

# Spektralna analiza zvučnog vala violine

---

**Draušnik, Georg**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:116:356775>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**MUZIČKA AKADEMIJA**

VI. ODSJEK

GEORG DRAUŠNIK

**SPEKTRALNA ANALIZA ZVUČNOG VALA  
VIOLINE**

DIPLOMSKI RAD



ZAGREB, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

MUZIČKA AKADEMIJA

VI. ODSJEK

SPEKTRALNA ANALIZA ZVUČNOG VALA  
VIOLINE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: red. prof. art. Vjekoslav Nježić

Student: Georg Draušnik

Akademska godina 2020./2021.

ZAGREB, 2021.

DIPLOMSKI RAD ODOBRILO MENTOR

red. prof. art. Vjekoslav Nježić

---

Potpis

U Zagrebu, 12.10.2020.

Diplomski rad obranjen \_\_\_\_\_ ocjenom \_\_\_\_\_.

POVJERENSTVO:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_

OPASKA:

PAPIRNATA KOPIJA RADA DOSTAVLJENA JE ZA POHRANU KNJIŽNICI MUZIČKE  
AKADEMIJE



## SADRŽAJ:

Sažetak

Summary

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod.....   | 1  |
| 2. Osnovna fizika zvučnih valova .....                   | 2  |
| 2.1 Frekvencija .....                                    | 3  |
| 2.2 Amplituda .....                                      | 4  |
| 2.3 Tonska ovojnica .....                                | 8  |
| 2.4 Harmonijski spektar .....                            | 10 |
| 2.5 Osnovni valni oblici .....                           | 12 |
| 2.6 Fourierova analiza .....                             | 13 |
| 3. Sintetizator .....                                    | 14 |
| 3.1 Suptraktivna sinteza .....                           | 14 |
| 3.2 Aditivna sinteza .....                               | 14 |
| 3.3 FM sinteza .....                                     | 15 |
| 3.4 Granularna sinteza .....                             | 16 |
| 3.5 Sinteza bazirana na uzorku (S & S) .....             | 17 |
| 3.6 Fizičko modeliranje .....                            | 17 |
| 3.7 Ostali tipovi sinteze .....                          | 18 |
| 4. Uzorkovanje (sampling) .....                          | 18 |
| 5. Tajna i analiza starotalijanske gradnje violina ..... | 21 |
| 5.1 Vanjski oblik violine .....                          | 23 |
| 5.2 Zvučnica .....                                       | 27 |
| 5.3 Dno .....  | 30 |
| 5.4 Debljina rezonantnih ploča .....                     | 30 |
| 5.5 Grudi .....  | 33 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.6  | Žljebica .....                                 | 33 |
| 5.7  | Kritički tonovi .....                          | 33 |
| 5.8  | Vučji tonovi .....                             | 34 |
| 5.9  | Oduške .....                                   | 35 |
| 5.10 | Volumen zračnog tijela .....                   | 36 |
| 5.11 | Vlastiti ton zračne komore .....               | 37 |
| 5.12 | Gredica .....                                  | 39 |
| 5.13 | Dušica .....                                   | 40 |
| 5.14 | Kobilica .....                                 | 41 |
| 5.15 | Drvo .....                                     | 43 |
| 5.16 | Stari talijanski lak .....                     | 51 |
| 6.   | Spektralna analiza zvučnog vala violine .....  | 52 |
| 6.1  | Bartolomeo Obici, Verona 1710. ....            | 53 |
| 6.2  | Joseph Ceruti, Mantova 1845. ....              | 55 |
| 6.3  | Joseph Bausch, Weimar 1911. ....               | 57 |
| 6.4  | Frédéric Fantova, Farini 2013. ....            | 59 |
| 6.5  | Gibanje amplitude parcijala kroz vrijeme ..... | 61 |
| 6.6  | Prazne žice .....                              | 64 |
| 6.7  | Sul tasto .....                                | 73 |
| 6.8  | Sul ponticello .....                           | 75 |
| 6.9  | Con sordino .....                              | 78 |
| 6.10 | Pizzicato .....                                | 80 |
| 6.11 | Prirodni oktavni flažoleti .....               | 83 |
| 7.   | Zaključak .....                                | 86 |
| 8.   | Literatura .....                               | 87 |

## Sažetak

Objedinjavanjem znanja o osnovama akustike, odnosno fizike zvuka i akustike rezonantne kutije violine, te spektralnom analizom njenog zvučnog vala doznajemo zašto je njegoova priroda toliko kompleksna da je bilo kakva digitalna rekonstrukcija analogna pravoj prirodi zvuka trenutno gotovo nemoguća.

KLJUČNE RIJEČI: violina, spektralna analiza, fizika zvuka, fizika rezonantne kutije, liuterija, gudački instrumenti

## Summary

By combining knowledge of the basics of acoustics, i.e. sound physics and acoustics of a violin resonant box, with spectral analysis of the violin sound wave we find out why its nature is so complex that any digital reconstruction analogous to the true nature of sound is currently almost impossible.

KEY WORDS: violin, spectral analysis, sound physics, resonant box physics, lutherie, bowed string instruments

# 1. Uvod

Razvojem tehnologije glazbena industrija suočava se sa sve većom ponudom i potražnjom raznih audio efekata, sintetizatora i digitalnih inačica klasičnih i tradicionalnih instrumenata kao jeftinijoj i praktičnijoj alternativni akustičnim instrumentima i živim izvođačima. VST (*Virtual Studio Technology*) dominira industrijom elektroničke i filmske glazbe te glazbe općenito, što razvojne programere virtualnih instrumenata i digitalnih efekata tjera na razvitak novih, boljih i pouzdanijih softvera. Oni će svojim korisnicima uvelike olakšati posao, poput kompozitora filmske glazbe koji nisu ograničeni samo budžetom, već i vremenom, a filmskoj producerskoj kući uštediti zaista velike količine novaca tako što ih neće nužno morati trošiti na najam orkestra i/ili solista. Unatoč velikom tehnološkom napretku i naporu razvojnih programera, još uvijek nijedan sintetizator ili *sampler* ne može konkurirati prirodi pravog instrumenta i izvedbi živog izvođača. Kompleksnost zvučnog vala raznih instrumenata varira, stoga nisu sve skupine instrumenata jednako zahtjevne za digitalnu rekonstrukciju njihovog zvučnog vala. Primjerice, udaraljke generalno imaju vrlo jednostavan oblik zvučnog vala kratkog trajanja, što ih čini pogodnima za razne realne oblike sinteze zvučnog vala, dok je s druge strane zvučni val gudačkih instrumenata dovoljno kompleksan da realna rekonstrukcija zvučnog vala u sintetizatoru još uvijek nije moguća. Sinteza zvučnog vala te njezina alternativa, uzorkovanje (*sampling*), delikatni su postupci kreacije odnosno adaptacije i oblikovanja željenog zvučnog vala manje poznati izvan svijeta elektroničke kompozicije i dizajna zvuka. Povijesnim pregledom i analizom starotalijanske tajne gradnje i akustike rezonantne kutije violine upoznajemo se s bazičnim fizikalnim komponentama tog gudačkog instrumenta za bolje i lakše razumijevanje problematike opisane u ovom diplomskom radu. Spektralnom analizom raznih violina doznajemo zašto i na koji način zvučni val gudačkih instrumenata ima nepredvidivo kretanje kroz vrijeme i frekvencijski spektar te koji parametri utječu na njegovu manifestaciju u prostoru i mehaničku prirodnost koju perceptivno vežemo uz isti. Uvidom u akustičku anatomiju instrumenta i njegove radne procese odgovaramo na pitanje zašto je realna rekonstrukcija zvučnog vala u sintetizatoru budućnost koja tek očekuje svijet glazbe i tehnologije te navodimo nedostatke uzorkovanja, koje je u toj domeni trenutačno ipak bolje pozicionirano.

## 2. Osnovna fizika zvučnih valova

Glazba svoj status umjetnosti zasniva na oblikovanju zvuka koji nastoji proizvesti logičnu cjelinu čiji se osnovni elementi poput melodije, harmonije, ritma, tempa, dinamike i boje mijenjaju u vremenu. Te promjene u zvuku možemo opisati akustičnim, objektivnim parametrima (fizička svojstva) i njihovim perceptivnim, subjektivnim ekvivalentima (na kakav način ih doživljavamo).

**Tablica 2.a Usporedba objektivnih i subjektivnih svojstava zvuka (Karača, 2013)**

| Akustička svojstva  | Opažajna svojstva   |
|---------------------|---------------------|
| Frekvencija         | Visina tona         |
| Amplituda           | Jačina zvuka        |
| Ovojnica (oblik)    | Artikulacija        |
| Harmonijski spektar | Boja zvuka (timbar) |

Premda se glazbenici pri opisivanju nekog tona služe njegovim psihološkim određenjem, u upotrebi elektroničkih instrumenata potrebno je poznavati fizikalno određenje zvuka. Tako umjesto visine tona govorimo o njegovoj frekvenciji, umjesto glasnoće o decibelima, a vidjet ćemo da boju tona (*timbar*) određuje njegov alikvotni niz.

No, krenimo *da capo*. Što je to uopće zvuk? Laički rečeno, zvuk je mehanički val koji nastaje promjenom zvučnog tlaka zraka. Ipak, za određenje zvuka potrebna su tri elementa: 1. izvor vibracije, 2. medij kojim se vibracija prenosi i 3. primatelj vibracije. Kada se, na primjer, trzne žica instrumenta [violine u slučaju ovog istraživanja], žica postaje izvor vibracije. Ta promjena zvučnog tlaka zraka, odnosno valno kretanje započeto vibriranjem žice, nastavlja se prenositi i širiti zrakom sve dok ne dospije do slušatelja u kojeg će izazvati osjet zvuka (Tanodi, 1997).

Jambrošić (2017) tumači osnove nužne za razumijevanje ponašanja zvuka kazavši kako su zvučni valovi longitudinalni valovi koji se šire elastičnim medijem poput plina ili tekućine određenom brzinom specifičnom za taj medij. U zraku je brzina stalna i ona na sobnoj temperaturi od 20 °C iznosi približno 343 m/s (relevantan faktor pri izračunu brzine zvuka je i razina vlage), dok se u vodi zvučni val kreće približnom brzinom od 1.481 m/s. Karača (2013) navodi kako u čvrstim tijelima valovi mogu biti i transverzalni - čestice medija ovdje mogu titrati i okomito na pravac širenja vala, tako

recimo kroz željezo čestice titraju brzinom od oko 5.120 m/s dok se kroz vrlo guste i krute materijale poput dijamanta zvučni val širi brzinom od 12.000 m/s. To ponašanje prate promjene tlaka, gustoće i temperature. Ono što čujemo je zvučni tlak, odnosno razlika između trenutne vrijednosti ukupnog tlaka i statičkog tlaka, a trenutna promjena tlaka koju percipiramo iznosi između 0,00002 (20  $\mu$ Pa) i 100 Pa. Također, zvuk se ne može širiti kroz vakuum.

Jambrošić (2017) pojašnjava kako je valna duljina udaljenost između dvije točke u valu s istom fazom u nekom vremenskom trenutku, a s obzirom na to da je brzina zvuka u zraku stalna, valna duljina zvučnog vala ovisi samo o frekvenciji kojom zvučni izvor pobuđuje zrak. Shodno tome možemo reći kako su zvučni valovi harmoničko, odnosno kružno promjenjivo gibanje zvučne energije koje se manifestira zgušnjavanjem i razrjeđivanjem molekula zraka, a pri tome valovi prenose energiju bez prijenosa materije.

## 2.1 Frekvencija

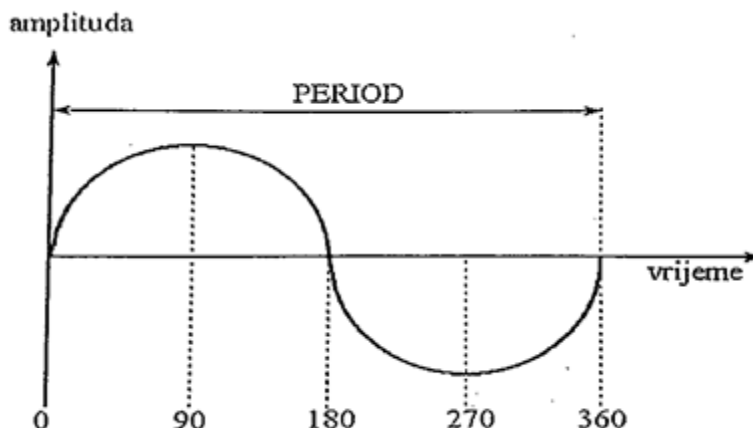
Frekvencija je fizikalna veličina kojom se izražava broj titraja u određenom vremenskom intervalu. Za određivanje frekvencije događanja, broj događaja koji promatramo u određenom vremenskom intervalu se podijeli s trajanjem tog vremenskog intervala. U Međunarodnom sustavu jedinica (SI), rezultat se mjeri jedinicom Hertz (Hz), nazvanom po njemačkom fizičaru Heinrichu Rudolfu Hertzu. Tako 1 Hz predstavlja jedan titraj u sekundi.

Kad se radi o zvučnom valu, frekvencija je ta koja karakterizira visinu tona. Frekvencija standardnog tona **A** iznad srednjeg **C** koja se definira kao 440 Hz tj. 440 titraja u sekundi, poznata je kao „koncertni ton”<sup>1</sup> na koji se orkestar obično ugađa. Ljudsko uho osjetljivo je na frekvencije od 20 do 20.000 Hertza, iako visoke frekvencije postaju sve manje čujne kako ljudi odrastaju (Karača, 2013).

---

<sup>1</sup> Koncertni ili komorni ton je u europskoj glazbenoj literaturi ton frekvencije 440 Hz i poznat je kao **A<sub>4</sub>**, dok je u znanstvenoj literaturi, tj. prema MIDI protokolu poznat kao **A<sub>4</sub>**. Vrijednost od 440 Hz pri temperaturi od 20 °C dogovorena je na međunarodnoj razini 1955. od strane organizacije koja se bavi standardizacijom vrijednosti (ISO – International Organization for Standardization).

**Slika 2.1.a Period zvučnog vala (Tanodi, 1997)**



Tanodi (1999) uz to navodi kako je gornja granica koju većina ljudi čuje oko 16.000 Hz (16 kHz) dok se kod starijih osoba ona spušta na 12 kHz. „Zvuk koji je viši od ljudskog čujnog spektra zove se ultrazvuk, a niži infrazvuk. Međutim, tonovi iznad 16 kHz koje ljudsko uho teško registrira, važni su jer kao dijelovi alikvotnih nizova daju specifičnu kvalitetu zvuku kojeg čujemo“ (Tanodi, 1997). Posljednja rečenica iznimno je važna tvrdnja za ovo istraživanje, koju ćemo istim nastojati i potkrijepiti.

## 2.2 Amplituda

Amplituda je u fizici najveći otklon od srednje vrijednosti veličine kojom se opisuje val ili titranje. Kad se zvučna amplituda povećava, mi je čujemo kao pojačavanje zvuka; kad se ona smanjuje, kažemo da se zvuk stišava. Vrijednost amplitude u akustici obično izražavamo skalom decibela (dB), što je način da izrazimo odnos između dvije vrijednosti zvučnog signala, bez obaveze da navodimo njihove prave vrijednosti ili razine. U radu sa zvukom najčešće baratamo ogromnim rasponom brojevnih vrijednosti. Odnos najslabijeg signala koji dolazi u mikrofoni i najjačeg signala na izlazu iz velikog razglasa, može pokrivati raspon mjeren od 1:1.000.000 ili više! U decibelima taj raspon iznosi nekih 150 dB, što je broj koji je mnogo lakše razumjeti i samim tim rad u muzičkom studiju se znatno pojednostavljuje. Iz ovog razloga, decibelske skale nisu linearne, već logaritamske (Karača, 2013).

Referentna vrijednost zvučnog tlaka iznosi već spomenutih 20  $\mu\text{Pa}$ , a to je minimalna vrijednost tlaka zvuka frekvencije 1000 Hz koju čovjekov sluh može

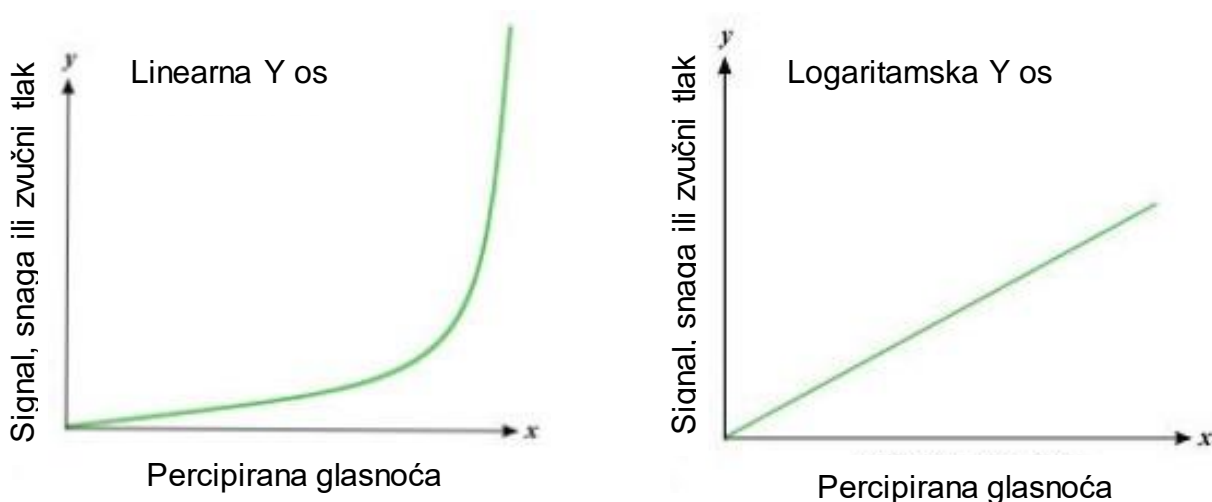
percipirati (prag čujnosti). To je također i polazna vrijednost SPL (Sound Pressure Level) skale, jedne od popularnijih skala zvučnog tlaka u kojoj ona iznosi 0 dB. Skala se prostire do već spomenute vrijednosti od 150 dB, pritom je iznos od 130 dB tzv. „prag boli“.

**Tablica 2.2.a Odnosi linearnih vrijednosti zvučnog tlaka i razina tlaka (Jambrošić, 2017)**

| Podražaj                    | SPL skala | Razina tlaka |
|-----------------------------|-----------|--------------|
| Prag čujnosti               | 0 dB      | 0,00002 Pa   |
| Šuštavo lišće               | 20 dB     | 0,0002 Pa    |
| Govor                       | 60 dB     | 0,02 Pa      |
| Ulična buka                 | 80 dB     | 0,2 Pa       |
| Kosilica za travu           | 100 dB    | 2 Pa         |
| Grmljavina                  | 120 dB    | 20 Pa        |
| Prag boli                   | 130 dB    | 63,25 Pa     |
| Zvuk aviona pri polijetanju | 140 dB    | 200 Pa       |

Karača (2013), prema Mikiću (2005), objašnjava kako se logaritamska funkcija povećava eksponencijalno, na sličan način kako funkcioniraju i naše uši kada je u pitanju utisak glasnoće zvuka. Tako rezultati prilikom korištenja decibelskih skala postaju jasni i praktični.

**Slika 2.2.a Logaritamska funkcija (Acousti Products, n.d.)**











Jambrošić (2017) pojašnjava matematičkom formulom kako izračunati neku veličinu u dB:

$$L = 10 \times \log \frac{\text{tlak } (p), \text{intenzitet } (I), \text{snaga } (W)}{\text{referentna vrijednost tlaka } (p_0), \text{intenziteta } (I_0) \text{ ili snage } (W_0)}$$

gdje je  $L$  (level) razina neke veličine u decibelima.

**Tablica 2.2.b Promjena slušnog dojma jačine zvuka u ovisnosti o broju izvora i odgovarajućoj promjeni zvučnog tlaka u dB (Jambrošić, 2017)**

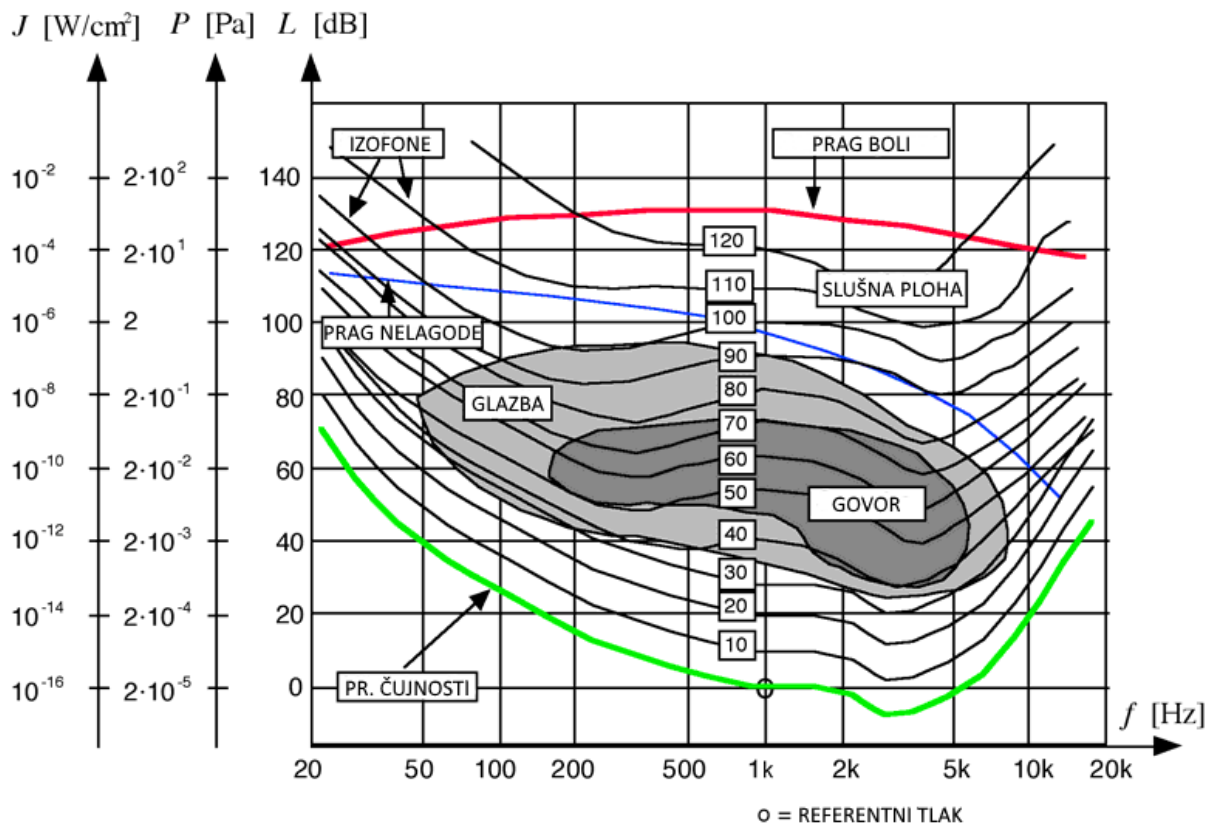
| Slušni dojam     | Porast razine | Broj istih izvora zvuka   |
|------------------|---------------|---|
| 4x glasnije      | + 20 dB       |  x100  |
| 2x glasnije      | + 10 dB       |  x10  |
| osjetno glasnije | + 6 dB        |  x4    |
| čujno glasnije   | + 3 dB        |  x2    |
| jedva glasnije   | + 1 dB        |  x1,25 |
|                  |               |  x1    |

Kao što se visina tona odnosi prema frekvenciji, tako je i glasnoća psihološko određenje jakosti. No glasnoću, uz jakost, određuje i frekvencija. Naime, primijećeno je da ljudsko uho čuje frekvencije od oko 3.000 Hz za 10 dB jače od ostalih. Ako je uho izloženo istoj jačini dulje vrijeme, stvorit će se privid stišavanja i udaljavanja zvuka. Isto tako na subjektivni doživljaj glasnoće nekog zvuka utječe i istovremena prisutnost drugih zvukova. (...) Većina zvukova koje čujemo u glazbi imaju jačinu između 30 i 80

dB. Treba znati da decibeli nisu apsolutna mjera i to da nisu mjera glasnoće, već jačine zvuka (Tanodi, 1997).

Nadalje, ovisnost slušnog osjeta o frekvenciji zvuka i razini zvučnog tlaka Jambrošić (2017) oslikava grafom, tzv. slušnom plohom.

**Slika 2.2.b Slušna ploha (Jambrošić, 2017)**



„Slušna ploha omeđena je s donje strane pragom čujnosti, odnosno krivuljom koja pokazuje najmanju razinu tlaka zvuka koju prosječna zdrava osoba čuje; ta je krivulja individualna i vrlo nelinearna, a s gornje je strane omeđena pragom boli, odnosno razinom tlaka zvuka koji izaziva bol kod slušatelja; ta je krivulja puno linearnija od praga čujnosti“ (Jambrošić, 2017).

Violina je jedan od instrumenata s najvećim dinamičkim rasponom. Iako dinamika uvelike ovisi o artikulaciji, prosječno praktično dinamičko područje violine iznosi od 30 do 35 dB. Razina zvučne snage violine kod *pp* iznosi minimalno 58 dB, a kod *ff* maksimalno 99 dB ovisno o kvaliteti i mogućnostima samog instrumenta, ali i izvođača.

## 2.3 Tonska ovojnica

Treća fizička odrednica karakteristike zvuka jest tonska ovojnica ili naprosto oblik zvučnog vala koji opisuje promjenu amplitude kroz određeno vrijeme. Karača (2013) navodi kako svaki instrument, pa tako i violina, ima karakterističnu ovojnicu koja se obično opisuje nizom točaka od početka zvuka do njegovog gašenja. Najjednostavnija i najtipičnija ovojnica ima četiri parametra: udar (*attack*), stišavanje (*decay*), zadržavanje (*sustain*) i otpust (*release*) i po prvim slovima engleskih riječi naziva se ADSR. Ona se gotovo uvijek koristi za generiranje zvukova na sintetizatorima jer, kako Jambrošić (2017) tvrdi, komercijalni analogni sintetizatori su definirali amplitudne ovojnice.

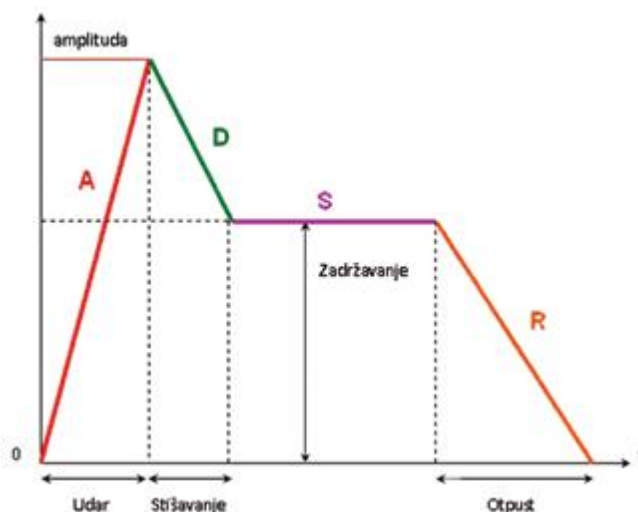
Udar (*attack*) je vrijeme kroz koje početni intenzitet raste od nule do svoje maksimalne vrijednosti.

Stišavanje (*decay*) je vrijeme pada početnog intenziteta sa svoje maksimalne vrijednosti na razinu zadržavanja.

Zadržavanje (*sustain*) je razina na kojoj će se ton zadržati dok je pritisnuta tipka sintetizatora sve do trenutka otpuštanja tipke.

Otpust (*release*) je vrijeme u kojem vrijednost ovojnice pada s razine zadržavanja na nulu prilikom otpuštanja tipke.

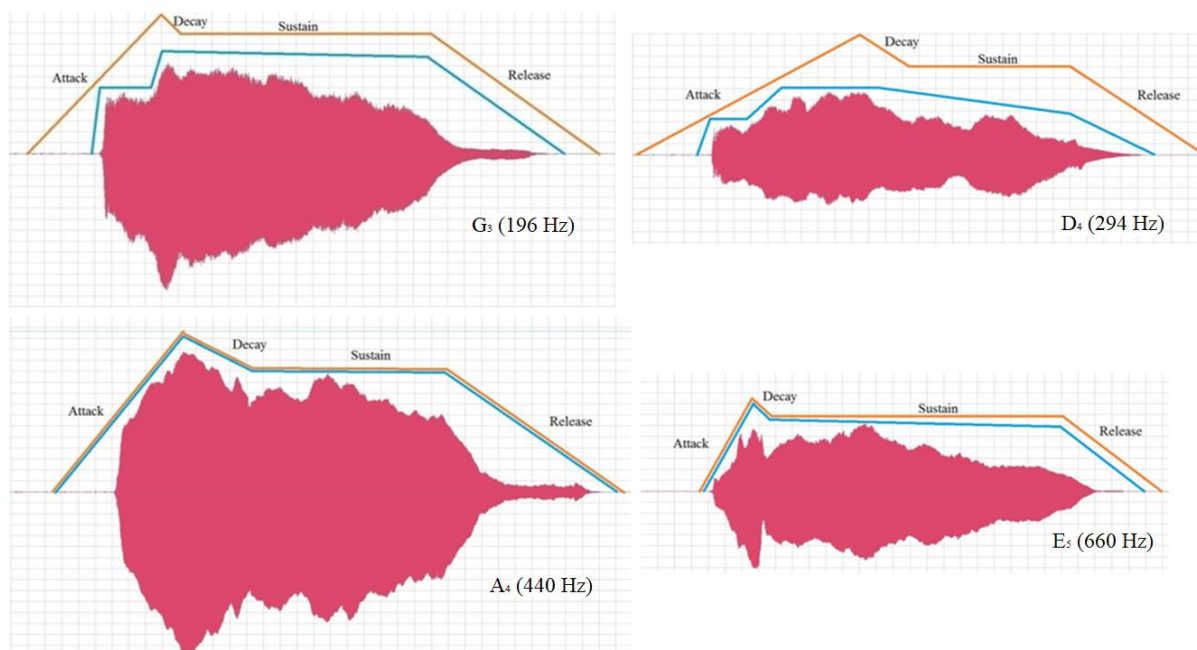
**Slika 2.3.a ADSR tonska ovojnica (Karača, 2013)**



Kompleksniji zvukovi poput zvukova akustičnih instrumenata mogu se i moraju opisati s više točaka kako bi prikaz tonske ovojnice bio precizan i realan. Tanodi (1997) govori kako se tonske ovojnice akustičkih instrumenata općenito razlikuju po tome

zadržava li ton tokom svojeg nastupa istu jačinu ili se nakon nastupa postupno stišava. U prezentiranoj tonskoj ovojnici zadržavanje (*sustain*) određuje jačinu tona za vrijeme njegova trajanja. Ako je razina zadržavanja (*sustain*) maksimalna, stišavanje (*decay*) neće djelovati, a na taj se način dobiva tonska ovojnica orgulja. Kod emulacije gudačkih ili puhačkih instrumenata razina zadržavanja (*sustain*) će biti nešto niža od maksimalne tj. razine stišavanja (*decay*) jer je pomoću udara (*attack*) i stišavanja (*decay*) potrebno oblikovati početak tona karakterističan za te instrumente. Kod emulacije instrumenata čiji se ton tokom trajanja stišava (npr. udaraljke) zadržavanje (*sustain*) se ne upotrebljava, već se pomoću stišavanja (*decay*) određuje brzina kojom se ton stišava. Zbog prirode gudačkih i puhačkih instrumenata tj. mogućnosti dugog zadržavanja (*sustain*) tona, tonske ovojnice najčešće poprimaju oblik trapezoida iako oblik ovojnice uvelike ovisi o artikulaciji što dovodi do zaključka kako sve moguće oblike tonske ovojnice određenog instrumenta percipiramo kao artikulaciju, premda Karača (2013) navodi kako ih djelomično percipiramo i kao boju tona (timbar) iz razloga što se zvučne boje često prepoznaju izuzetno brzo, već nakon inicijalne faze udara (*attack*).

**Slika 2.3.b Tonska ovojnica praznih žica Bernardinijeve violine iz 2006.  
(Leccese, 2018)**



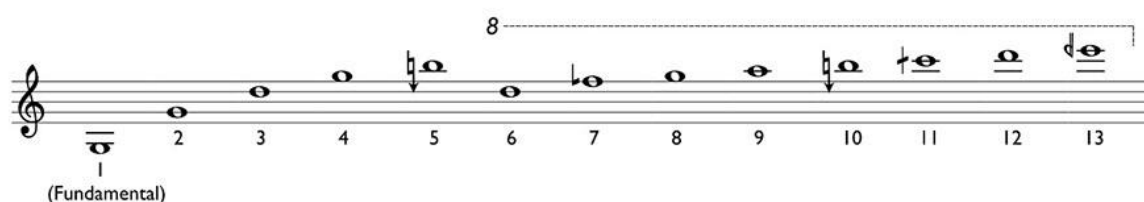
Potencijalne promjene u frekvencijskim odnosima nastale radi stišavanja tona prikazuju se **spektralnom ovojnicom**.

## 2.4 Harmonijski spektar

Posljednji, četvrti, parametar razjašnjava doživljaj boje zvuka, odnosno timbra. „Dok ovojnice pokazuju promjenu amplitude u vremenu, harmonijski spektar pokazuje red frekventnih amplituda u bilo kojem trenutku u vremenu. Ovaj je red poznat kao red (niz) alikvotnih tonova ili harmonika. Alikvotni tonovi su suzvučni tonovi koji se čuju prilikom sviranja nekog 'temeljnog tona'. Pritom se temeljni ton naziva i 'prvim harmonikom', prvi alikvotni ton 'drugim harmonikom' itd.“ (Karača, 2013).

Jambrošić (2017) navodi kako je kod kompleksnih (složenih) tonova, čiji se spektar sastoji od više frekvencijskih komponenti, visina tona određena frekvencijom osnovnog tj. prvog harmonika.

**Slika 2.4.a Alikvotni niz prazne G žice na violini (Modney, n.d.)**



Sinusni ton je siromašan u boji i rijedak u našem okruženju. Zvukovi su većinom kompleksni, odnosno složeni, što znači da sadrže više različitih frekvencijskih komponenti. Za sve one pridjeve, kojima neki ton opisujemo kao zaobljen, oštar, metalan ili baršunast, krive su frekvencijske komponente. Jedan od najčudnijih aspekata percepcije boje zvuka jest da valni oblik koji sadrži mnoge frekvencije možemo čuti kao jedan ton određene visine, a da se spektralni balans harmonika stapa zajedno u jedan doživljaj – osjećaj boje zvuka. Frekvencijske komponente zvuka mogu se općenito podijeliti u dvije grupe: harmoničke i neharmoničke. Ako zvuk sadrži frekvencije koje su višekratnici osnovne (fundamentalne) frekvencije, tada govorimo o zvuku složenom od **harmoničkih parcijala** (npr.  $440 \times 1$ ,  $440 \times 2$ ,  $440 \times 3$  itd.). **Svaki harmonički parcijal složenog zvuka je sinusni ton.** Tonovi iznad osnovnog zovu se overtonovi ili alikvoti, a svi zajedno tvore harmonički ili alikvotni niz. Broj nekog alikvota uvijek je za jedan manji od broja harmoničkog parcijala, tj. prvi alikvot je drugi parcijal, itd. Iako su frekvencijski odnosi između svakog idućeg para alikvota isti, glazbeni intervali između susjednih alikvota postaju manji kako se niz penje. Frekvencijske komponente nekog zvuka koje nisu višekratnici osnovne frekvencije zovemo

neharmonički parcijali. Ne moraju svi alikvoti biti prisutni u svakom zvuku. Naprotiv, upravo prisutnost jednih, a izostanak drugih daje prepoznatljivost pojedinom zvuku. Uz alikvotni niz, koji je najvažniji za određenje boje tona, za prepoznavanje nekog instrumenta vrlo je važan početni dio zvuka. Kada bi na magnetofonskoj vrpici snimljenom tonu glasovira odrezali njegov početak, teško bi bilo odrediti o kojem je glazbalu riječ. Elementi zvuka, harmonički ili neharmonički, koji su prisutni vrlo kratko vrijeme, često samo prilikom njegova početka, zovu se **tranzijenti** (Tanodi, 1997).

Karača (2013) pojašnjava iz druge perspektive upućujući na još jedan fizikalni aspekt koji svojim zakonitostima tvrdi kako se zvukovi muzičkih, akustičkih, instrumenata obično sastoje od jednog temeljnog tona i njemu pridruženog, dodatnog skupa harmonika koji se mogu smatrati **superpozicijom** sinusnih valova fundamentalne frekvencije i sinusnih valova čije se frekvencije prema temeljnom tonu odnose kao 1:2:3:4:5:6 itd.

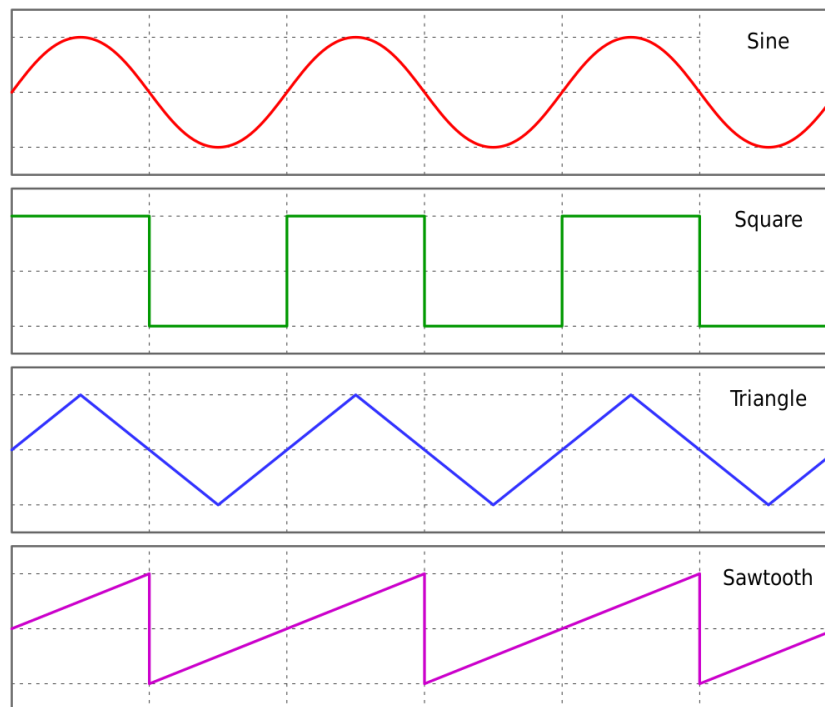
Određeni instrumenti, prvenstveno žičani, nude mogućnost izolacije alikvota, odnosno njihove izolirane reprodukcije skraćivanjem žice pritiskom prsta za njenu polovinu, trećinu, četvrtinu itd., što se u glazbenoj praksi naziva prirodni flažolet (fr. flageolet). Skraćivanje žice na bilo kojem mjestu jednim prstom tj. umjetno određivanje fundamentalnog tona i lagano dodirivanje iste žice drugim prstom razmakom udaljenim od prvog prsta za čistu kvartu ili čistu kvintu, rezultira nastankom umjetnog flažoleta.

Fizikalni fenomen odnosa harmonika prema svojem vlastitom temeljnom tonu, odnosno fundamentalnoj frekvenciji, je u tome što ako u složenom tonu osnovni harmonik nedostaje, ton će se i dalje percipirati kao da ima istu visinu, ali će biti izmijenjene boje odnosno timbra. S druge strane zanimljiv je još jedan, percepcijski subjektivan, fenomen koji kombiniranjem dvaju složenih tonova rezultira trećim, koji nastaje kao zbroj ili razlika ta dva različita tona. Najčešći oblik ove subjektivne auditivne komponente je manifestacija kroz razliku dva kombinirana tona. U znanstvenoj literaturi treći, novonastali, ton poznat je kao kombinacijski ili subjektivni ton, međutim, u svijetu glazbe definiran je kao Tartinijev ton.

Giuseppe Tartini (1692. – 1770.) bio je talijanski skladatelj i violinist kojem se pripisuje otkriće ovog psihoakustičkog fenomena, na koji se sam Tartini referirao kao odlično sredstvo za ispravljanje netočne intonacije dvohvata.

## 2.5 Osnovni valni oblici

Slika 2.5.a Osnovni valni oblici (Oleh, 2016)



Najosnovniji i najjednostavniji zvučni valni oblik je sinusoida tj. sinusni zvučni val, koji je ujedno i najzanimljiviji iz nekoliko razloga. On se sastoji isključivo od svoje osnovne tj. fundamentalne frekvencije, što znači da ne sadrži nijedan alikvotni ton. On također može služiti kao građevni materijal za opis i izgradnju bilo kojeg oblika zvučnog vala uključujući i kvadratni (*square*) oblik, što otkriva Fourier 1822. Unatoč njegovoj iznimnoj važnosti i korisnosti sinusni ton se ne nalazi, odnosno ne postoji u prirodi, već se isključivo sintetizira u sintetizatoru.

Drugi jednostavni, osnovni, valni oblik, koji također postoji isključivo ako je umjetno sintetiziran, je već spomenuti kvadratni (*square*) valni oblik. Specifičan je po alikvotnom sadržaju tako što sadrži neparne, odnosno tek svaki drugi alikvot tj. harmonički parcijal. Zanimljiv je i njegov recipročan odnos amplitude alikvota i njihovog broja: što je alikvot viši, amplituda je manja.

Isti amplitudni odnos alikvota ima i nazubljeni tj. pilasti (*sawtooth*) valni oblik, treći osnovni valni oblik, s time da on sadrži sve alikvotne tonove. Neki ga smatraju ekstremnim slučajem asimetričnog trokutastog valnog oblika.

Trokutasti (*triangle*), četvrti osnovni valni oblik, kao i kvadratni, sadrži samo neparne harmonike, s time da se najviši harmonički parcijali stišavaju puno brže nego najviši harmonici kvadratnog valnog oblika.

Pulsni, peti osnovni valni oblik, asimetrična varijanta kvadratnog valnog oblika, specifičan je po tome što njegov harmonijski spektar ovisi o ciklusu pulsacije. U slučaju kada je puls kratak, odnosno kada je valni oblik uzak, on sadrži sve alikvotne iste amplitude. Širenjem pulsa mijenja se i sastav alikvotnih tonova sve dok ne dostigne širinu od 180 stupnjeva, kada je identičan kvadratnom valu.

## 2.6 Fourierova analiza

Fourierova transformacija je razgradnja funkcije na sinusoide različitih frekvencija; u slučaju Fourierovog niza ili diskretne Fourierove transformacije, sinusoide su harmonici temeljne frekvencije funkcije koja se analizira. Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768. – 1830.) bio je francuski matematičar i fizičar kojem ovaj moćan alat duguje svoji mehanizam djelovanja. Karača (2013) gomilu informacija i matematičkih operacija svodi na najbitnije za ovo istraživanje objasnivši kako je Fourier u svojim radovima dokazao kako se bilo koja kontinuirana funkcija može prikazati kao beskonačni zbroj sinusnih valova. Nadalje pojašnjava kako je taj rezultat imao kolosalne posljedice u matematičkom kontekstu pri razmatranju funkcija, ali i na fizikalnu pozadinu reprodukcije i sinteze zvuka.

Proces spektralne analize, što je i tema ovog diplomskog rada, odnosno rastavljanje zvuka instrumenta, u ovom slučaju violine, na njegove osnovne komponente odnosno sinusne zvučne valove naziva se Fourierova analiza. „Naime, pokazalo se da je za sintetiziranje nekog zvuka najprikladniji način da se taj (ili sličan) zvuk prvo analizira, a iz dobivenih podataka o parcijalnim tonovima možemo isti taj zvuk ili reproducirati ili transformirati. Mnoge spektralne analize osnivaju se na tehnici Fourierove analize sastavnih frekvencija. Zvuk se propušta kroz niz filtera uskog područja, a izlaz filtera se mjeri određujući amplitudu i fazu frekvencija prisutnih u spektru“ (Tanodi, 1997).



### 3. Sintetizator

Sintetizator je instrument koji zvuk proizvodi elektroničkim putem, a mnoge ili sve zvučne parametre korisnik može mijenjati. On kao i *sampler* može biti digitalni i analogni, a njegova glavna značajka je sinteza zvuka tj. njegovo slobodno, proizvoljno modeliranje. Vješti dizajneri zvuka, osim hipotetske kreacije beskonačno mnogo sintetskih zvukova, u sintetizatorima mogu rekonstruirati apsolutno bilo koji zvučni val koji se može čuti u prirodi ili urbanim sredinama. Bez obzira na to je li izvor zvuka čovjek, životinja, priroda općenito ili pak s druge strane neki mehanički izvor zvuka poput motornog vozila, ventilatora itd., on se u sintetizatoru može rekonstruirati s velikom, ako ne i apsolutnom točnošću. Zadatak koji prethodi sintezi željenog zvučnog vala je odabir metode ili metoda sinteze zvuka, kojih ima mnogo, a svaka ima svoj kriterij uporabe. U ovome radu će se koncizno obraditi najbitniji tipovi sinteza za ovo istraživanje.

#### 3.1 Suptraktivna sinteza

Suptraktivna sinteza najjednostavniji je oblik sinteze zvuka u kojemu se zvuk modelira uklanjanjem harmoničkog sadržaja iz njegovog frekvencijskog spektra. To se postiže filtrom ugrađenim u sintetizator koji ima minimalno 3 promjenjiva parametra: 1. cutoff frekvencija, 2. rezonancija i 3. jačina.

#### 3.2 Aditivna sinteza

Aditivna sinteza najstariji je oblik sinteze zvuka koji zbrajanjem jednostavnih zvučnih valova rezultira složenijim signalom. Ona funkcionira na način da se zvuk kreira dodavanjem harmonika, odnosno dodavanjem novih jednostavnih zvučnih valova u postojeći zbroj koji se ponašaju kao harmonici osnovnog, fundamentalnog tona. „Dodavanjem raznih parcijala stvaramo složeni, ali fiksirani, nepomični valni oblik koji se ne mijenja za vrijeme trajanja note. Mnogo interesantnije sintetičke boje, kao i vjernije imitacije tradicionalnih instrumenata, postižu se mijenjanjem miksture sinusnih valova u tijeku vremena“ (Tanodi, 1997). Broj oscilatora koji sudjeluje u sintezi hipotetski nije ograničen, međutim, svaki sintetizator ipak ima svoje određene kapacitete.

### 3.3 FM sinteza

Frekvencijska modulacija je forma u kojoj jedan signal modulira tj. djeluje na drugi signal, što rezultira nastajanjem kompleksnih valnih oblika. Kao što Jambrošić (2017) napominje, FM sinteza je vrlo efikasna za softversku implementaciju jer zahtijeva samo dvije operacije množenja, jedno zbrajanje te dva potraživanja u valnoj tablici, što znači da ju je puno lakše izvesti upotrebom digitalnog sklopovlja. Upravo zato je ona i sinonim za digitalnu sintezu zvučnih valova. Za lakše razumijevanje FM sinteze nužno je prethodno opisati jednostavnije RM (ring modulacija) i AM (amplitudna modulacija) sinteze zvuka.

RM sinteza zvuka je ona u kojoj kao rezultat djelovanja jedne frekvencije (modulacijski signal) na drugu (frekvencija nosioca) dobijemo dvije frekvencije, njihov zbroj i razliku.

**Tablica 3.3.a RM sinteza zvuka**

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| Frekvencija nosioca         | 440 Hz    |
| Modulacijska frekvencija    | +/-100 Hz |
| Rezultirajuća frekvencija 1 | 340 Hz    |
| Rezultirajuća frekvencija 2 | 540 Hz    |

AM sinteza zvuka funkcionira isto kao i RM sinteza, međutim, uz dvije frekvencije, njihov zbroj i razliku, prisutna je i treća, osnovna frekvencija.

**Tablica 3.3.b AM sinteza zvuka**

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| Frekvencija nosioca         | 440 Hz     |
| Modulacijska frekvencija    | +/- 100 Hz |
| Rezultirajuća frekvencija 1 | 340 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 2 | 440 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 3 | 540 Hz     |

FM sinteza ima jednak radni proces kao već spomenute modulacije zvuka, ali prilikom frekvencijske modulacije prisutan je cijeli niz rezultirajućih frekvencija. Tanodi (1997) dodaje da, ukoliko je odnos osnovne (noseće) i modulacijske frekvencije jednak odnosu cijelih brojeva (npr.  $440 \text{ Hz} \div 110 \text{ Hz} = 4 : 1$ ), rezultirajuće frekvencije su harmonički parcijali. U suprotnom (npr.  $440 \text{ Hz} \div 120 \text{ Hz} = 4 : 1.1$ ) rezultirajući spektar čine neharmonički parcijali.

**Tablica 3.3.c FM sinteza zvuka**

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| Frekvencija nosioca         | 440 Hz     |
| Modulacijska frekvencija    | +/- 100 Hz |
| Rezultirajuća frekvencija 1 | 40 Hz      |
| Rezultirajuća frekvencija 2 | 140 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 3 | 240 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 4 | 340 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 5 | 440 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 6 | 540 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 7 | 640 Hz     |
| Rezultirajuća frekvencija 8 | 740 Hz     |
|                             | ...        |
| Rezultirajuće frekvencije   | $+\infty$  |

Iako je broj rezultirajućih frekvencija jednako udaljenih od osnovne hipotetski beskonačan, on se ipak može regulirati prema vlastitoj potrebi. „Nosac određuje jačinu zvuka, modulator sa svojom tonskom ovojnicom stvara promjene u boji zvuka, a njihov frekvencijski međuodnos određuje kakav će valni oblik (parcijale) zvuk imati“ (Tanodi, 1997).

### 3.4 Granularna sinteza

Granularna sinteza specifična je po tome što sintetizirani zvuk rastavlja na njegove mikro komponente tj., kako Jambrošić (2017) definira, operaciju sinteze vrši na razini mikrozvuka. Mikrozvuk je zvuk kraći od najmanje moguće perceptivne vrijednosti glazbene note, a dulji od trajanja jednog uzorka signala, točnije, nešto kraće od 0.1 sekunde, a dulje od 10 milisekundi. Taj mali komadićak zvuka još se naziva i granula.

Granularna sinteza funkcionira djelomično slično kao i *sampler*, reproducira ranije snimljene, u ovom slučaju, sintetizirane uzorke, ali su oni rascjepkani na već spomenute razine trajanja, odnosno granule. Granule se mogu reproducirati različitim frekvencijama, brzinama, fazama, jačini, gustoći granula, ali i kvaliteti i bitnoj dubini uzorka, što u konačnici rezultira vrlo bogatim kolažom mikrozvuka. Ovu vrlo specifičnu i inovativnu metodu sinteze zvuka izmislio je grčki skladatelj Iannis Xenakis.

Iako je vrlo efektivna i nudi vrlo širok spektar mogućnosti, ona ipak nije upotrebljiva za digitalnu rekonstrukciju zvučnog vala akustičkog instrumenta.

### 3.5 Sinteza bazirana na uzorku (S & S)

Umjesto zvučnog vala koji nastaje elektronički u sintetizatoru, S & S (*sample & synthesis*) sintetizator koristi već snimljene i pohranjene zvukove kao svoje izvore. Zbog nekadašnjeg problema sa kapacitetom memorije sintetizatora pohranjivali su se samo udarni (*attack*) i mali dio zadržanog (*sustain*) dijela tonske ovojnice snimljenog zvuka koji se potom stavlja u petlju (*loop*) kako bi se stvorila iluzija duljeg uzorka. Međutim, neki instrumenti poput klavira imaju sporiji razvitak boje tona tokom dijelova zadržavanja (*sustain*) i stišavanja (*decay*) što se ne može reproducirati petljom (*loop*) kratkog uzorka pa se uzorak zadržavanja obrađuje kroz konvencionalnu suptraktivnu arhitekturu filtera i pojačala koji stvaraju iluziju prirodno evoluirajućeg razvijanja boje tona.

### 3.6 Fizičko modeliranje

Sinteza prema fizikalnom modelu (PhM) odnosi se na metode unutar kojih se generirani valni oblik signala izračunava koristeći matematički model koji predstavlja skup jednadžbi i algoritama koji simuliraju fizički izvor zvuka, najčešće glazbeni instrument ili ljudski glas. Model je napravljen na temelju zakona fizike koji upravljaju proizvodnjom zvuka te tipično sadrži nekolicinu parametara od kojih su neki konstantni te opisuju karakteristike materijala i dimenzije instrumenata, a drugi su vremenski promjenjivi te opisuju glazbenikovu interakciju s instrumentom kao npr. okidanje žice ili pokrivanje rupe na flauti (Jambrošić, 2017).

Sintetizator za fizičko modeliranje zapravo generira binarne podatke (zvuk) u realnom vremenu, prilagođene i reaktivne na razne nijanse parametarskih promjena. Njegova sposobnost da zvuči organski i realno u potpunosti ovisi o vještini i znanju programera. PhM sinteza također može i modelirati elemente instrumenata i kombinirati ih na načine nemoguće u prirodi npr. truba svirana gudačom ili mali bubanj (*snare*) koji mijenja visinu tona ili svoju veličinu u realnom vremenu.

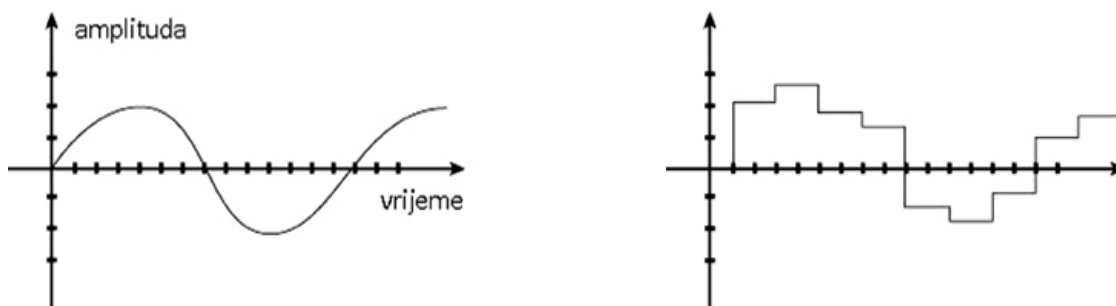
### 3.7 Ostali tipovi sinteze

Najpoznatiji preostali komercijalni tipovi sinteze su: linearno-aritmetička (LA) sinteza, sinteza pomoću valnih tablica (*wavetable synthesis*), vektorska sinteza, sinteza fazne distorzije, skenirana sinteza i dr.

## 4. Uzorkovanje (sampling)

Vrlo jednostavno rečeno, uzorkovanje je proces pretvorbe analognog zvučnog signala u digitalni. Prilikom pretvorbe akustičke energije, koja djeluje na membranu mikrofona, u električnu, novonastali signal prenosi informaciju do ADC sistema odnosno analogno-digitalnog konvertera ili pretvarača. Treba imati na umu kako oblik električnog signala nije jednak obliku zvučnog signala iako ga on pokušava imitirati. Analogno-digitalni konverter pretvara električni signal s informacijom o akustičkoj energiji u binarni kod, odnosno jezik razumljiv računalu, a to je niz binarnih brojeva. Svaki broj sadrži informaciju koja opisuje određene parametre zvuka u određenom trenutku u vremenu. Preciznost i opsežnost tih informacija ovisi o dva parametra AD pretvorbe: frekvencija uzorkovanja (*sample rate*) i njegovoj rezoluciji (*bit depth*) odnosno broja bitova po uzorku.

**Slika 4.a Proces digitalnog uzorkovanja (Karača, 2013)**

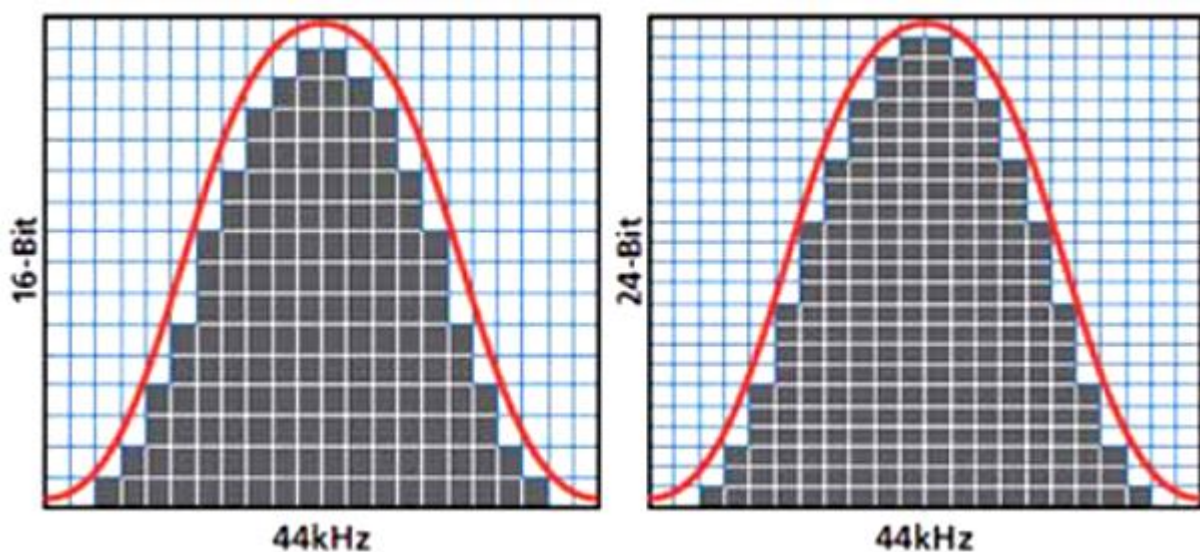


Frekvencija uzorkovanja je broj uzoraka u sekundi kojim računalu opisuje zvučni val. Harry Nyquist (1889. – 1976.), švedsko-američki inženjer elektronike, otkriva kako frekvencija uzorkovanja mora biti barem dvostruko veća od najviše frekvencije zvučnog vala koji želimo digitalno kodirati kako bi se frekvencijski spektar tog zvučnog vala mogao kodirati te kasnije prenijeti, odnosno rekonstruirati u svojoj cijelosti prilikom

digitalno-analogne pretvorbe. U znanstvenoj literaturi to se pravilo naziva Nyquistov teorem, a minimalna potrebna frekvencija uzorkovanja naziva se Nyquistovom frekvencijom. Standardne vrijednosti frekvencije uzorkovanja danas su 44.100 Hz i 48.000 Hz, iako je moguće uzorkovanje frekvencijom od 96.000 Hz i 192.000 Hz, ali i više.

Svaki uzorkovani trenutak u vremenu ima određeni broj, koji hipotetski može biti beskonačan, vrijednosti amplitude odnosno dinamičkih vrijednosti uzoraka koji se zove rezolucija (broj bitova  $N$ , tj. bit depth). On je kroz povijest mijenjao svoje vrijednosti počevši rezolucijom od 8 bita po uzorku pa preko vrijednosti od 12 i 16 do današnjeg standarda od 24 bita po uzorku iako tehnologija nudi mogućnost rada i sa većom rezolucijom od 32 i 64 bita po uzorku. Do povećanja standarda prema Jambrošiću (2018) došlo je iz praktičnih razloga zbog toga što veća rezolucija nudi više mogućih zadanih vrijednosti amplitude, što znači da je manja razlika među njima i u konačnici to rezultira boljim opisom izvornog analognog signala. Broj dinamičkih vrijednosti se računa tako da se dvije moguće binarne vrijednosti, 0 i 1, potenciraju brojem bitova  $N$ , jednostavnije rečeno  $2^N$ . Tako se recimo sa 16 binarnih znamenki ( $2^{16}$ ) može opisati 65.536 dinamičkih vrijednosti, a s 24 bita ( $2^{24}$ ) može se opisati čak 16.777.216 dinamičkih razina po uzorku.

**Slika 4.b Usporedba amplitudnih vrijednosti rezolucije 16 i 24 bita  
(Karača, 2013)**

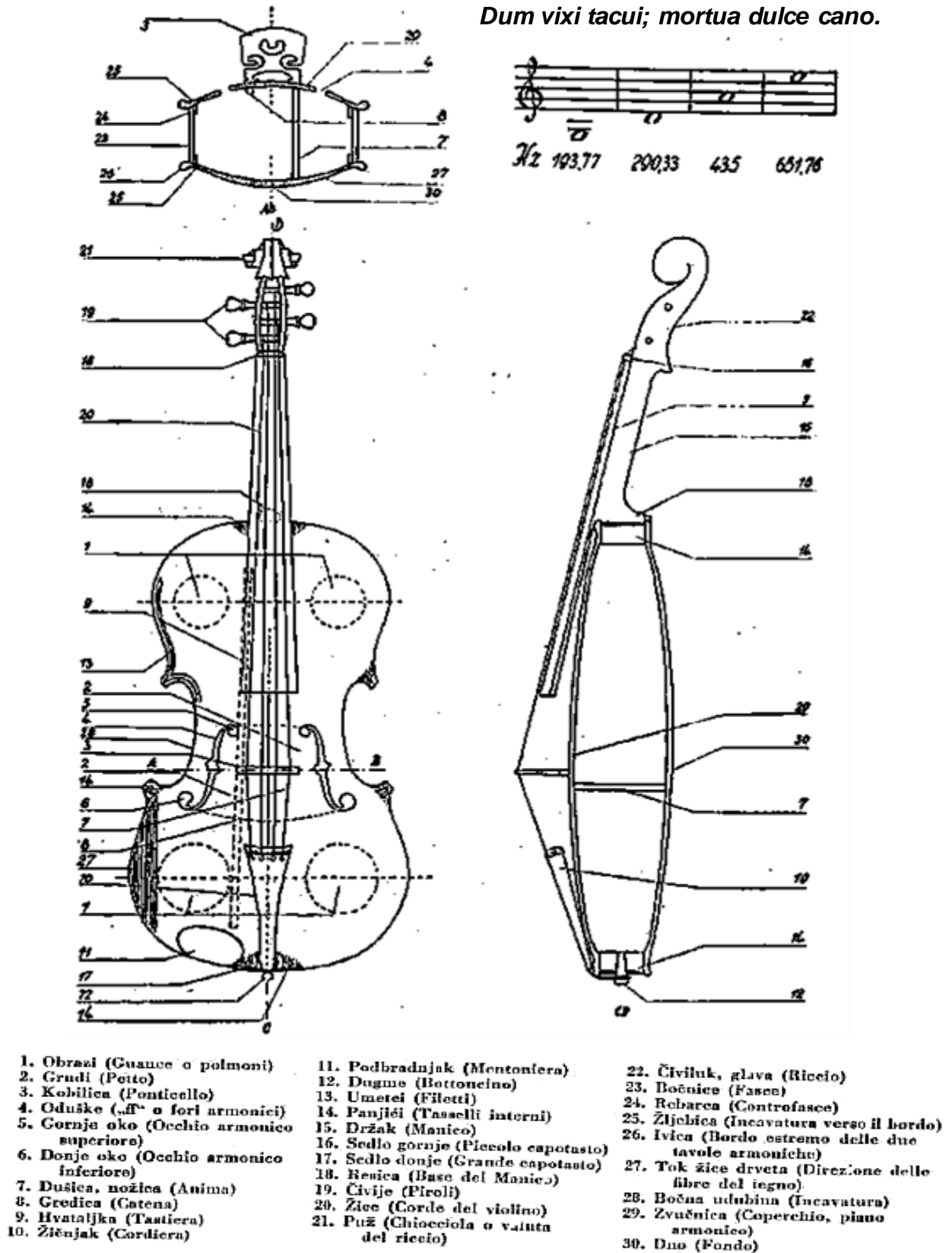


Prilikom uzorkovanja akustičkih instrumenata potrebno je uzeti više uzoraka jer, osim što se karakter tona mijenja s njegovom visinom, on se, naravno, mijenja i s promjenom artikulacije. Uzorak jednog tona sviranog gudačkom npr. violine može trajati dokle god je stisnuta tipka *sampler* tako što se u zadržanom (*sustain*) dijelu tona stvori petlja (*loop*) koja ponavlja zadržani dio onoliko koliko je potrebno. Prilikom izrade i programiranja orkestralnog *sampler* potrebno je svaki ton svakog instrumenta u orkestru snimiti sa svim željenim artikulacijama kako bi on prilikom svojeg korištenja uistinu bio što vjernija reprodukcija živog tona. Iako je uzorak tona realan zvuk akustičkog instrumenta, najveći nedostatak *sampler* je to što on uvijek koristi isti uzorak za isti ton iste artikulacije što znači da on uvijek, nažalost, zvuči isto.

## 5. Tajna i analiza starotalijanske gradnje violina

*Viva fui in silvis; sum dura occisa securi;*

*Dum vixi tacui; mortua dulce cano.*



Slika 5.a Violina i njeni dijelovi (Kresnik, 1951)



Iako je na uvodnom mjestu bila riječ o gudačkim instrumentima, naši će izvodi držati u prvome redu na umu najtipičnijeg predstavnika tih instrumenata – violinu.

Violina nije samostalna i nova tvorevina. Ona je samo jedna, no najsavršenija, upravo zaključna faza u razvoju gudačkih instrumenata. Ishodišnu točku te evolucije čini viola. Pored tehničkih razloga na to upućuje etimologija talijanskih riječi violino i violone. Jezično gledano – violino je deminutiv, a violone (kontrabas) augmentativ od riječi viola.

Koliko je zvuk violine obasan neobično plemenitom ljepotom, koliko je njena spoljašnost zaodjenuta u ruho savršeno skladnih linija i površina, toliko je građenje violine kao gudačkog instrumenta ovijeno mrakom i tajanstvenošću. Rođena u Italiji, zemlji klasične stvaralačke i reproduktivne muzičke umjetnosti, violina, ponesena duhom Corellija i Monteverdija, nije bila samo postavljena na prvo mjesto. U posljednjih tristo godina ona je živo sudjelovala u daljnjem unapređivanju, razvoju i izgrađivanju orkestralne muzike.

O njeno pobjedničko osvajanje cijeloga svijeta vezana je i slava starih talijanskih majstora graditelja violina, naročito Kremonjana Amatija, Stradivarija, Guarnerija i drugih. Poslije dvjesto godina uspona, slave i nedostižnosti – od polovine šesnaestog stoljeća do polovine osamnaestog stoljeća – slijedi dvjesto godina silaženja, propadanja i zaboravi stare talijanske liuterije<sup>2</sup>, umijeća građenja gudačkih instrumenata. Nestajanjem starih majstora nestalo je i „tajne“ o građenju muzičkih instrumenata, nestalo je i liuterije kao umjetnosti u klasičnom smislu te riječi (Ugrenović, 1951).

Mnogi su pokušali i mnogi još uvijek pokušavaju ostvariti ono što Ugrenović (1951) karakterizira kao „talijanski ton violine, točnije plemenitost, punoću, podatnost i nosivost toga tona“, međutim, unatoč uložnim naporima i kopiranjem strukture, oblika i dimenzije, ne samo rezonantne kutije, već cijelog instrumenta, ništa nije dovelo do konačnog, željenog cilja.

Ta vojska neumornih podijelila se na dva tabora. Jedni su – a to je bio kudikamo veći dio – tvrdili, da se „tajna“ sastojala i da se sastoji u intuiciji, u umjetničkom osjećanju, u individualnim prirođenim sposobnostima graditelja, u ličnoj tajni, u radioničkoj tradiciji, koja se prenosila s jedne generacije na drugu. Drugi su stali na

---

<sup>2</sup> „Korijen riječi liuto, luth, Laute arapskog je porijekla (al-ud) i znači – drvo“ (Ugrenović, 1951).

gledište: da se radilo i da se radi o zakonima prirode, o pojavama, koje padaju u oblast nauke, naročito fizike i matematike. Jedni su uzimali kao osnovu „tajne“ konstrukciju (model), oblik i dimenzije, drugi materijal, iz koga je on građen (drvo), treći lak, a četvrti način upotrebe instrumenta (starenje i isviravanje). Rijetki – a među njima je i Kresnik – bili su istraživači, koji su nastojali pronaći međusobno uzročnu vezu ili bar utvrditi odnose između rečenih činilaca (Ugrenović, 1951).

Iznimno je važno napomenuti kako dr. Franjo Kresnik govori i razrađuje tematiku poučen vlastitim iskustvom i istraživanjima tako da neke tvrdnje ne treba nužno shvaćati kao normativ, već kao smjernice.

## 5.1 Vanjski oblik violine

Violina formu kakvu ima danas duguje postepenoj evoluciji kroz povijest graditeljskih radionica i obiteljskim tajnama te nizu preinaka nužnim za potpunu funkcionalnost instrumenta. Rezultat je nevjerojatna akustička i mehanička sofisticiranost koju stari talijanski majstori puna dva stoljeća implementiraju u gradnju gudačkih instrumenata, posebice violine, a te norme i postulati opstaju do danas.

Funkcionalnost i pouzdanost instrumenta rasli su paralelno s potrebama izvođača, ali i novih izazova koje predstavlja novonastala glazba onog vremena. Kresnik (1951) upućuje na najraniji stadij modela kakav poznajemo danas ukazavši da su graditelji, kako bi se olakšalo sviranje, bili primorani suziti gornji dio instrumenta zbog toga što je sviranje van 1. pozicije zbog dimenzija bilo otežano. Sužavanjem cijelog instrumenta i otvaranjem dviju bočnih udubina u obliku slova **C** ostvarili su veću slobodu kretanja gudala. Ovim potezom žrtvovan je dio prostora rezonantne kutije koji se nadoknađuje ispupčivanjem zvučnice. Smještanjem bočnih udubina niže od sredine dovelo je nužno do spuštanja odušaka, a to je bio odlučan korak prema poboljšanju kakvoće i siline tona. „Na taj su način instrumenti u pravom smislu riječi dobili vlastite grudi“ (Kresnik, 1951). Oduške izvorno također u obliku slova **C** spuštaju se zbog prevelike blizine rubovima instrumenta, a njihovi donji krajevi okreću se na suprotnu stranu kako bi udaljenosti između gornjeg i donjeg kraja (oka) odušaka podesile dimenzijama zvučnice. „Na taj su način oduške u obliku slova **C** dobile oblik slova **f**. Tu preinaku i konačni oblik odušaka dugujemo isključivo talijanskim graditeljima“ (Kresnik, 1951).

Sličnosti starih majstora u konstrukciji i dimenziji, njihovim simetričnostima i asimetričnostima, nisu slučajne ni aproksimativne. To se može naslutiti vizualnom komparacijom, međutim, dr. Kresnik empirijskim istraživanjem neke elemente sa sigurnošću utvrđuje te napominje kako je svaka njihova varijanta ili preinaka bila plod zrelog razmišljanja.

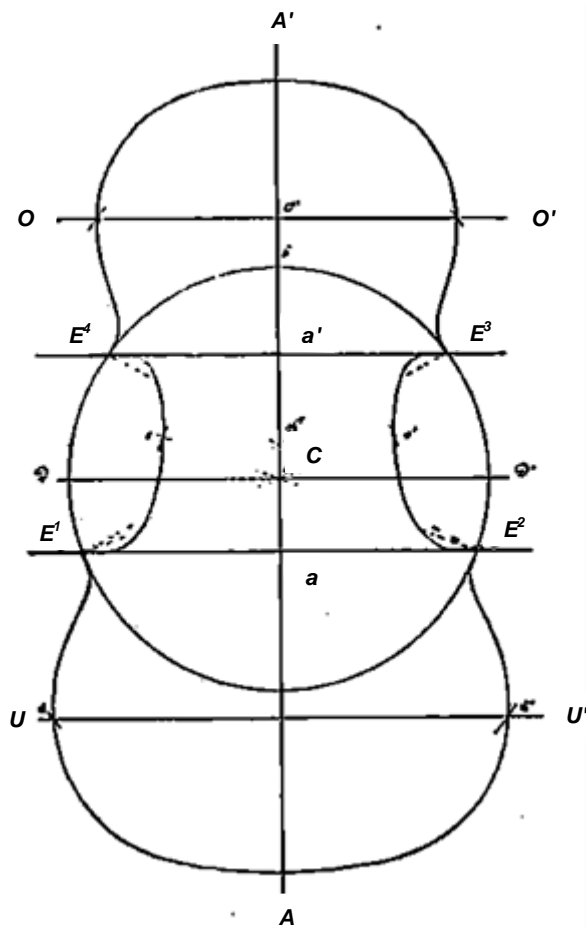
Istražujući stara remek-djela možemo primijetiti da se neke dimenzije neprestano ponavljaju. Sama ta činjenica nagoni na pretpostavku da su se stari majstori, kad su spremali osnovu za svoje instrumente, služili nekim planom, makar i primitivnim.

Drugi je dokaz o postojanju te pretpostavke u konstrukciji odušaka, koju je izvršio Stradivari, kao i u činjenici da je Stradivari neobičnom točnošću zacrtavao položaj oka i zareza odušaka. Oduške, naime, određuju položaj kobilice, uzimajući u obzir samo središnji dio zvučnice. Iz toga proizlazi da je sve to sistem koji nas učvršćuje u uvjerenju da su stari graditelji radili prema unaprijed utvrđenom planu. (...)

„Ne mislim reći, da je metoda, koju sam izradio potpuno identična s metodom starih graditelja. Ipak se ona u mnogome približava njihovim načelima, jer je općenito primjenjiva i jer po jednostavnosti i praktičnosti odgovara sistemima, koji su tada bili uobičajeni. Za konstrukciju je dostajalo ravnalo, svitak papira i olovka. Učvršćivanju ove moje pretpostavke pridonijelo je i to, što sam za svog boravka u Kremoni imao neobično povoljnu priliku, da u gradskom muzeju proučim planove, oblike i modele, koje je ostavio Stradivari“ (Kresnik, 1951).

Budući da su dimenzije rezonantne kutije, odnosno lika violine, predodređene duljinom zvučnice, sav daljnji konstrukt akustičkog sistema svoje mjere temelji na njoj. „Duljinu zvučnice, to jest same violine, preuzeli smo u veličini, koju su nam ostavili stari graditelji na svojim remek-djelima“ (Kresnik, 1951). S druge strane, graditelji su tu veličinu normirali s obzirom na znanje o volumenu i vlastitom tonu zračne komore instrumenta, o čemu će biti govora kasnije.

**Slika 5.1.a Lik violine tipa Antonija Stradivarija uzet s originala iz godine 1709.  
(Kresnik, 1951)**



Dr. Kresnik (1951) minuciozno objašnjava svaki relevantan parametar planskog projektiranja ovog tipa violine. Iako duljina zvučnice varira, ona je ipak omeđena nekim vrijednostima, poput 355,5 mm kao normalna donja granica i raspon od 357 do 359 mm kao njezin maksimum, a prosječna širina donjeg dijela zvučnice dodijeljena navedenim vrijednostima je 210 mm. Širina je ipak zasebna kategorija budući da gornji i donji dio korpusa nisu simetrični, pa tako gornji dio zvučnice na već navedene veličine iznosi u prosjeku između 168 mm i 170 mm, iako najraniji Stradivarijevi modeli minimum smještaju na razinu od

158 mm, a neke violine velikog formata definiraju maksimum od čak 172 mm.

Egzaktne mjere sjajna su nit vodilja za izračun i determinaciju tipa violine, no najvažniji faktor pri izradi željenog modela ipak su omjeri. Duljina srednjeg dijela korpusa violine koji je omeđen točkama  $E^1$ ,  $E^2$ ,  $E^3$ ,  $E^4$ , odnosno gornjim i donjim uglovima, treba biti četvrtina ukupne duljine rezonantne kutije. Duljina gornjeg dijela osi  $A' a'$  odnosi se prema maksimalnoj gornjoj širini  $O O'$  u omjeru 3 : 4, dakle:

$$A' a' : O O' = 3 : 4$$

Duljina  $A' a'$  množi se sa 4, a potom se dobiveni broj dijeli sa 3 i dobiva se mjera gornje širine u milimetrima.

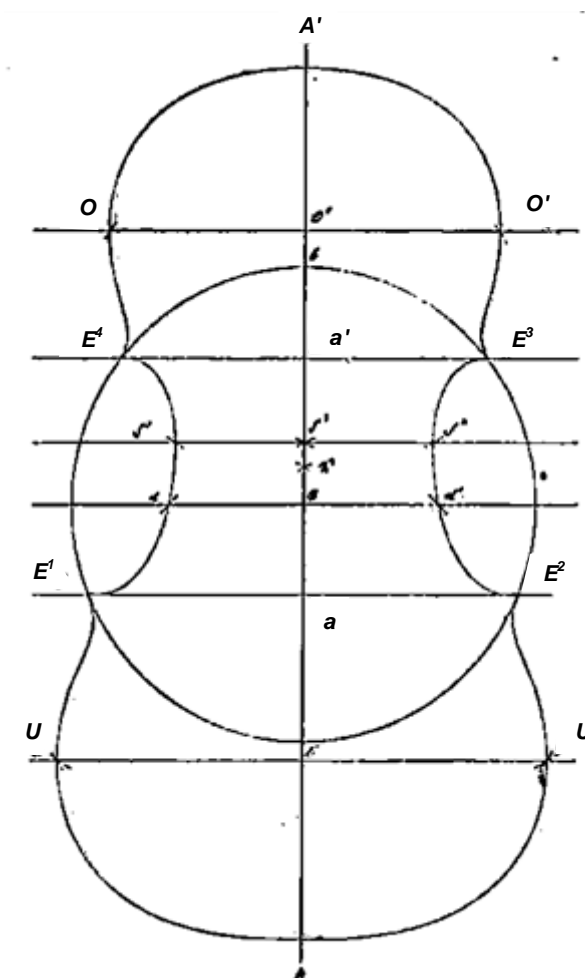
Središnja širina ekvivalent je razmaku točaka  $C$  i  $a'$ , a najveća donja širina rezultat je odnosa:

$$A a : U U' = 12 : 17$$

Duljina  $A$  a množi se sa 17 te se dobiveni broj podijeli sa 12, a rezultat se bilježi u milimetrima.

Ovo su samo neke, najrelevantnije, od 12 točaka kojima je omeđen ovaj tip violine. „Veliki su majstori mogli sad slobodno, nevezanih ruku, prema vlastitom estetskom ukusu i raspoloženju upotpunjavati ostalo. Izlazi jasno da svaka izmjena u duljini kutije povlači za sobom izmjenu svih ostalih dimenzija, ali uvijek automatski, u točnim međusobnim odnosima“ (Kresnik, 1951).

**Slika 5.1.b Lik violine tipa Giuseppe Guarneri del Gesù uzet s modela originala iz godine 1735. (Kresnik, 1951)**



Ovaj jednako interesantan tip violine drukčijih omjera dr. Kresnik predstavlja kao mjerodavan primjer drugog tipa kremonske škole uz individualne preinake majstora.

Duljina srednjeg dijela rezonantne kutije koja je omeđena točkama  $E^1$ ,  $E^2$ ,  $E^3$ ,  $E^4$ , odnosno gornjim i donjim uglovima, treba iznositi  $3/11$  ukupne duljine korpusa instrumenta. Duljina gornjeg dijela osi  $A' a'$  odnosi se prema maksimalnoj gornjoj širini  $O O'$  u omjeru  $50 : 69$ , dakle:

$$A' a' : O O' = 50 : 69$$

Duljina  $A' a'$  množi se sa 69, a potom se dobiveni broji dijeli  $A O$  i dobiva se mjera gornje širine u milimetrima.

Središnja širina ekvivalent je razmaku točaka  $C$  i  $a'$ , a najveća donja širina rezultat je odnosa:

$$a A : U U' = 35 : 51$$

Duljina  $a$  A množi se sa 51 te se dobiveni broj podijeli sa 35. Rezultat je također izražen u milimetrima.

„Ne mislim reći, ponavljam to, da metoda, koju sam izradio, sve ako se i općenito primjenjuje pri gradnji violina, odgovara u svim pojedinostima metodi tadašnjih graditelja. Međutim, po jednostavnosti i praktičnosti ona vjerno odražava duh starih majstora. Ako nadalje uzmemo u obzir, da su primjerci, koji su ovdje ispitivani, izvučeni onako nasumce iz mase instrumenata, što su ih sagradili ti majstori, moramo ipak istaći točnost s kojom su se oni pridržavali svojih konstrukcijskih načela“ (Kresnik, 1951).

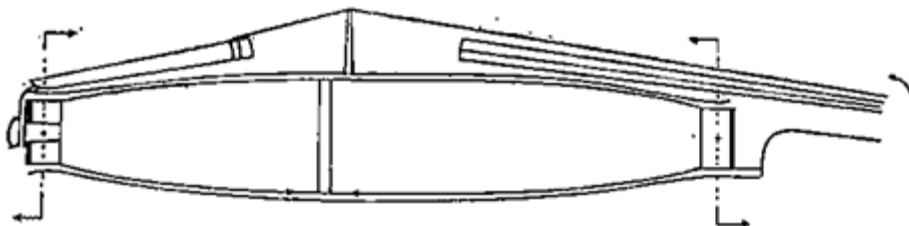
## 5.2 Zvučnica

Jedna od ključnih komponenta ovog akustičkog titrajnog sustava je bespogovorno zvučnica, tj. rezonantna ploča. Ona amplificira slabe titraje žica koji se preko kobilice (konjića) prenose na nju, a zatim preko dušice zvučni valovi putuju do donje rezonantne ploče, odnosno dna. Zvučnicom osnaženi i na dno preneseni, valovi udvostručuju površinu zvučne plohe. Zvučnica cijelom svojom površinom titraje žice prenosi i na zračni prostor unutar korpusa instrumenta, a kao rezultat svega navedenog ti se zvučni valovi projiciraju i u zrak van instrumenta.

„Promotrimo li vanjsku površinu zvučnice, opaziti ćemo dvije osobine: ispupčenu površinu i oduške.

Već smo istakli, da su stari graditelji violina osjetili potrebu, da izboče zvučnicu, kako bi kutiji osigurali potrebnu zapreminu; oni su dobro znali, da od toga u prvom redu zavisi snaga tona i zvučnost instrumenta“ (Kresnik, 1951).

**Slika 5.2.a Uzdužni presjek violine (Kresnik, 1951)**



Zvučnica, s obzirom na svoje dimenzije, trpi ogroman pritisak koji, ovisno o duljini žica, materijalu od kojeg su napravljene, visini kobilice i frekvenciji komornog tona,

može iznositi okvirno između 4 kg i 12 kg. Međuodnos svih sila koje sudjeluju u proizvodnji zvuka vrlo je kompleksan i opterećujući, a Kresnik (1951) objašnjava kako je zvučnicu trebalo izbočiti upravo kako bi se povećao njen kapacitet i pojačala njena otpornost prema opterećenju, a s druge strane kako bi joj se dala vlastita, unutarnja, napetost koje u neispupčenoj zvučnici ne bi bilo.

„Na zvučnici i na dnu razlikujemo longitudinalnu i transverzalnu ispupčenost. Longitudinalna je mnogo važnija, jer od nje zavise oblik i linija transverzalne ispupčenosti.

Ispupčenost zvučnice ne odgovara kružnom luku; njen se profil približava više elipsi ili paraboli, što je neobično važno za akustičnost instrumenta“ (Kresnik, 1951).

**Slika 5.2.b Poprečni presjek zvučnice (Kresnik, 1951)**

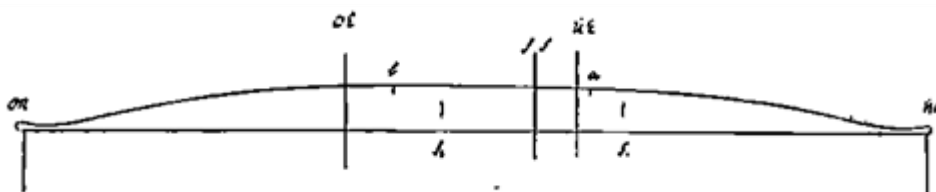


Akumulativnu, najveću, dubinu rezonantne kutije naziva se i ukupnom visinom tijela violine, a ona je određena ispupčenosti zvučnice i dna te visinom srednjih bočnica, a ona je u starih majstora iznosila šestinu ukupne duljine korpusa. Zbroj gornjih i donjih bočnica također mora iznositi šestinu ukupne duljine tijela instrumenta. Kresnik prikazuje i način izračuna gdje za primjer uzima Stradivarijev tip violine čija je zvučnica duga 355 mm. Njoj se od ukupne veličine odbiju gornji i donji rubovi od kojih svaki iznosi 2,5 mm. Budući da tražimo šestinu duljine zvučnice, 350 mm dijelimo na 6 jednakih dijelova, što rezultira iznosom od 58,3 mm, koji, zbog lakšeg računanja, zaokružujemo na 58 mm, što predstavlja vrijednost ukupne dubine rezonantne kutije. Pretpostavimo da su gornje i donje bočnice jednake visine, svaka duljine 29 mm:

$$58 \text{ mm} - 29 \text{ mm} = 29 \text{ mm}$$

Uz pretpostavku da je dobivenih 29 mm razdijeljeno jednako na ispupčine zvučnice i dna, svaki dio jednak je visini od 14,5 mm.

Slika 5.2.c Uzdužni presjek zvučnica (Kresnik, 1951)



U slučaju da gornje i donje bočnice nisu jednake duljine, kao što je i bio običaj kremonskih graditelja, jer su gornje bočnice imale tendenciju biti niže od donjih, uzima se aritmetička sredina zbroja svih duljina bočnica te se dalje računa isto kao na već prikazan način. Važno je napomenuti kako su rijetki slučajevi ovako čistog računa poput prikazanog primjera, što zbog eksperimentiranja starih graditelja, što zbog toga što metrički sustav tada još uvijek nije postojao. Spomenuta šestina duljine instrumenta također može iznositi više ili manje, kao i bočnice, ovisno o modelu instrumenta, željenom cilju i naravno graditelju.

Već je ranije bilo rečeno da je longitudinalni profil najvažniji jer od njega zavisi oblikovanje transverzalnih profila.

U njemu razlikujemo tri dijela, čiji je tok adekvatan donjem, srednjem i gornjem dijelu violine. U svakom pojedinom dijelu uzdužni profil ima različit, karakterističan tok.

Na grudima – a to je središnje polje violine, koje je ograničeno oduškama –, linija profila je pravac, koji kod raznih majstora ima različitu duljinu. Ponekad je njegova duljina različita i kod istog majstora (Kresnik, 1951).

Violina kao rezonantna kutija u cjelini ima svoj vlastiti ton, međutim, imaju ga i rezonantne ploče same po sebi, a o tome će biti govora nešto kasnije.

Tijelo violine gledano geometrijski potpuno je simetrijske građe. Naprotiv, u akustičnom smislu ono je građeno asimetrijski. Debljina žica, a prema tome i dubljina tona, veća je na lijevoj polovini instrumenta. Vlastiti ton lijeve strane zvučnice dublji je za veliku sekundu (ponekad za veliku tercu pa i čistu kvintu) od desne. To znači, vlastiti ton lijeve strane zvučnice podešen je frekvencijama žica **g** i **d**, koje su joj prostorno bliže. Toj razlici je podešena i građa zvučnice, naročito volumna težina njena drveta (Ugrenović, 1951).



### 5.3 Dno

Dno, iako već spomenuto, ipak kao zasebna komponenta zahtijeva posebnu elaboraciju. Ono je konstantno izloženo opterećenju iznutra prema van i, za razliku od zvučnice, ono nije poduprto gredicom i dušicom, stoga je za izradu kvalitetnog i otpornog dna potrebno koristiti drvo kompaktnije i gušće molekularne strukture. Dno mora biti čvrsto i dovoljno tanko kako bi se osigurala što veća sposobnost titranja.

Longitudinalni profil dna u mnogome se razlikuje i jednostavniji je od profila zvučnice. On predstavlja gotovo kružni luk; zbog toga on već po svojoj prirodi manje popušta nego gornja ploča; to se može doseći jedino tako, ako mu se dadu umjerene debljine.

Vidimo, dakle, koliko je sa statičke točke gledišta važno da longitudinalna os dna bude različita od longitudinalne osi zvučnice. To s akustičkog gledišta traži različit materijal, jer je za statičke momente važna čvrstoća, a za akustičke sposobnost titranja, to jest elastičnost drveta (Kresnik, 1951).

Kako bi pojasnio titrajni sustav rezonantne kutije, Kresnik (1951) opisuje proces refleksije zvučnih valova unutar samog korpusa instrumenta:

„Okomitim udarima, koji se s kobilice prenose na zvučnicu, zrak u kutiji pokreće se u stojnim valovima. Zbog posve individualnog oblika njegovih unutarnjih površina, a pod najpovoljnijim uvjetima za rezonanciju valovi se s velikom energijom reflektiraju, možemo čak kazati, bacaju prema oduškama.

Ovako pojačan zvučni val predaje se kroz oduške vanjskomu zraku. Tako nastaje brza i bujna podatnost tonova starih kremonskih violina, koja im je davala onu oštru svježinu i izražajni karakter.“

### 5.4 Debljina rezonantnih ploča

Već je spomenuto kako o debljini rezonantnih ploča velikim dijelom ovisi podatnost, zvučnost i kakvoća tona kao i čvrstoća instrumenta, posebice dna. Među remek-djelima starih majstora prisutne su razne varijante mjera debljine rezonantnih ploča, međutim, one čak ni generacijski nikada nisu izlazile van okvira ostvarene efikasnosti i ustanovljenog zanata jer fizika to naprosto nije dopuštala.

Debljine, što su ih prvo graditelji davali rezonantnim pločama, bile su bez svake sumnje pretjerane; no kasnije, kako su uznapredovala načela građenja, debljine su se sve više i više smanjivale, posebno pak za dna. Dna su u svome središnjem dijelu, iako su bila od javorovine, morala dobiti veće debljine od zvučnica, jer dno ima da podnese pritisak kobilice pod mnogo nepovoljnijim uvjetima od zvučnice. Zvučnica, osim potpore bočnica, na koje je prilijepljena, ima podesan oslonac i u gredici, za razliku od dna, koje se mora odupirati samo pritisku iznutra prema vani.

Debljine zvučnica, što su ih upotrebljavali najveći majstori – od Andree Amatija do Stradivarija – više-manje su jednake, jer je pritisak kobilice kod svih violina uglavnom jednak. Prema tome ni debljine, što su ih upotrebljavali različni majstori nisu mogle pretrpjeti veće promjene. Njihove su razlike minimalne, a i one zavise od ispupčenosti rezonantnih ploča i od razlika upotrebljenoga drveta. (Kresnik, 1951)

Debljine ploča nisu ravnomjerno raspoređene jer debljina mora zadovoljiti spomenute norme, a to su one statičke i akustičke prirode. Rezonantna ploča mora biti deblja tamo gdje mora podnijeti veliki pritisak, a tanja na neopterećenim mjestima kako bi mogla ispuniti svoj akustički zadatak i titrati slobodnije. „Jasno je, da s udaljavanjem od kobilice pritisak na zvučnici opada, a opadaju i impulsi. Tim smjerom treba da opada i debljina zvučnice, da ona ne bi došla u suprotnost sa smanjenim pritiskom i sa slabljenjem zvučnih valova“ (Kresnik, 1951).

Empirija je znala, da svaka neugrađena ploča violine ima svoj vlastiti ton. Po tvrđenju empirije najčešće se tonovi ploča kreću oko  $e$  ili  $f$ . Između tona zvučnice i tona dna postoji neki odnos frekvencija. Interval tih tonova najčešće je sekunda (velika ili mala), ponekad terca (mala, rijetko velika). Po pravilu je vlastiti ton gornje ploče (zvučnice) dublji od tona dna. (...)

Ploča za rezonanciju napravljena od drveta kojim se zvuk širi većom brzinom mora biti tanja nego zvučnica napravljena od drveta kojim se zvuk širi manjom brzinom. I stvarno su stari empirici početne debljine ploča za rezonanciju uzimali veće i onda ih postepeno smanjivali, dok nisu dobili debljinu, koja odgovara brzini zvuka, dakle gustoći i elasticitetu drveta.

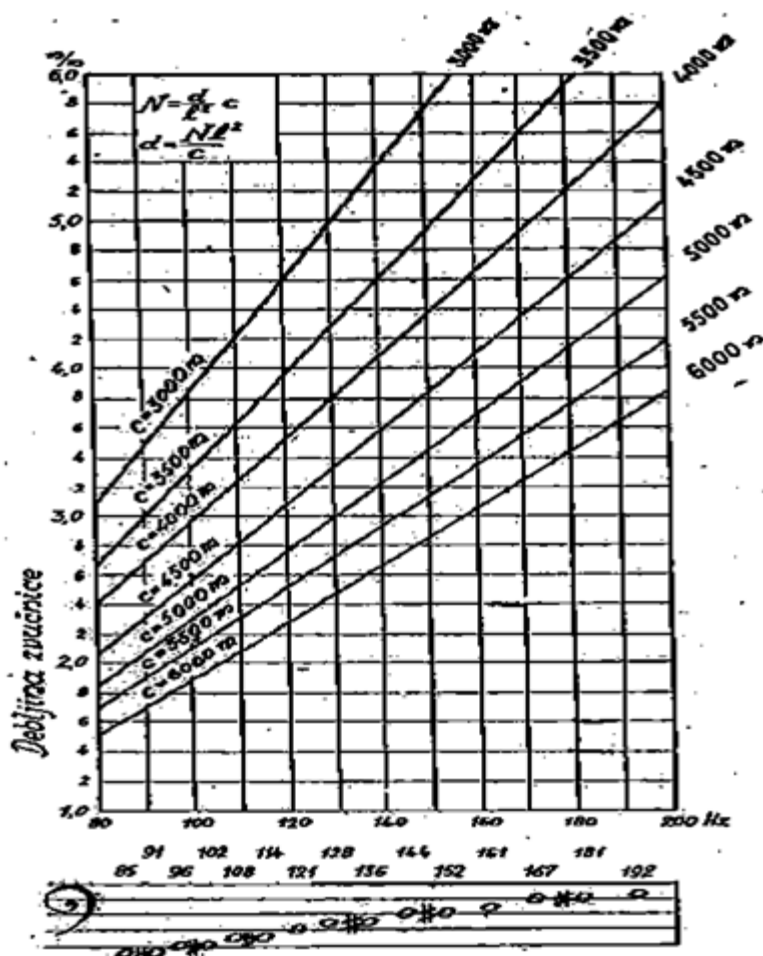
No to pritanjivanje ploča moralo je voditi računa još i o ovim obzirima:

1. Pločama treba dati onu minimalnu debljinu, kod koje ugrađene ploče mogu ne samo titrati što potpunije, već i svojom čvrstoćom mogu izdržati pritisak žica;

2. Ploče trebaju pritanjivanjem postati toliko savitljive, da im se pri ugrađivanju može dati potrebna longitudinalna i transverzalna ispučenost;
3. Da ploče uzmognu izvršiti zadatak rezonatora, njihova minimalna debljina treba obuhvatiti najdublje tonove **g** žice, a da pritom ne bude prekoračena granica pod 1. i 2.
4. Da bi ploča za rezonanciju mogla pojačavati sve tonove ljestvice, ona mora biti različite debljine.
5. Budući da je brzina širenja zvuka kroz javorovinu manja od one za smrekovinu, dno violine, da bi moglo sprovoditi zvuk jednako kao zvučnica, mora biti deblje nego zvučnica.

Debljina zvučnice starih talijanskih violina kreće se od 2 do 4 mm. Za brzinu zvuka to odgovara frekvencijama **e**, **f**, **fis**, **g**. Te se frekvencije mogu utvrditi matematički i akustički. Utjecaj debljina na visinu tona – za debljine od 2 do 4 mm – vrlo je velik. Jedna desetina milimetra odgovara razlici od ¼ tona (Ugrenović, 1951)!

**Slika 5.4.a Zavisnost visine tona od debljine zvučnice i brzine zvuka**  
(Ugrenović, 1951)



Također je bitno napomenuti kako su debljine longitudinalne osi više-manje jednolike, dok su s druge strane debljine transverzne osi nudile puno širi spektar mogućnosti modeliranja zbog nejednakih širina rezonantnih ploča, različitog toka njihovih kosih dijelova te zbog veće ili manje širine žljebica.

## 5.5 Grudi

Najvažnije, ujedno i najopterećenije, ali i najčvršće mjesto na zvučnici je njezin središnji dio, koji se može nazvati i grudima violine. Omeđene oduškama i pod pritiskom kobilice grudi moraju imati adekvatan tj. najveći mogući elasticitet i slobodu titranja, a sretna okolnost je da oduške omogućuju grudima upravo to, tako da se s pravom taj dio titrajnog sustava može nazvati mehaničkom simbiozom. Širina grudi se kroz stoljetnu tradiciju kremonskih graditelja nije bitno mijenjala pa je tako u svojim počecima ta širina iznosila 108 mm, dok se nije standardizirala na raspon od 110 mm do 112 mm, a u rijetkim slučajevima je znala iznositi i od 112 mm do 114 mm.

## 5.6 Žljebica

Prva relevantna komponenta rezonantne kutije koja se nalazi unutar korpusa samog instrumenta je žljebica. „Zadatak je žljebice, da zvučnici i dnu, koji su po nuždi zalijepljeni za rubove, da pravilno odmjerenu slobodu titranja, gipkost, koja će omogućiti, da ploče što lakše slijede zvučne impulse kobilice i da pojačaju vibriranja zračne mase kako one u violini tako i one van nje“ (Kresnik, 1951). Žljebice uz zvučnicu tanje su od onih uz dno zbog različitog drva za izgradnju te poradi većeg opterećenja s kojim se dno suočava. Različiti majstori su se različito odnosili prema njihovoj konstrukciji, međutim, cilj je bio isti –, povećati vibracijske sposobnosti zvučnice.

## 5.7 Kritički tonovi

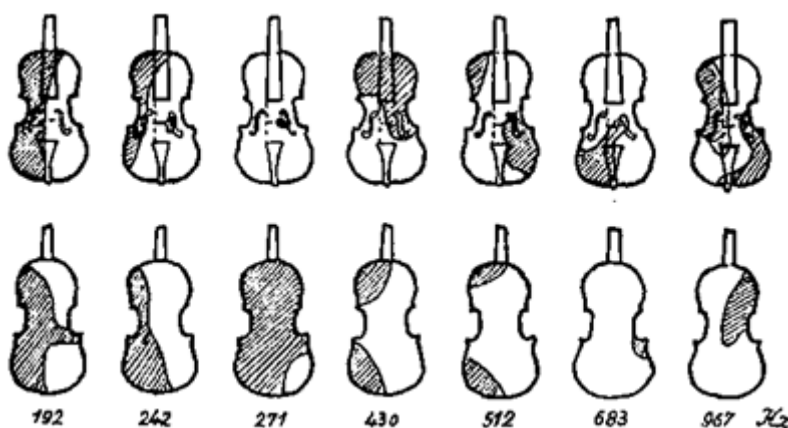
Zanimljiva fizikalno perceptivna komponenta jesu kritički tonovi. Emitiranje tona potezom gudala po žici u određenim slučajevima poput skraćivanja žice na dijelove koji ne titraju, odnosno nisu ekvivalent odnosima alikvotnog niza, može rezultirati zvučnim udarima, tzv. kritičkim tonovima. Kobilica, koja zbog svoje osjetljivosti provodi i najmanje nepravilnosti, potom ih prenosi na zvučnicu, koja nadolazeći signal amplificira. Ova pojava je posebice izražena u visokim pozicijama na nižim, debljim žicama, a javlja se uvijek na određenim duljinama žice. Ona također postoji i na višim, tanjim žicama, međutim, u suzdržanijem obliku koji često ostane nezamijećen zbog tankoće žica i njihovih visokih frekvencija zbog kojih se nastali kritički tonovi lakše akomodiraju.

## 5.8 Vučji tonovi

Forma zvučnih udara koja kategorički također pripada skupini kritičkih tonova jesu vučji tonovi, premda je njihova priroda potpuno drukčija kao i proces nastanka i rezonancije.

Zvučnica, koja prima neobično složene titraje, što ih prenosi kobilica, biva čvornim linijama podijeljena na nekoliko vibracijskih polja. Razvijaju se tako stojni valovi, kod kojih zbog refleksije dolazi do superpozicije. Oni se sumiraju tvoreći veće ili manje fleksije – devijacije – zvučnice. Njihova je amplituda osim ostaloga uvijek proporcionalna sa silinom, koja ih proizvodi. Kako su ti valovi zbir valova različitih amplituda, rezultante pokazuju i goleme razlike, a često i veoma zapletene oblike (Kresnik, 1951).

**Slika 5.8.a Čvorišne linije zvučnog tijela violine (Kresnik, 1951)**



Već je spomenuto kako su rezonantne ploče različitih debljina i ispupčenosti duž svojih longitudinalnih i transverzalnih osi, a to uvelike utječe na faktor titranja. „Zna se, da tanka žica titra mnogo brže od debele. To važi i za zvučnicu i za dno. I kod njih tanji dijelovi titraju brže nego deblji, jer transverzalni valovi stoje s debljinom u obrnutome odnosu. Vibracije tankih dijelova zvučnica mogu biti višekratnik broja titraja proizvedenog osnovnog tona. Ta je činjenica od izvanredne važnosti za akustičke kvalitete rezonantnih ploča; jer i od toga zavisi savršeno pojačavanje tona određenim harmonijskim tonovima, koji su neophodno potrebni za njihovu snagu, mekoću i briljantnost. (...) Kad ti najtanji dijelovi dosegnu određeni broj titraja, dolazi između njih i onih sa debljih dijelova do zvučnih udara. Ti su udari objektivne prirode, jer nastaju u

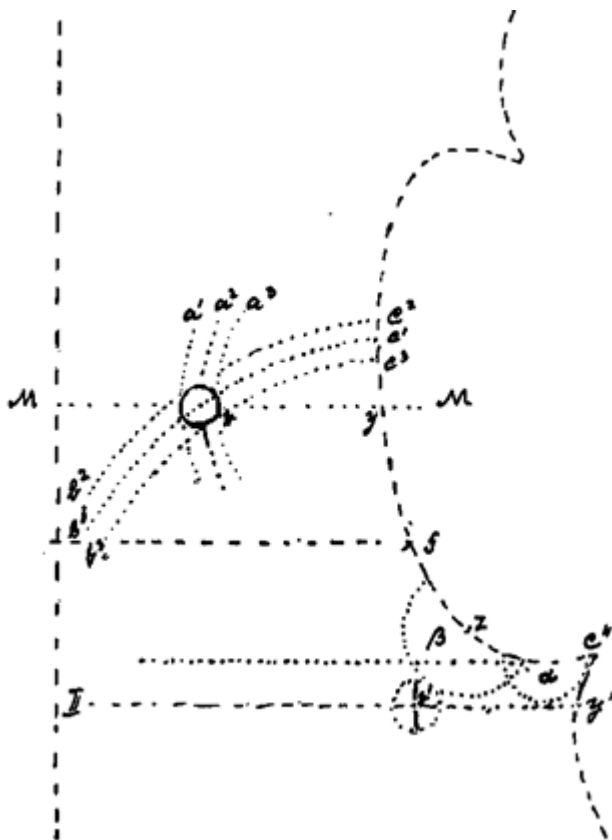
stvarnosti: impulsi udara sumiraju se odista i dovode do većih vibracija. Tako ti zvučni udari proizvode neugodan šum“ (Kresnik, 1951).

Suprotno kritičkim tonovima, vučji ne nastaju na žici, već na zvučnici instrumenta, što upućuje na disharmoniju debljina rezonantne ploče. Budući da je ovo mana konstrukcijske prirode, teško ju je uvijek u potpunosti ukloniti.

## 5.9 Oduške

Koncept i estetika odušaka nisu slučajne te su završna faza dugogodišnjeg razvoja iniciranog otkrivenjem njihove akustičke i statičke esencijalnosti. O tome govori i činjenica kako su stari majstori iza sebe ostavili crteže modela svojih odušaka po kojima se, rekonstrukcijom istih, mogu ustanoviti i neka preklapanja poradi kojih se može, uvjetno rečeno, govoriti i o normiranju nekih parametara.

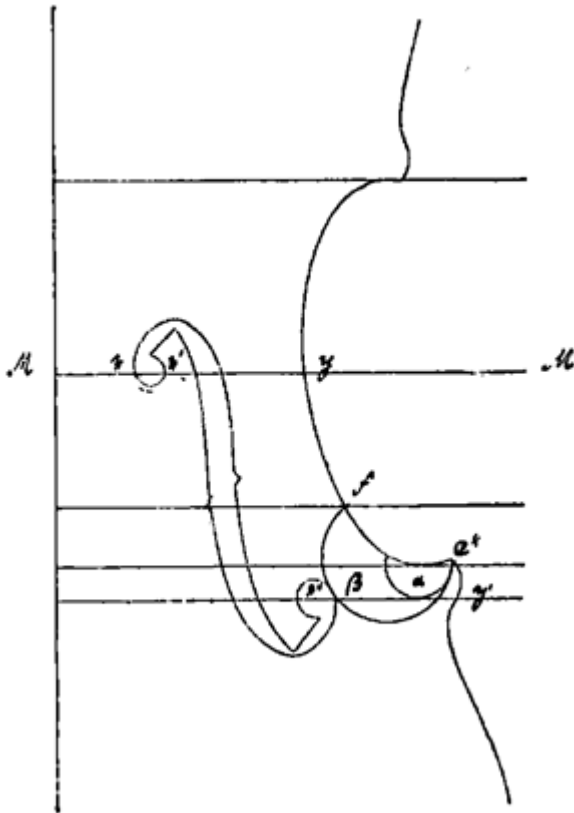
### Slika 5.9.a Konstrukcija odušaka Antonija Stradivarija (Kresnik, 1951)



Za konstrukciju oduške potrebno je preploviti nacrt zvučnice po njenoj duljini te preploviti središnji dio između gornjih i donjih uglova **C** otvora. U slučaju Stradivarijevog modela polovica, a u slučaju Guarnerijevog modela trećina tog pravca jesu vanjski, odnosno unutarnji rub kružića za gornje oko. Promjer gornjeg oka je u oba slučaja uvijek jednak osmini polovine širine zvučnice. Druga pomoćna linija crta se ispod donjeg ruba udaljenosti od njega jednakoj promjeru gornjeg oka. Na njoj se nalazi središte donjeg oka specifične

udaljenosti, ovisno o modelu, od najbližeg ruba. Kresnik (1951.) napominje kako je promjer gornjeg oka jednak najvećoj širini odušaka kod njihovih zarezata.

**Slika 5.9.b Konstrukcija odušaka Giuseppe Guarneri iz godine 1743.  
(Kresnik, 1951)**



„Jasno je dakle, da se s mijenjanjem profila violine u istom omjeru mijenjaju i dimenzije odušaka. To je od neocjenjive važnosti za pravilno reguliranje vlastitog tona zračne kutije...” (Kresnik, 1951).

Unatoč postojanju nepisanih pravila, oduške čak ni kod različitih instrumenata istog autora nisu jednake, stoga se suma sveg znanja o konstrukciji prema Kresniku (1951) može svesti na četiri točke „kapitalne važnosti“:

1. položaj i veličina gornjih očiju
2. širina oduške u visini unutarnjih ureza
3. položaj unutarnjih ureza odušaka
4. položaj veličine donjih očiju

Dužina samih odušaka otprilike iznosi petinu dužine kutije, makar je i taj čimbenik podložan kontroliranim modifikacijama. Što se tiče ureza na oduškama, treba napomenuti kako su unutarnji referenca za precizno postavljanje kobilice, dok su vanjski urezani iz čisto estetskih razloga.

## 5.10 Volumen zračnog tijela

Veličina instrumenta ne može značajno oscilirati jer se u suprotnome on mijenja na štetu sonornosti i karaktera tona. Drugim riječima, znatne izmjene dimenzija instrumenta mogu promijeniti definiciju instrumenta o kojem je riječ. Imajući prethodno rečeno na umu, može se zaključiti kako se promjenom bilo koje veličine rezonantne kutije mijenja i volumen zračnog tijela korpusa instrumenta. Volumen zračnog tijela

omeđen je već obrađenim elementima, a to su dužina, širina i dubina. „Pažljivim motrenjem [majstori] su zapazili, da volumen zraka, koji zavisi od visine bočnica i veličine ispupčenosti, stoji u određenom omjeru s dužinom tijela. (...) Ne treba dakle, čuditi se, što su stari graditelji, kako ćemo kasnije vidjeti, uspijevali da postignu uvijek jedan te isti ton same zvučne komore svojih instrumenata čak i onda, kad su varirali njihove dimenzije“ (Kresnik, 1951).

Volumen zračnog tijela najviše ovisi o visini bočnica, a manjim dijelom i o ispupčenosti zvučnice i dna.

Više ili niže bočnice djeluju mnogo radikalnije na volumen ormarića, jer vijenac bočnica obuhvaća apsolutno najveći dio volumena violine; onaj dio, koji otpada na ispupčenost mnogo je manji.

„Za potvrdu toga donosim primjer jednog Guarnerijeva modela male dužine od 352 mm, koji obuhvaća  $1.830 \text{ cm}^3$  zraka, a ispupčenost zvučnice i dna sadržavaju svega  $400 \text{ cm}^3$ .“

Ako su bočnice niže, volumen je manji, a to djeluje povoljno na dvije visoke žice, na račun dviju niskih. (...)

Ako se, naprotiv, bočnice povise i volumen poveća, štetuju visoke žice na račun dubokih, koje dobivaju karakter violinih žica (Kresnik, 1951).

Oduške su također značajan faktor jer djeluju kao regulator volumena i vlastitog tona zračne komore. Proširivanjem odušaka povisuje se vlastiti ton zračne komore, ali smanjuje se volumen zračnog tijela, a sužavanjem odušaka se vlastiti ton zračne komore snižava, međutim povećava se volumen zračnog tijela. „Vidimo dakle da proširivanje odušaka po svome efektu odgovara spuštanju bočnica; i obratno, sužavanje odušaka odgovara dizanju bočnica“ (Kresnik, 1951).

## 5.11 Vlastiti ton zračne komore

Ton određene visine zračnog stupca instrumenta naziva se vlastitim tonom, u ovome slučaju, violine. Félix Savart (1791. – 1841.), francuski fizičar i matematičar koji je uspjehe ostvario i nizao na području akustike, gajio je poseban interes prema violini. Osim što je osobno konstruirao eksperimentalni trapezoidni model violine, istraživao je i vlastite tonove instrumenata Stradivarija i Guarnerija del Gesù te došao do



zaključka kako se radi o frekvenciji od 256 titraja, što otprilike odgovara današnjem muzičkom tonu  $C_1$ . Također otkriva kako akustička pobuda bilo kojeg dijela rezonantne kutije rezultira istim tonom bez obzira radi li se o zvučnici, dnu ili bočnicama. Razlog tome je to što se titraji jednog dijela prenose na cijeli akustički sistem. „Takav sistem čini cjelinu, koja se potresena na jednom mjestu kao jedinstveno čvrsto tijelo dijeli na pojedine vibrantne dijelove, ograničene nodalnim linijama<sup>3</sup>. Svaki od tih pojedinih dijelova gubi, tako reći, svoju individualnost, jer mu povezanost sa sistemom sprečava, da vibrira onako, kako bi vibrirao, da je slobodan. Ta je pojava bila dobro poznata starim Kremonjanima“ (Kresnik, 1951).

Ono što je veoma zanimljivo je što gudački instrumenti aktivno prkose zakonu fizike koji nalaže da tijela istog agregatnog stanja lakše ulaze u korezonantni odnos. Pa tako čvrsta tijela lakše korezoniraju s čvrstim, plinovita s plinovitim, a tekuća s tekućima. „Zna se, da zvučni valovi, koji se inače lagano šire kroz čvrsta tijela, ne prelaze s njih podjednako lako na tekuće, a još manje lako na plinovito tijelo kao što je zrak“ (Kresnik, 1951). Ono što izdvaja gudačke instrumente van polja ove teorije je snaga kojom se zvučni valovi prenose s rezonirajuće ploče, odnosno cijelog akustičkog sistema na zrak unutar, a potom i van zračne komore.

Visina tona nastalog u zračnoj komori violine spomenutim korezonantnim odnosom ovisi o dužini i dubini rezonantne kutije, ali ne i o njenoj širini! Jedini parametri zavisni o širini jesu snaga i čistoća vlastitog tona. Tom spoznajom su se rukovodili stari majstori prilikom sužavanja gornjeg dijela korpusa instrumenta kako bi se olakšalo sviranje u višim pozicijama.

$C_1$  kao referentna vrijednost vlastitog tona violine proizašla je iz želje starih graditelja da nadopune dijapazon instrumenata onime koji bi odgovarao ulozi soprana čiji je prosječni raspon glasa od  $C_1$  do  $C_3$ . „Osnovicu tog opsega čini veličina larinksa i dužina glasnica, upravo kao što i glas violine zavisi od dužine tijela i od dužine žica. (...) Na koncu, za zvučnost violine posve je sporedno, da li je vlastiti ton njegove zračne komore intoniran sa  $C_1$  ili  $Cis_1$  ili čak  $A_1$  ili  $Ais_1$ . Važno je, da to odgovara dužini zračnog stupca, to jest dužini instrumenta: visina tona violine ne smije se osjetljivo ni povisivati ni snižavati mijenjanjem dubine zvučne kutije i širine odušaka“ (Kresnik, 1951).

---

<sup>3</sup> Nodalne linije su crte ili krivulje na materijalu koje miruju dok ostatak tijela vibrira.

## 5.12 Gredica

Ova višenamjenska instalacija, često napravljena od smrekovine, važan je dio simbiotskog titrajnog sustava violine koji se, uz žljebicu i dušicu, nalazi s unutrašnje strane instrumenta. Dimenzije gredice mijenjale su se kroz povijest radi opterećenja zvučnice, koje se također mijenjalo promjenama vrijednosti komornog tona.

Gredica u prvome redu poradi svoje napetosti daje zvučnici veću otpornost prema pritisku kobilice, koji djeluje na sredini, i protiv pritiska na njenim krajevima, koji potječe iz napetosti žica. Na taj se način znatno povećava elastična otpornost zvučnice, a to je od bitnog utjecaja na njenu osjetljivost i pokretljivost kao i na snagu i punoću zvuka.

Kad budemo raspravljali o kobilici, vidjet ćemo, da je u doba Stradivarija komorni ton bio mnogo dublji nego danas, pa je i pritisak kobilice na zvučnicu morao biti manji. Tako je i stara gredica mogla biti kraća i vitkija od nove.

Kad je 1859. odlučeno, da se komorni ton podigne na 435 titraja<sup>4</sup>, morale su se poradi znatnog pojačanja pritiska žica i kobilice povećati sve dimenzije gredice (Kresnik, 1951).

Radi povećanja dimenzija gredice ona više nije mogla jednako efektivno djelovati postavljena paralelno s longitudinalnom osi, stoga ju je struka počela postavljati ukošeno s obzirom na os. U oba slučaja ona mora prolaziti ispod lijeve nožice kobilice, a tamo je njena visina ujedno i najveća. Gredice talijanskih majstora, kao što je već rečeno, bile su kraće od onih koje se danas postavljaju. „Duljina, koju su upotrebljavali Kremonjani kretala se između 219 i 254 mm. Ipak i tada su se gradile dulje gredice i približavale se modernoj mjeri, ponekad ih čak i premašivale. (...) Najveće uobičajene normalne visine modernih gredica danas iznose: za violinu od 10 do 12 mm, što znači 28. odnosno 23. dio duljine“ (Kresnik, 1951). Treća dimenzija gredice je njena debljina koja je, iznenađujuće, bila i još uvijek je, vrlo standardizirana. „Ogledajmo malo debljine gredica najboljih starih talijanskih graditelja: vidjet ćemo, da su debljine postojane, prosječno 4,76 mm, te da nemaju nikakve veze s duljinom i visinom gredice. Pokatkad

---

<sup>4</sup> Komorni ton često je mijenjao svoju vrijednost tokom 18. i 19. stoljeća. Glazbena vilica, koja datira iz 1740. i koja se povezuje s Georgom Friedrichom Händelom osobno, ugođena je na 422,5 Hz. Razne varijante tona  $A_1$  su bile prisutne pa tako samo neke od vrijednosti iznose 403 Hz, 409 Hz i 432 Hz dok su neke glazbene vilice poput one Ludwiga van Beethovena iz 1800. bile ugođene na čak 455,4 Hz. Danas ta vrijednost više ne iznosi 435 Hz kako se navodi u citatu dr. Kresnika, već 440 Hz premda orkestri i solisti trenutno diljem svijeta sustavno pomiču tu granicu prema vrijednosti od 443 Hz.

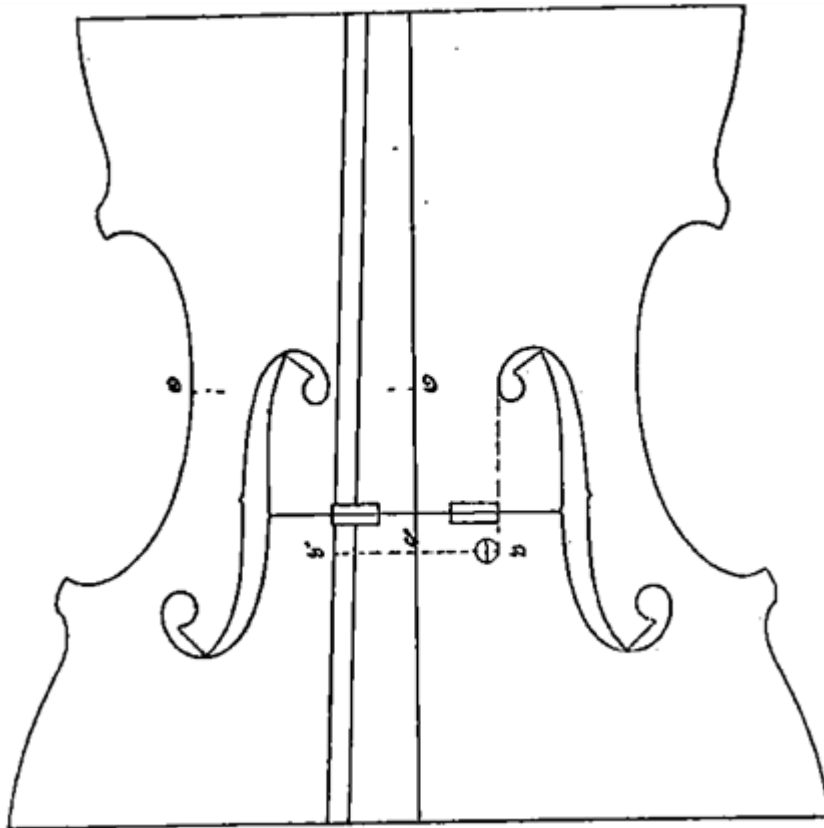
nailazimo na debljine od 5 mm, no debljinu od 4,76 mm treba smatrati normom“ (Kresnik, 1951).

### 5.13 Dušica

Posljednji element jezgrenog trojstva je dušica i vrlo je važna za sonornost, boju i snagu tona violine. Njena uloga i pravilno postavljanje dva su faktora zavisni jedno o drugome. „Zadatak dušice nije samo u tome, da ona na dno instrumenta prenosi zvučne valove pojačane zvučnicom udvostručujući na taj način površinu zvučne plohe. Njena je ne manje važna zadaća u tome, da pomaže stvaranje i dalje razvijanje stojnih valova na rezonantnim pločama i na kutiji violine kao i to, da pojačava harmonijske tonove, – a od njih zavisi sama zvučnost i karakter tona –, kako bi ih instrument lako i čisto reproducirao“ (Kresnik, 1951).

U njeno pravilno postavljanje treba uračunati i prethodno odrediti njenu egzaktnu duljinu kako bi, jednom postavljena, samo lagano dodirivala gornju i donju ploču istovremeno. Predugačka dušica rezultira pružanjem otpora zvučnici onemogućujući njezino slobodno vibriranje. Njezin smještaj računski određuje Kresnik (1951) objasnivši kako se stražnji rub dušice mora poklapati i s linijom položaja dušice. Polumjer dušice iznosi otprilike 6 mm, a udaljenost prednjeg ruba dušice i stražnjeg brida kobilice iznosi otprilike 6,5 mm. Cijeli izračun se svodi na određivanje polovine od dvanaestine duljine zvučnice, što upućuje na točan položaj dušice u smjeru longitudinalne osi. Položaj u transverzalnom smjeru određuje se spuštanjem okomice vanjskog ruba oka oduške na liniju kobilice, a ta okomica će dodirivati vanjski rub dušice. „Dušica regulira snagu i kakvoću tona violine, no ona je tako tijesno povezana s konstitucijom i individualnošću instrumenta, da je pokatkad potrebno odstupiti od navedenog načela. Uza sve to pravilo, koje smo maločas iznijeli, služi kao praktičan izlaz i kao polazna točka za eventualna sitna, katkad potrebna pomicanja dušice, iako će se u velikoj većini slučajeva postići pravilan položaj“ (Kresnik, 1951). Točna debljina dušice izvodi se ili iz desetine ukupne visine instrumenta ili promjera gornjeg oka oduške.

**Slika 5.13.a Položaj kobilice i dušice (Kresnik, 1951)**



Drvo za oblikovanje dušice mora biti isto kao i ono od kojeg je izgrađena zvučnica kako bi njezina funkcionalnost bila maksimalna. „Širina njegovih godova mora se općenito približavati širini godova drveta upotrijebljena za zvučnicu u blizini osi simetrije. Ono mora i raspolagati istim akustičkim osobinama vodljivosti zvuka kao i zvučnica“ (Kresnik, 1951).

## 5.14 Kobilica

Alternativnog, danas općeprihvaćenog, naziva konjić, kobilica je jedan od najvažnijih mehanizama instrumenta van njegovog korpusa. Ona prenosi slabe vibracije žica na rezonantne ploče, a uzročno-posljedično i na zračnu komoru instrumenta.

„Nazvati remek-djelom taj delikatni organ, koji prenosi zvuk, bilo bi malo, jer on na najprikladniji način ujedinjuje u sebi i estetski oblik s odličnim akustičkim osobinama.

I to sitno remek-djelo ostavili su nam kremonski majstori u obliku, koji se ne može dalje usavršavati“ (Kresnik, 1951).

Za utvrđivanje točnog položaja kobilice kao referenca se koriste unutrašnji zarezni odušaka, ona se postavlja u njihovoj razini. „Dio zvučnice iznad linije kobilice i onaj ispod nje stoje u odnosu 5:4“ (Kresnik, 1951). Nožice kobilice, prosječne debljine 4 mm, izložene su izvanredno velikom vlaku i pritisku žica s obzirom na svoje dimenzije. Iako oba navedena parametra ovise o vrsti žica, ugodbi komornog tona i visini kobilice, dr. Kresnik (1951) za primjer uzima žice srednje debljine, ugodbu frekvencije 435 Hz te adekvatnu visinu kobilice s obzirom na ispupčenost zvučnice.

**Tablica 5.14.a Vlak i pritisak žica na kobilicu (Kresnik, 1951)**

| Žice   | Vlak žica u kg | Pritisak žica u kg |
|--------|----------------|--------------------|
| e      | 8,16           | 3,62               |
| a      | 6,11           | 2,72               |
| d      | 4,98           | 2,20               |
| g      | 4,53           | 2,00               |
| Ukupno | 23,78 kg       | 10,54 kg           |

Prema ovome modelu izračuna nožica kobilice ispod **g** žice trpi pritisak vrijednosti 4,63 kg, a nožica ispod e žice vrijednost od 5,91 kg, a sveukupni pritisak žica iznosi 4/9 njihovog sveukupnog vlaka. Osim što ovisi o vrsti žica i ugodbi, pritisak žica o kobilicu čimbenik je zavisna i o visini kobilice, dok je njena visina zavisna o ispupčenosti zvučnice.

Violine s visokom ispupčenošću zahtijevaju nisku kobilicu; i obratno, spljoštenijim violinama potrebna je viša kobilica.

Visoke kobilice uvećavaju napon žica pa i pritisak na zvučnicu, koji iz toga napona potječe. Stoga se one upotrebljavaju za deblje zvučnice.

Uporedo s povećanjem visine kobilice do određene granice ton postaje jači, ali i oporiji: ako se s visinom pretjera, ton ponovo slabi. Naprotiv, ako se smanji visina, kobilica postaje kruća, a zvuk opor (Kresnik, 1951).

Širina kobilice pri svojem vrhu ovisi o razmaku pojedinih žica, a njezina širina u bazi kod nožica ekvivalent je udaljenosti između unutarnjih rubova gornjih oka odušaka. „Na taj je način iskorišten čitav dio grudi“ (Kresnik, 1951).

Masa kobilice u prosjeku iznosi 2 do 3 grama, a potrebno je obratiti pozornost i na njenu debljinu, čija se točna vrijednost može zadati samo urezivanjem proreza.

Debljina kobilice nije ravnomjerno raspoređena i ovisno o rasporedu debljine zavisi kvaliteta osnovnog tona i njegovog harmonijskog spektra. Prorezi kao naizgled estetska intervencija uistinu nisu samo to, već služe kao inkubator u kojemu se svi spomenuti elementi podržavaju u svojim vrijednostima nužnim za pravilan, maksimalno efektivan način rada.

Prorezi u prvom redu reguliraju težinu kobilice i eliminiraju mrtvu težinu suvišnog drveta. (...)

Prorezi na različitim mjestima ravnomjerno prekidaju longitudinalno tkivo (žicu drveta). Na taj je način krutost i elastičnost kobilice bez smanjivanja njene nosivosti svedena na nužni minimum. Kako za prijenos tako i za kvalitetu tona, od izvanredne je važnosti ne samo točan položaj proreza, nego i njihova veličina (Kresnik, 1951).

## 5.15 Drvo

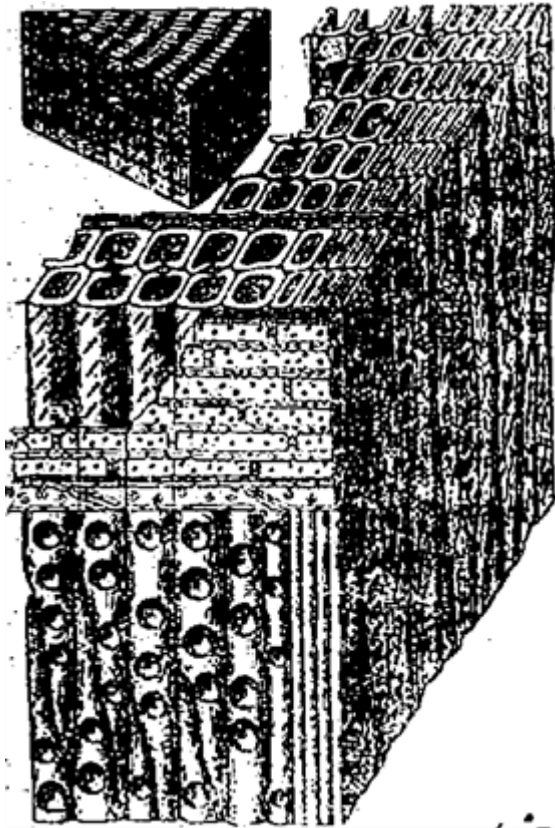
Kako bi se razjasnila uloga drva i njegova odnosa s kvalitetom tona instrumenta, potrebno je sagledati drvo iz njegovog biološkog aspekta. Fokus ovog poglavlja bit će elaboracija karakteristika četinjača jer, osim što su one temeljni građevni materijal violine, njihova građa je jednostavna i jasna. „Građa lišćara je malo složenija, iako se kemijska i fizička svojstva jedne i druge grupe u glavnom podudaraju“ (Kresnik, 1951).

Godovi, osim što mogu biti indikator starosti drva, imaju i svoje akustičke karakteristike. Jedni su svjetliji, što odgovara periodu proljetnog drva, a drugi tamniji, što odgovara periodu jesenjeg drveta. „Proljetno drva razvija se u vremenu od proljeća do jeseni, porozno je i meko; ono zauzima veći dio godišnjeg prstena. Vodljivost zvuka veća je u poroznog proljetnog nego kompaktnijeg jesenjeg drveta. (...) Što je zona jesenjeg drveta jednoličnija i uža, to je vodljivost veća. Teže drvo ujedno je i manje zvučno. (...) Učešće zona jesenjeg drveta odgovara 1/5 do 1/4 širine godišnjeg prstena. Drvo, čiji su prstenovi široki od 1 do 1½ mm, naročito je podesno za zvučnice violina“ (Kresnik, 1951). „Ta činjenica neobično je važna, jer se zna, da su širina godova i učešće zone kasnog drveta najbolje makroskopsko mjerilo za volumnu težinu drveta, a po njoj i za elasticitet i brzinu zvuka“ (Ugrenović, 1951).

Anatomska građa drva inače je zasebna botaničko-tehnička disciplina anatomije drva. Svako drvo ima jedinstvenu anatomsku strukturu, a njezin presjek se proučava

mikroskopski ili golim okom iz tri različite perspektive: poprečni, uzdužni radijalni i uzdužni tangencijalni presjek.

**Slika 5.15.a Presjek četinjačavog drveta u frontalnoj, radijalnoj i tangencijalnoj ravnini (Kresnik, 1951)**



Drvena masa konifera<sup>5</sup> sastavljena je od traheida, koje istovremeno vrše i fiziološki (hranjenje) i mehanički zadatak (čvrstoću). Duljina traheida iznosi od 2,6 mm do 5 mm, a širina 0,025 do 0,075 mm; oblik im je vretenast ili prizmatski. Njihovi poprečni profili nalikuju na paralelograme, koji se prema jesenjem drvetu sve više spljoštavaju. Traheide saobraćaju međusobno preko sitnih otvora, koji se nazivaju jazići. Oni su ili jednostavni ili ograđeni, što je vrlo važno za kretanje vode.

Sržni traci sastoje se od nekoliko redova pravilnih prizmatskih duguljastih stanica raspoređenih u drvoj masi debla u radijalnom smjeru (vidi slike). Sržni trakovi četinjačavog drveta vrlo su tanki, što je od velike važnosti za cjepljivost, čvrstoću i finoću drveta. Zbog radijalnog smjera sržni trakovi umanjuju svojstvo utezanja drveta.

Dakle, drveno se tkivo sastoji od dvije različite grupe, anatomskih elementa; to su longitudinalne traheide i radijalno (transverzalno) smješteni sržni trakovi. No longitudinalno tkivo čini sa sržnim tracima jedinstvenu mrežu. (...)

Smolni su kanali međustanične žile cilindarskog oblika, koji u jelovini (*Abies pectinata* D.C.) teku horizontalno, a u smrekovini (*Picea excelsa* L.K.) horizontalno i vertikalno.

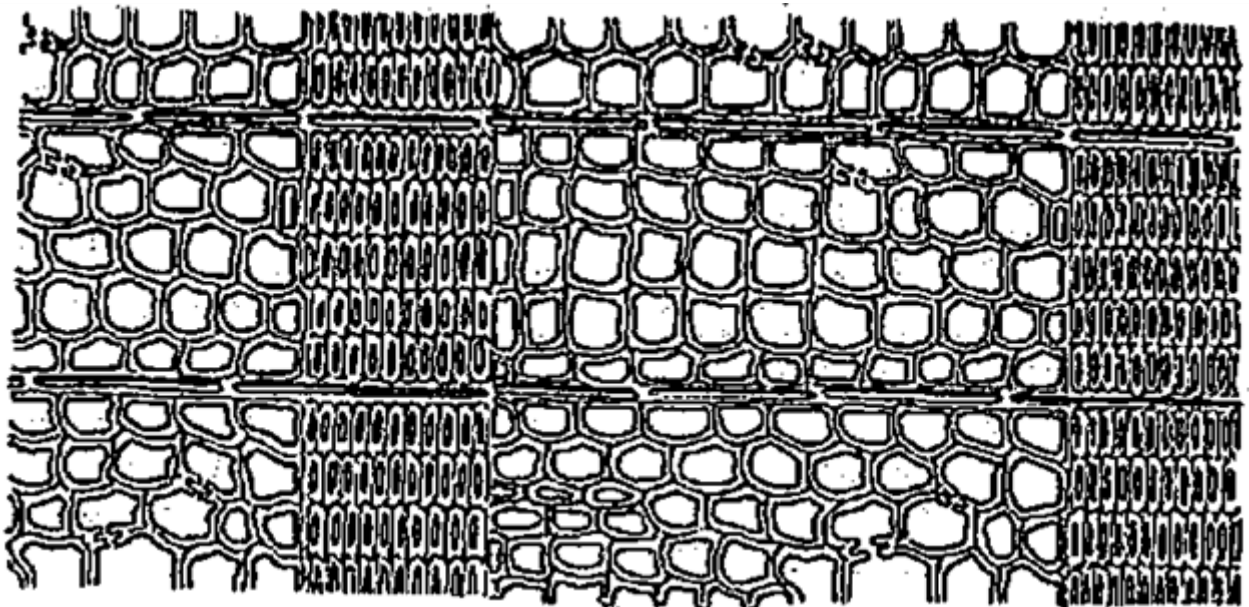
---

<sup>5</sup> Četinjača

Zbog relativno jednostavne i jednolične građe konifera, koje su građene samo od traheida, sržnih trakova i malo parenhimskog tkiva, četinjari imaju naročit kvalitet kao drvo za rezonanciju, zahvaljujući tu upotrebljivost izvanrednoj vodljivosti za zvuk u longitudinalnom smjeru.

Kemijski sastav drveta od najveće je važnosti za njegovu kakvoću. Kemijske supstance, koje se susreću u strukturi drveta mogu se podijeliti u tri grupe: 1. supstancije, koje tvore stanične stijenke (celuloza i lignin); 2. popratne supstancije (smola, masti, šećer, škrob, ulja, tanin), 3. voda (Kresnik, 1951).

**Slika 5.15.b Poprečni presjek četinjavog drveta (Kresnik, 1951)**



Celuloza kao najrasprostranjeniji ugljikov spoj na Zemlji čini i najveći dio drvene strukture, od 40 do 50% ukupnog sastava ovisno o vrsti drva, a nastaje kao nuspojava fotosinteze. Lignin je uz celulozu također glavni sastojak drva te, ovisno o vrsti, može činiti od 15 do 35% ukupnog sastava. On, može se reći, poput cementa povezuje celulozna vlakna u vrlo čvrstu izvanstaničnu strukturu. Proces sinteze lignina i njegova pohranjivanja na unutarnju stranu celulozne stijenke naziva se lignifikacija, a ta novonastala celulozno-ligninska struktura drvu omogućava veliku čvrstoću.

„Meko drvo, naročito jelovina, bogatije je celulozom od tvrdog drveta. Celuloza je vrlo otporna prema kemijskim supstancama, a donekle i prema živim organizmima.



Mikroorganizmi ponajčešće, uništavaju lignin, a celulozu ostavljaju netaknutu“ (Kresnik, 1951).

Osim što je glazbenoj struci već poznat njezin derivat kolofonij (kalofonij), koji služi za povećanje trenja struna na gudalu za lakše pobuđivanje žice, smola je također jedna od esencijalnih tvari i za liuteriju. „Za nas je od neobične važnosti činjenica, da u stanične zidove, dok su ispunjeni vodom, smola ne može prodrijeti. Oni će smolu apsorbirati tek pošto se posve osuše i osmole; taj se proces, međutim, odvija prilično brzo.

Smola daje drvetu izvjesnu tvrdoću; zahvaljujući smoli drvo je trajnije, ali i krhkije“ (Kresnik, 1951).

Dugotrajno uvjerenje kako važnu ulogu u kvaliteti drva igraju i šećeri oboreno je raznim eksperimentima prvom polovicom 20. stoljeća, međutim, sadržaj škroba vrlo je relevantan utoliko što povećava tvrdoću drva. „Drvo oboreno u zimsko doba ima više škroba; insekti napadaju drvo radi škroba“ (Kresnik, 1951).

Posljednja najznačajnija tvar o kojoj ovisi korisnost drva za izgradnju instrumenata jest voda, koja u drvu nije kemijski čista. Sadržaj i količina vode ovise o tekućem godišnjem dobu i od velike su važnosti za trajnost drveta. Previše vode može pogodovati razvoju gljivica, što rezultira raspadanjem i razaranjem stanične strukture drva. „Dvije trećine te vode slobodne su i nalaze se u sudovima, jedna trećina upijena je u staničnim zidovima.

Pri sušenju drveta izlazi najprije slobodna voda, takozvana fiziološka voda, a tek kasnije voda, koja se nalazi u staničnim elementima, takozvana higroskopska voda“ (Kresnik, 1951).

Prilikom sušenja drvo se smanjuje i gubi na svojim dimenzijama i obujmu, a taj se proces naziva utezanje drva. „Polagano i prirodno sušenje drveta treba pretpostavljati brzom i umjetnom sušenju, koje uzrokuje veća razaranje u drvnim vlaknima, a sve na uštrb provodljivosti zvuka“ (Kresnik, 1951).

Razina prosušenosti drva je također faktor provodljivosti.

Smole, masne tvari i sve supstancije, koje nemaju jednaku vibracijsku sposobnost kao i drvo, smanjuju njegovu vodljivost.

Lakiranjem violina mijenja se i vodljivost zvučnice; stoga je od posebne važnosti, da lak bude pravilno načinjen i da nikako ne ulazi u supstanciju drveta.

Smolaste supstancije apsorbirane u staničnim stijenkama oksidiraju i pojačavaju njihovu napetost, to znači pojačavaju vibracijsku sposobnost i rezonanciju, olakšavaju valovima zvuka prolaženje. Naravno, radi se tu o malim količinama, posebno pak u smrekovini i jelovini, koje po svojoj prirodi ne obiluju smolastim materijalima. Naročito je smrekovina podesna za građenje violina; ostale vrste te obitelji, koje sadržavaju više smolastih materija, nisu tako podesne (Kresnik, 1951).

Kad je riječ o drvetu za rezonanciju, prvo pitanje, koje se nameće jest: gdje leži osnovni uzrok, da se građenje violina javilo najprije u Sjevernoj Italiji i ondje doseglo svoje savršenstvo? Za najstarija ognjišta umijeća Kremonu i Brešu u Italiji – jednako kao i za ostala evropska: Mirécourt i Madon u Francuskoj, Füssen i Mittenwald u Bavarskoj, Markneukirchen u Saskoj, Schönbach u Češkoj – vrijedi isti osnovni geografski činilac: blizina smrekovih i jelovih šuma. Za Italiju to su bile alpske regije smreke. Dakle, drvo, odnosno šuma, dala je već u prvim počecima osnovni smjer razvoju umijeća u građenju gudačkih instrumenata (Ugrenović, 1951).

O brzini zvuka u različitim materijalima već je bilo govora u uvodnom dijelu poglavlja o osnovnim značajkama fizike zvuka, međutim, različita drva različitim brzinama provode zvučne valove, stoga drvo kao medij za prijenos zvučnih valova zahtijeva zaseban pristup.

**Tablica 5.15.a Brzina rasprostiranja zvuka (Ugrenović, 1951)**

| <b>Materijal</b>          | <b>Brzina zvuka</b> |
|---------------------------|---------------------|
| Javor ( <i>Acer</i> )     | 3.990 m/s           |
| Hrast ( <i>Quercus</i> )  | 4.240 m/s           |
| Jasen ( <i>Fraxinus</i> ) | 4.330 m/s           |
| Topola ( <i>Populus</i> ) | 4.630 m/s           |
| Bukva ( <i>Fagus</i> )    | 4.810 m/s           |
| Smreka ( <i>Picea</i> )   | 5.050 m/s           |
| Jela ( <i>Abies</i> )     | 5.280 m/s           |

Ubrzo se empirijom utvrdilo da je homogenost i izotropnost razmjerno najveća kod smrekovine. I stvarno sva tehnika građenja gudačkih instrumenata četiri stotine godina sve do danas upotrebljava isključivo smrekovinu (*Picea excelsa Lnk*). (...)

Brzina kojom smrekovina provodi zvuk, zavisi od njena velikog elasticiteta i vrlo malene volumne težine. Ako se za osnovicu poređenja uzmu jednake težine smrekovine i čelika, elasticitet smrekovine je za neka 24% veći od elasticiteta najboljeg čelika. Budući da – po shvaćanju akustike – brzina zvuka nije drugo nego kvocijent elasticiteta i volumne težine, razumljivo je, da drvo, a naročito smrekovina, po vodljivosti za zvuk stoji na prvom mjestu. (Ugrenović, 1951).

Komparacijom već znanih podataka može se ustvrditi kako u longitudinalnom smjeru kroz smrekovinu zvuk putuje 15 puta brže nego kroz zrak. „U transversalnom smjeru, to jest okomito na smjer trahejida ta brzina čini 1/5 do 1/2 one iskonske, dakle circa 1000 m kao donja granica“ (Ugrenović, 1951).

Unatoč općem znanju o kakvoći smrekovine, nije svejedno gdje ona izrasta i o kojoj se vrsti točno radi. Naime, ona mora izrasti u određenim uvjetima kako bi zadovoljila kriterije nužne za kvalitetnu gradnju instrumenata.

Smrekovina za rezonanciju može se naći samo u njenoj prirodnoj biljno-geografskoj regiji i pod prirodnim ekološkim uvjetima. To znači u šumskim masivima sa nekih 1.100 – 1.500 m nadmorske visine, koji nisu poremećeni zahvaćanjem čovjeka. Njena je domena planinska prašuma u dobi od 150 do 200 godina. Ne ulazi u obzir smrekovina iz šuma, koja je u toku prošlih stoljeća umjetnim uzgajanjem potisnuta s planina na niže položaje ili čak u nizine.

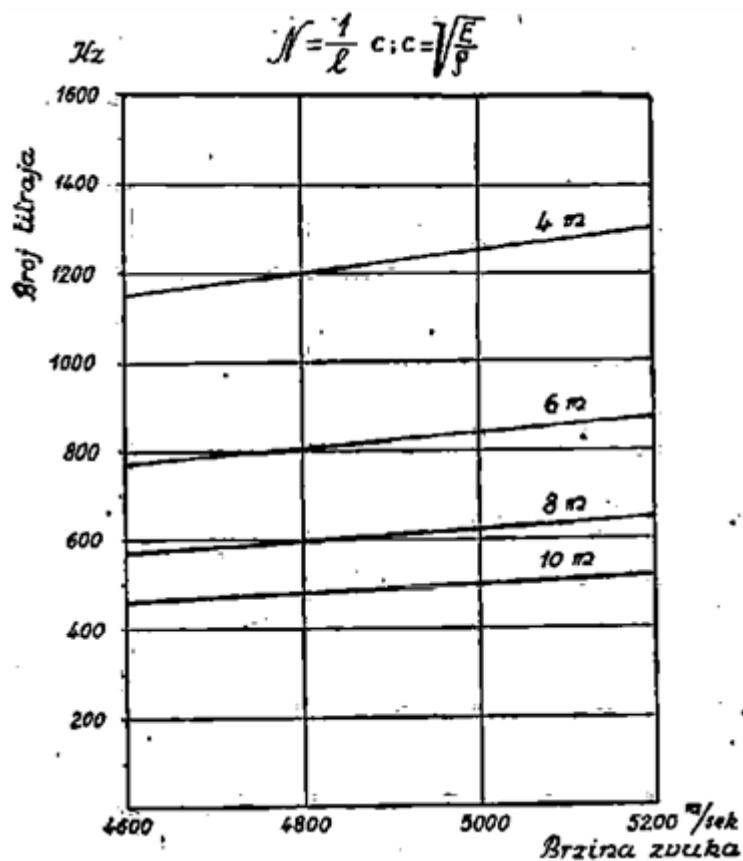
No ni sva planinska smrekovina iz rečene visinske regije, dobi i načina uzgajanja ne smatra se jednako vrijednom. Najviše se cijeni tzv. smreka lještarka, koja pokazuje neobičnu uleknutost godova u smjeru radijalnom, jasno uočljivu na periferiji i na poprečnom presjeku (Ugrenović, 1951).

Pri traženju i odabiranju kvalitetne smrekovine graditelji gudačkih instrumenata, stari empirici, služili su se i auditivnim načinom u šumi i u radionici.

Još donedavno smrekovi trupci spuštali su se snagom gravitacije po uskim drvenim žljebama (točilima, rižama) s planine u dolinu. Za vrijeme klizanja trupci se taru o drvene stijene žljebe, proizvode ton određene frekvencije. Graditelji gudačkih

instrumenata kontrolirali su visinu toga tona i iz nje zaključivali o upotrebljivosti drveta (Ugrenović, 1951).

**Slika 5.15.c Odnos broja titraja spram brzine zvuka i dužine trupca (Ugrenović, 1951)**



Ako pretpostavimo, da je  $l$  bio jednak, a brzina zvuka različita (4.600, 4.800, 5.000, 5.200 metara u sekundi), visina proizvedenog tona kretala se u intervalu sekunde ili terce. Dakle, stari graditelji mogli su s punim opravdanjem zaključivati: što je viši ton, to je veća brzina rasprostiranja zvuka, to bolji je stupanj upotrebljivosti trupca za građenje gudačkih instrumenata. Znači, postupak empirije bio je u skladu s naukom. (Ugrenović, 1951).

Slika 5.15.d Odnos visine tona spram brzine širenja zvuka i dužine trupca  
(Ugrenović, 1951)



Nažalost, poput većine materijala, i lignin i celuloza unutar drva izloženi su i sklone procesu oksidacije, što u konačnici rezultira tamnjenjem drveta.

Taj proces utječe na lijepu, plemenitu boju starih kremonskih instrumenata, boju, koja se ne može postići nikakvim umjetnim sredstvima. Toj boji divimo se i kao izvanrednoj osnovici čudesnog kremonskog laka.

Tim polaganim, ali nezaustavljivim procesom oksidacije komponente drvene supstancije pretvaraju se u „huminske“ supstancije i započinje razaranje drveta. To je stanje u kojem se sad nalaze stari kremonski instrumenti. Nažalost približava se dan kad će ta remek-djela otpjevati svoj labuđi pjev.

Naravno, taj sam po sebi polagani proces usporen je lakiranjem i brigom oko instrumenata; on negdje može trajati tri do četiri stotine, u pojedinim slučajevima i do tisuću godina (Kresnik, 1951).

## 5.16 Stari talijanski lak

Teško je govoriti o kemijskom sastavu starog talijanskog laka budući da je njegova tajna ostala zapečaćena u ondašnjem periodu ljudske povijesti i povijesti umjetnosti kao obiteljska tajna graditelja. Analizom laka donekle se može utvrditi što točno čini njegov sastav, međutim, za ovo istraživanje ipak su relevantnije informacije o njegovim estetskim, akustičkim i mehaničkim svojstvima.

Iz estetskog aspekta ono što krasí talijanski lak je ljepota, nježnost i sjaj koji se iščitavaju iz njegove prozirnosti, a opipom je tekstura slična baršunu i vosku. „Smjesa smola, koja ga sastavlja, dodaje njegovoj mekoći i elastičnosti znatnu žilavost; otuda mu otpornost protiv svakog kvarenja“ (Kresnik, 1951). Ono što fascinira je njegova nevjerojatna, vrlo konzistentna, otpornost vanjskim utjecajima poput hladnoće i topline i to kroz period od čak 300 i više godina. „Jedna je od najznačajnijih osobina starog kremonskog laka, koji je star nekoliko stoljeća, da je on u potpunosti izdržao svoju originalnu plastičnost. Ta je činjenica unatoč nježnoj strukturi tog laka jasan znak njegove otpornosti; ona ukazuje na to, da je njegovo otapalo bilo sastavljeno od eterskih ulja“ (Kresnik, 1951).

Za zvučnost rezonantnih ploča jedna od najvažnijih karakteristika laka koje on mora zadovoljiti je ona akustičke prirode, a to je njegova elastičnost. „Takav lak ne šteti prirodnoj vibracijskoj sposobnosti, lako preuzima titraje i ne remeti početnu rezonanciju ploča“ (Kresnik, 1951).

U konačnici on služi kao svojevrsna zaštita drva od vanjskih utjecaja poput spomenute temperature, ali i vlage. „Kutija je izložena ne samo utjecaju vlage zraka, već i vlage, koja bje iz tijela sviračeva (pluća, ruku, lica). Na taj vanjski utjecaj reagira drvo kao higroskopsna i anizotropna tvar uvećanjem dimenzija (bubrenjem), naročito onih u transversalnom smjeru, i slabljenjem elastičnosti i vodljivosti drveta za zvuk“ (Ugrenović, 1951).

## 6. Spektralna analiza zvučnog vala violine

Za determinaciju i mjerenje nekih auditivnih karakteristika instrumenta, ponajviše njegovog harmonijskog spektra, postoje razni moćni digitalni alati. Spektrogram, kao jedan od njih, razlaže složeni zvučni val Fourierovom analizom na sve njegove osnovne komponente, odnosno pribrojnice, a to su sinusoide. Drugim riječima, spektrogram ocrta sve frekvencije prisutne u spektru snimljenog materijala počevši od subaliquotnih tonova ili fundamentalnog tona do njegovog najvišeg alikvota. Iako matematika nalaže kako se trzajem žice hipotetski stvara beskonačan niz harmoničkih parcijala, oni su u praksi ipak ograničeni svojim intenzitetom. Naime, što je harmonik viši, intenzitet mu je manji u odnosu na prethodni harmonik. Ovo obrnuto proporcionalno svojstvo harmonika računalnom programu omogućuje razlučivanje i filtriranje intenzivnih i manje intenzivnih harmoničkih parcijala ovisno o njihovoj jačini unutar dBFS (*decibels relative to full scale*) skale. Također, frekvencijska razlika između harmonika može se prikazati do razine jednog centila<sup>6</sup>.

Spektrogram će precizno prikazati frekvencijski sastav odsviranih tonova na violini uz njihove vrijednosti i intenzitete. U istraživanje su uključene četiri violine i njihove izvedbe praznih žica, praznih žica *sul tasto*, praznih žica *sul ponticello*, praznih žica s metalnom sordinom, prirodnih oktavnih flažoleta te praznih žica *pizzicato*. Korištene su žice bečke tvornice *Thomastik – Infeld* modela *PI (Peter Infeld)* te *Dominant*, a komorni ton je podešen na 440 Hz. Violine su snimane mikrofonom modela *AKG C414 XLS* i *DPA 4015*, a signal je procesiran u računalnom programu *VoceVista Video Pro*.

---

<sup>6</sup> Sto centila čini poluton temperiranog sustava.

## 6.1 Bartolomeo Obici, Verona 1710.

Iako nije riječ o Cremoni, Obici je sjajan primjer talijanske gradnje i svih onih epiteta i superlativa koje ona generalno zaslužuje. Snaga tona, njegova nosivost i manifestacija u prostoru parametri su superiorniji onima ostalih violina u ovome istraživanju. Iako bi se boja tona mogla okarakterizirati kao pomalo nazalna, njezina kvaliteta, bogatstvo i snaga projekcije onemogućuju negativnu percepciju tog, inače nepoželjnog, epiteta. Za snimanje su korištena dva seta žica modela *PI* (*Peter Infeld*), jedan star 4 mjeseca te drugi potpuno nov.

**Slika 6.1.a Bartolomeo Obici, Verona 1710.**





**Slika 6.1.b Bartolomeo Obici, Verona 1710.**



**Tablica 6.1.a Mjere violine Bartolomea Obicija iz 1710.**

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Duljina zvučnice/dna                | 357 mm |
| Gornja širina korpusa               | 163 mm |
| Srednja širina korpusa              | 104 mm |
| Donja širina korpusa                | 199 mm |
| Visina gornjih bočnica              | 29 mm  |
| Visina srednjih bočnica             | 30 mm  |
| Visina donjih bočnica               | 30 mm  |
| Debljina zvučnice kod lijeve oduške | 2,5 mm |
| Debljina zvučnice kod desne oduške  | 3 mm   |
| Udaljenost kobilice od vrha         | 193 mm |
| Udaljenost kobilice od dna          | 160 mm |
| Udaljenost između odušaka           | 74 mm  |
| Širina odušaka kod ureza            | 6 mm   |
| Promjer gornjeg oka                 | 6 mm   |
| Promjer donjeg oka                  | 8 mm   |

## 6.2 Joseph Ceruti, Mantova 1845.

Težak, trom, ali izrazito nosiv i snažan ton tamnije boje ovog prekrasnog instrumenta korespondira s njegovim malo većim dimenzijama. Unatoč tome što nije izrađen u Cremoni, on ipak predstavlja nasljeđe starotalijanske kremonske škole gradnje instrumenata. Naime, Ceruti se na svojim instrumentima potpisuje kao Joseph Ceruti filius Joannis Baptistae Cremonensis. Za vrijeme snimanja instrumenta korištene su žice modela *Dominant*.

**Slika 6.2.a Joseph Ceruti, Mantova 1845.**





**Slika 6.2.b Joseph Ceruti, Mantova 1845.**



**Tablica 6.2.a Mjere violine Josepha Cerutija iz 1845.**

|                                     |          |
|-------------------------------------|----------|
| Duljina zvučnice/dna                | 358 mm   |
| Gornja širina korpusa               | 163,5 mm |
| Srednja širina korpusa              | 112 mm   |
| Donja širina korpusa                | 202 mm   |
| Visina gornjih bočnica              | 32 mm    |
| Visina srednjih bočnica             | 31 mm    |
| Visina donjih bočnica               | 32,5 mm  |
| Debljina zvučnice kod lijeve oduške | 3 mm     |
| Debljina zvučnice kod desne oduške  | 3 mm     |
| Udaljenost kobilice od vrha         | 194 mm   |
| Udaljenost kobilice od dna          | 163 mm   |
| Udaljenost između odušaka           | 83 mm    |
| Širina odušaka kod ureza            | 7 mm     |
| Promjer gornjeg oka                 | 8 mm     |
| Promjer donjeg oka                  | 11 mm    |

### 6.3 Joseph Bausch, Weimar 1911.

Ovaj instrument vrlo oštrog i sonornog tona primjer je njemačke gradnje instrumenata koji se svojom snagom tona može usporediti onoj Obicijeve violine. Modelirana je prema Giuseppe Guarneri del Gesù tipu konstrukcije. Specifičnog je intenziteta  $d_1$  žica koja rezonira vrlo bogatim i punim tonom. Prilikom snimanja violine korištene su žice modela *PI* (*Peter Infeld*).

Slika 6.3.a Joseph Bausch, Weimar 1911.





Slika 6.3.b Joseph Bausch, Weimar 1911.



Tablica 6.3.a Mjere violine Josepha Bauscha iz 1911.

|                                     |          |
|-------------------------------------|----------|
| Duljina zvučnice/dna                | 355 mm   |
| Gornja širina korpusa               | 164,5 mm |
| Srednja širina korpusa              | 111 mm   |
| Donja širina korpusa                | 204 mm   |
| Visina gornjih bočnica              | 28 mm    |
| Visina srednjih bočnica             | 28 mm    |
| Visina donjih bočnica               | 30 mm    |
| Debljina zvučnice kod lijeve oduške | 2 mm     |
| Debljina zvučnice kod desne oduške  | 2,5 mm   |
| Udaljenost kobilice od vrha         | 195 mm   |
| Udaljenost kobilice od dna          | 160 mm   |
| Udaljenost između odušaka           | 79 mm    |
| Širina odušaka kod ureza            | 7,5 mm   |
| Promjer gornjeg oka                 | 7,5 mm   |
| Promjer donjeg oka                  | 11 mm    |

#### 6.4 Frédéric Fantova, Farini 2013.

Ovaj atipični oblik violine pobija mnoga obrađena i utvrđena graditeljska načela. Konstruirana je prema formi koju je osmislio francuski graditelj François Chanot (1788. – 1825.), a specifična je po tome što nema rubova pa tako korpus instrumenta vizualno liči onome gitare. Također, ima pojednostavljene oduške bez očiju, koje umjesto slovu *f* više sličje izvornim oduškama u obliku slova **C**. Posljednja i vrlo očita modifikacija je ona estetskog karaktera, a to je smjer namotaja puža koji je potpuno suprotan tradicionalnoj konstrukciji. Premda oku ugodna i interesantna, njezin je ton vrlo trom, tamnije je boje i nazalnog je karaktera, a te karakteristike vrlo vjerojatno duguje svojim uvećanim širinama korpusa instrumenta. Za vrijeme snimanja korištene su žice modela *PI* (*Peter Infeld*).

**Slika 6.4.a Frédéric Fantova, Farini 2013.**



**Slika 6.4.b Frédéric Fantova, Farini 2013.**



**Tablica 6.4.a Mjere violine Frédérica Fantove iz 2013.**

|                                     |         |
|-------------------------------------|---------|
| Duljina zvučnice/dna                | 356 mm  |
| Gornja širina korpusa               | 170 mm  |
| Srednja širina korpusa              | 113 mm  |
| Donja širina korpusa                | 209 mm  |
| Visina gornjih bočnica              | 31 mm   |
| Visina srednjih bočnica             | 31 mm   |
| Visina donjih bočnica               | 32 mm   |
| Debljina zvučnice kod lijeve oduške | 3 mm    |
| Debljina zvučnice kod desne oduške  | 3 mm    |
| Udaljenost kobilice od vrha         | 196 mm  |
| Udaljenost kobilice od dna          | 160 mm  |
| Udaljenost između odušaka           | 62,5 mm |
| Širina odušaka kod ureza            | 8 mm    |
| Promjer gornjeg oka                 | /       |
| Promjer donjeg oka                  | /       |

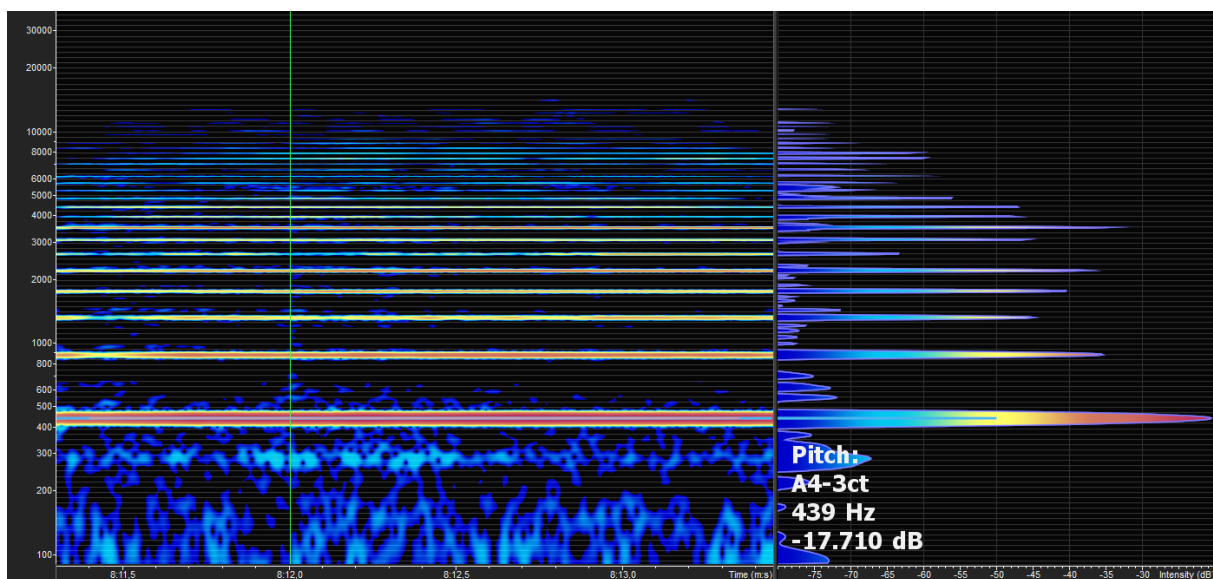
## 6.5 Gibanje amplitude parcijala kroz vrijeme

Svaki nesintetski zvuk na razne se načine mijenja kroz svoje vrijeme trajanja. Uz tonsku ovojnici koja definira promjenu forme zvučnog vala kroz vrijeme, mogući promjenjivi parametri su frekvencija, amplituda, sadržaj harmonijskog spektra, ali i amplitude parcijala harmonijskog spektra. Ta kontinuirana promjena amplitude rezultat je neperiodičkog superpozicioniranja sinusnih valova koji putuju kroz materijal instrumenta. Upravo to nepredvidivo gibanje amplitude svakog parcijala zasebno uzrokuje prirodni i organski ton violine kakvim se on smatra, a u konačnici i percipira.

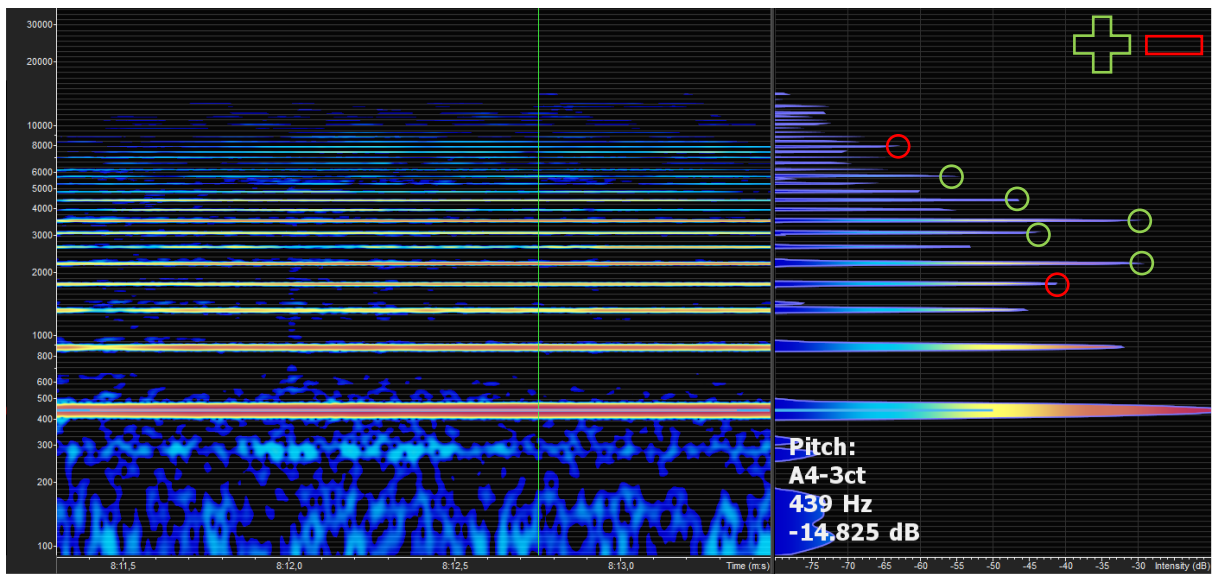
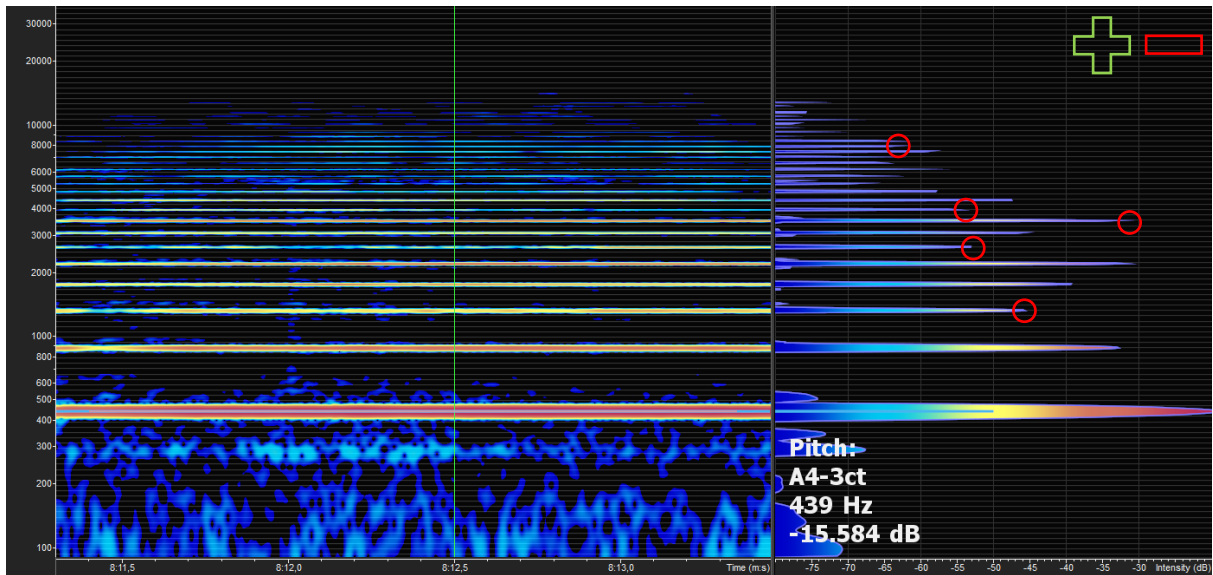
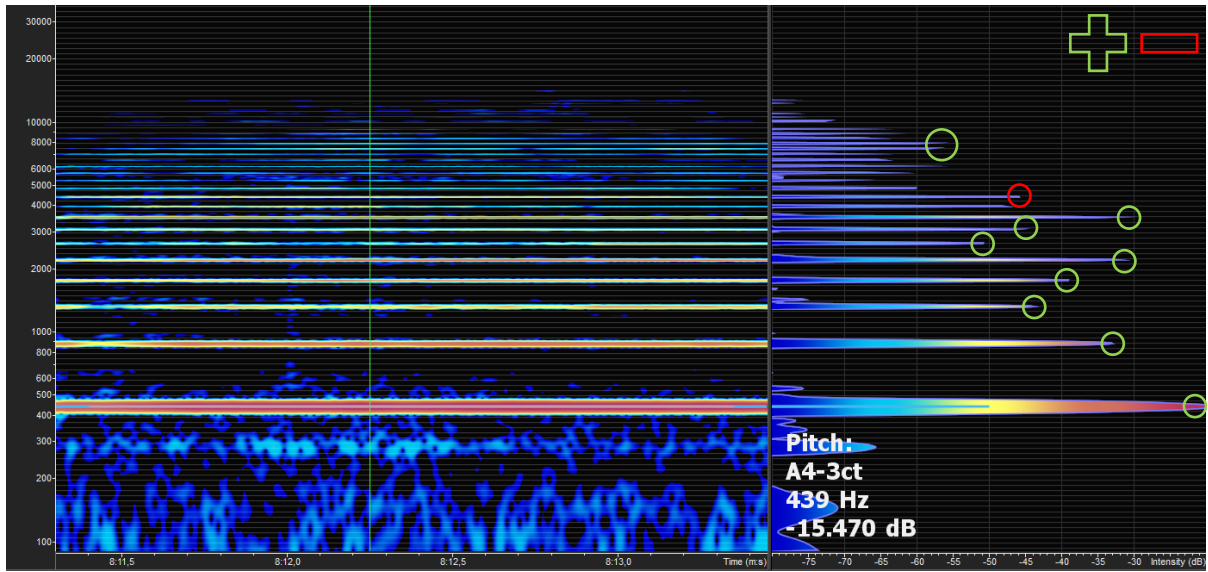
Bitno je napomenuti kako se te amplitudne promjene parcijala odvijaju iznimno velikom brzinom, s time da se amplitude parcijala gibaju potpuno neovisno jedna o drugoj. Iako oscilacije amplitude istog parcijala ne izlaze van okvira specifičnog za tu tonsku visinu i način izvođenja, svaka značajna promjena barem jednog od dva navedena parametra prouzročiti će radikalnu promjenu sastava harmonijskog spektra.

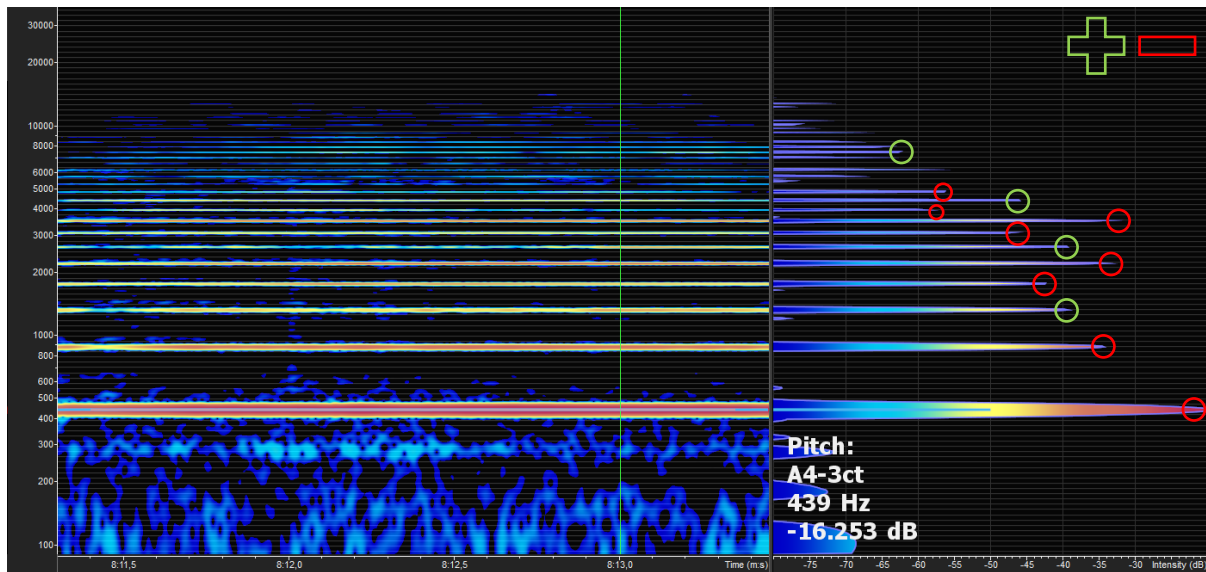
Kao primjer gibanja amplitude, odnosno intenziteta parcijala, priložen je obrađeni uzorak u vremenskom trajanju od 1 sekunde. Crvenom bojom označen je pad, a zelenom rast intenziteta parcijala u odnosu na njihovu prethodnu poziciju u vremenu.

**Slika 6.5.a Gibanje amplitude parcijala prazne  $a_1$  žice kroz period od jedne sekunde, Obici 1710., nove žice**







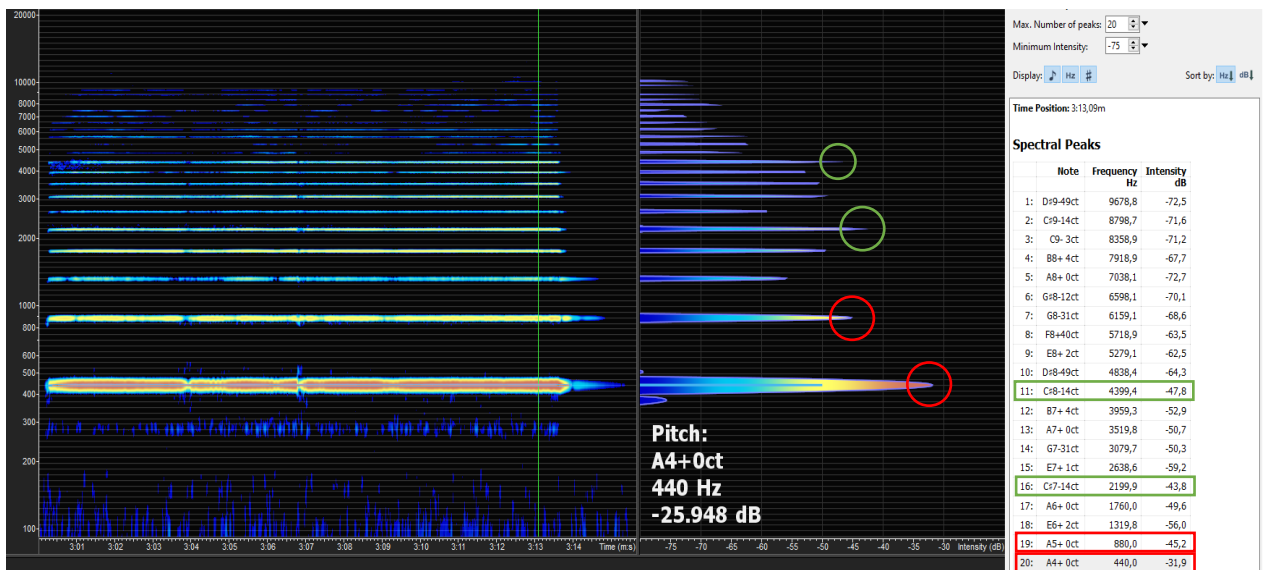


Nekim parcijalima u trenutku intenzitet pada ili raste, dok se nekima uopće ne mijenja. Gibanje amplitude parcijala događa se već na razini jedne stotinke, međutim, u ovome istraživanju prikazat će se određeni trenutci spektra u vremenu koji će se prezentirati kao prosjek svih vrijednosti tog tona i/ili artikulacije.

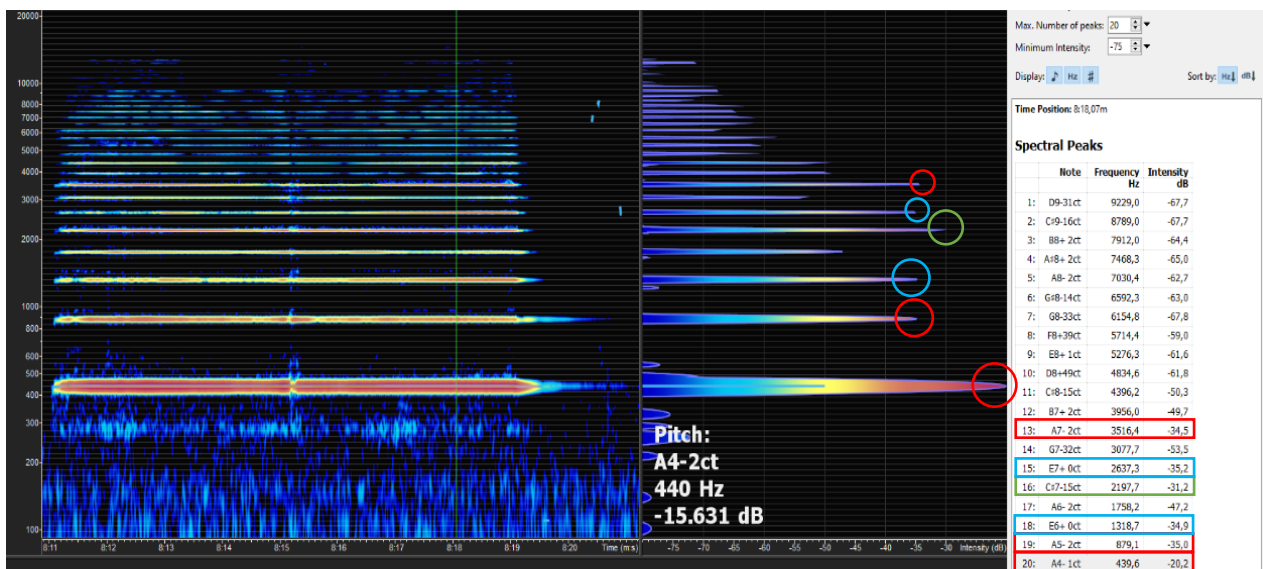
## 6.6 Prazne žice

Tonovi koji zahtijevaju minimum ljudske intervencije te koji služe kao polazišne točke intoniranja jesu prazne žice. One su također odlična referenca za određivanje kvalitete tona instrumenta, tj. kvalitete samog instrumenta. Spektralnom analizom detaljno se može vidjeti sadržaj harmonijskog spektra svake žice zasebno.

Slika 6.6.a Prazna  $a_1$  žica, Obici 1710., stare žice



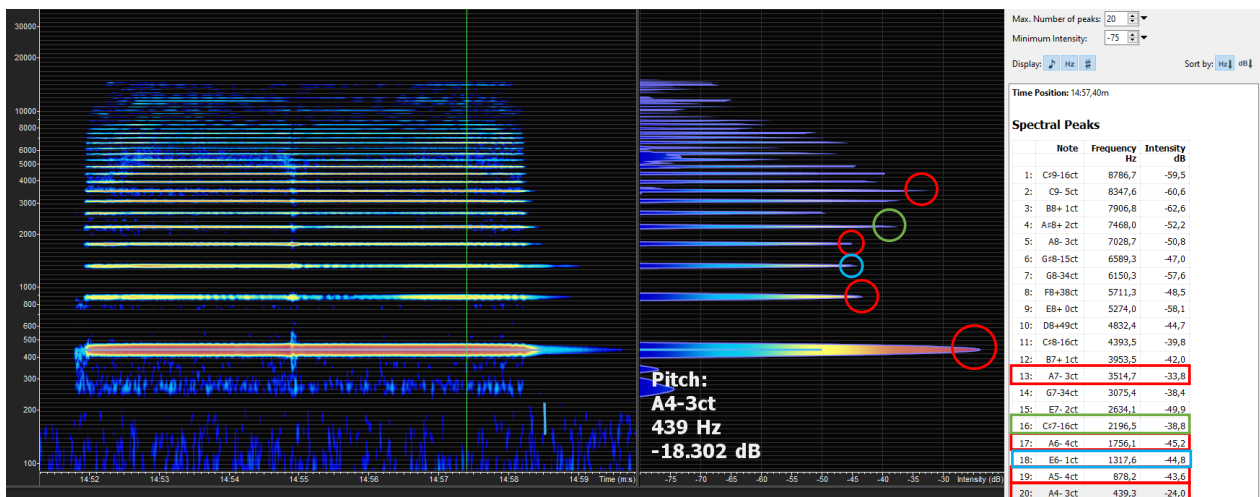
Slika 6.6.b Prazna  $a_1$  žica, Obici 1710., nove žice



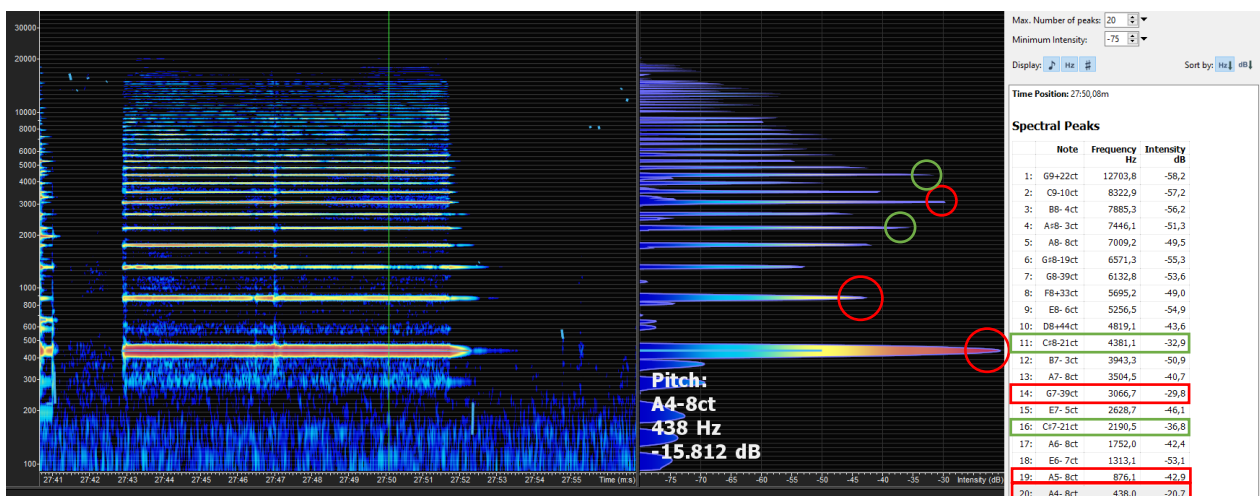
Razlika između starih i novih žica vizualno je evidentna. Osnovni harmonik i harmoničke parcijale novih žica puno su intenzivnije i pravilnije su raspoređene s obzirom na alikvotni niz prilikom produkcije zvuka. Uslijed pobude starih žica neki harmonici koji aktivno sudjeluju u oblikovanju boje tona nisu dovoljno intenzivni kako bi formirali bogati zvuk violine te ostvarili njegov puni potencijal.

Prazna  $a_1$  žica instrumenta Josepha Cerutija ima jasno izražene oktavne ( $a$ ) harmonike.

Slika 6.6.c Prazna  $a_1$  žica, Joseph Ceruti 1845.



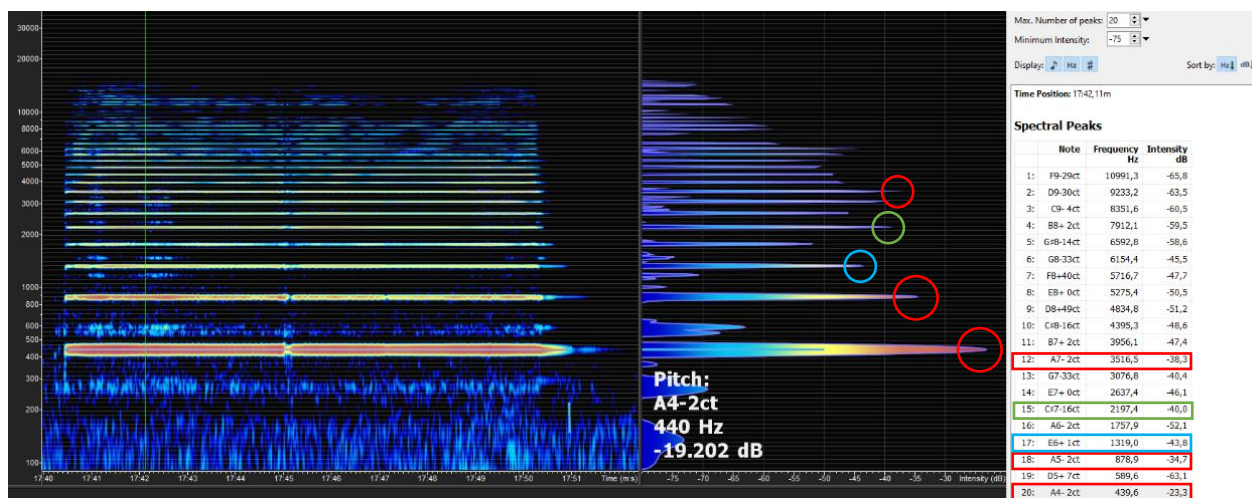
Slika 6.6.d Prazna  $a_1$  žica, Bausch 1911.



Instrumentu Bauscha ponajviše rezoniraju 7. ( $g_4$ ) i 10. ( $cis_5$ ) alikvot  $a_1$  žice.



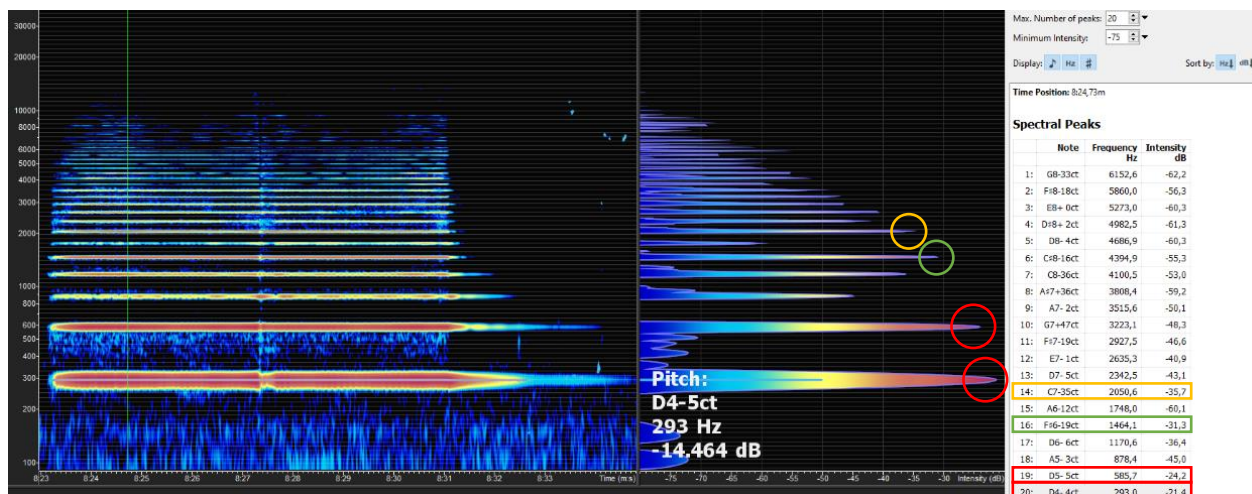
Slika 6.6.e Prazna  $a_1$  žica, Fantova 2013.



Svim analiziranim  $a_1$  žicama instrumenata zajednička je vrlo izražena prisutnost oktavnih ( $a$ ) harmonika generalno te harmonika  $e_3$  i  $cis_4$ .

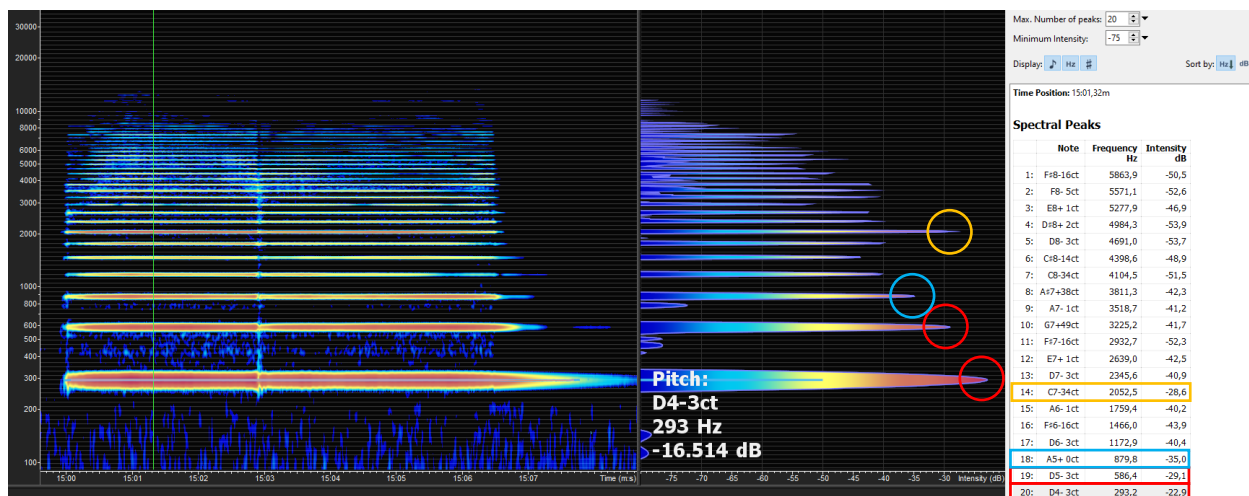
Druga žica u redu za analizu harmonijskog spektra je  $d_1$  žica frekvencije 293.7 Hz.

Slika 6.6.f Prazna  $d_1$  žica, Obici 1710., nove žice



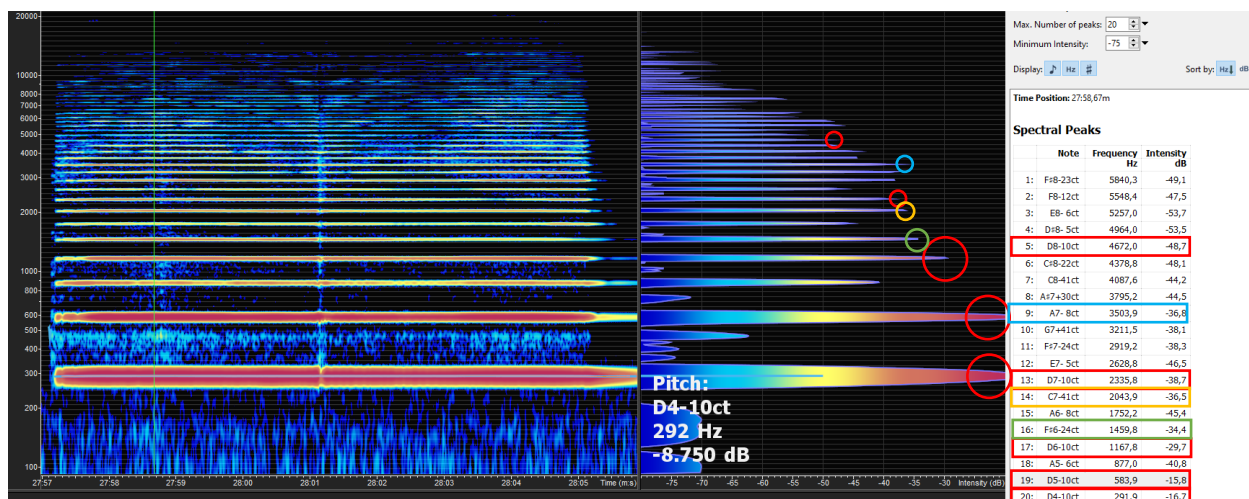
Obicijeva  $d_1$  žica ima vrlo ravnomjerno raspoređene intenzitete harmoničkih parcijala. Njihova snaga gotovo eksponencijalno pada što im je vrijednost veća.

Slika 6.6.g Prazna  $d_1$  žica, Joseph Ceruti 1845.



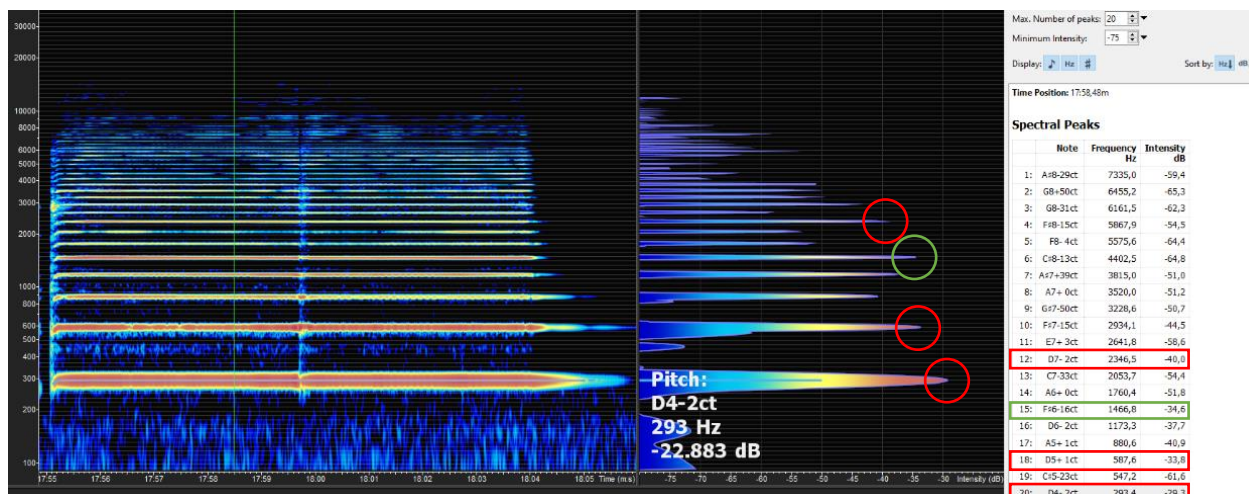
Na primjeru Cerutija zanimljivo je vidjeti kako je alikvot  $c_4$  intenzivniji od prvog, oktavnog ( $d$ ) alikvota.

Slika 6.6.h Prazna  $d_1$  žica, Bausch 1911.



Ono čemu instrument Josepha Bauscha duguje svoj iznimno snažan, zaokruženi i puni ton  $d_1$  žice je pojačana aktivnost oktavnih ( $d$ ) harmonika u spektru, ali i visina do koje aktivni i čujni dio harmonijskog spektra seže.

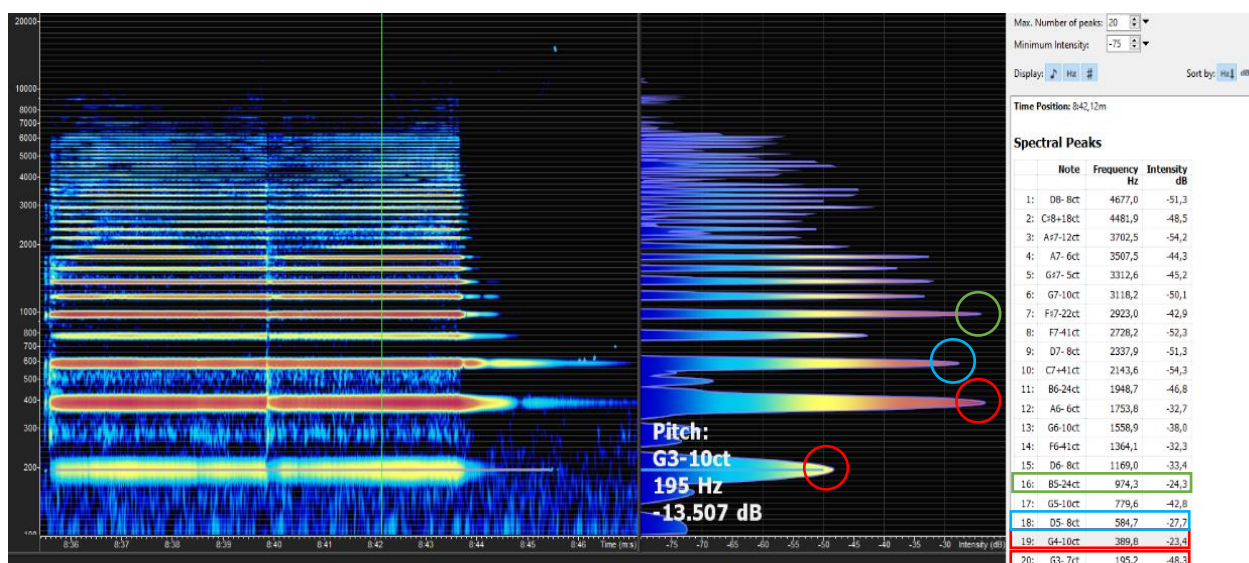
Slika 6.6.i Prazna  $d_1$  žica, Fantova 2013.



Svim  $d_1$  žicama zajednička je izraženija aktivnost harmonika  $fis_3$  i  $c_4$  te harmoničkih parcijala vrijednosti tona  $a$  generalno.

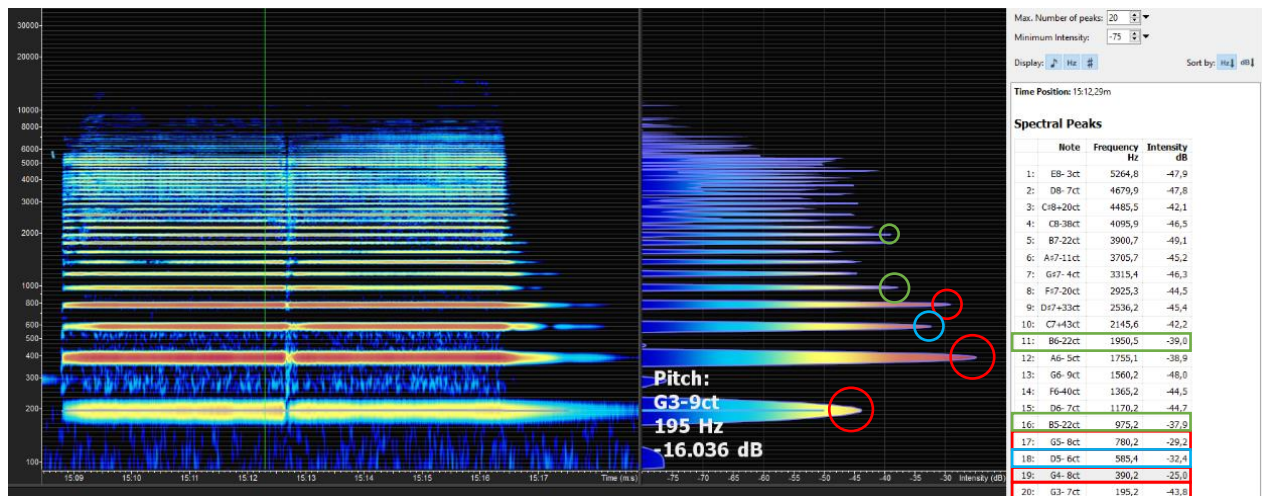
Ono što je vrlo specifično je prazna  $g$  žica frekvencije 196 Hz kojoj je prvi, oktavni alikvot intenzivniji od vlastitog fundamentalnog tona. Uz prvi alikvot generalno je jako izražen i četvrti ( $h_2$ ).

Slika 6.6.j Prazna  $g$  žica, Obici 1710., nove žice



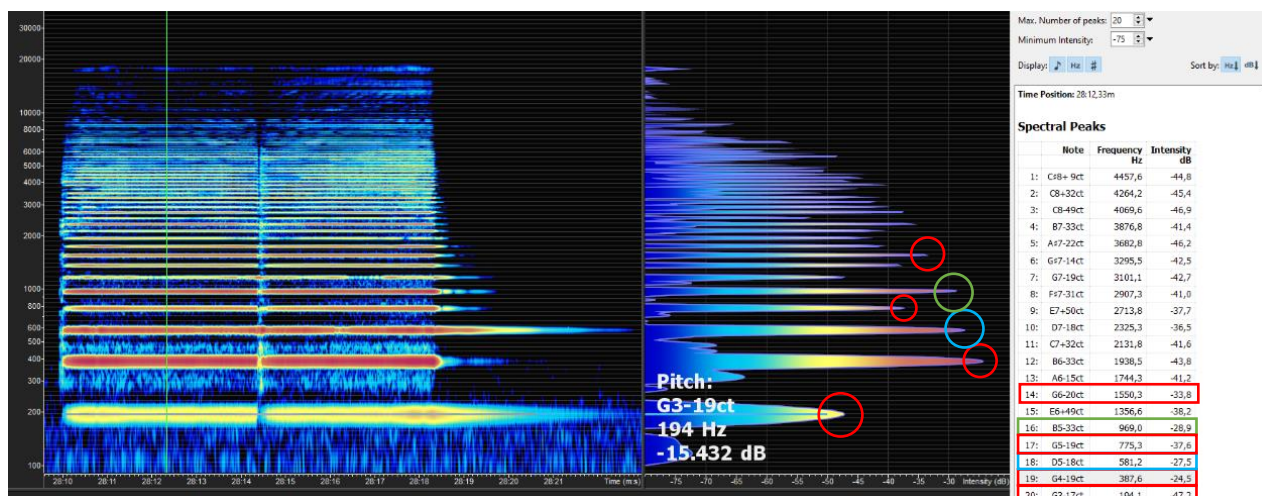


Slika 6.6.k Prazna g žica, Joseph Ceruti 1845.



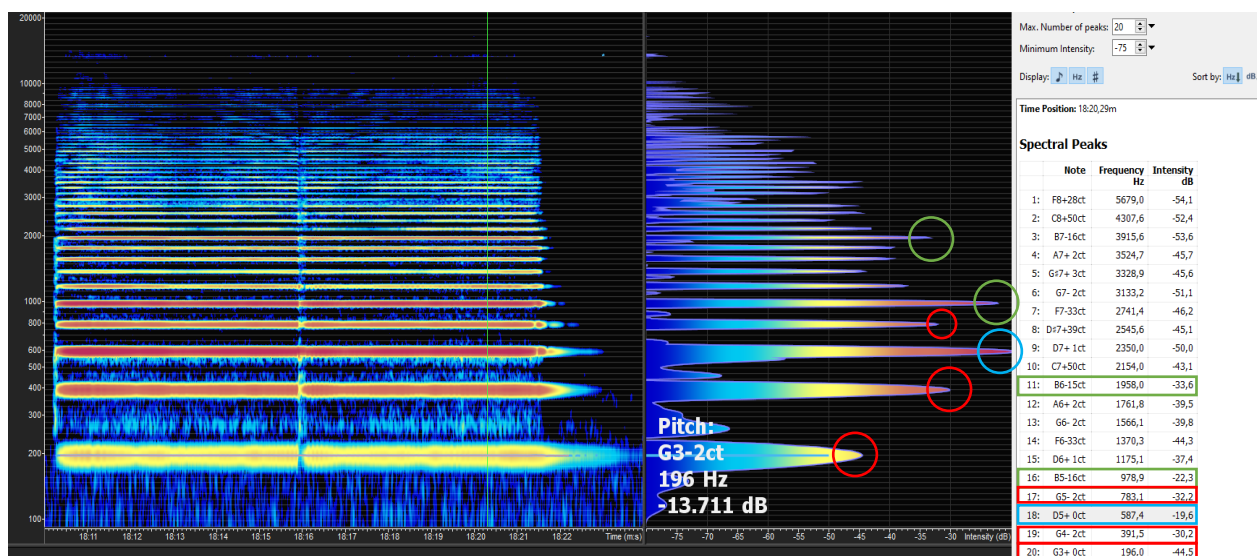
Harmonički parcijal visine tona  $h$  posebno je izražen kod Cerutijeve violine, dok instrument Josepha Bauscha ponovno ima vrlo izražene oktavne ( $g$ ) harmonike uz iznimno veliko bogatstvo harmonijskog spektra. Iako je riječ o žici najniže frekvencije, ona kod Bauschovog instrumenta pokazuje izrazito velik intenzitet harmonika u dijelu spektra između 10 kHz i 20 kHz.

Slika 6.6.l Prazna g žica, Bausch 1911.





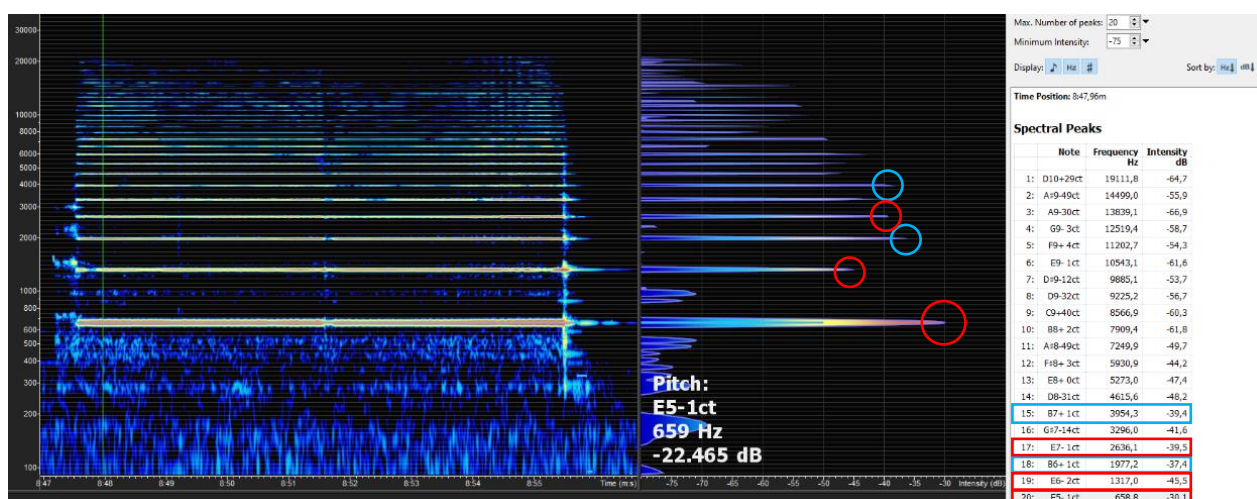
Slika 6.6.m Prazna gžica, Fantova 2013.



Fantova, s druge strane, ima drukčiju preraspodjelu intenziteta jer je drugi alikvot ( $d_2$ ) intenzivniji od temeljnog tona i njegovog prvog alikvota ( $g_1$ ).

Posljednja analizirana žica je  $e_2$  žica standardne frekvencije 659,3 Hz.

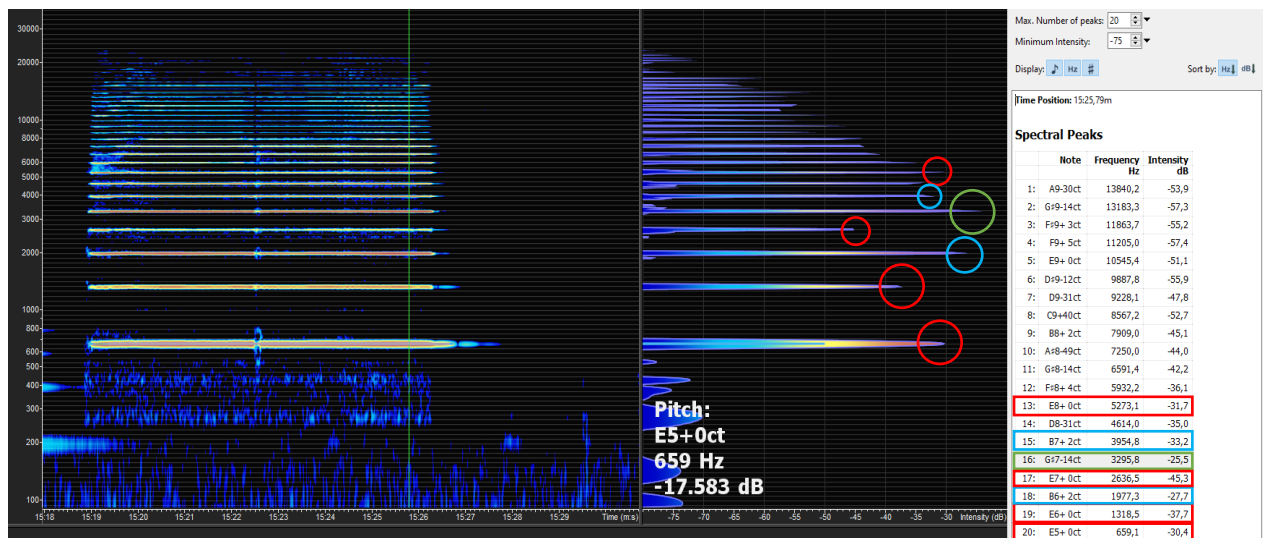
Slika 6.6.n Prazna  $e_2$  žica, Obici 1710., nove žice



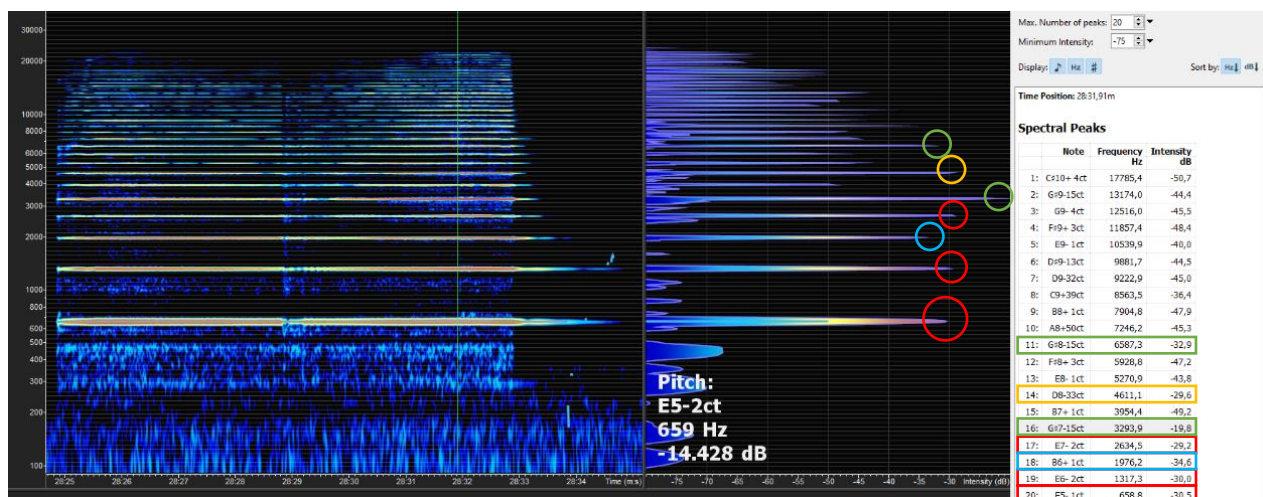
Zanimljivo je primijetiti povećane intenzitete kvintnih ( $h$ ) harmonika  $e_2$  žice violine Bartolomea Obicija.

Prazna  $e_2$  žica instrumenta Josepha Cerutija specifična je po tome što je četvrti alikvot tonske vrijednosti  $gis_4$  intenzivniji od fundamentalnog tona, a ujedno je i najintenzivniji harmonički parcijal. Uz njega je vrlo izražen i harmonik  $h_3$ , koji je također intenzivniji od vlastitog fundamenta.

Slika 6.6.o Prazna  $e_2$  žica, Joseph Ceruti 1845.

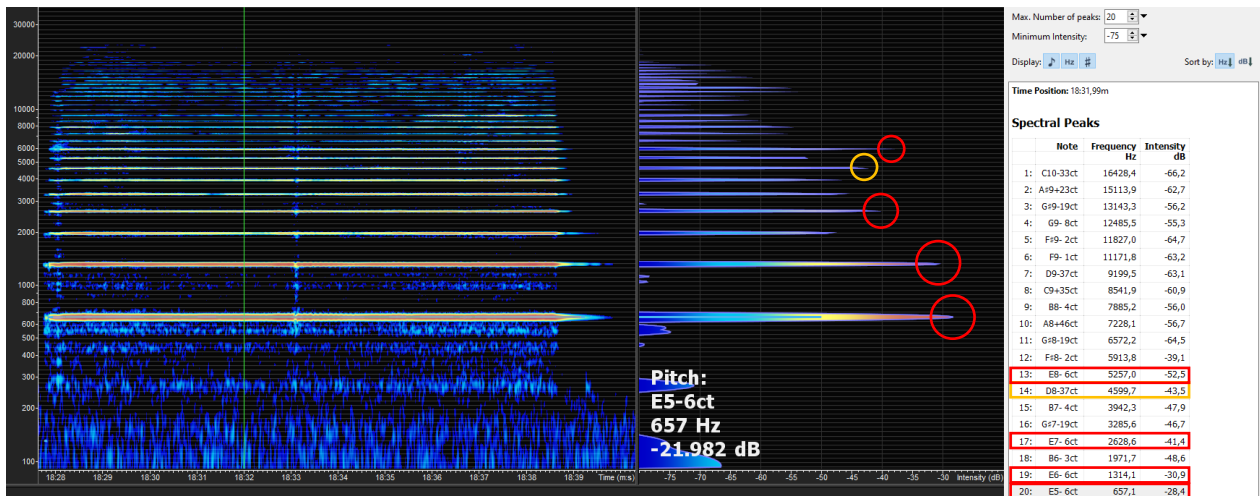


Slika 6.6.p Prazna  $e_2$  žica, Bausch 1911.



Bauscheva  $e_2$  žica sličnog je karaktera kao i ona s Cerutijevog instrumenta. Uz velike intenzitete oktavnih ( $e$ ) harmonika vrlo je izražen harmonik tonske visine  $gis$ .

Slika 6.6.r Prazna  $e_2$  žica, Fantova 2013.



Harmonijskim spektrom  $e_2$  žice Fantovine violine evidentno dominiraju oktave (e) harmoničke parcijale.

Zanimljivo je primijetiti gotovo linearan pad intenziteta viših harmonika svih analiziranih  $e_2$  žica instrumenata.

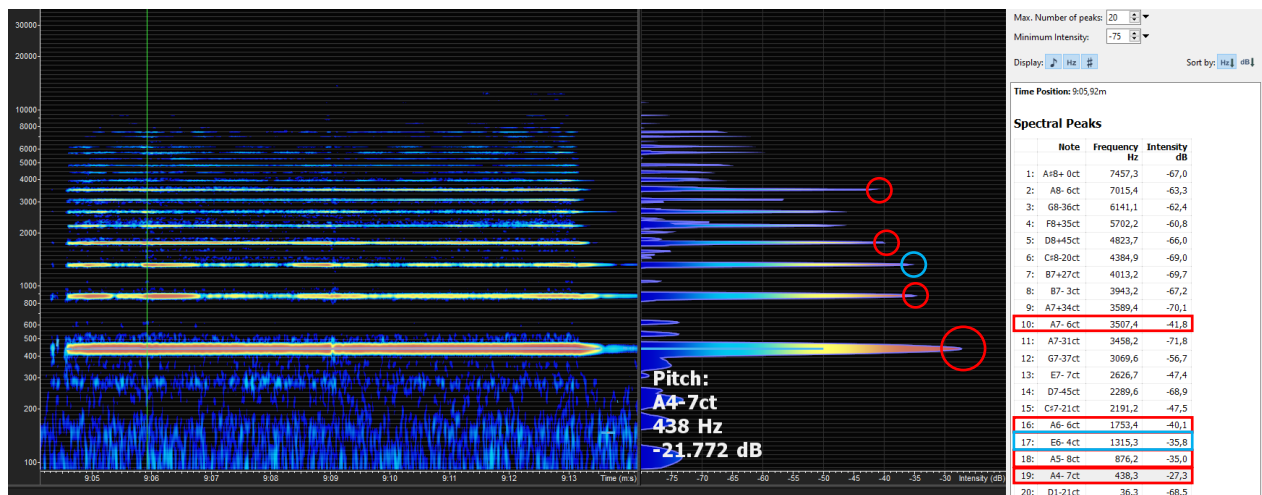
Na svakoj priloženoj slici se uz jasno ocrtane harmoničke parcijale također mogu vidjeti i frekvencije slabijeg intenziteta koje ne pripadaju nužno alikvotnome nizu. Neke nastaju zbog trenja kao nuspojava prelaska struna gudala preko žice ili ako se uz strune po žicama prelazi i drvenim dijelom gudala. Sve ovakve mikronepravilnosti harmonijskog spektra, odnosno alikvotnog niza, utječu na boju tona instrumenta i na percepciju istih.

Nakon analize sadržaja harmonijskog spektra svih žica violine može se govoriti o zavisnosti harmonijskog spektra i tonske ovojnice, odnosno međuodnosu boje zvuka i artikulacije. Oba parametra jednako su relevantna pri determinaciji proizvedenog zvuka instrumenta.

## 6.7 Sul tasto

U glazbenoj terminologiji sintagma „*sul tasto*“, što na talijanskom jeziku znači „*na hvataljci*“, oznaka je artikulacije specifična za gudačku obitelj instrumenata. Postiže se povlačenjem gudala preko žica na mjestu ispod kojeg se nalazi hvataljka instrumenta te poput svih artikulacija utječe na boju zvuka koji instrument proizvodi, odnosno njegov harmonijski spektar. Do promjene dolazi zbog toga što se odmicanjem gudala od uporišne točke žice, odnosno kobilice, smanjuje amplituda vibracije žice prilikom povlačenja gudala. Kao primjer nastale promjene, u analizi će se koristiti jedna žica svakog instrumenta.

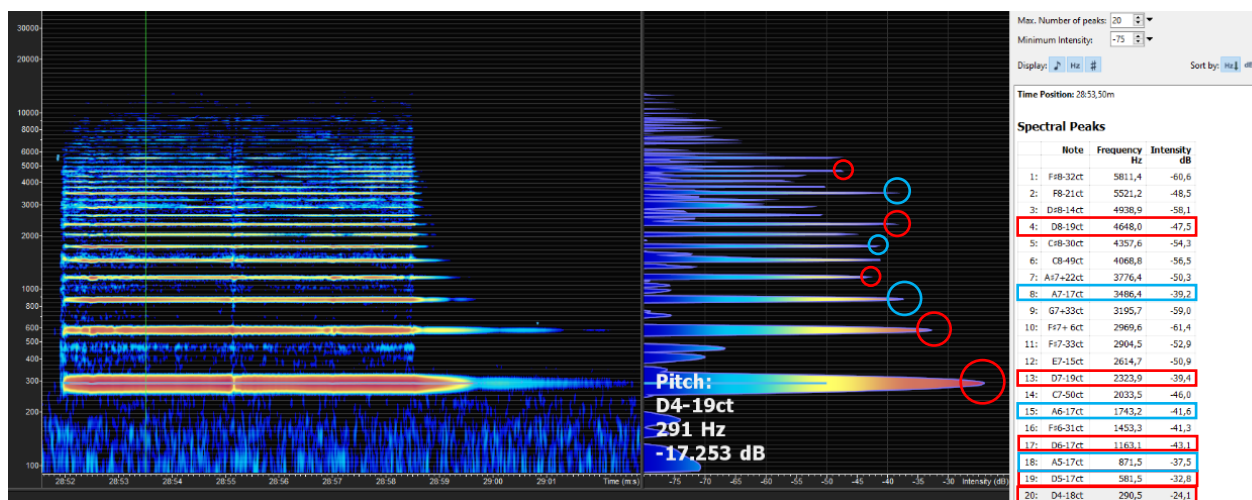
Slika 6.7.a Prazna  $a_1$  žica „*sul tasto*“, Obici 1710., nove žice



Iz spektrograma se jasno može iščitati nedostatak najviših harmonika koji su bili prisutni prilikom standardnog načina izvođenja, govoreći primarno o frekvencijama iznad 8 kHz. Također je pojačana aktivnost oktavnih ( $a$ ) harmonika te je izraženo odsustvo visokog intenziteta harmonika  $cis_4$ .

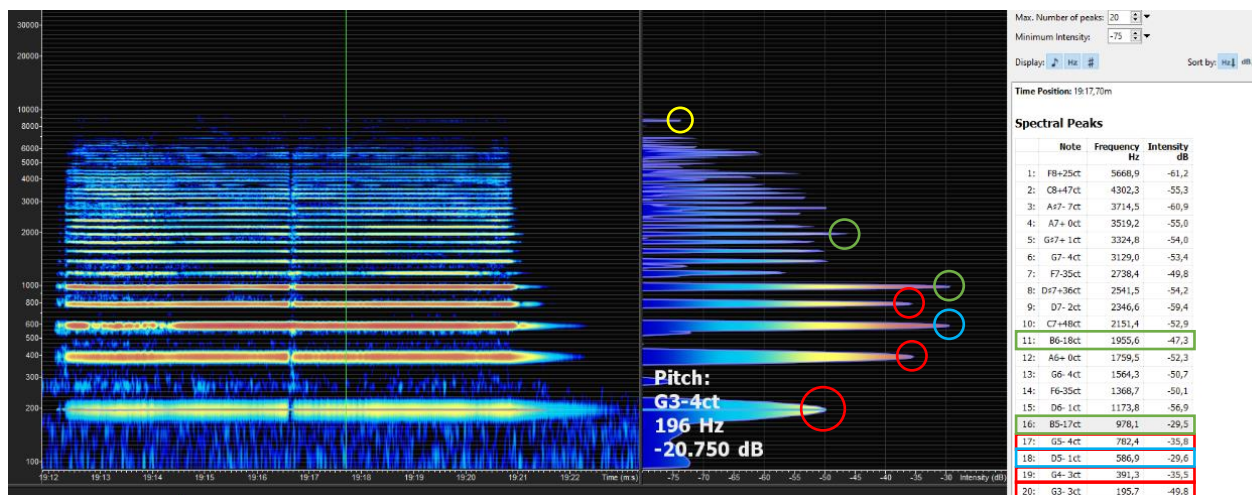


Slika 6.7.b Prazna  $d_1$  žica „sul tasto“, Bausch 1911.



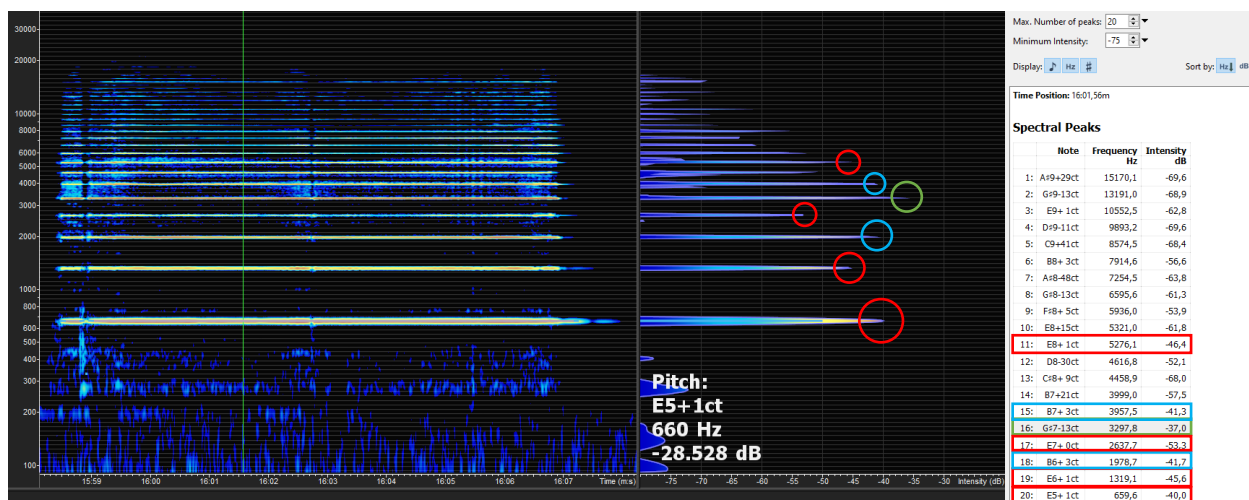
Izrazito umanjena aktivnost oktavnih ( $d$ ) harmonika na  $d_1$  žici instrumenta Josepha Bauscha izjednačava se sa njegovim kvintnim ( $a$ ) harmonicima. Iako i dalje vrlo prisutna, umanjena je i snaga najviših harmonika počevši od 6 kHz nadalje.

Slika 6.7.c Prazna  $g$  žica „sul tasto“, Fantova 2013.



Unatoč tome što se omjeri intenziteta harmonika Fantovine violine nisu promijenili u odnosu na standardno povlačenje gudala po žici, njihova je snaga bitno manja. Drastičan pad intenziteta je zabilježen iznad 7 kHz, uz iznimku harmonika  $c_6$  frekvencije 8601 Hz.

Slika 6.7.d Prazna e<sub>2</sub> žica „sul tasto“, Ceruti 1845.



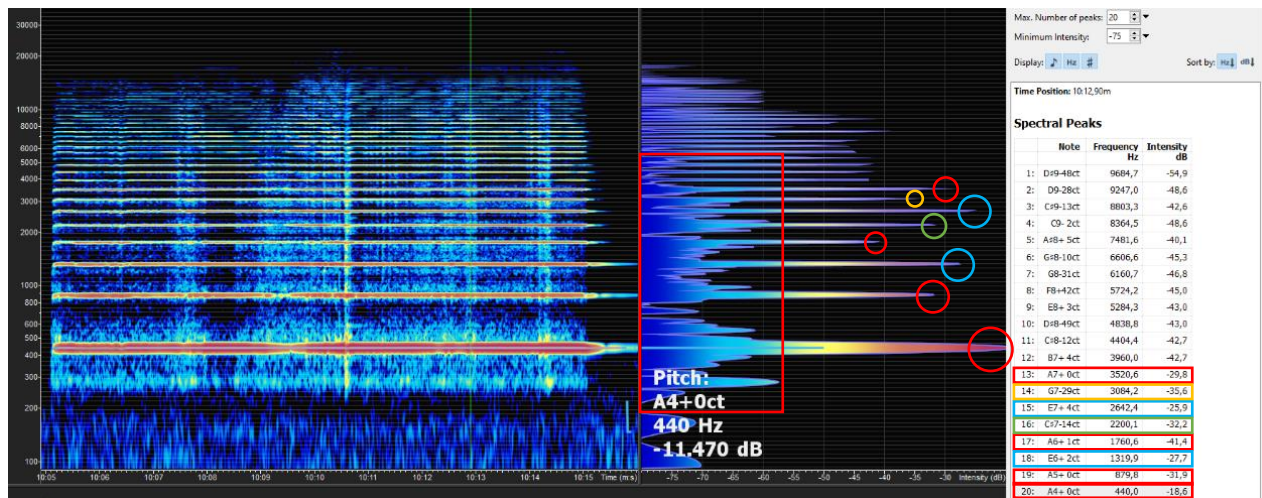
Cerutijev instrument „sul tasto“ artikulacijom oslabio je i osiromašio harmonijski spektar e<sub>2</sub> žice, međutim, omjeri intenziteta najizraženijih harmonika ostali su isti.

Shodno analizi može se reći kako „sul tasto“ artikulacija mijenja boju zvuka instrumenta tako što oslabljuje i generalno osiromašuje harmonijski spektar instrumenta, uključujući i potpuni nedostatak harmonika najviše frekvencije bilo koje žice.

## 6.8 Sul ponticello

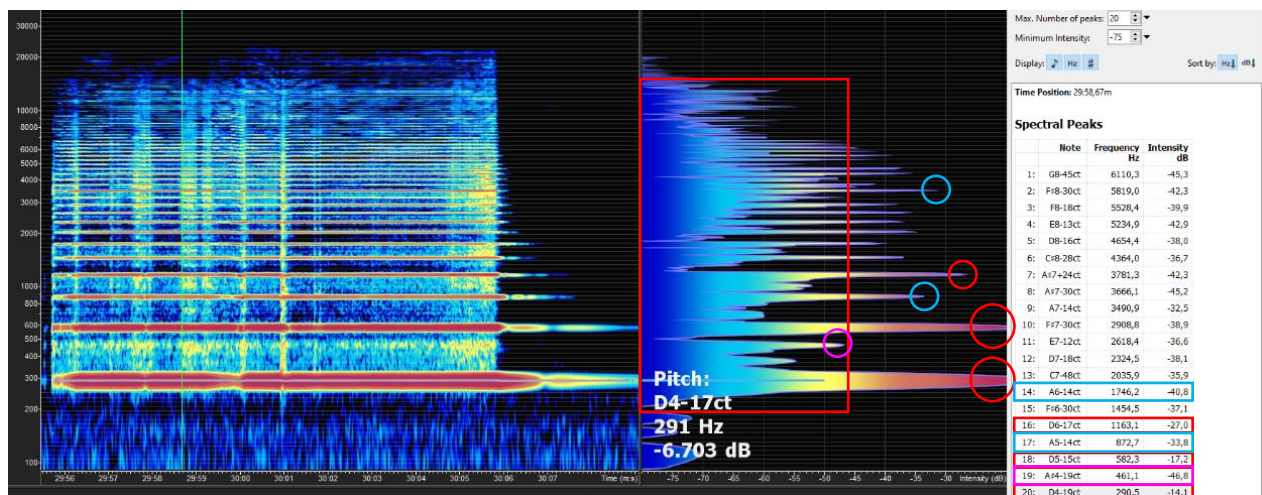
Doslovno prevedeno s talijanskog jezika „sul ponticello“ znači „na mostu“ te je također artikulacija specifična za obitelj gudačkih instrumenata. Izvodi se približavanjem gudala prema kobilici te povlačenjem po žici, što rezultira vrlo snažnim i aktivnijim vibriranjem žice. Ta se promjena manifestira i u harmonijskom spektru. Nastali zvuk često je okarakteriziran kao neugodan i glasan, iako njegova snaga ovisi o pritisku koji izvođač vrši gudalom na žicu.

Slika 6.8.a Prazna  $a_1$  žica „sul ponticello“, Obici 1710., nove žice



Uz povećanje intenziteta kvintnih (**e**) i oktavnih (**a**) harmoničkih parcijala te parcijala tonske visine **g<sub>4</sub>** vrlo je prezentno i uvećanje intenziteta neharmoničkih parcijala.

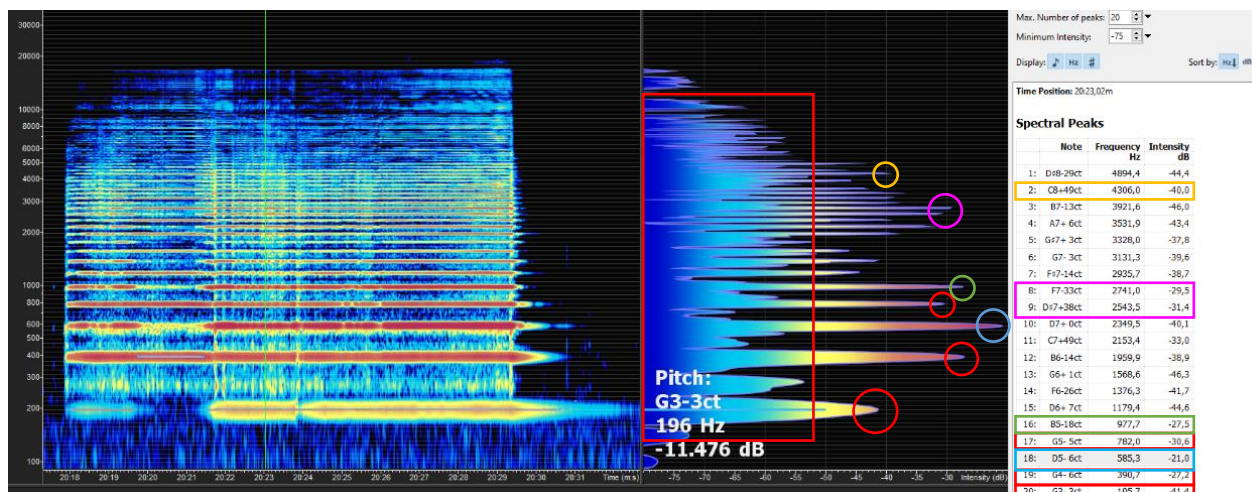
Slika 6.8.b Prazna  $d_1$  žica „sul ponticello“, Bausch 1911.



Uz vrlo aktivne oktavne (**d**) i kvintne (**a**) harmonike prisutna je velika količina vrlo intenzivnih neharmoničkih parcijala, od kojih najveći spektralni maksimum ima onaj tonske visine **ais<sub>1</sub>**.

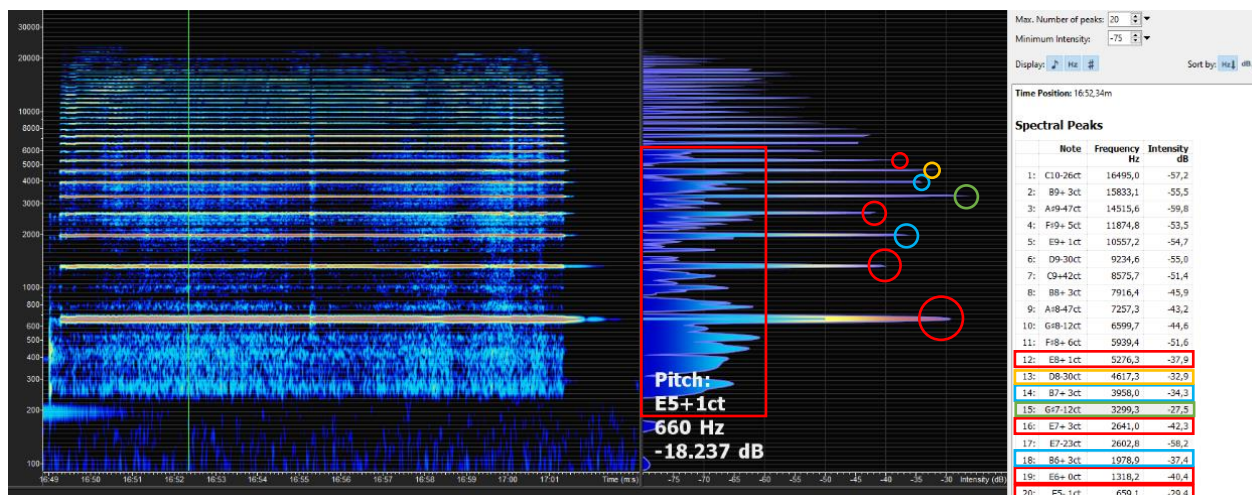


Slika 6.8.c Prazna g žica „sul ponticello“, Fantova 2013.



Međudnos prvih pet parcijala se nije značajno promijenio s obzirom na drukčiju artikulaciju, međutim, uz značaj porast intenziteta neharmoničkih parcijala ističu se i dva harmonička: **dis<sub>4</sub>** i **f<sub>4</sub>**.

Slika 6.8.d Prazna e<sub>2</sub> žica „sul ponticello“, Ceruti 1845.



Novom artikulacijom smanjio se nastup kvintnih (**h**) harmonika, iako je harmonik **gis<sub>4</sub>** i dalje snažniji nego fundamentalna frekvencija.

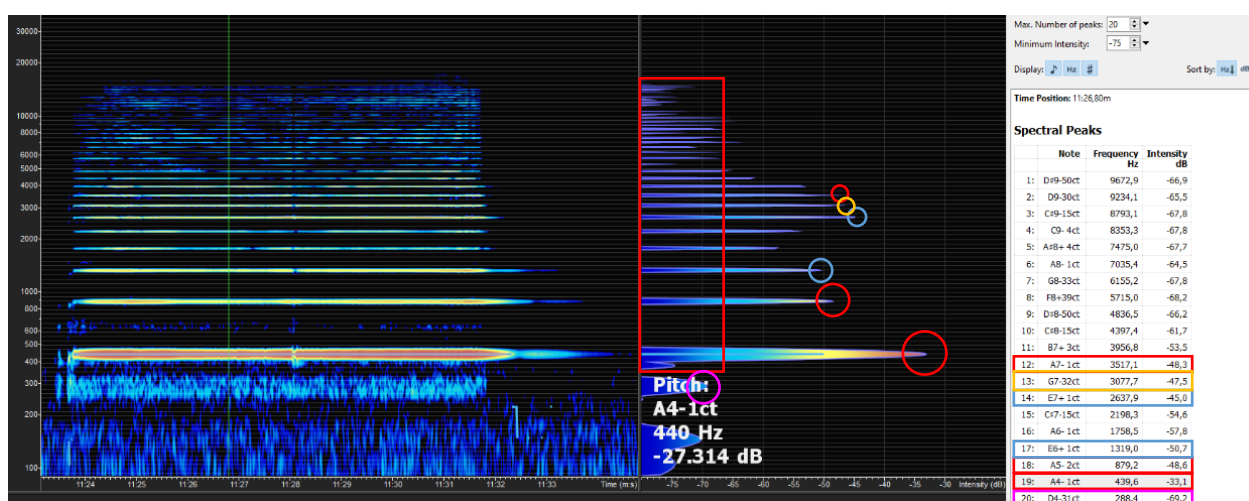
„Sul ponticello“ izvedba rezultira zvukom veoma bogatog harmonijskog spektra koji se percipira kao vrlo oštar, snažan, ali često i neugodan.



## 6.9 Con sordino

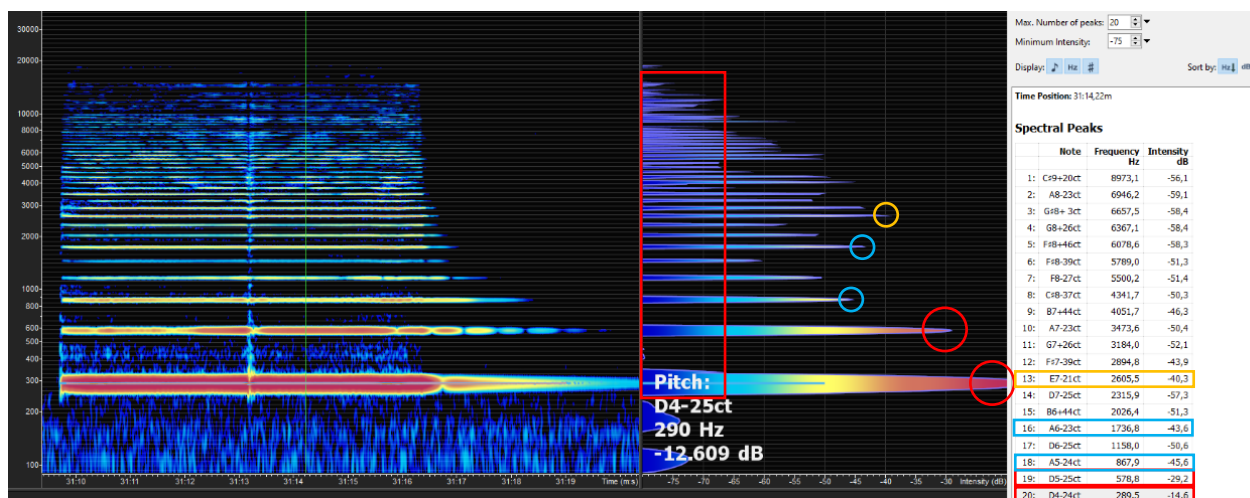
Sordina, čija etimologija riječi također vuče korijene iz talijanskog jezika od riječi *sordo*, što znači gluh ili prigušen, predmet je koji se polaže preko kobilice. Njegova je funkcija utišati ton instrumenta, a on to ostvaruje prvenstveno mijenjajući njegovu boju. Sordina umanjuje vibracije nastale pobudom žice koje kobilica zatim prenosi na zvučnicu instrumenta. Ona može biti drvena, metalna, gumena ili plastična, a o materijalu ovisi razina promjene boje tona. U ovome istraživanju korištena je metalna sordina kako bi se promjena boje mogla što radikalnije opisati.

Slika 6.9.a Prazna  $a_1$  žica „con sordino“, Obici 1710., nove žice



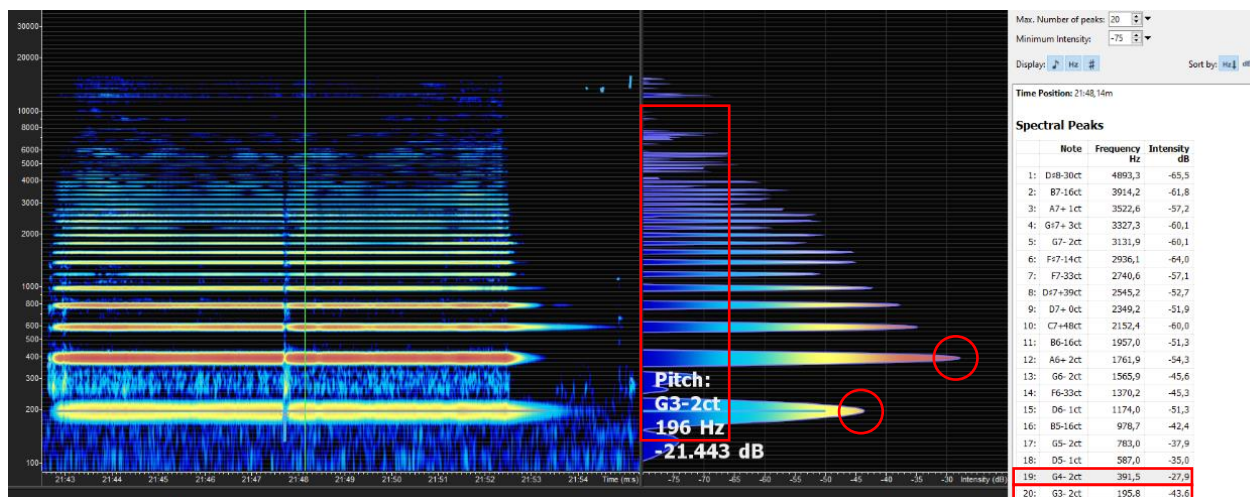
Odsvirana sa sordinom,  $a_1$  žica Obicijeve violine očuvala je postojanost oktavnih (**a**) i kvintnih (**e**) harmonika. Uz generalan pad snage svih parcijala, značajan je pad intenziteta harmoničkog parcijala **cis<sub>4</sub>** i rast intenziteta parcijala **g<sub>4</sub>**. Ukupan harmonijski spektar zvuka u potpunosti je osiromašen neharmoničkim parcijalima, što rezultira puno čistijim sastavom alikvotnog niza. Osim što je spektar vizualno puno pregledniji, takvog je karaktera i proizvedeni ton. Zanimljivo je primijetiti snažnu frekvenciju ispod fundamentalne, koja po svojoj vrijednosti od 288,4 Hz s velikom točnošću odgovara onoj **d<sub>1</sub>** žice.

Slika 6.9.b Prazna  $d_1$  žica „con sordino“, Bausch 1911.



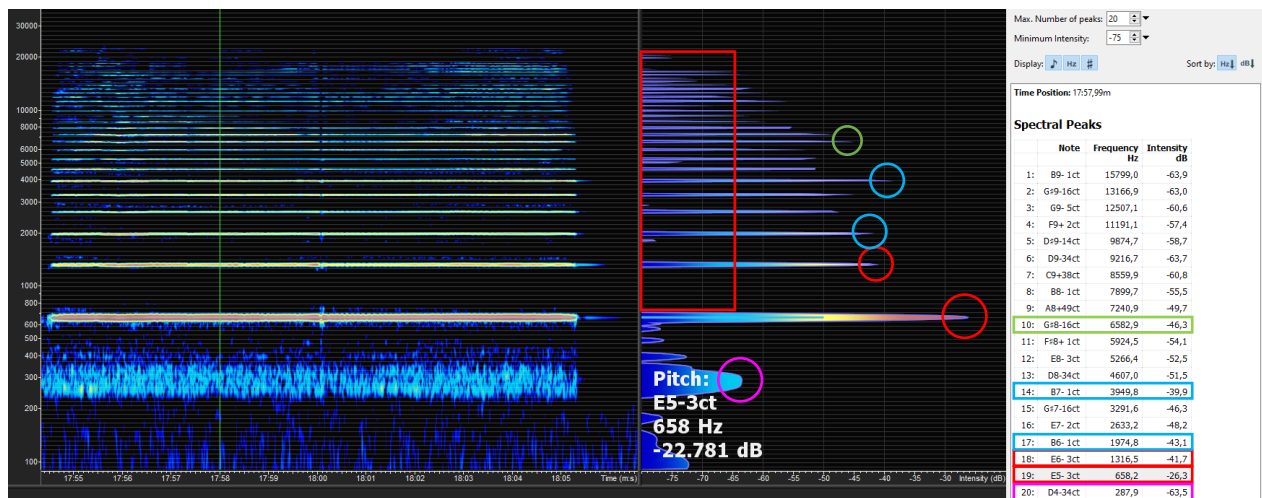
Sordina je vrlo pojednostavila harmonijski spektar Bauscheve  $d_1$  žice. Manja je prisutnost oktavnih ( $d$ ) harmonika uz očuvani balans harmoničkih parcijala visine tona  $a$  generalno. Harmonik  $e_4$  se po intenzitetu izjednačio s prethodno navedenom vrijednosti, dok neki poput  $c_4$  nisu uopće prisutni.

Slika 6.9.c Prazna  $g$  žica „con sordino“, Fantova 2013.



Upotrebom sordine znatno se stabilizirao odnos harmonika u harmonijskom spektru prazne  $g$  žice Fantovina instrumenta. Od najintenzivnijeg harmoničkog parcijala tonske visine  $g_2$  nadalje može se primijetiti gotovo linearan pad intenziteta.

Slika 6.9.d Prazna e<sub>2</sub> žica „con sordino“, Ceruti 1845.



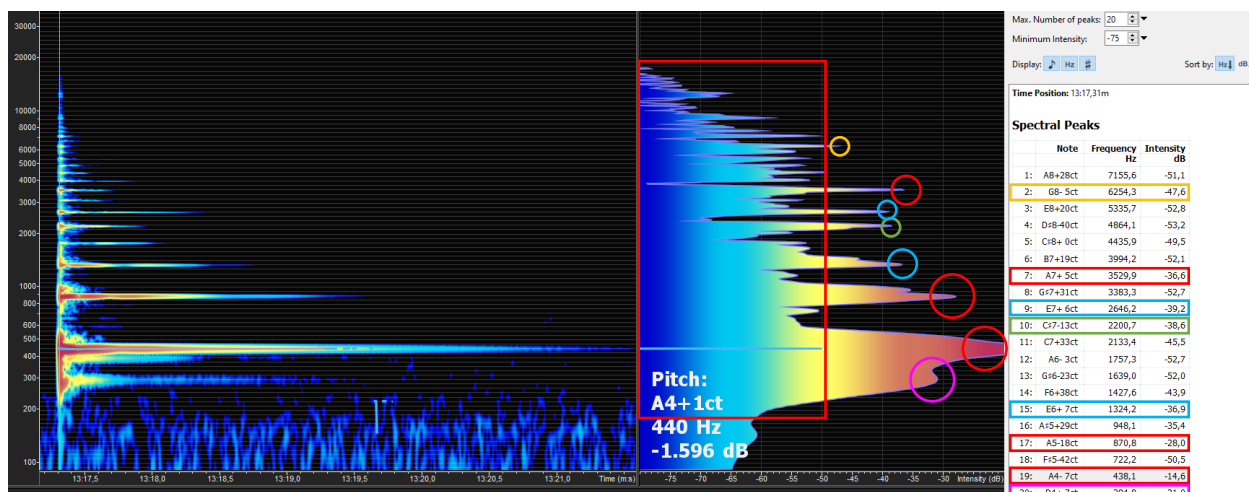
Cerutijsva violina je pod utjecajem sordine ublažila neravnomjerno raspoređene intenzitete najistaknutijih harmonika, s time da je harmonik **gis<sub>4</sub>** znatno utišan. Iako je riječ o drugom instrumentu i drugoj žici, opet neobično snažno rezonira frekvencija vrijednosti 287,9 Hz, što je skoro ekvivalent frekvenciji **d<sub>1</sub>** žice.

Svim sordiniranim instrumentima zajedničko je pročišćavanje i, uvjetno rečeno, stabilizacija odnosa harmonika unutar vlastitog harmonijskog spektra odsvirane žice. Ton je mekši i tiši u odnosu na standardan način izvođenja, ali i siromašniji.

## 6.10 Pizzicato

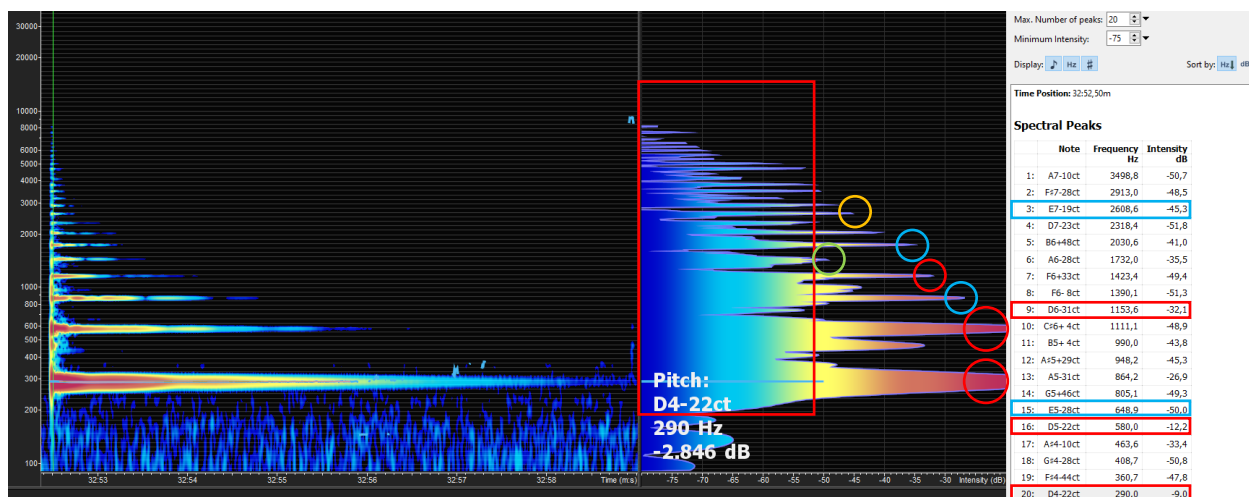
Također kao dio talijanskog vokabulara, „*pizzicato*“ doslovno prevedeno znači „*trzan*“. Značajan odmak od prethodno obrađenih artikulacija je u tome što se „*pizzicato*“ ne svira gudalom, već se žice pobuđuju trzanjem prstima. Ton je vrlo oštar i usmjeren, a njegova je tonska ovojnica perkusijskog karaktera; ton naglo dostiže svoj maksimum, koji zatim vrlo brzo zamre.

Slika 6.10.a Prazna  $a_1$  žica „pizzicato“, Obici 1710., nove žice



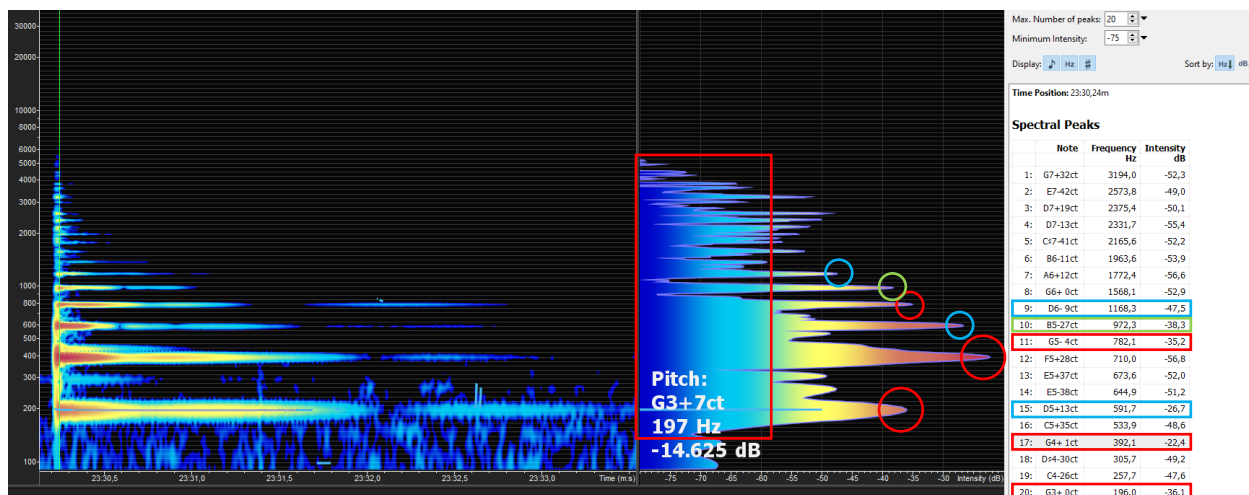
Prilikom samog početka proizvedenog tona trznute reprezentativne  $a_1$  žice može se uočiti velika aktivnost harmonijskog spektra. On obiluje neharmoničkim i harmoničkim parcijalima, međutim, taj nagli amplitudni porast parcijala traje otprilike desetinu sekunde. Ovakav sadržaj spektra odgovara akustičkoj definiciji tranzijenata. On se ubrzo drastično pojednostavljuje rezonirajući samo harmoničkim parcijalima, s time da fundamentalna frekvencija najdulje ostaje prisutna u spektru. Omjer snaga harmoničkih parcijala nije se značajno promijenio u odnosu na „arco“ način izvođenja, ali ponovno je prisutna pojačana aktivnost frekvencije 294,8 Hz, koja odgovara onoj  $d_1$  žice.

Slika 6.10.b Prazna  $d_1$  žica „pizzicato“, Bausch 1911.



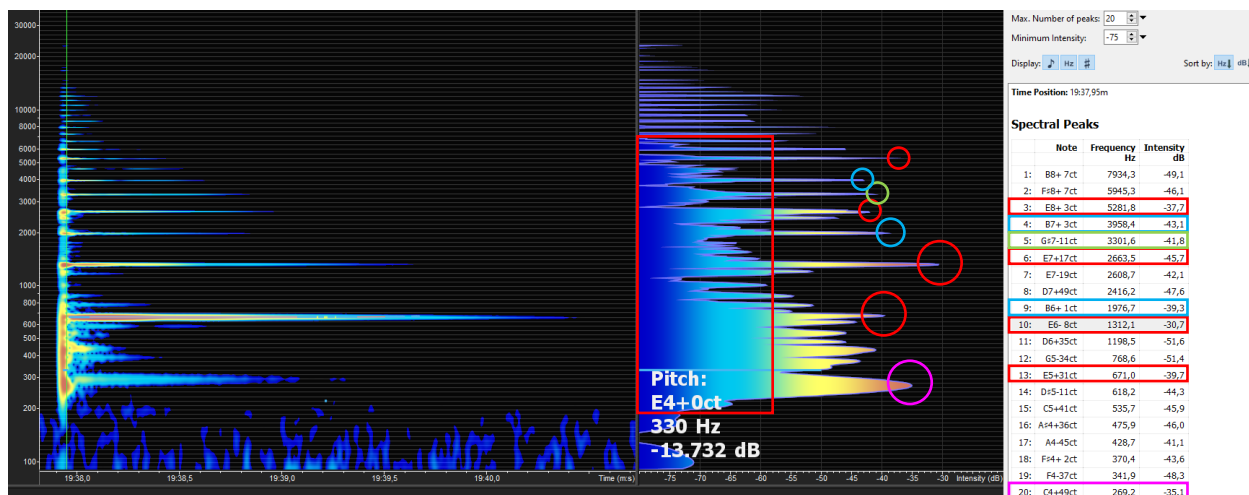
Početak tona ponovo je bogatog spektra koji već nakon desetine sekunde gubi svoj inicijalni intenzitet. Balans harmoničkih parcijala  $d_1$  žice ostao je sličan onome „arco“ načinu izvođenja, iako harmonik  $fis_3$  dolazi do izražaja tek nakon pada intenziteta tranzijenata.

Slika 6.10.c Prazna  $g$  žica „pizzicato“, Fantova 2013.



Trzanjem  $g$  žice instrument Frédérica Fantove uravnotežio je odnose svojih harmoničkih parcijala pa tako harmonici tonske visine  $d$  i  $a$  više nisu dominantni u spektru.

Slika 6.10.d Prazna  $e_2$  žica „pizzicato“, Ceruti 1845.





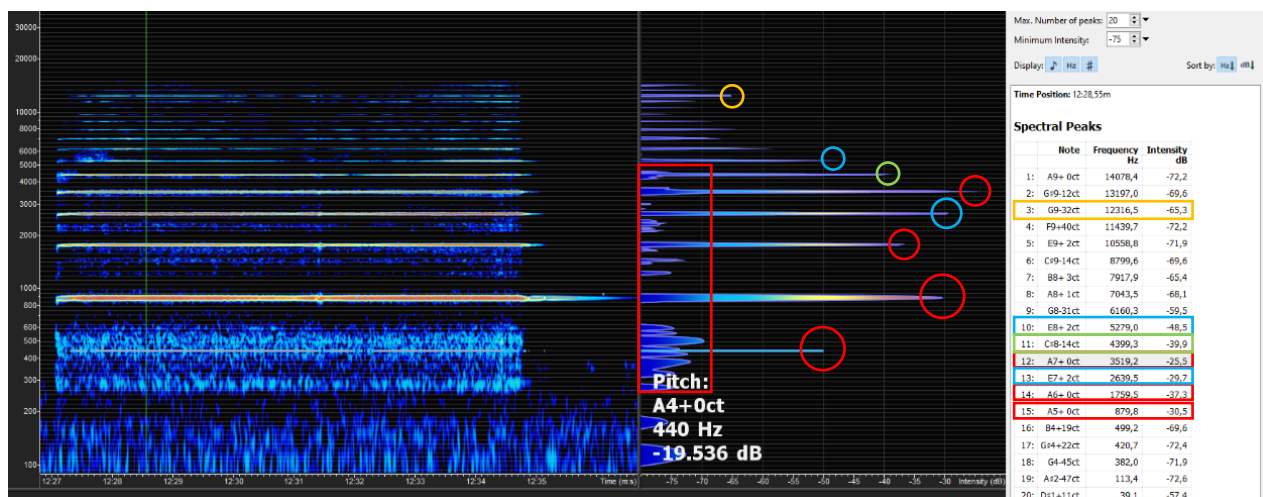
Unatoč tome što je najviši dio spektra  $e_2$  žice u potpunosti lišen tranzijenata, oni su i dalje vrlo prezentni u srednjem dijelu, a priloženi spektrogram je zanimljiv iz još nekoliko razloga. Uz rebalans harmoničkih parcijala u odnosu na „arco“ artikulaciju, može se zapaziti i iznenađujuće velik intenzitet harmonika  $c_1$ , koji je, uz parcijal  $e_3$ , snažniji od fundamentalne frekvencije. Već nakon 0,2 sekunde naglo se pojačava intenzitet fundamentalnog tona  $e_2$ , koji zatim preuzima glavnu ulogu pri rezonanciji.

Otupljen i kratak, zvuk „pizzicato“ artikulacije duguje karakter svojeg tona tranzijentima, iako boja također uvelike ovisi i o mjestu na instrumentu na kojem se žica trzne.

## 6.11 Prirodni oktavni flažoleti

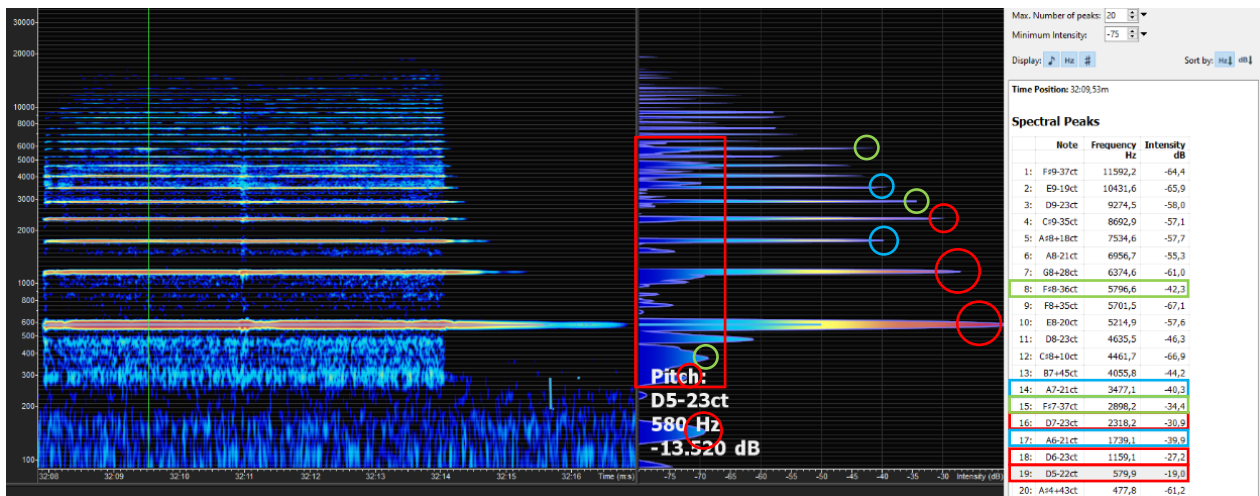
Definicija i proces nastanka flažoleta već su ranije opisani u poglavlju koji govori o harmonijskom spektru. U istraživanju su snimljeni i analizirani flažoleti koji nastaju skraćivanjem žice na njezinoj polovini, što rezultira oktaviranjem frekvencije na koju je ugođena žica. Njihova boja tona nježnija je varijanta boje tona zvižduka koji se sumira sa često primjetnim šuštanjem neharmoničkih parcijala.

Slika 6.11.a Prirodni oktavni flažolet  $a_1$  žice, Obici 1710., nove žice



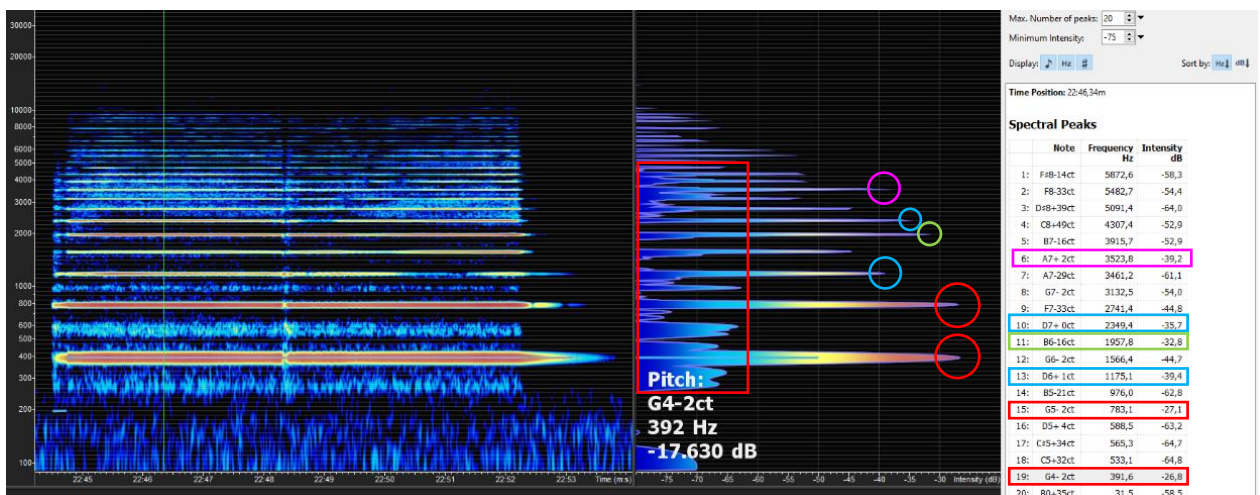
Premda je računalni program prepoznao frekvenciju 440 Hz kao fundament koji nedostaje, ona je vrlo niskog intenziteta u spektru. Najintenzivniji harmonik je onaj tonske visine  $a_3$ , koji ponajviše oblikuje ton onakvim kakvim ga percipiramo. Uz zanemariv broj neharmoničkih, došlo je do preraspodjele snage harmoničkih parcijala uz intenziviranje parcijala  $g_6$ .

Slika 6.11.b Prirodni oktavni flažolet  $d_1$  žice, Bausch 1911.



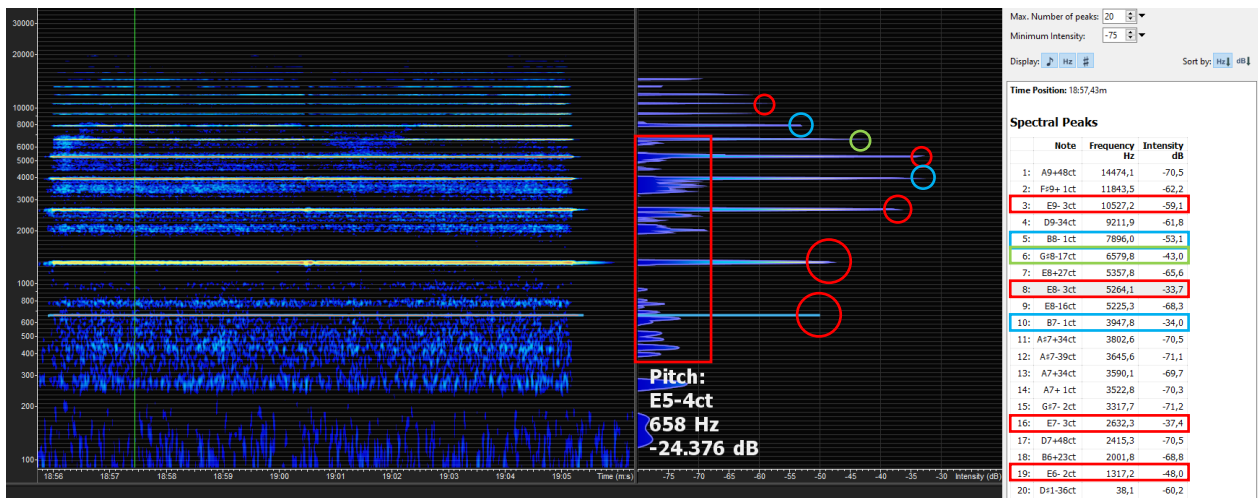
Sviranje flažoleta rezultiralo je stabilizacijom odnosa u harmonijskom spektru, iako su ispod najintenzivnijeg  $d_2$  parcijala vrlo prisutne frekvencije parcijala  $fis_1$ ,  $d_1$  i  $d$ .

Slika 6.11.c Prirodni oktavni flažolet  $g$  žice, Fantova 2013.



Prvi i drugi parcijal oktavnog flažoleta **g** žice izjednačeni su po intenzitetu, što je značajna promjena u odnosu na reprodukciju prazne **g** žice, kojoj je fundamentalni ton slabiji od prvog alivkota. Uz pad intenziteta harmonika **d** i **h** očit je i rast intenziteta harmonika **a**<sub>4</sub>. Također je izraženije prisustvo neharmoničkih parcijala koje rezultira šuštavom bojom tona.

**Slika 6.11.d Prirodni oktavni flažolet e<sub>2</sub> žice, Ceruti 1845.**



Računalni program ponovno je prepoznao frekvenciju **e<sub>2</sub>** žice kao fundamentalan ton, unatoč tome što on u spektru ne postoji. Ono što je vrlo specifično je gotovo jednak intenzitet harmonika **h<sub>4</sub>** i **e<sub>5</sub>**, s time da je alivkot **e<sub>5</sub>** ujedno i najintenzivniji harmonički parcijal u priloženome spektru.

Vrlo bogat oktavnim i kvintnim harmoničkim parcijalima, spektrogram flažoletu je preko svih primjera ispunjen i raznim neharmoničkim parcijalima niskog intenziteta, a oni zajednički formiraju specifičnu boju tona flažoletu.



## 7. Zaključak

Spektralna analiza zvučnog vala pokazala je i dokazala složenost i bogatstvo koji rezonantni sustav violine nudi. Shodno analizi može se reći kako zvučni val, odnosno ton violine živi u vremenu i prostoru u kojem se giba. Premda će se on uvijek prepoznati kao njegov prilikom reprodukcije zvuka, on se u harmonijskom spektru drastično razlikuje ovisno o instrumentu. Svaka violina naizgled ima svoje zadane postavke harmonijskog spektra, međutim, spektar nije statičan, nego je, dapače, vrlo dinamičan pa se tako odnosi harmoničkih parcijala kontinuirano mijenjaju. Ovisno o eventualnoj anomaliji titrajnog sustava u trenutku ili artikulaciji općenito, spektar može izraziti razne specifičnosti amplituda i frekvencija harmoničkih, ali i neharmoničkih parcijala. Nepredvidiva i neperiodička struktura zvučnog vala violine maksimalno otežava pristup njegovoj potencijalnoj sintetskoj rekonstrukciji. Ona bi morala sadržavati vrlo bogate i precizne informacije o svim parametrima titrajnog sustava i njegovih anomalija svih harmonijskih spektara svih frekvencija i artikulacija kako bi se u potpunosti mogla modelirati prema živom, akustičnom primjerku. Sve navedeno vodi prema rekonstrukciji zvučnog vala tek jedne violine. U konačnici, izgled i dimenzije samo su dva parametra distinkcije instrumenata; analizom se pokazalo kako se harmonijski spektar instrumenta može smatrati njegovim „*otiskom prsta*“ budući da je svaki vrlo unikatan bez obzira na frekvenciju i artikulaciju tona.

Stari talijanski majstori nepovratno su zadužili svijet glazbe i glazbenu literaturu kontinuiranim eksperimentiranjem i usavršavanjem svojih instrumenata. Bogatstvo mogućnosti koje violina nudi korespondira s njezinom vrlo kompleksnom konstrukcijom i fizikom koja se odvija u rezonantnoj kutiji prilikom produkcije zvuka. Ponašanjem poput živog organizma, titrajni sustav violine stoljećima se odupire svakom pokušaju anticipacije kretanja i pripitomljavanja njegovog zvučnog vala i bez sumnje će nastaviti intrigirati ljubitelje glazbe diljem svijeta kao najsavršeniji predstavnik gudačkih instrumenata.

## 8. Literatura

Acousti Products. (n.d.). *Quiet PC*. Dohvaćeno iz Perception and Measurement of Noise from PCs and IT Equipment: <https://quietpc.de/pcnoise>

Jambrošić, K. (2017). *Glazbena akustika*. Zagreb: Muzička akademija u Zagrebu.

Jambrošić, K. (2018). *Elektroakustika i audiotehnika*. Zagreb: Muzička akademija u Zagrebu.

Karača, I. (2013). *Uvod u muzičku tehnologiju*. Sarajevo: Muzička akademija u Sarajevu, Institut za muzikologiju.

Kresnik, F. (1951). *Starotalijansko umijeće građenja gudačkih instrumenata*. Zagreb: Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti.

Leccese, F. (2018). *The bowed string instruments: acoustic characterization of unique pieces from the Italian*. IOP Publishing Ltd.

Modney, J. (n.d.). *Sound American*. Dohvaćeno iz Ciaconna with just intonation: A practical guide to violin tuning / A wilderness journey with Bach: <https://soundamerican.org/issues/just-intonation/ciaconna-just-intonation-practical-guide-violin-tuning-wilderness-journey>

Oleh. (2016, August 18). *Oleh*. Dohvaćeno iz Basic sound waves with C++ and JUCE: <https://medium.com/@olehc/basic-sound-waves-with-c-and-juce-50ec9f0bfe5c>

Tanodi, Z. (1997). *Osnove elektroničke glazbe*. Zagreb: Muzička akademija u Zagrebu.

Ugrenović, A. (1951). *Drvo za rezonanciju od Stradivarija do danas u svijetlu nauke*. Zagreb: Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti.