružinog drva, ovi dijelovi izrađeni su od fineline furnira orahovine, debljine 1,2 mm, odnosno 0,6 mm za furniranje glave.

Dizajn gitare obilježile su i osobne sklonosti prema konačnom željenom zvuku gitare, što znači da je odabrana gitara rezultat želja autora, koji je uvelike utjecao i na odabir materijala, odnosno vrste drva korištenih u izradi gitare.



*Slika 12. CAD model gitare*



*Slika 13. CAD model gitare*





*Slika 14. CAD model gitare*

### 4.2. Materijal izrade i njegove karakteristike

Akustična gitara, kompleksan je sklop različitih faktora koji utječu na njena akustična svojstva. Ponajprije, svaki element konstrukcije akustične gitare daje svoj doprinos njenim konačnim zvučnim svojstvima, a materijali od kojih je izrađen instrument igraju ključnu ulogu u tim svojstvima.

Pri odabiru drvnog materijala (uglavnom drvnih ploča), vrlo je važno da on ispunjava osnovne preduvjete za upotrebu u izradi glazbenog instrumenta, a to su:

- drvo je ispiljeno četvrtanjem, odnosno ima teksturu blistače,
- pravilna i ravna tekstura,
- krutost ploče u svim smjerovima,
- pravilno osušen drveni materijal,
- nema kvrga, crvotočina, gljivica, pukotina ili džepova smole,
- zvučno reagira na udarne podražaje.

Svi elementi eksperimentalne gitare, izrađeni su od materijala od kojih je izrađen i originalni model gitare Martin OM-28, jedina razlika u materijalu koji je korišten u izradi može biti u njegovoj klasi, no kod eksperimentalne gitare, najniža klasa materijala bila je prva „AA“ klasa,

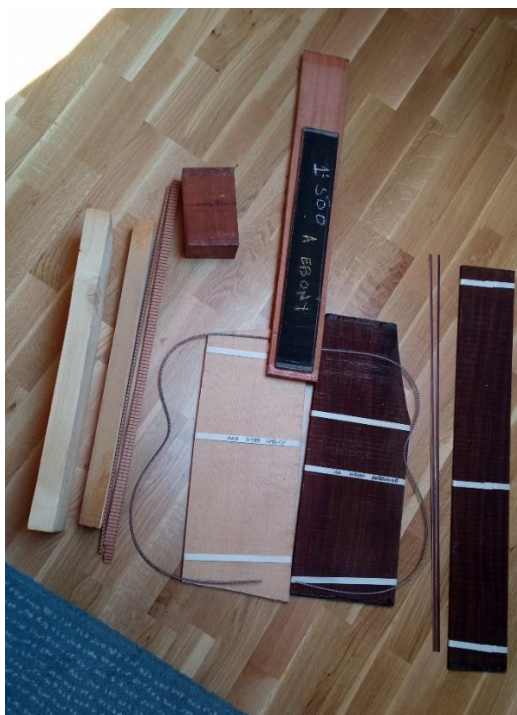
#### 4. MATERIJALI I METODE

dok se po klasifikaciji kvalitete drva, ispred prve „AA“ klase, ispred nalaze još samo prva „AAA“ klasa i „master“ klasa, no ove klase više se vrednuju po estetskim nego po fizikalnim i mehaničkim obilježjima drva, što nema velikog utjecaja na akustična svojstva.

U tablici u nastavku, prikazana je kopija računa naručenog materijala potrebnog za izradu instrumenta, na kojoj su vidljive vrste drva naručene za izradu eksperimentalne gitare, te njihove klase.

Reference	Product	Tax Rate	Base price (Tax excl.)	Unit Price (Tax excl.)	DTO	Qty	Total (Tax excl.)
1156	AA African Ebony Acoustic / Archtop Guitar Fingerboard	21 %	--	€20.20	0 %	1	€20.20
3185-3299	AA Indian Rosewood Classic Guitar Set	21 %	€82.80	€57.96	-30 %	1	€57.96
335	AAA Sitka Spruce Classic Guitar Tops	21 %	--	€47.00	0 %	1	€47.00
4198	African Mahogany Acoustic / Archtop / Electric Guitar Neck (700x100x25 mm)	21 %	--	€12.00	0 %	1	€12.00
7375	DM-PF744C binding	21 %	--	€5.75	0 %	2	€11.50
12811	E-09 African Mahogany Top/Back/Side Reinforcement	21 %	--	€2.90	0 %	4	€11.60
7	European Spruce Bracewood 40 mm	21 %	--	€2.50	0 %	2	€5.00
11557	Indian Rosewood - White Binding	21 %	--	€9.50	0 %	2	€19.00
9795	Mahogany FSC100% Acoustic Guitar Heel	21 %	--	€11.20	0 %	1	€11.20

**Slika 15.** Popis naručenog materijala za izradu eksperimentalne gitare



**Slika 16.** Isporučeni materijal za izradu eksperimentalne gitare

##### **Važna akustična svojstva drva**

Akustična svojstva drva poput glasnoće, kvalitete i boje zvuka određuju se prema fizikalnim i mehaničkim svojstvima materijala od kojih je izrađen instrument.

Prema Ulrike G.K. Wegst (2006.), svojstva materijala o kojima ovise njegova akustična svojstva su gustoća, Youngov modul elastičnosti, te koeficijent gubitka. Ova svojstva određuju brzinu zvuka u materijalu, njegove prirodne frekvencije, te intenzitet zvučnog zračenja. Najvažnija akustička svojstva materijala u primjeni na glazbenim instrumentima su brzina zvuka unutar materijala, karakteristična impedancija, koeficijent zvučnog zračenja i koeficijent gubitka.

Brzina ( $c$ ), kojom zvuk putuje kroz materijal definirana je kao korijen Youngovog modula elastičnosti materijala ( $E$ ) podijeljenog s gustoćom materijala ( $q$ ):

$$c = \sqrt{\frac{E}{q}} [m / s]$$

Impedancija ( $z$ ) materijala, definirana je kao umnožak brzine zvuka u materijalu ( $c$ ) i njegove gustoće ( $q$ ):

$$z = cq = \sqrt{Eq}$$

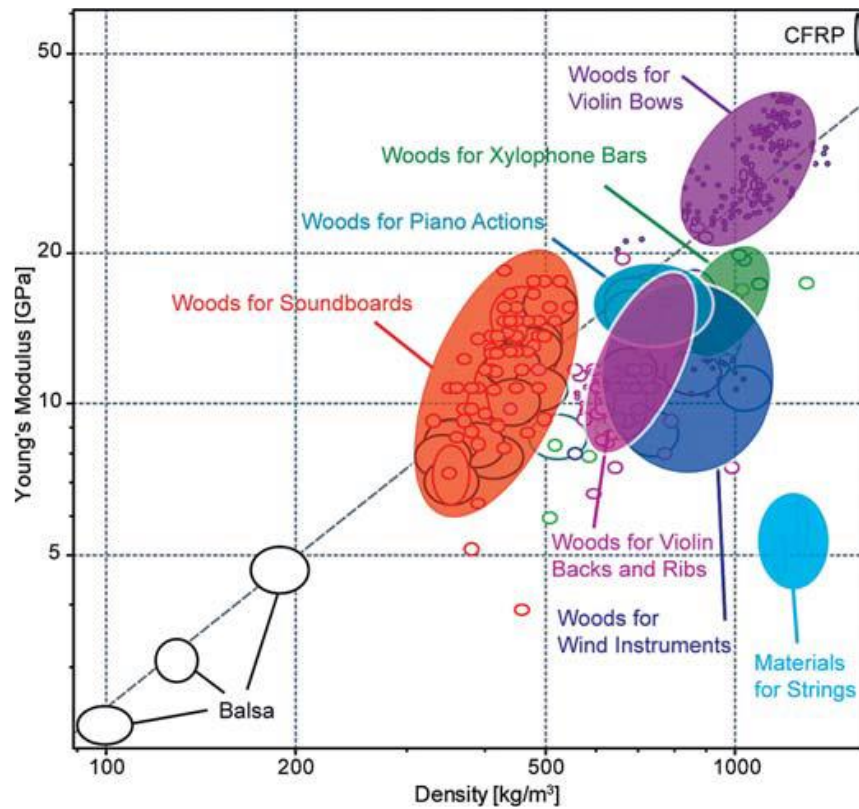
Koeficijent zvučnog zračenja ( $R$ ) materijala definiran je kao omjer brzine zvuka materijala ( $c$ ) i njegove gustoće ( $q$ ):

$$R = \frac{c}{q} = \sqrt{\frac{E}{q^3}} [m^4 / s kg]$$

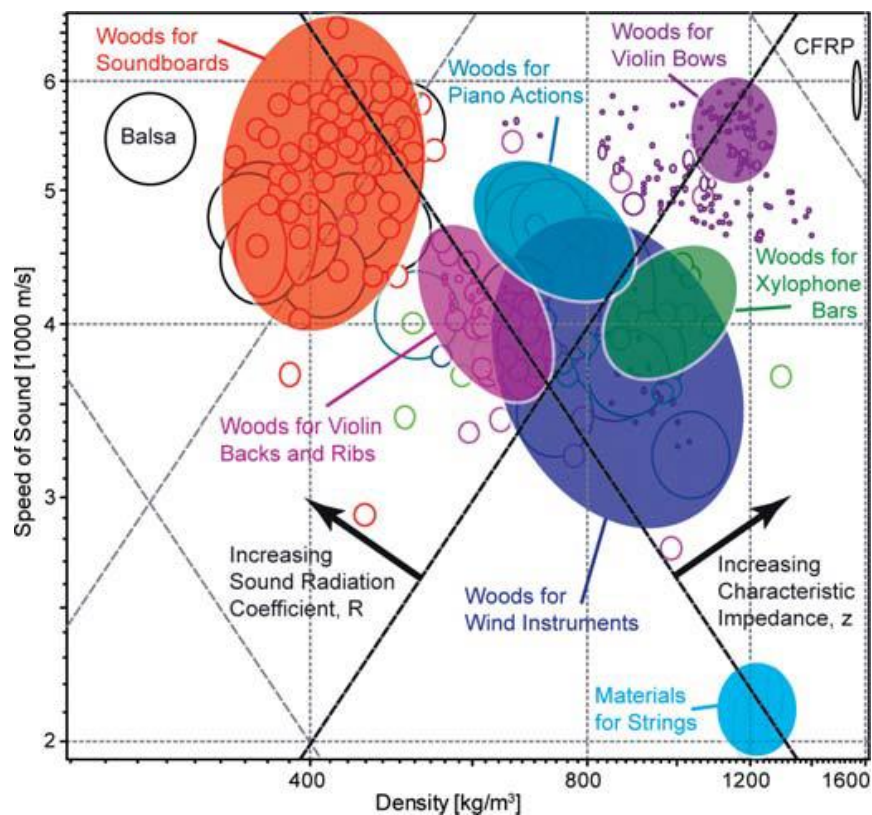
Koeficijent gubitka ( $\eta$ ) mjeri stupanj do kojeg materijal rasipa vibracijsku energiju unutarnjim trenjem. Druge mjere prigušenja uključuju faktor kvalitete ( $Q$ ) logaritamski dekrement, ( $\delta$ ) i kut gubitka ( $\psi$ ).

$$\eta = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi} = \tan \psi$$

U nastavku su prikazani grafovi odnosa gustoće i modula elastičnosti, gustoće i brzine zvuka u materijalu, te graf odnosa koeficijenta gubitka i koeficijenta na kojima su označena područja kojima bi svojstva materijala odgovarala pojedinim dijelovima instrumenata.

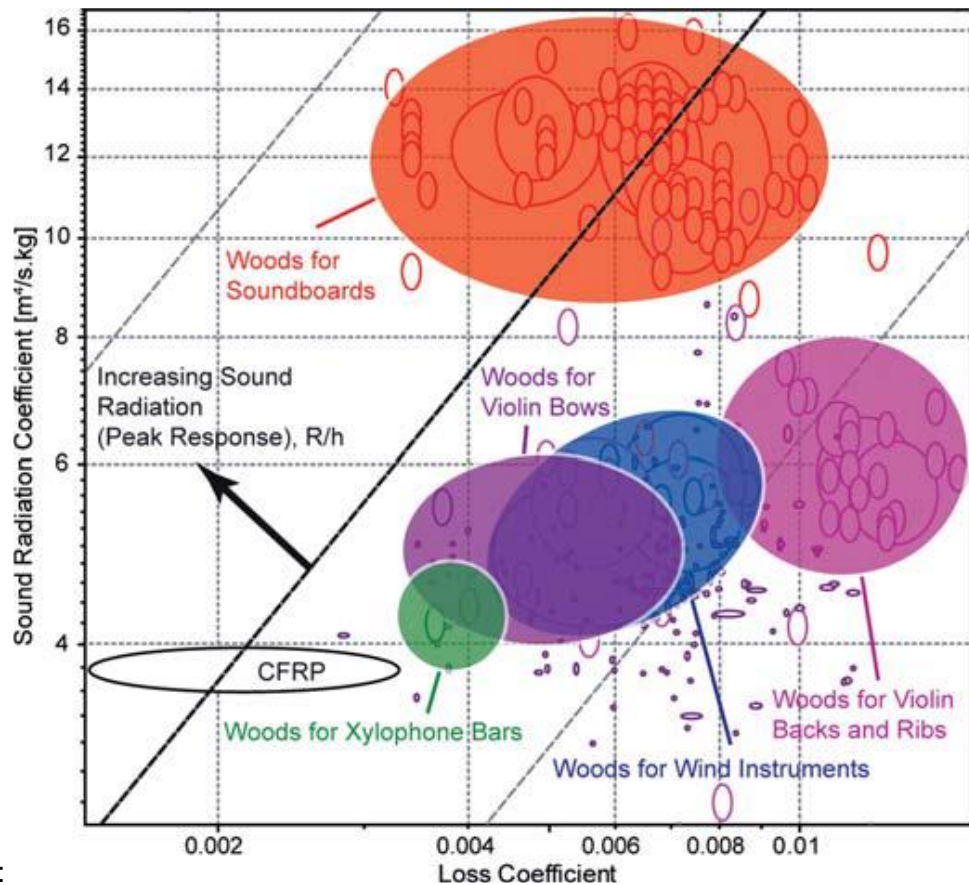


Slika 17. Odnos Gustoće i Youngovog modula elastičnosti (Ulrike G.K. Wegst (2006.))



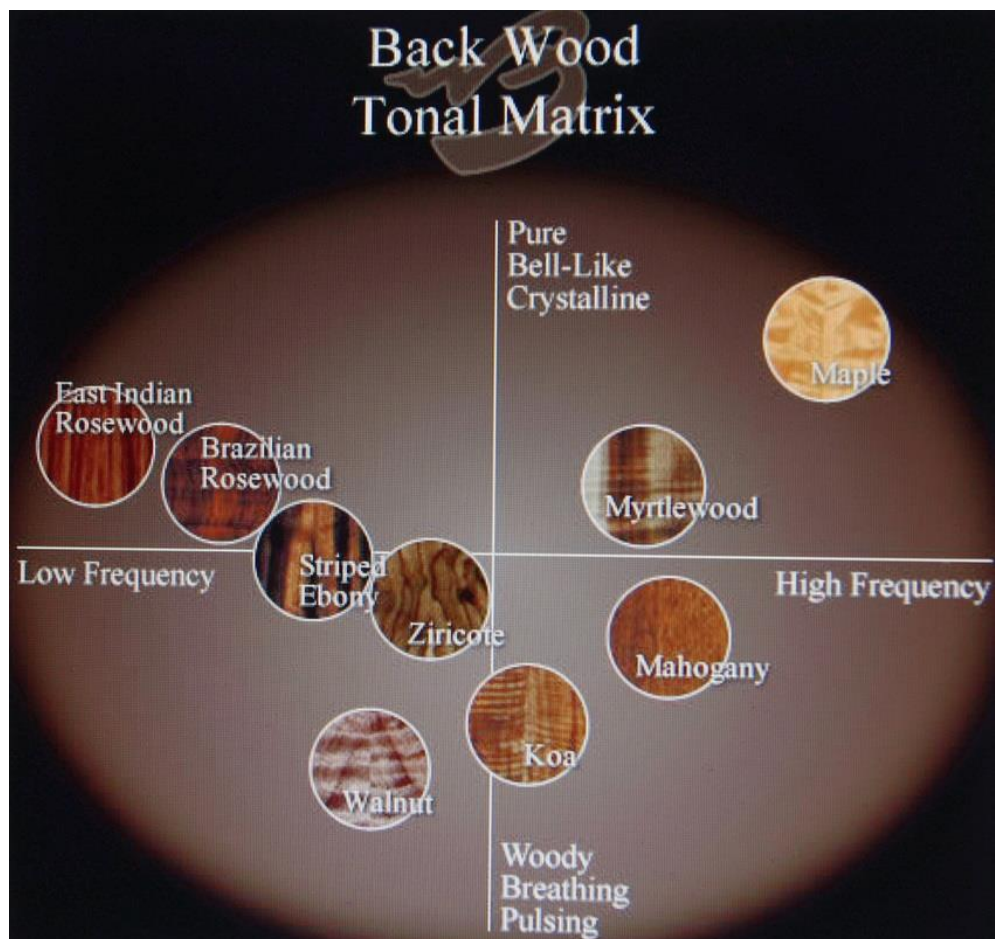
Slika 18. Odnos gustoće i brzine širenja zvuka (Ulrike G.K. Wegst (2006.))





**Slika 19** Odnos koeficijenta gubitka i koeficijenta zvučnog zračenja (Ulrike G.K. Wegst (2006.))

Osim zvučne ploče, ton instrumenta uvelike je određen stražnjom pločom i bočnim stranicama. Kada govorimo o karakteru tona, u razgovorima glazbenika i u glazbenom žargonu može se čuti da je ton svijetao ili taman, topao ili hladan, zvonak ili prigušen, sa više ili manje basa, izraženih ili manje izraženih visokih, srednjih ili niskih tonova i slično. Na slici 20. prikazano je kako neke vrste drva upotrijebljene za izradu stražnje i/ili bočnih stranica utječu na subjektivan doživljaj tona instrumenta, odnosno subjektivni tonski spektar.



**Slika 20.** Utjecaj različitih vrsta drva, uobičajenih za izradu stražnje ploče i bočnih stranica gitare na subjektivni doživljaj tona (Anonimni autor, 2022.)

### 4.3. Proces i metode izrade eksperimentalne gitare

Proces izrade eksperimentalne akustične gitare sa modifikacijama konstrukcije zvučne ploče započeo je nakon istraživanja literature i pribavljanja potrebnog materijala. Literatura iz koje je crpljeno znanje o izradi akustične gitare, knjiga je poznatog graditelja Johnatana Kinkead-a „Sagradite svoju vlastitu akustičnu gitaru“ (2004.), ali i brojna druga literatura koja je navedena u popisu.

Kako bi se vizualizirala ideja, konstrukcijski razradila eksperimentalna gitara i kako bi se kasnije ti modeli koristili u svrhu izrade elemenata gitare na CNC stroju, napravljen je CAD model gitare, već prikazan na slikama 12, 13 i 14 u prethodnom dijelu rada.

U nastavku rada, proces izrade podijeljen je na elemente: zvučna ploča, bočne stranice, stražnja ploča, vrat i glavu, te hvataljku i konačno sklapanje i sastavljanje elemenata gitare.

##### **Zvučna ploča (glasnjača)**

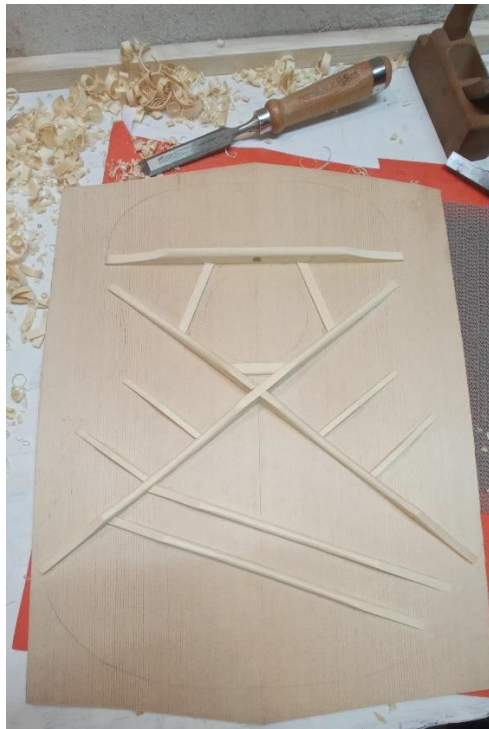
Obrada prednje ploče započela je spajanjem dvije „susjedne“ ploče dobivene iz raspiljivanja trupca četvrtanjem, u radijalnom smjeru kako bi se dobila tekstura blistače. Naručeni materijal ploča isporučen je sa nadmjerom, ukupne debljine ploče od 4mm, koje su se kao takve prije obrade spojile tupim sljubom. Nakon spajanja ploča, bilo je potrebno stanjiti dobivenu ploču na jednoliku debljinu ploče od 2,80 mm.



**Slika 21.** Zvučna ploča prije spajanja

Slijedeći korak izrade bio je ispiljivanje letvica potrebnih za ukrutu zvučne ploče iz komada drva, također dobivenog iz raspiljivanja trupca četvrtanjem. Ove letvice, bilo je potrebno obraditi na način da glavni krakovi x-ukrute budu spojeni na sredini zvučne ploče preklopnim spojem. Letvice su također bile izrađene s nadmjerom na njihovu visinu te su kao takve, četvrtastog presjeka učvršćene lijepljenim spojem na unutrašnju površinu zvučne ploče. Prije lijepljenja, letvice su bile obrađene tako da tvore luk, odnosno po dužini letvica sa donje strane, brušenjem tračnom brusilicom izrađeni su radijusi elemenata po njihovoj dužini, kako zvučna ploča gitare ne bi bila ravna, nego poprimila blagi kupolasti oblik.

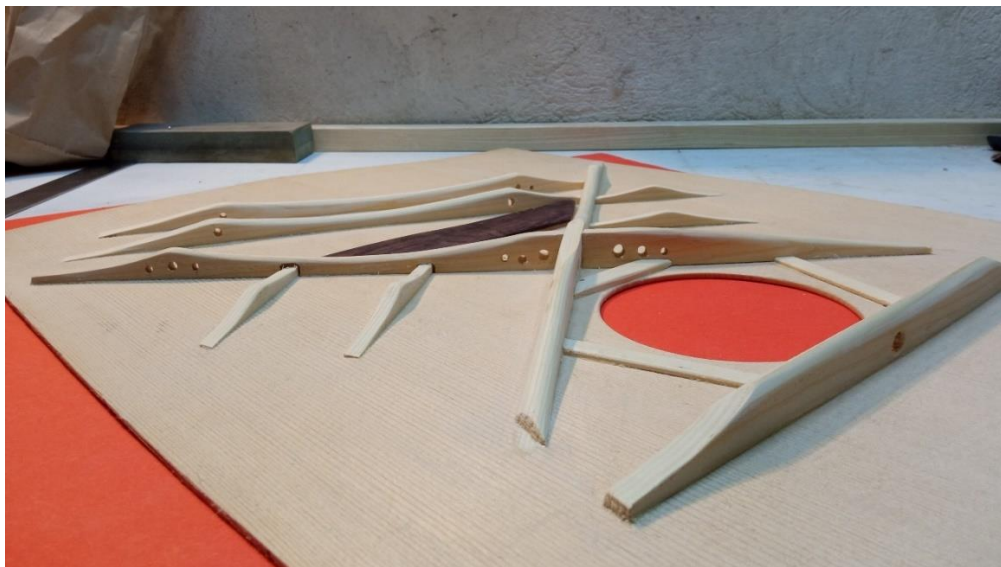
Kako bi letvice u preši osigurale dobar spoj sa zvučnom pločom, te kako bi zvučnu ploču poprimila oblik kupole, izrađeno je inverzno udubljenje na drvenoj ploči na koju je prilikom lijepljenja letvica u preši postavljena zvučna ploča.



**Slika 22.** Zvučna ploča nakon lijepljenja i oblikovanja elemenata ukrute

Nakon lijepljenja letvica na zvučnu ploču, one su oblikovane dlijetom, skalopirane po nacrtu te su nakon skalopiranja i brušenja letvica, na određenim dijelovima ukrute (uglavnom najvišim), poprečno izbušene rupice modelarskom bušilicom, promjera provrta 5, 4 i 3 mm, vidljivih na slici 23 u nastavku rada.

Nakon oblikovanja i modifikacije letvica ukrute, na zvučnoj ploči, modelarskom glodalicom je izveden provrt zvučne rupe,  $\varnothing$  98 mm.



**Slika 23.** Zvučna ploča nakon bušenja poprečnih provrta na elementima ukrute, te izrade zvučnog otvora



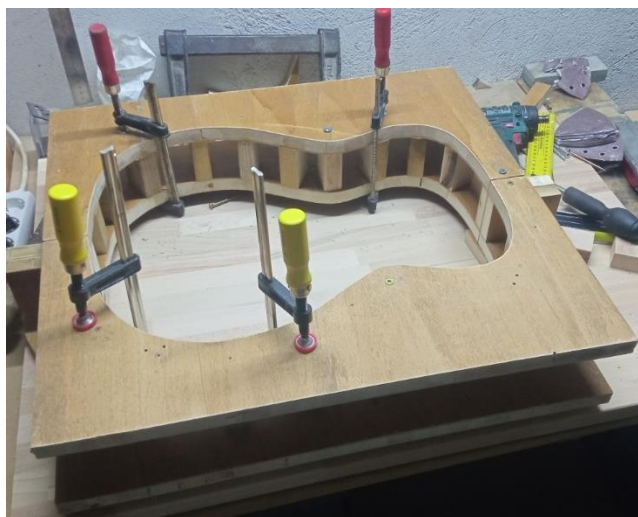
### **Bočne stranice**

Za oblikovanje bočnih stranica, prethodno je bilo potrebno napraviti kalup u kojemu će stranice po završetku oblikovanja poprimiti svoj konačni oblik. Kalup je izrađen od 4 dijela stolarske ploče, izrezanih i izbrušenih simetrično, po konturama oblika tijela gitare (*Slika 24*). Između ovih ploča, nalaze se dijelovi drvenih letvi jednake visine, simetrično raspoređeni po obodu kontura bočnih stranica gitare, odnosno kalupa, ove letvice osiguravaju spoj dijelova kalupa, te spajanje dvaju elemenata kalupa vijčanim spojem, a razmak između ovih elemenata osigurava brže sušenje bočnih stranica nakon savijanja.

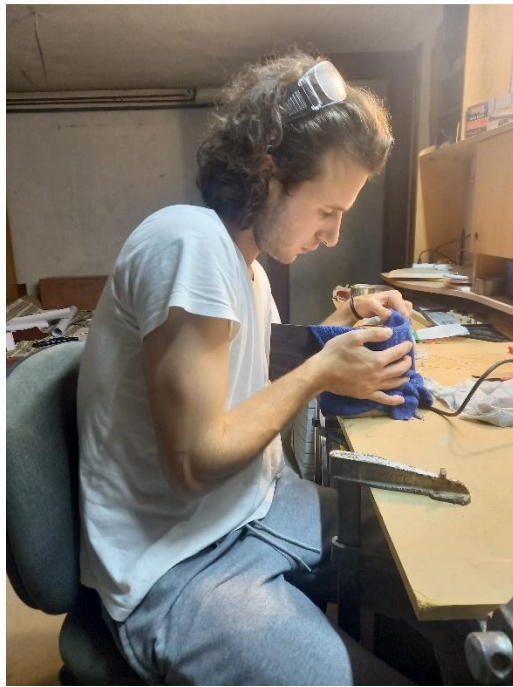
Prije savijanja stranica, one su izrezane po krivuljama na nacrtu, jer tijelo akustičnih gitara, također nije jednolike debljine već se ono konusno širi od gornjeg prema donjem dijelu tijela.

Savijanje stranica izvedeno je prethodnim stanjivanjem stranica debljine 4,50 mm na jednoliku debljinu od 2,80 mm. Nakon stanjivanja stranica, one su kuhane u vrućoj vodi 1h. Nakon kuhanja, stranice su savijane oko grijača koji je prethodno zagrijan na temperaturu od cca 240°C. Bitno je spomenuti da je kod savijanja ključno grijati što veću površinu drva koju zahvaća radijus savijanja kako bi se omogućilo lakše savijanje drva bez pucanja.

Nakon što je savijeno drvo odstajalo 48 sati stegnuto u kalupu, stranice se spajaju lijepljenjem gornjeg i donjeg bloka vidljivih na *slici 27*. Gornji blok, osim što služi kao konstrukcijski element spajanja bočnih stranica, on također ima i ključnu ulogu spajanja tijela gitare sa vratom. Nakon lijepljenja blokova, uz bridove stranica gitare lijepe se drvene trake, koje imaju ulogu povećanja površine lijepljenog spoja, a tako i čvrstoće spoja zvučne, odnosno stražnje ploče gitare sa bočnim stranicama tijela.



**Slika 24.** Izrada kalupa za savijanje bočnih stranica



**Slika 25.** Savijanje i oblikovanje konture bočnih stranica



**Slika 26.** Učvršćivanje bočnih stranica u kalup



*Slika 27. Lijepjenje savitljive drvene trake na bočne stranice nakon njihovog sastavljanja*

#### **Stražnja ploča**

Osim što stražnja ploča ima ljestvičasti oblik ukrute, te manje radijuse letvica ukrute od prednje ploče, kako bi one osigurale još veću zakrivljenost kupole stražnje ploče, postupak izrade, isti je kao i onaj zvučne ploče naveden u poglavlju 4.1.3.1.



*Slika 28. Obilježavanje radijusa elemenata ukrute stražnje ploče*



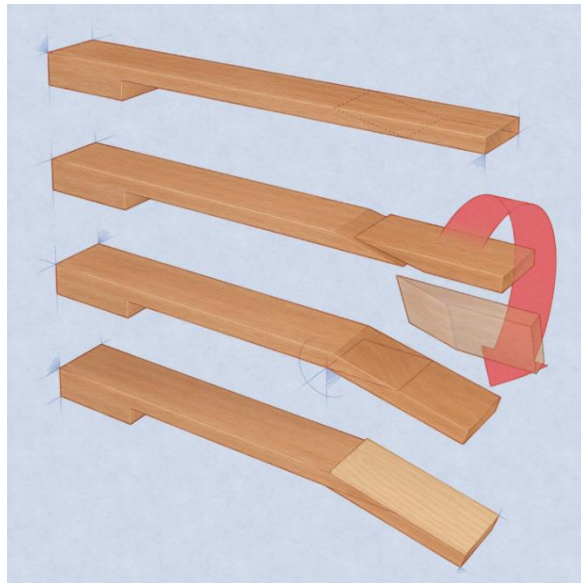
**Slika 29.** Lijepljenje elemenata ukrute na stražnju ploču gitare

### ***Vrat i glava***

Kompleksnost oblika vrata gitare čini njegov konusan, zaobljeni oblik, krivulje „pete“ vrata, odnosno dijela koji omogućuje dosjed vrata gitare s tijelom te prijelazne krivulje s vrata na glavu gitare. Za ovakav zahtjevan oblik, prilikom ručnog rada, potrebna je iznimna vještina, no da bi se doskočilo tom problemu, ovaj dio izrađen je CNC tehnologijom uz minimalnu doradu ručnim radom. Iz već spomenutih CAD modela, izrađeni su CAM programi te se vrat izrađivao u nekoliko faza. U izradi 3D modela(CAD), i pripreme mehaničke obrade (CAM) korišteni su računalni programi tvrtke Autodesk, Inc. (Inventor i Fusion 360) te je kao post procesorski program CAM kontrolnog sustava korišten kompjuterski program Mach 3 Mill, tvrtke Newfangled solutions.

U prvoj fazi, obradak se pripremio poprečnim rezanjem materijala pod kutem od 15° kako bi se dobila dva dijela od kojih je gornji nakon rezanja zaokrenut za 180° i spojen tupim sljubom sa donjim dijelom vrata. Ovakav način izrade kuta glave gitare prikazan na slici 30 osigurava veću čvrstoću na savijanje, potrebnu kod napetih žica jer smjer vlakana glave gitare prate njen oblik.





**Slika 30.** Postupak Izrade kutnog spoja glave i vrata gitare (Peter Wojcieszek, 2022.)

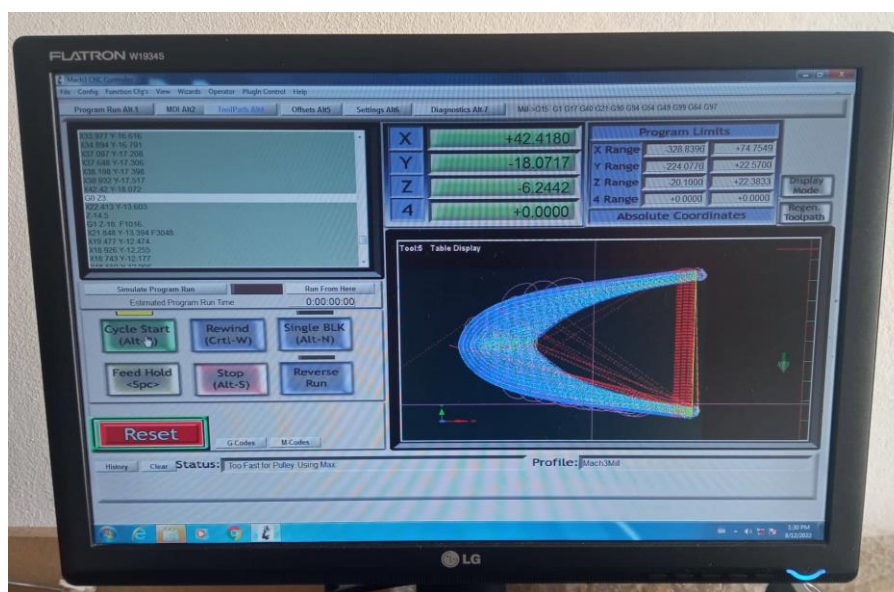
Druga faza bila je postavljanje obratka na stol CNC stroja te glodanje utora za šipku vrata gitare. U trećoj fazi izvodilo se glodanje konusnog, stražnjeg dijela vrata polukružnog presjeka i pete vrata, te izrezivanje konture vrata iz obratka. Peta gitare, izrađivala se u 3 faze zbog ograničenosti stroja, odnosno njegovog 3-osnog načina rada i nedovoljne duljine dostupnih glodala, te se ovaj element rastavio u 3 visinska nivoa kako bi se kasnije ovi dijelovi zalijepili jedan na drugog. Četvrta faza bila je obrada prednjeg i stražnjeg dijela glave i spoja s vratom te bušenje provrta za mašinicu na glavi instrumenta, prikazanog na *slici 34*.



**Slika 31.** CNC obrada vrata gitare



**Slika 32.** CNC obrađen segment pete vrata



**Slika 33.** Prikaz ekrana post procesor programa „Mach 3“ u izradi elementa



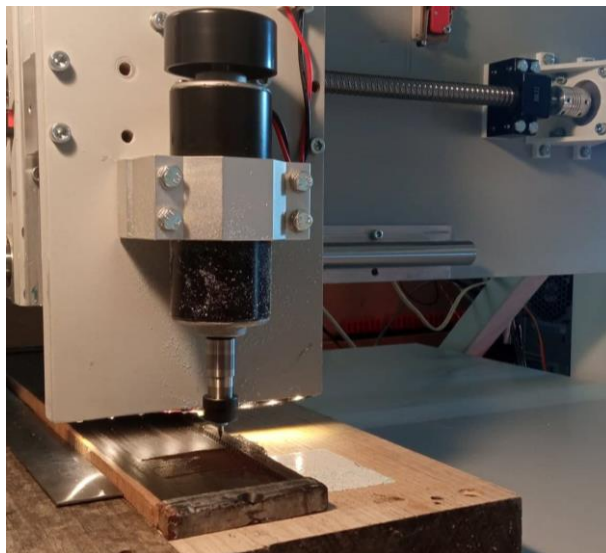
**Slika 34.** CNC bušenje rupa na glavi gitare



**Slika 35.** Slika vrata i segmenta pete gitare nakon CNC obrade

#### **Hvataljka**

Hvataljka gitare također je precizno izrađena na CNC stroju kako bi razmak pragova i izrada utora za njih bila gotovo savršeno izvedena. Također na gornjoj strani hvataljke izveden je radijus po širini hvataljke koji je karakterističan za ovaj model gitare.



*Slika 36. CNC glodanje utora za pragove na hvataljci gitare*

#### ***Sklapanje i sastavljanje elemenata gitare***

Pri sklapanju elemenata gitare, mosta gitare na zvučnu ploču, lijepljenju zvučne i stražnje ploče na bočne stranice, te hvataljke na vrat gitare, korišteno je alifatsko ljepilo „Titebond-Original“ koje je najraširenije i najpoznatije ljepilo u izradi drvenih instrumenata. Njegova krutost i čvrstoća lijepljenog spoja osiguravaju potrebnu mehaničku čvrstoću instrumenta i prikladan prijenos vibracija između lijepljenih elemenata. Nakon sklapanja hvataljke i vrata gitare, na hvataljku su postavljeni pragovi gitare tijesnim spojem. Nakon postavljanja, oni su nivelirani, odnosno izbrušeni tako da njihovi vršni dijelovi budu u jednoj ravnini, te su ispolirani modelarskom brusilicom i mekom polir pastom za metale.



*Slika 37. Priprema elemenata gitare prije sklapanja*

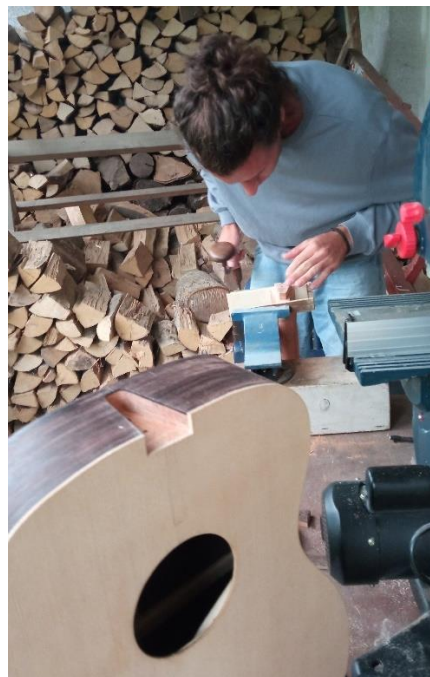




**Slika 38.** Sklopljena stražnja stranica gitare sa bočnim stranicama

Nakon sklapanja elemenata, na tijelu gitare izrađen je utor, dok je na vratu gitare, ispod njegove pete, izrađeno pero. Na tijelu gitare, odnosno gornjem bloku unutar tijela izbušena su dva provrta, koja su također izvedena i na peru vrata gitare u koje se upustila „trio“ matica kako bi vijci s unutarnje strane tijela prošli kroz provrte i dospjeli do unutarnjeg (metričkog) navoja trio matice i tako privukli vrat gitare ka tijelu i osigurali čvrst spoj.

Također, bitno je spomenuti kako je dosjed vrata gitare na tijelo izveden pod kutem od približno  $2^\circ$  (ravnina hvataljke u odnosu na ravninu zvučne ploče), odnosno  $88^\circ$  (dosjed vrata u odnosu na ravninu spoja hvataljke i vrata gitare.)



**Slika 39.** Izrada dosjeda vrata gitare s tijelom



**Slika 40.** Postavljanje pragova na hvataljku gitare



**Slika 41.** Sklopljena eksperimentalna gitara – prednja strana



*Slika 42. Sklopljena eksperimentalna gitara – stražnja strana*

### 4.4. Metode ispitivanja

Kao što je već prethodno spomenuto u radu, cilj ovog istraživanja bio je koncentriran na pronalaženje utjecaja konstrukcijske modifikacije zvučne ploče izvedene mehaničkom obradom poprečno izvedenih provrta na njene elemente konstrukcije, odnosno ukrućenja zvučne ploče.

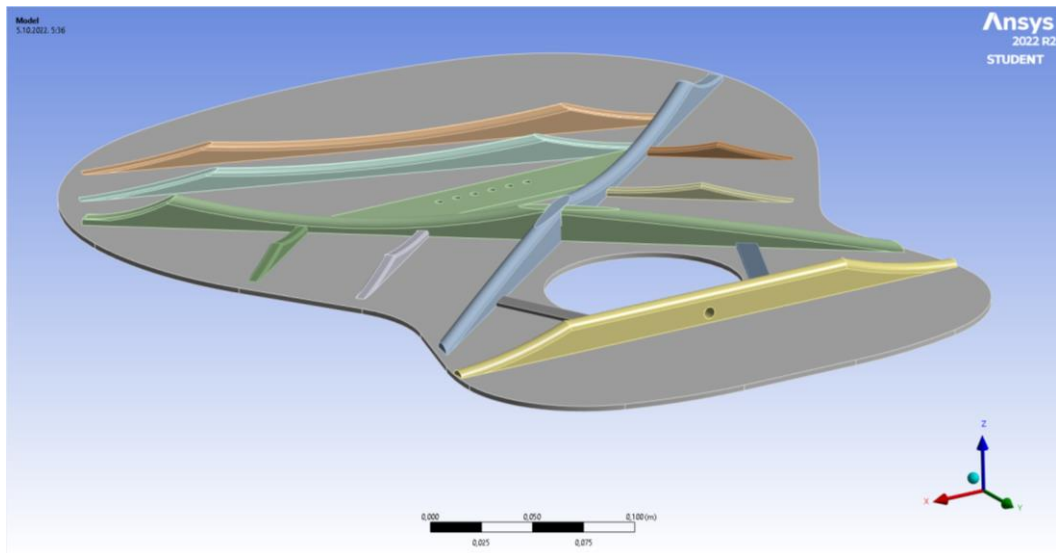
Intuitivna ideja proizašla je iz pretpostavke: veća pokretljivost prednje ploče = veća amplituda titranja = pojačana glasnoća i bolji odaziv instrumenta. No, je li to uistinu tako? Hoće li razlika biti primjetna? Kako će se ova modifikacija odraziti na ostala akustična svojstva instrumenta? Na ta pitanja, pokušalo se naći odgovore kroz 2 načina ispitivanja:

1. Modalnom analizom
2. Subjektivnim doživljajem sviranja i slušanja instrumenta

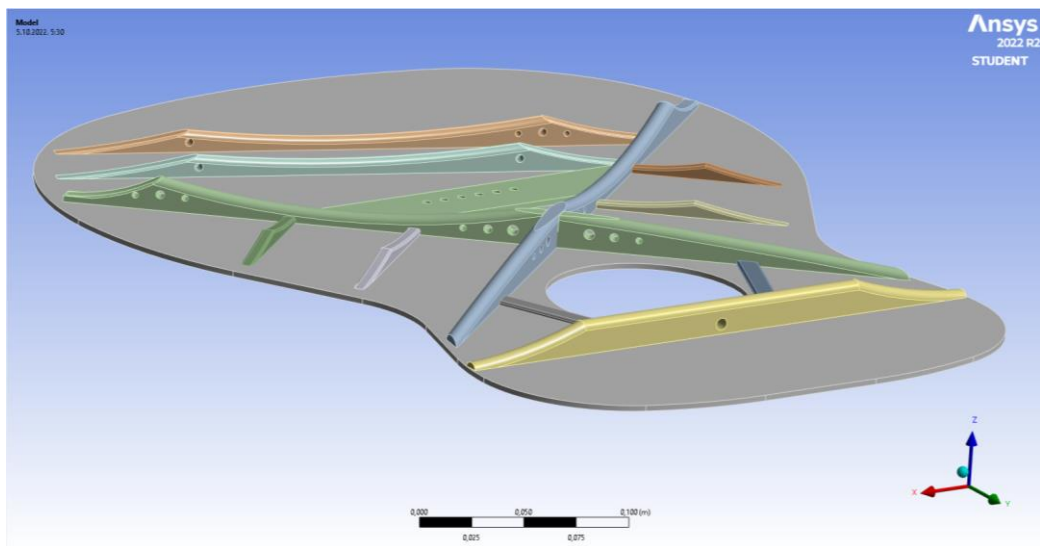
#### **Modalna analiza**

Modalna analiza izvedena je simulacijom u kompjuterskom programu Ansys. Napravljena su dva 3D modela zvučne ploče koja su uspoređena modalnom analizom. Prvi model sa skalopiranom verzijom x-ukrute zvučne ploče, dok je drugi model po svemu identičan kao i prvi, osim što on još ima i poprečno izbušene provrte na elementima ukrute koje su izvedene kako bi mehaničkom obradom konstrukcijski modificirale zvučnu ploču, promjeri provrta su veličine 5,4 i 3 mm. Prikaz modela vidljiv je na *slikama 43 i 44*.



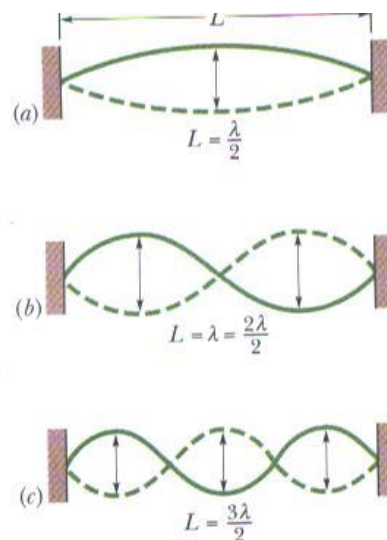


**Slika 43.** 3D model zvučne ploče korištena u analizi (klasično izvedena X-ukruta)



**Slika 44.** 3D model zvučne ploče s dodanim provrtima na elementima ukrute

Da bi objasnili pojam moda i što je modalna analiza, osvrnut ćemo se kratko na jednostavniji slučaj, a to su vibracije žice učvršćene na dva kraja. Skica takve žice je na slici 45. Žica učvršćena na dva kraja je jednostavniji slučaj zato što na njoj nastaju jednodimenzionalni transverzalni stojni valovi, dok na tijelu gitare nastaju dvodimenzionalni transverzalni stojni valovi, stoga su matematički opis i vizualizacija vibracija na žici jednostavniji od opisa vibracija na tijelu gitare, ali principi modalne analize vrijede jednako za oba slučaja.



**Slika 45.** Stojni valovi na primjeru žice ( V.H. Bartolić, P. Kulušić, 2004.)

Reducirat ćemo maksimalno matematiku u našem objašnjenju te napisati samo relacije koje su potrebne za shvaćanje temeljne ideje modalne analize.

Uzmimo da imamo žicu duljine  $L$  (kao na slici 45), učvršćenu na dva kraja, zategnutu silom  $F$  (sila napetosti u žici), koja ima linijsku gustoću  $\mu = m/L$  (masu po jedinici duljine). Da bi odredili kakvo titranje može nastati na toj žici moramo riješiti valnu jednadžbu. Rješenja valne jednadžbe za žicu učvršćenu na krajevima su stojni valovi oblika:

$$y_n(x, t) = a_n \sin(n\pi x/L) \cos(2\pi f_n t) [m] \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Gdje nam  $y_n(x, t)$  govori koliki je transverzalni pomak žice na mjestu  $x$  u trenutku  $t$ . Indeks  $n$  nam označava tzv. mod,  $a_n$  je amplituda  $n$ -tog moda, a  $f_n$  je frekvencija  $n$ -tog moda. Za  $n=1$  imamo titranje prikazano na slici 45 (a) tj. imamo titranje s jednim „truhom“, odnosno sredina žice maksimalno titra, a na rubovima gdje je žica učvršćena nema titranja, tamo su tzv. „čvorovi“. S prethodnom rečenicom smo upravo opisali prvi svojstveni način titranja tj. prvi mod. Tom prvom modu  $n=1$  je pridružena frekvencija:

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} [Hz]$$

Vidimo da frekvencija prvog moda ovisi o duljini žice  $L$  (što je duža žica manja je frekvencija, naravno i obrnuto, što je kraća žica veća je frekvencija), o sili napetosti žice  $F$  (veća napetost, veća frekvencija) i o linijskoj gustoći  $\mu$  (veća gustoća manja frekvencija). Za  $n=2,3$  imamo drugi i treći mod za koje žica titra sa oblikom kao na slici 45 (b) i (c). Vidimo da sa porastom broja  $n$  raste broj trbuha i pojavljuju se novi čvorovi na žici, pored dva čvora na rubovima. Za

proizvoljni  $n$ -ti mod žica bi titrala sa  $n$  trbuha i  $n-1$  čvorova, ne računajući čvorove na krajevima žice. Frekvencija  $n$ -tog moda za  $n=2,3,4,\dots$  se može napisati kao višekratnik frekvencije prvog moda tj. vrijedi  $f_n = nf_1$ . Žica na gitari je upravo žica učvršćena na dva kraja te se ovo što je napisano odnosi i na nju. Kad glazbenik zatitra žicu na gitari, titranje koje nastaje je zbroj više modova, dakle zbroj više mogućih stojnih valova  $y_n(x, t)$ , od kojih svaki doprinosi ukupnom zbroju sa svojom amplitudom  $a_n$ , a najčešće je amplituda prvog moda  $a_1$  najveća te on određuje u najvećoj mjeri zvuk koji čujemo. Zato se frekvencija  $f_1$  prvog moda u glazbi naziva ton, a ostali modovi sa svojim frekvencijama daju ono što u glazbi nazivamo boja tona.

Kompjuterski program Ansys, koji koristimo za analizu 3D modela gitare, računa transversalne stojne valove koji mogu nastati na prednjoj ploči gitare. Svaki stojni val predstavlja jedan mod i pridružena mu je njegova frekvencija titranja. Slično kao u primjeru sa žicom gitare, prvi mod ima najnižu frekvenciju i najjednostavniju strukturu. Razlika je u tome što su valovi na ploči gitare dvodimenzionalni pa za njihovo predstavljanje koristimo boju tj. crvena boja predstavlja mjesta gdje je titranje s najvećom amplitudom te se boja mijenja kako se amplituda titranja smanjuje preko narančaste, žute, zelene sve do plave koja označava mjesta gdje gotovo uopće nema titranja. Na slici 46. vidimo prvi mod na prednjoj ploči s provrtima u konstrukciji. Vidimo da je prisutno jedno područje s izrazitim titranjem (crvena boja) te oko njega titranje slabi, zapravo je ponašanje kvalitativno slično kao za žicu na slici 45 (a) gdje također imamo jedan trbuh. Asimetrija uzorka koji nastaje na gitari je posljedica geometrije gitare i rubnog uvjeta da je cijeli rub ploče gitare „čvor“, tj. rub ploče je linija duž koje nema titranja za bilo koji mod pa tako i prvi mod, slično kao što su čvorovi na krajevima žice na slici 45. prisutni kod svih modova. Sa slike 46. možemo iščitati i frekvenciju prvog moda  $f_1 = 205.1\text{Hz}$ . Na slici 48. vidimo drugi mod, koji ima jedno područje izraženog titranja (crvena boja), ali i drugo odvojeno područje gdje je titranje nešto manje izraženo (zelena boja) što je opet kvalitativno slično drugom modu na žici na slici 45 (b) u smislu da i ovdje imamo dva trbuha, samo što je drugi manji. Zbog spomenutog oblika gitare i rubnog uvjeta ne mogu nastati trbusi istih amplituda, kao kod žice. Sa slike 46. vidimo da je frekvencija drugog moda  $f_2 = 451.05\text{Hz}$ , tj. ovdje ne vrijedi odnos  $f_2 = 2f_1$ , ili općenito  $f_n = nf_1$ , koji je vrijedio kod modova na žici. Veza frekvencije prvog moda i ostalih modova se naravno i u ovom slučaju može matematički artikulirati, ali je složenija od spomenutog odnosa frekvencija modova na žici i nećemo ju ovdje navoditi. Na slikama 46. -55. vidimo kako porastom rednog broja moda raste složenost uzorka i povećava se pripadna frekvencija, što je kvalitativno isto ponašanje kao kod modova na žici. Slično kao i kod primjera sa žicom, kad ploča gitare vibrira prilikom sviranja gitare, ukupna vibracija je općenito zbroj više modova, od kojih svaki doprinosi ukupnoj vibraciji svojom amplitudom. Također, primjetimo da uzorci na slikama 46. – 55. nisu ništa drugo nego Chladni uzorci koje smo već sreli na stranici 20 .

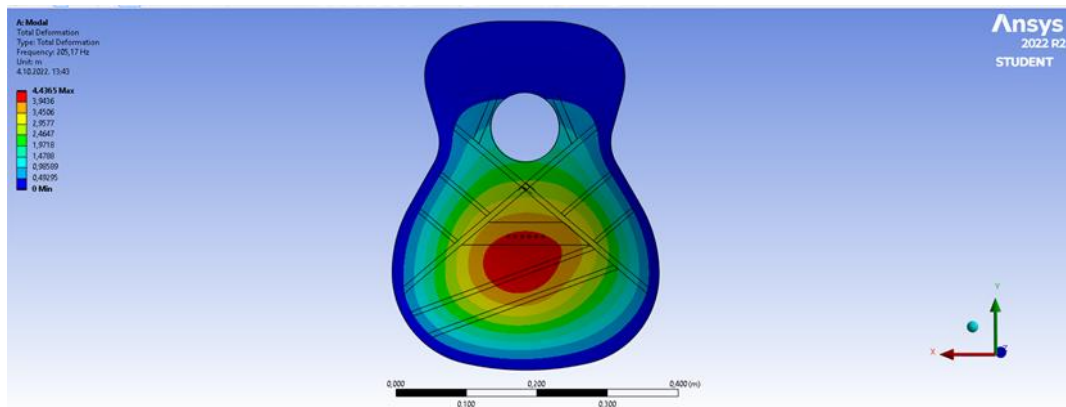
Na slikama u nastavku prikazano je prvih 5 modova ploča sa modifikacijom ukrute, odnosno bez nje.. Ako pogledamo frekvencije modova za ploču s rupicama i ploču bez rupica nije

## 4. MATERIJALI I METODE

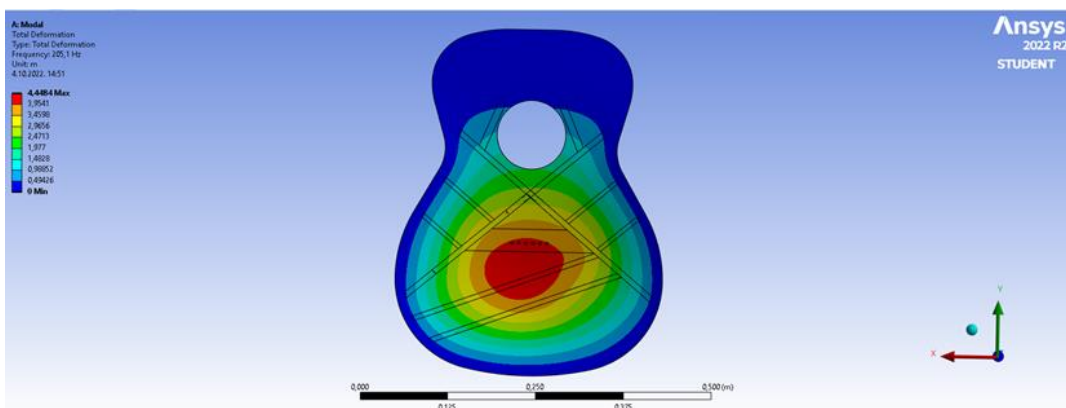
vidljivo da je došlo do neke sustavne promjene tj. prvi mod za ploču s rupicama ima neznatno nižu frekvenciju, a naredni modovi neznatno višu frekvenciju od ploče bez rupica u ukruti. Program Ansys također daje i maksimalnu amplitudu titranja pojedinog moda i vidljivo je da je amplituda titranja ploče s rupicama za sve modove nešto viša od amplitude titranja ploče bez rupica, što bi se moglo dovesti u korelaciju s manjom masom ploče s rupicama.

Modalna analiza je u principu izvrstan alat za karakterizaciju utjecaja mehaničkih svojstava na akustička svojstva, ali program Ansys koji je bio dostupan (studentska besplatna verzija) ima niz ograničenja zbog kojih rezultati nisu konkluzivni. Naime, program uzima da je drvo izotropan materijal sa jednakim naprezanjem u svim smjerovima, što ne odgovara realnosti, također rezolucija, tj. broj točaka mreže koju koristi metoda konačnih elemenata u programu, vjerojatno nije bila dovoljna da uhvati utjecaj rupica na čvrstoću strukture, već je vjerojatno samo uhvaćen utjecaj male razlike u masi što možda objašnjava nešto veće amplitude titranja ploče s rupicama.

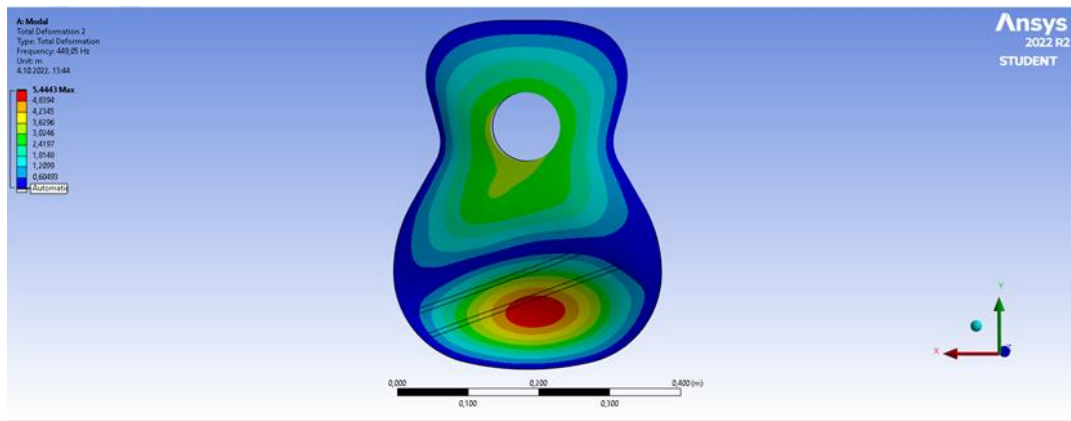
Na slikama u nastavku prikazano je prvih 5 prirodnih modova zvučnih ploča.



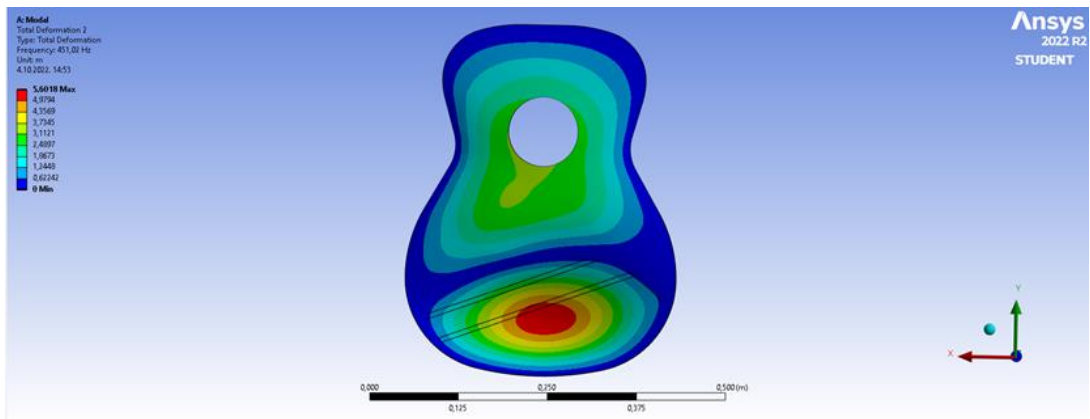
**Slika 46.** Prvi mod – klasično izvedena zvučna ploča



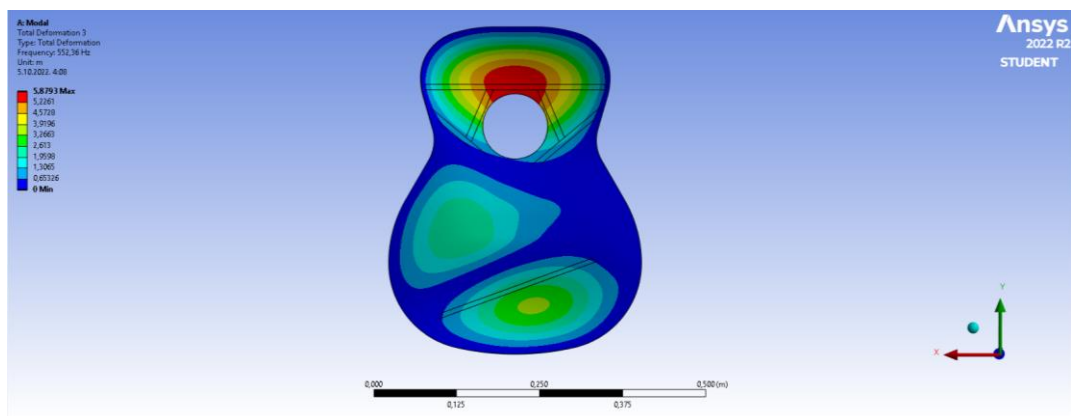
**Slika 47.** Prvi mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije



Slika 48. Drugi mod – klasično izvedena zvučna ploča

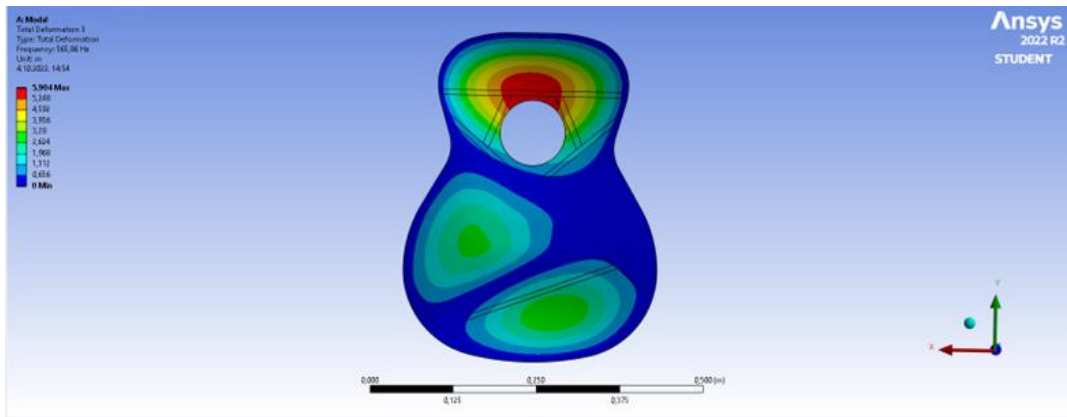


Slika 49. Drugi mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije

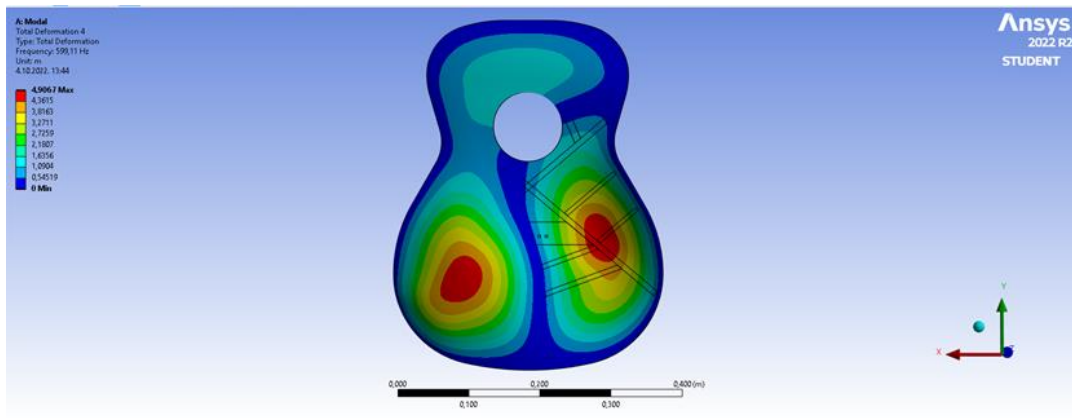


Slika 50. Treći mod – klasično izvedena zvučna ploča

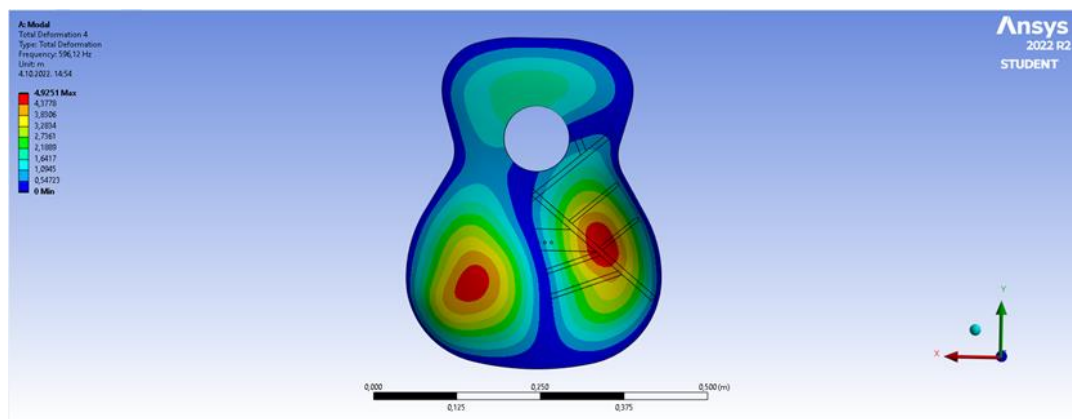




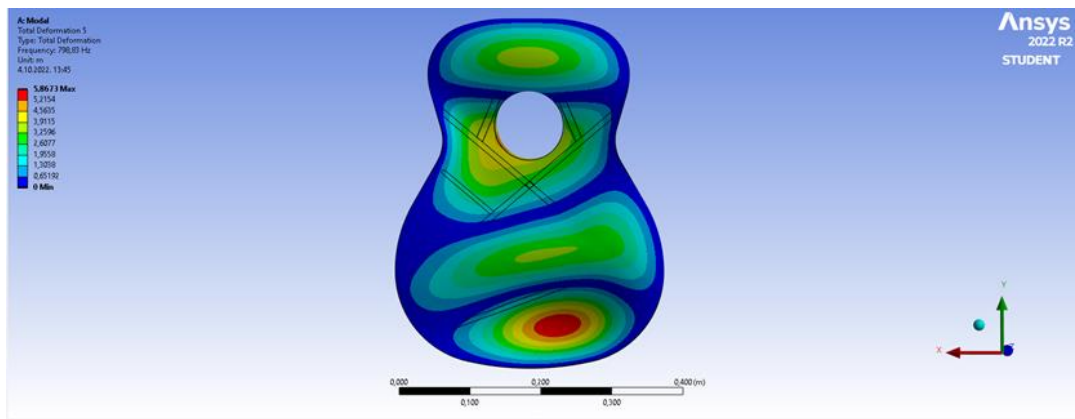
*Slika 51. Treći mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije*



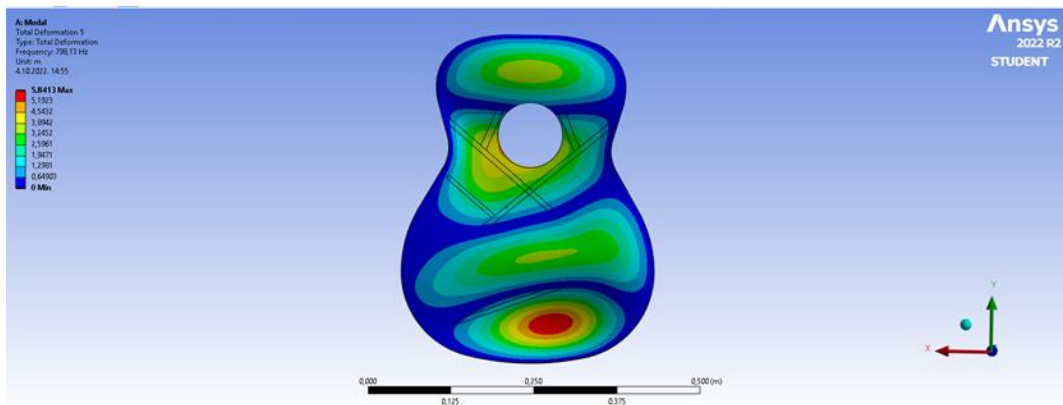
*Slika 52. Četvrti mod – klasično izvedena zvučna ploča*



*Slika 53. Četvrti mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije*



**Slika 54.** Peti mod – klasično izvedena zvučna ploča



**Slika 55.** Peti mod- Zvučna ploča s provrtima u elementima konstrukcije

### Subjektivni doživljaj sviranja i slušanja instrumenta

Po završetku izrade gitare, njena akustična svojstva ocijenjena su od strane 5 akademskih glazbenika. Ispitivanje se provelo sviranjem i slušanjem gitare od strane ispitanika, te je nakon ispitivanja provedeno ispunjavanje anketnog upitnika o akustičnim svojstvima eksperimentalne gitare od strane ispitanika.

Ispitanici su bili ispitani upitima, odnosno ponuđenim odgovorima o akustičnim svojstvima eksperimentalne gitare navedenim u anketnom upitniku u nastavku rada (Ukupni broj odgovora ispitanika, odnosno postotak zastupljenosti pojedinog ponuđenog odgovora naveden je u zagradi pored odgovora. Ukoliko odgovor uopće nije bio zastupljen, kraj njega nema podataka u zagradi).



*Slika 56. Subjektivno ispitivanje instrumenta*

### Anketni upitnik

**Tema:** Utjecaj konstrukcijske modifikacije pri mehaničkoj obradi elemenata akustične gitare na njena akustična svojstva

**Cilj istraživanja:** Utvrđivanje postojanja značajne razlike u akustičnim svojstvima akustične gitare s modifikacijom u konstrukciji zvučne ploče, u odnosu na akustičnu gitaru bez konstrukcijskih modifikacija zvučne ploče.

1. Prilikom sviranja eksperimentalne akustične gitare jeste li primijetili povećani odaziv (engl. response) zvuka u odnosu na istu razinu pobude žice:
  - a. Nimalo
  - b. Možda, ali nisam siguran
  - c. Vrlo malo (1 odgovor; 20%)
  - d. Jesam, razlika je primjetna (4 odgovora; 80%)
  - e. Jesam, odaziv je vrlo velik
  
2. Prilikom sviranja eksperimentalne gitare tehnikom sviranja prstima, jeste li primijetili povećanu glasnoću instrumenta:
  - a. Nimalo
  - b. Možda, ali nisam siguran (1 odgovor, 20%)
  - c. Vrlo malo
  - d. Jesam, primjetna je veća glasnoća instrumenta (4 odgovora, 80%)
  - e. Jesam, instrument je iznimno glasan
  
3. Prilikom sviranja eksperimentalne gitare trzalicom, jeste li primijetili povećanu glasnoću instrumenta:
  - a. Nimalo
  - b. Možda, ali nisam siguran
  - c. Vrlo malo
  - d. Jesam, instrument je vrlo glasan (5 odgovora, 100%)
  - e. Jesam, instrument je iznimno glasan
  
4. Prilikom sviranja eksperimentalne gitare, jeste li primijetili razliku u produženom trajanju odsviranog tona:
  - a. Nimalo
  - b. Možda, ali nisam siguran (1 odgovor, 20%)
  - c. Vrlo malo (3 odgovora; 60%)
  - d. Jesam, ton značajno duže traje (1 odgovor; 20%)
  
5. Prilikom sviranja eksperimentalne gitare, jeste li primijetili poboljšana rezonantna svojstva gitare u odnosu na gitaru sa klasično izvedenom konstrukcijom zvučne ploče:
  - a. Nimalo (1 odgovor; 20%)
  - b. Možda, ali nisam siguran
  - c. Vrlo malo (2 odgovora; 40%)
  - d. Jesam, razlika je značajna (2 odgovora; 40%)

### 5. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom radu, koncentracija je usmjerena uglavnom na „ponašanje“, značaj i konstrukciju zvučne ploče gitare. Uz zvučnu ploču, rad obuhvaća i ostale elemente gitare te obrađuje tematiku i tehnologije njihove izrade, svojstava materijala i njihovu ulogu u akustičnim svojstvima instrumenta.

Ipak, zvučna ploča, kao temeljni i najvažniji element akustične gitare, pokušala se modificirati poprečnim provrtima u elementima ukrute zvučne ploče.

Obavljena ispitivanja, pokazala su naznake mogućeg utjecaja takve obrade zvučne ploče, ponajprije na glasnoću instrumenta, no ispitivanja bi svakako trebalo nastaviti kako bi se ova teza u potpunosti potvrdila.

Jedna od bitnih činjenica dokazana ovim radom jest da provrti u konstrukciji zvučne ploče svakako imaju utjecaja na akustična svojstva zvučne ploče. Uzevši u obzir da su provrti izvedeni na već skalopiranoj ukruti zvučne ploče gdje nije bilo puno prostora za dodatne modifikacije, ovakva metoda otvara prostor uporabi u konstrukciji zvučne ploče umjesto tehnike skalopiranja. Upravo je ovaj dio bitan kod pripreme i obrade elemenata ukrute zvučne ploče CNC strojem. Nije uobičajena praksa obrađivati elemente ukrute CNC tehnologijom, a onda ih lijepiti na zvučnu ploču zbog njihovih profiliranih oblika i nespretnosti lijepljenja. Zato se skalopirane letvice ukrute obično ručno obrađuju nakon lijepljenja na zvučnu ploču, dok su one pravilnih oblika, četverokutnog poprečnog presjeka, te se kasnije skalopiraju.

Stoga, današnjim tehnologijama, moćnim računalnim simulacijama, CAD/CAM programima, te CNC tehnologijom otvaraju se vrata razvoju i unaprjeđenju konstrukcijskih i dizajnerskih elemenata instrumenata kao što je gitara.

Ovaj rad, pokazao je i usporedio rezultate dobivene simulacijom prirodnih modova zvučne ploče gitare. Ono što u radu nije navedeno zbog u sumnje u točnost podataka, su rezultati simulacije cijelog, odnosno sklopljenog tijela gitare. Ova simulacija pokušala se izvesti, napravljeni su modeli tijela gitare, no zbog nedopuštene visoke razlučivosti mreže koju koristi metoda konačnih elemenata, ovi rezultati nisu navedeni u radu, jer razlučivost svakako utječe na konačni rezultat.

### 6. ZAKLJUČAK

Ovim diplomskim radom, pokazali su se odnosi modifikacije konstrukcije zvučne ploče gitare na njena akustična svojstva. Smanjivanjem mase i povećanjem pokretljivosti zvučne ploče bušenjem poprečnih provrta, pokazalo se da ove mehaničke i konstrukcijske izmjene, u određenoj mjeri, stimuliraju akustična svojstva gitare u vidu povećane amplitude titranja zvučne ploče te tako postoje naznake utjecaja na intenzitet glasnoće instrumenta. Također, ovakva izmjena utječe i na modove gitare, odnosno na njihovu prirodnu frekvenciju.

Ono što se ovim radom ne može sa sigurnošću potvrditi su konkretne i precizne kvantitativne razlike između klasično izvedene i modificirane zvučne ploče. Razlog tomu su ograničenja dostupne verzije programa Ansys koja se koristila u ovom radu. Ograničenje se odnosi na nemogućnost programa da simulira modove ortotropnog materijala, te nedostatna rezolucija, odnosno broj točaka mreže koji koristi metoda konačnih elemenata, vjerojatno nije dovoljna da bi točnost simulacije bila visoka.

Ispitivanje subjektivnog doživljaja sviranja gitare, potvrdio je teze koje je pokazala i modalna analiza, no ovo ispitivanje, također ima nedostatak što nisu ispitivane dvije identične gitare u vidu materijala i konstrukcije zbog nemogućnosti pribavljanja originalnog modela Martin OM-28 ili dostojne zamjene već su se razlike temeljile na iskustvu glazbenika i drugim dostupnim modelima akustičnih gitara.

Stoga, ovaj rad ima čvrste temelje za daljnja istraživanja koja bi se trebala obaviti kako bi ovo istraživanje dobilo potpuno jasne i determinirane rezultate, primjerice usporednim mjerenjem dvaju instrumenata ili izrade potpuno numerički determinirane simulacije modova gitare.

## LITERATURA

1. Inta, R., 2022: The acoustics of steel string guitar
2. Kinkead, J., 2004: Build your own acoustic guitar
3. Gualandri, D., Analysis of an Acoustic Guitar  
([https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/Student\\_Projects/Spring13/Dan\\_Gualandri\\_P406\\_Final\\_Project\\_Report\\_Sp13.pdf](https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/Student_Projects/Spring13/Dan_Gualandri_P406_Final_Project_Report_Sp13.pdf), pristupljeno: 15.8.2022.)
4. Nicoletti, G., 2022: Measuring and tuning the performances of the acoustic guitar
5. Ulrike G. K. W., 2006: Wood for sound
6. Jansson, E.V., 1983: Function, construction and quality of the guitar
7. Sandberg, L., 2000: The acoustic guitar guide
8. D'haenens, G., 2017: Braces: regular, parabolic or scalloped?  
(<https://www.dhaenensguitars.com/braces-regular-parabolic-or-scalloped/>)
9. Gedeon G., 2019: Wood as An Engineering Material: Mechanical Properties of Wood
10. Lozano, Ed, 2022: Understanding Acoustic Guitar Bracing Systems  
(<https://guitarspace.org/acoustic-guitars/acoustic-guitar-bracing-systems/>, Pristupljeno: 21.7.2022.)
11. French, M. R., 2009: Engineering the Guitar
12. French, M.R., 2012: Technology of the Guitar