
Ana Žegarac

Ispitivanje uticaja tornavoza na zvuk klasične gitare

Tornavoz je deo koji se ponekad koristi u konstrukciji klasične gitare. Ispitivan je njegov uticaj na boju i prostiranje zvuka klasične gitare. Poređeni su snimci tonova proizvedenih na gitari korišćenjem svakog od 9 tornavoza različitih dužina, kao i bez korišćenja tornavoza. Zvuk je sniman sa dva mikrofona od kojih je jedan bio postavljen kod glave izvođača, a drugi na rastojanju od jednog metra ispred njega. Dobijeni rezultati pokazuju da se Helmholtcova rezonancija može koristiti kao model za uticaj tornavoza na boju tona. Ona je uspešno predvidela pojačanja harmonika u 80% slučajeva. Zaključeno je i da tornavoz utiče na prostiranje zvuka – određeni tonovi snimani dok je gitara imala tornavoz bili su znatno glasniji na jednom mikrofону u odnosu na drugi.

Uvod

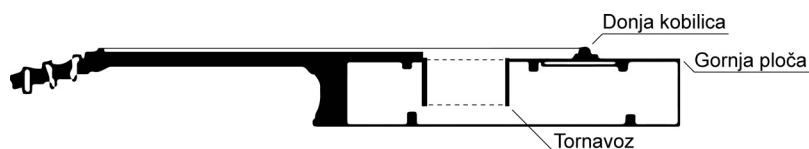
Osnovni parametri kojima se opisuje zvuk muzičkog instrumenta su visina, jačina i boja. Kod prostih tonova, visina je određena frekvencijom tona, dok je kod složenih tonova ona određena frekvencijom osnovnog tona, odnosno najnižeg. Jačina predstavlja energiju zvučnog talasa koja se u jedinici vremena prenese kroz jediničnu površinu normalnu na pravac prostiranja talasa. Boja tona zavisi od odnosa amplituda viših harmonika. Osnovni ton se naziva prvi harmonik, a frekvencija svakog sledećeg harmonika je ceo broj puta veća od frekvencije prvog.

Klasična gitara je trzani žičani muzički instrument. Njeno telo služi efektivnijem prenošenju vibracija žica na okolni vazduh. Kada izvođač okine žicu na gitari, te vibracije se preko donje kobilice prenose na gornju ploču. Ovako se i okolni vazduh podstiče na vibraciju i pojačava ton.

U želji za pravljenjem instrumenta sa što lepšim i prijatnijim tonom, u 19. veku graditelji su se upustili u eksperimentisanje sa ugrađivanjem nestandardnih delova. Verovatno najpoznatiji među njima, Antonio Torres Jurado (1817 – 1892), dao je osnovu konstrukcije klasične gitare koju danas znamo, s tim što je u neke od svojih gitara ugrađivao i tornavoz, deo

Ana Žegarac (1996), Beograd, Ljube Šercera 4, učenica 3. razreda Računarske gimnazije u Beogradu i 3. razreda Srednje muzičke škole „Vatroslav Lisinski” u Beogradu

valjkastog oblika. Tornavoz je bio pričvršćen za gornju ploču gitare i spuštao se skoro do donje (slika 1). Verovalo se da je uticao na boju nižih tonova i da ih je pojačavao, kao i da je zbog svog cilindričnog oblika usmeravao zvuk ka publici, pa je samim tim izvođač čuo bitno tiši ton. Iako je određeni broj graditelja sledio Toresov primer, tornavoz je vremenom prestao da se koristi. Međutim, neki savremeni graditelji su ponovo počeli da ga ugrađuju, samo što su sada česti i tornavozi dugački svega dva do tri centimetara (Romanillos 1997).



Slika 1.
Skica poprečnog preseka gitare sa tornavozom

Figure 1.
Cross section of a guitar with tornavoz

Fenomen koji bi mogao da objasni uticaj tornavoza je Helmholtzova rezonancija, pojava da se u šupljini zatvorenog tela stvara rezonancija kada vazduh struji iznad nje. Na primer, kada vazduh počne da struji preko grla flaše, čuće se zvuk. Ova pojava je opisana sledećom formulom (Wolfe):

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{P}{V_0 L}} \quad (1)$$

gde su:

f_H – rezonantna frekvencija

v – brzina zvuka u vazduhu

P – površina poprečnog preseka grla, u ovom slučaju tornavoza

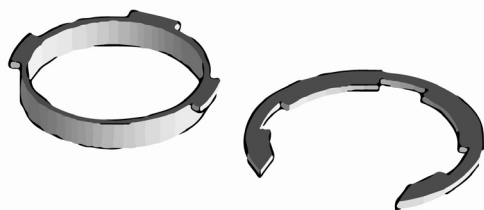
V_0 – zapremina šupljine, u ovom slučaju tela gitare

L – dužina tornavoza

Usled Helmholtzove rezonancije samo neki od harmonika treba da budu pojačani kada je ton odsviran na gitari sa određenim tornavozom, odnosno tornavoz bi, u zavisnosti od dužine, trebalo da menja boju tona. Ovaj rad ima dva cilja. Prvi, da se na osnovu ispitivanja boje zvuka snimanog na gitari sa različitim tornavozima utvrdi koliko dobro Helmholtzova rezonancija opisuje promene, a drugi određivanje razlike u zvuku snimanog pored glave izvođača i na mestu publike.

Metod

Tornavozi su napravljeni od kompozitnog materijala korišćenjem 3D štampača ZPrinter 250, nakon čega su nalakirani lakom za čamce. Dužina najmanjeg tornavoza je 1 cm, a svakog sledećeg za po 1 cm veća. Najduži od tornavoza (dužine 9 cm) nije dodirivao donju ploču gitare. Istim postupkom napravljen je i adapter koji je držao tornavoze na mestu tokom snimanja (slika 2). Spoljašnja površina gornje ploče oko otvora gitare bila je



Slika 2.
Model tornavoza (levo)
i adaptera (desno)

Figure 1.
Model of the tornavoz
(left) and adapter
(right)

oblepljena krep trakom, a na nju super lepkom zalepljen adapter. Debljine zidova tornavoza i adaptera bile su po 3 mm, a spoljašnji prečnik tornavoza 86 mm. Gitara korišćena prilikom snimanja bila je CG 111C marke Yamaha.

Snimanje je vršeno u muzičkom studiju. Korišćena su dva kondenzatorska mikrofona AKG C-12 VR. Jedan je bio postavljen sa desne strane glave izvođača, na udaljenosti od oko 30 cm, usmeren ka gitari, a drugi ispred izvođača, na udaljenosti od jednog metra od instrumenta. Temperatura gluve sobe je bila konstantna tokom snimanja i iznosila je 23°C.

Sniman je zvuk gitare sa 9 tornavoza različitih dužina, kao i zvuk gitare bez tornavoza (ali sa adapterom), dakle ukupno 10 različitih varijanti tornavoza. Snimana su po 32 tona odsvirana sa svakim od tornavoza (od tona e u velikoj oktavi do tona ais u drugoj oktavi). Na svakoj od žica odsvirano je po 5 tonova (počevši od prazne žice svirano je po intervalima male terce do 12. polja, sa izuzetkom prve žice na kojoj su odsvirane i dve terce preko 12. polja). Nakon svakog seta snimanja isti postupak je ponovljen sa drugim tornavozom. Prilikom snimanja korišćena je zvučna kartica RME Fireface 800, a snimano je korišćenjem softverskog paketa Pro Tools 10. Snimano je dvokanalno u WAV formatu. Na prvom kanalu sniman je zapis sa mikrofona koji je stajao pored izvođača, a na drugom sa frontalnog mikrofona. Frekvencija uzorkovanja bila je 44 100 Hz i svaki uzorak je sadržao informaciju od 24 bita.

Obradom podataka u softverskom paketu MATLAB dobijen je frekvencijski spektar svakog od tonova, a za svaki od njih poređeni su samo intenziteti prvih 10 harmonika. To je urađeno na sledeći način. Iako je za štimovanje gitare posle svakog seta snimanja korišćen štimer, nije se moglo osigurati da svaki put bude naštimovana na tačnu frekvenciju, već je ona varirala nekoliko herca. Zbog toga je za svaki od snimljenih tonova prava frekvencija osnovnog tona računata iz snimljenih podataka traženjem lokalnog maksimuma. Za frekvenciju n-tog harmonika uzimana je najjača frekvencija u okolini od deset uzoraka tog harmonika. Ovako su dobijene 32 matrice dimenzija 10×10, odnosno po jedna za svaki od 32 tona koja su svirana. Polja matrice predstavljaju intenzitete prvih 10 harmonika dobijenih za svaku od deset varijanti tornavoza.

Uticaj tornavoza na boju ispitivan je skaliranjem spektara tako da su osnovni tonovi imali jedinične intenzitete i poređenjem odnosa intenziteta harmonika. Zbog Helmholtzove rezonancije samo bi određeni harmonici trebalo da budu pojačani kada je ton odsviran sa datim tornavozom.

Uzmimo da je na primer harmonik 9 odsviran sa tornavozom 1 (dalje u tekstu harmonik (1, 9)) trebalo da bude pojačan. Uticaj Helmholtcove rezonancije procenjen je na sledeći način: intenzitet harmonika koji je trebalo da bude pojačan zbog prisustva određenog tornavoza poređen je sa srednjim intenzitetom istih harmonika snimljenih sa tornavozima koji po formuli 1 ne bi trebalo da dovedu do njegovog pojačanja. Odnosno, intenzitet harmonika (1, 9) poređen je sa srednjim intenzitetom svih harmonika 9 koji nije trebalo da budu pojačani prisustvom ostalih tornavoza. Ako je srednji intenzitet bio manji, smatrano je da je Helmholtcova rezonancija uspešno predvidela pojačanje intenziteta. Za svaki ton je računat procenat uspešnog poklapanja deljenjem ukupnog broja harmonika koji su smatrani pojačanim zbog Helmholtcove rezonancije sa ukupnim brojem onih koji je po formuli 1 trebalo da budu pojačani.

Radi procenjivanja razlike u zvuku gitare koji čuje izvođač i koji čuje publika, poređen je odnos apsolutnih jačina osnovnih tonova snimljenih svakim od mikrofona. Kako izvođač nije mogao svaki od tonova da odsvira istom jačinom, apsolutne intenzitete različitih tonova nije bilo smisla upoređivati.

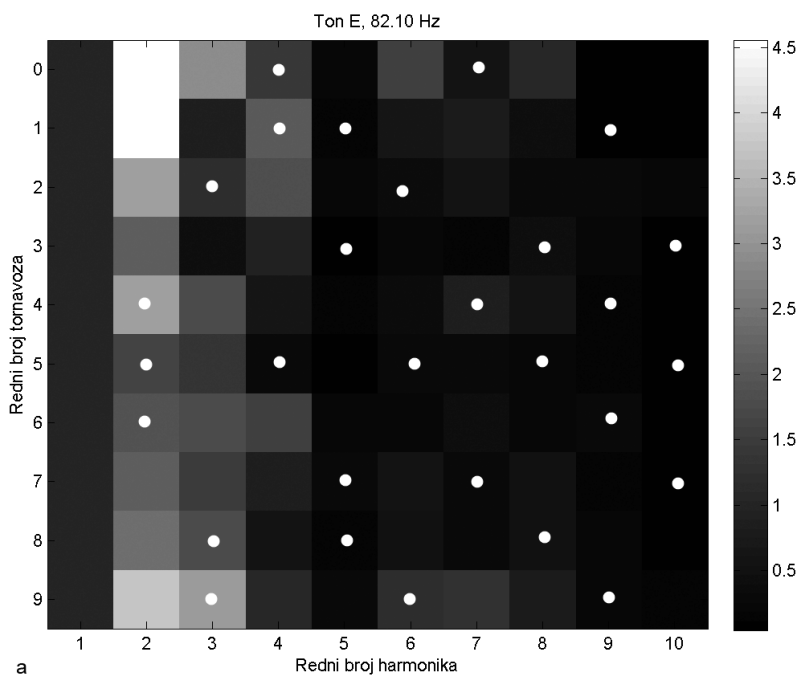
Rezultati i diskusija

Kako bi se stekao bolji uvid u relativnu jačinu harmonika, krajnji rezultati za svaki ton predstavljeni su na dijagramima na čijim su osama redni brojevi harmonika, odnosno tornavoza. Za dužinu nultog tornavoza uzeta je debljina gornje ploče gitare i adaptera (6 mm). Boje polja na slikama predstavljaju relativan intenzitet harmonika u odnosu na prvi.

Na slikama 3 i 4 nalaze se dijagrami na kojima su prikazane relativne jačine harmonika u zavisnosti od tornavoza koji je bio na gitari tokom snimanja. Tačke na poljima pokazuju koji harmonici bi zbog Helmholtcove rezonancije trebalo da budu pojačani.

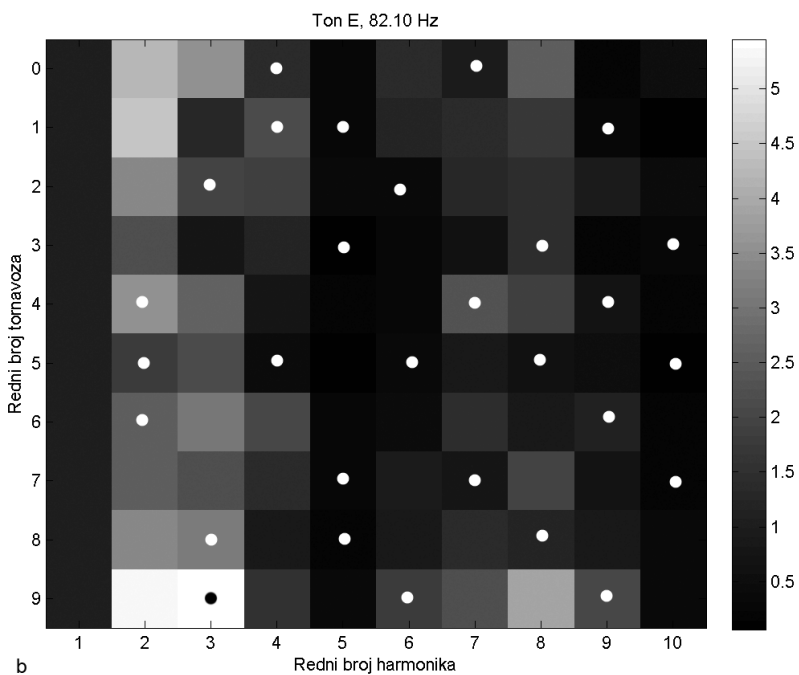
Izačunat je odnos broja harmonika koji su pojačani i broja harmonika koji je trebalo da budu pojačani zbog Helmholtcove rezonancije za svaki ton i za oba mikrofona. Harmonici su smatrani pojačanim ako su ispunili uslov naveden u odeljku Metod, a trebalo je da budu pojačani zbog Helmholtcove rezonancije ako im je frekvencija bila jednaka celobrojnom umnošku neke odgovarajuće frekvencije izračunate po formuli (1). Na osnovu toga je računat procentat uspešnih poklapanja za svaki od mikrofona. Za mikroskop koji se nalazio pored glave izvođača (mikrofon 1), on je iznosio 79%, a za onaj koji se nalazio na mestu publike (mikrofon 2) 76%. Iako je poklapanje veće kod mikrofona 1, to nam ne govori da je izvođač čuo veću razliku u boji tona, već samo da Helmholtcova rezonancija bolje opisuje promene koje je čuo.

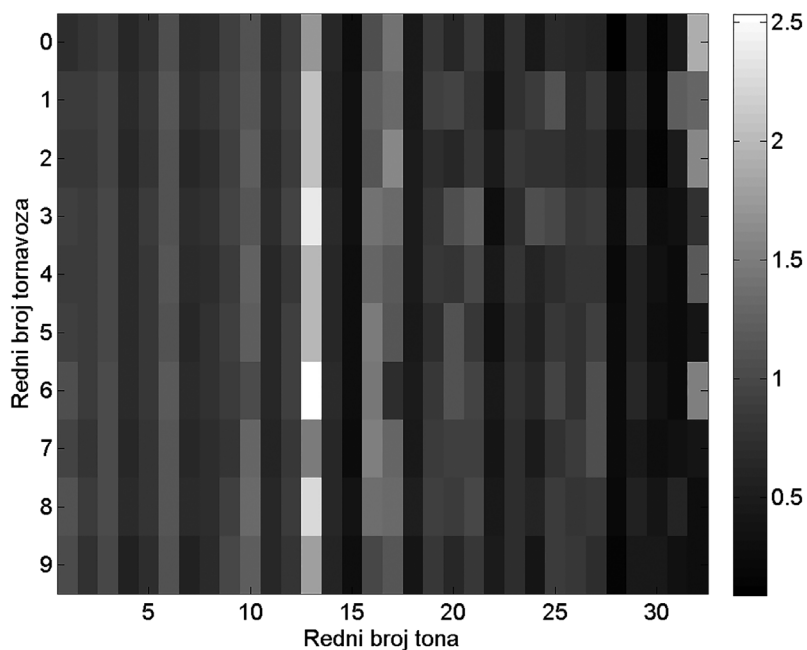
I odnos apsolutnih jačina osnovnih tonova je predstavljen na dijagramu sličnom prethodnim (slika 4): indeksi polja označavaju redni broj tornavoza, odnosno redni broj harmonika, a boja količnik jačine osnovnog tona snimljenog mikroskopom koji se nalazio pored glave izvođača i jačine osnovnog tona snimljenog frontalnim mikroskopom.



Slika 3.
 Relativne jačine prvih 10 harmonika tona E za svih 10 varijanti tornavoza snimljenih na mikrofONU 1 (a) i mikrofONU 2 (b)

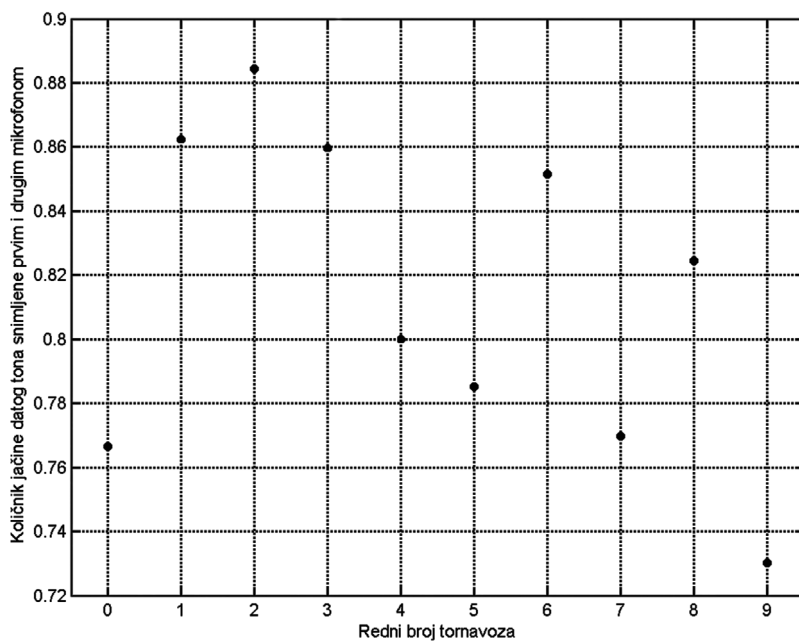
Figure 3.
 Relative intensities of the first 10 harmonics of the tone E2 with each of the tornavoces, recorded on microphone 1 (a) and microphone 2 (b)





Slika 4.
Odnos jačina tonova snimljenih prvim i jačina tonova snimljenih drugim mikrofonom

Figure 4.
Ratio of intensities recorded with the first and the second microphone



Slika 5.
Srednje vrednosti količnika jačina

Figure 5.
Average values of the ratios of intensities

Na slici 5 se nalaze srednje vrednosti tih količnika za svaki od tornavoza. U proseku, tonovi su se jače čuli na drugom mikrofonu, odnosno onom koji stoji na mestu na kom bi bila publika. Iako se kreću u relativno uskom intervalu, može se primetiti da su količnici za nijansu veći za tornavoze 1, 2, 3, 6 i 8.

Zaključak

Na osnovu razlika u odnosu jačina viših harmonika ustanovljeno je da boja tona bitno zavisi od tornavoza. Helmholtcova rezonancija je uspešno predvidela pojačanje harmonika u 78% slučajeva, što govori da ona može koristiti za opis uticaja tornavoza na zvuk klasične gitare. Odnosi intenziteta harmonika i odnosi intenziteta osnovnih tonova razlikuju se u zavisnosti od položaja mikrofona kojim je snimano i dužine tornavoza. Ovo znači da se drugačija boja tona čuje na mestu publike i na mestu izvođača, odnosno da tornavoz utiče i na prostiranje zvuka gitare.

Istraživanje bi moglo da se poboljša pravljenjem mehaničkog okidača, čime bi se osiguralo da je žica svaki put okinuta istom jačinom. Mogao bi detaljnije da se ispituje uticaj tornavoza na prostiranje zvuka, kao i uticaji tornavoza napravljenih od različitih materijala: drveta, metala, ugljeničnih vlakana, itd. Istraživanje bi moglo da se razvija traženjem teorijskog modela koji bi opisivao uticaj tornavoza na jačinu tona.

Zahvalnost. Zahvaljujem se Bojanu Dragojeviću na realizaciji snimanja i Urošu Markoviću i Dušanu Alagiću na pomoći pri organizaciji snimanja. Zahvaljujem se profesoru Aleksandru Hadži-Đorđeviću na pruženim informacijama o tornavozu i o konstrukciji klasične gitare, kao i mentorima, Marku Kuzmanoviću i Stevanu Radanoviću, na podršci i pomoći pri izradi projekta.

Literatura

Romanillos J. R. 1997. *Antonio De Torres: Guitar Maker-His Life and Work*. Westport: Bold Strummer

Wolfe J. Helmholtz Resonance. Dostupno na:
<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html> [Pristupljeno 01.11.2013.]

Ana Žegarac

Examining the Influence of Tornavoz on the Sound of the Classical Guitar

Tornavoz is a cylindrical part used in the construction of a classical guitar. It is attached to the inner side of the soundboard (Figure 1). Guitars with such attachments first see use in the 19th century, but over the years their popularity decreases significantly. Tornavoces were believed to affect the timbre of lower pitched tones, leading them to be amplified. Its cylindrical shape was also believed to cause sound to be directed towards the audi-

ence and not the performer, therefore the person playing the guitar could not hear the sound that well.

The phenomenon that could explain the effect of the tornavoz is called the Helmholtz resonance. It is the phenomenon of air resonance in a cavity, such as when one blows across the top of an empty bottle.

Tornavoces used in the experiment were made using a 3D printer (ZPrinter 250), a total of nine of them were printed. Thirty two tones were played on the same guitar each time with one of the different tornavoces and once without the attachments. The played tones were recorded with two microphones (AKG C-12): one placed near the head, and the other at about a meter in front of the performer.

After processing, only the intensities of the ten harmonics were compared for each tone. In order to assess the influence of the Helmholtz resonance, all spectra was scaled so that the first harmonics had unit intensities (Figure 3 show spectra recorded on microphones 1 and 2). The influence of the Helmholtz resonance was estimated by doing the following: the intensity of the harmonic with the attached tornavoz was compared to the average intensity of the same harmonics recorded with tornavoces that should not amplify the sound. If the average intensity should be smaller, the Helmholtz resonance would be correct in the prediction of amplification.

To conclude an estimate in sound difference between what the performer and the audience heard, a comparison was made between absolute intensities of the first harmonic recorded (Figure 5).

The results indicate that the Helmholtz resonance represents a solid model for describing the effect a tornavoz has on the timbre of a sound. It was successful to predict amplification in 78% of cases. The tornavoz was also shown to affect sound propagation – certain tones recorded while the guitar had a tornavoz were louder on one microphone in regards to the other.

