

# Subjektivna prepoznatljivost nesavršenosti zvuka crkvenog zvona - početna istraživanja

Aleksandra Samolov \* Miomir Mijić \*\*

**Apstrakt** — Cilj ovoga rada je bio da se utvrde granice devijacije frekvencija parcijala u zvuku crkvenih zvona pri kojima se konstatuje disharmoničnost njihovog zvuka. U tom cilju izvršeni su subjektivni testovi sa sintetisanim signalima koji su reprezentovali zvuke crkvenih zvona čija je masa reda veličine 50 kg i 250 kg. Konstatovano je da se disharmoničnost primećuje pri odstupanjima frekvencije parcijala koja su u intervalu 10-20 centi, zavisno od frekvencije.

**Keywords** — disharmoničnost, subjektivni test, zvono

## I. UVOD

Zvona su karakteristična pojava u skoro svim kulturama. Iako su tokom istorije imala razne funkcije, zvona su najčešće bila korišćena u religiozne svrhe. Kao zapadnoevropski muzički instrument, zvona su se razvila, u XV i XVI veku, kada su zanatlije koje su pravile zvona otkrili mogućnost štimovanja njihovih harmonika. Posebno zanatlije u Holandiji i Belgiji isticali su se u tome [1]. U ranom XVII veku u Engleskoj su počela da se prave zvona koja su u svom spektru imala tonove dijatonske skale.

Razvojem livarskog zanata počela su da se postavljaju i pitanja o vezi oblika zvona i kvaliteta njihovog zvuka, što je rezultovalo razvojem posebne nauke o zvonima, kampanologije. Ključno pitanje ove naučne discipline bilo je nalaženje veza između profila zvona (njegovog poprečnog preseka) i spektralnih komponenti u njegovom zvuku. Ovo je posebno bitno naglasiti, jer karakter samog niza određuje kvalitet zvuka zvona. Od fundamentalnog značaja za zvuk zvona kao instrumenta su ukupni intenzitet zvuka i njegovo trajanje u vremenu, uobičajeno nazvano vreme odzvana.

Zvuk zvona ne sadrži harmonijski niz spektralnih komponenti kao što je to slučaj sa zvukom drugih muzičkih instrumenata. Zategnuta žica ili vazdušni stub oscilovanjem generišu pravilan harmonijski niz, što kod zvona nije slučaj. Eksperimentalno dobijeni odnosi kod dobro napravljenog zvona su 1.00 : 2.07 : 2.24 : 3.09 : 3.76 ili 1.00 : 1.78 : 2.61 : 2.76 : 4.41 [2]. Pošto se termin „harmonik“ odnosi na spektralne komponente čije su

frekvencije celobrojni umnošci frekvencije osnovnog tona, za opisivanje komponenata zvuka zvona koristi se termin „parcijal“ [3]. Poređenjem odnosa spektralnih komponenti, odnosno parcijala u zvuku zvona i harmonika u zvuku nekog klasičnog instrumenta može se zaključiti da osim što niz kod zvona ima neharmonijski karakter, on je takođe i zbijeniji na frekvencijskoj osi. Na primer, frekvencija petog harmonika nekog muzičkog instrumenta definisana je kao pet puta viša od osnovne frekvencije, dok je vrednost frekvencije petog parcijala kod zvona približno jednaka četiri puta višoj frekvenciji od najniže, to jest prve spektralne komponente.

Zvono koje je pobuđeno da osciluje, to čini na izuzetno kompleksan način. Njegovo vibriranje može se opisati kao linearna kombinacija normalnih vibracionih modova čije su početne amplitude određene načinom izobličavanja forme zvona usled vibriranja. Kompleksnost zvuka posledica je velikog broja normalnih modova različitog karaktera koji doprinose oscilovanju. Modovi se u literaturi klasifikuju u grupe, što u mnogome olakšava i razumevanje muzičkog karaktera parcijala zvona [4].

Prirodno je i jednostavnije za livce i muzičare bilo da se parcijali umesto odnosom frekvencija, prikazuju nazivima određenih tonova. Uobičajeni nazivi prvih pet parcijala su: donja oktava (hum), fundamental (za oktavu viši od tona donje oktave), mala terca, kvinta i nominal (za dve oktave viši od tona donje oktave). Ovih pet parcijala su i najznačajniji za zvuk zvona. Viši parcijali imaju manji intenzitet i kraće trajanje u odnosu na prvih pet [3].

U ovom radu su prikazani rezultati istraživanja najmanje potrebne devijacije u frekvencijama parcijala zvuka zvona da bi se zvuk zvona subjektivno doživljavao kao disharmoničan. U tom cilju izvršeno je subjektivno testiranje potrebnog minimalnog odstupanja u frekvencijama pojedinih parcijala da bi se u zvuku zvona konstatovala disharmoničnost (takozvana „granica disharmoničnosti“). Ovo testiranje je izvršeno za dve pretpostavljene veličine zvona, to jest za više i niže frekvencije.

## II. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Da bi se odredile granice primetnosti disharmoničnosti sintetizovan je niz tonova koji predstavlja pet osnovnih parcijala sadržanih u zvuku jednog zvona. Kao polazna osnova za sintezu uzet je snimak zvuka dva realna crkvena zvona. Prvo zvono je imalo masu oko 50 kg, a drugo oko 250 kg. Ovakvim izborom pokriven je širi opseg frekvencija parcijala u zvuku od 131 Hz, kolika je

Ovaj rad je napisan na osnovu aktivnosti realizovanih u okviru projekta 23046 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

\*Aleksandra Samolov je student doktorskih studija na Fakultetu za fizičku hemiju, deo ovih studija odvija se na Elektrotehničkom fakultetu (Laboratorija za akustiku) u Beogradu (e-mail: sale1509@yahoo.com)

\*\*Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: emijic@etf.bg.ac.yu)

vrednost frekvencije donje oktave većeg zvona, do 2637 Hz, kolika je frekvencija najvišeg parcijala u zvuku manjeg zvona.

Prvi parcijal manjeg zvona (donja oktava) imao je frekvenciju 659 Hz, što odgovara muzičkom tonu e" (E5). Ovaj ton je poslužio kao osnova za definisanje ostala četiri parcijala u sintetizovanom signalu. Za njihovo određivanje korišćena je pretpostavljena struktura idealnog zvona sa komponentama koje odgovaraju dobro temperovanom tonskom sistemu. Tako parcijal označen kao prima odgovara tonu e"" (E6) i ima frekvenciju 1318 Hz, terca odgovara tonu g"" (G6) i ima frekvenciju 1567.98 Hz, kvinta je ton h"" (H6) sa frekvencijom 1975.53 Hz, a peti parcijal, takozvani „nominal“ je ton e"" (E7) sa frekvencijom 2637 Hz.

Prvi parcijal težeg zvona imao je frekvenciju 131 Hz, što odgovara muzičkom tonu c (C3). U ovom slučaju prima je ton c' (C4) i ima frekvenciju 262 Hz, mala terca je ton e' (E4) sa frekvencijom od 311.13 Hz, kvinta je ton g' (G4) frekvencije 392 Hz, a nominal je ton c" (C5) frekvencije 524 Hz.

Signal sa ovakvom diskretnom strukturom spektralnih komponenti generisani su u programskom paketu MATLAB. Da bi se dobili kontrolisani uslovi eksperimenta uvedene su dve polazne aprokcimacije. Prva aproksimacija je bila da su svih pet parcijala sintetisanog zvuka s jednakim amplitudama. Ovakva pretpostavka može se smatrati aproksimacijom s obzirom na činjenicu da su amplitude parcijala kod realnih zvona međusobno različite sa stohastičkim odnosom veličina kod različitih zvona. Druga aproksimacija koja je uvedena na početku sinteze signala je da su svi parcijali u zvuku zvona konstantnih amplituda. U realnom zvuku zvona amplitude parcijala lagano opadaju u vremenu po eksponencijalnom zakonu, pa bi takva pretpostavka odgovarala stanju zvuka posmatranog u jednom kraćem vremenskom intervalu.

Polazeći od definisanog skupa pet parcijala s navedenim frekvencijama, generisani su signali u kojima je frekvencija pojedinačnih parcijala varirana u zadatim skokovima. Ti skokovi su bili definisani u centima. Cent je jedinica za merenje muzičkih intervala na logaritamskoj skali. Koristi se za definisanje veličine izuzetno malih muzičkih intervala ili za poređenje veličine intervala u različitim tonskim sistemima. Jedan cent je, po definiciji, hiljadudvestoti koren broja 2, odnosno 1/17.3 delova procenta. Na osnovu toga, interval od 1200 centi odgovara intervalu jedne oktave. U dobro temperovanom sistemu jedan polustepen ima 100 centi.

Promene su uvek vršene samo na jednom od parcijala u zvuku zvona, dok bi ostali bili nepromenjeni. Pri tome je prvi parcijal, donja oktava, u svim varijacijama ostajao nepromenjen sa konstantnom frekvencijom 659 Hz. Ostalim parcijalima frekvencije su varirane u koracima  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 15$ ,  $\pm 20$ ,  $\pm 25$ ,  $\pm 30$ ,  $\pm 40$  i  $\pm 50$  centi.

Subjektivni testovi granice disharmoničnosti zvuka zvona organizovani su uz učešće 11 subjekata. Svaki od njih je imao minimalno osmogodišnje muzičko obrazovanje, što je trebalo da garantuje njihovo razumevanje pojma disharmoničnosti u zvuku zvona.

Subjekti su slušali pripremljene signale u kojima je sukcesivno povećavana devijacija frekvencije jednog od parcijala u koracima, definisanim u centima, koji su gore navedeni. Reprodukcijska signala vršena je pomoću slušalica u studijskim uslovima, što je garantovalo odsustvo eventualnih ometajućih zvukova sa strane.

Sintetizovani signali koji su pripremljeni i reprodukovani subjektima imali su trajanje 5 s i puštani su im u nizu jedan za drugim. Između signala umetana je pauza u trajanju od 3s. Svaki prvi reprodukovani signal u nizu bio je zvuk idealnog zvona sa parcijalima postavljenim na izračunatim idealnim frekvencijama, dok su sledeći signali imali promenjenu frekvenciju jednog od parcijala. Ispitanicima su grupe signala puštane nasumično, stohastički sa aspekta unetih promena frekvencije a ne po rastućem redosledu odstupanja. Time se težilo da se izbegne efekat navikavanja čula sluha na pojedinu vrstu zvuka.

### III. REZULTATI

#### A. Minimalno primetna disharmoničnost manjeg zvona

Rezultati ispitivanja granice disharmoničnosti manjeg zvona prikazani su u Tabeli 1. Prva kolona predstavlja frekvencije parcijala idealnog zvona iz dobro temperovanog sistema. U drugoj su date srednje vrednosti pozitivnog odstupanja u centima, dok su u trećoj koloni date vrednosti ovih odstupanja preračunatih u Hz. Ova konverzija je izvršena sledećom formulom:

$$a = b * 2^{\frac{n}{1200}} \quad (1)$$

gde je  $b$  frekvencija parcijala iz dobro temperovanog sistema u Hz, a  $n$  je odstupanje u centima. Ovi rezultati su prikazani i grafički na Slici 1, gde je odstupanje nacrtano u funkciji idealne frekvencije. U dijagramu su ucrtane i standardne devijacije pojedinačnih rezultata dobijenih od subjekata.

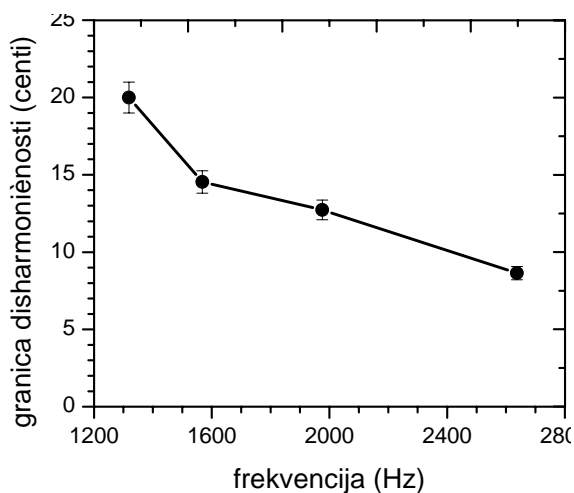
Na isti način, kao i kod prikazivanja pozitivnog odstupanja, izvršena su izračunavanja za negativna odstupanja frekvencije parcijala od idealnih vrednosti. Rezultati su prikazani u tabeli 2. Sve oznake imaju isto značenje kao i u prethodnom slučaju. Rezultati su prikazani i grafički na Slici 2, gde je odstupanje nacrtano u funkciji idealne frekvencije, sa označenim standardnim devijacijama.

#### B. Minimalno primetna disharmoničnost većeg zvona

Veće zvono ima frekvencije svih parcijala na relativno niskim frekvencijama, od 131 Hz do 524 Hz. Primenjen je isti postupak, kao i kod manjeg zvona. Rezultati za pozitivne devijacije frekvencije parcijala prikazani su u Tabeli 3 i na Slici 3, a za negativne devijacije frekvencija u Tabeli 4 i na Slici 4. Na dijagramima su prikazane srednje vrednosti i standardne devijacije. Sve oznake imaju isto značenje kao u prikazu rezultata za manje zvono.

TABELA 1: REZULTAT ISPITIVANJA GRANICE DISHARMONIČNOSTI  
MANJEG ZVONA - POZITIVNO ODSTUPANJE

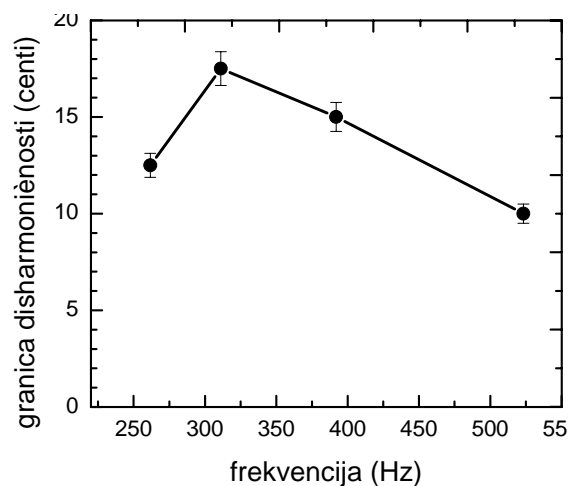
idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
1318	+20	1333.83
1567.98	+14.5	1581.20
1975.53	+12.7	1990.11
2637	+8.6	2650.21



Slika 1. Rezultati ispitivanja granice disharmoničnosti za pozitivna odstupanja frekvencija parcijala manjeg zvona

TABELA 3: REZULTAT ISPITIVANJA GRANICE DISHARMONIČNOSTI  
VEĆEG ZVONA - POZITIVNO ODSTUPANJE

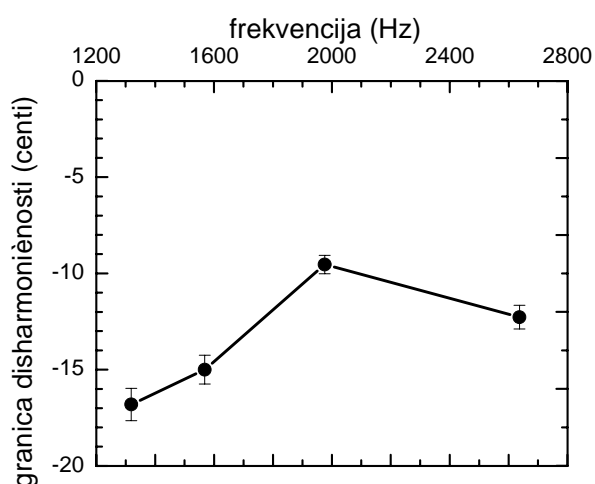
idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
262	+ 12.5	263.52
311.13	+ 17.5	314.29
392	+ 15	395.41
524	+ 10	526.28



Slika 3. Rezultati ispitivanja granice disharmoničnosti za pozitivna odstupanja frekvencija parcijala većeg zvona

TABELA 2: REZULTAT ISPITIVANJA GRANICE DISHARMONIČNOSTI  
MANJEG ZVONA - NEGATIVNO ODSTUPANJE

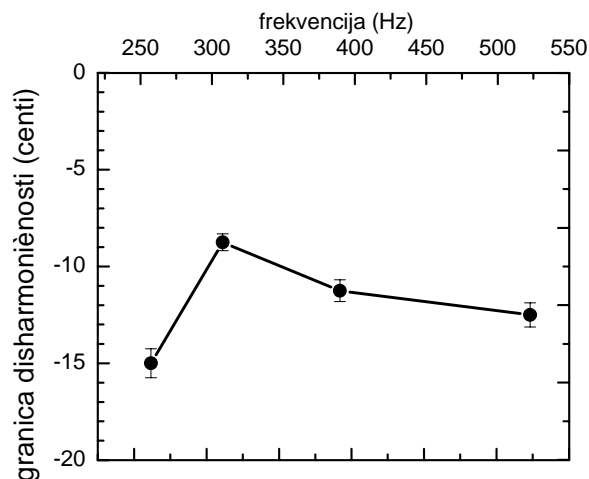
idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
1318	-16.81	1305.77
1567.98	-15	1554.45
1975.53	-9.54	1964.67
2637	-12.27	2618.40



Slika 2. Rezultati ispitivanja granice disharmoničnosti za negativna odstupanja frekvencije parcijala manjeg zvona

TABELA 4: REZULTAT ISPITIVANJA GRANICE DISHARMONIČNOSTI  
VEĆEG ZVONA - NEGATIVNO ODSTUPANJE

idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
262	- 15	259.37
311.13	- 8.75	309.56
392	- 11.25	389.46
524	-12.5	519.49



Slika 4. Rezultati ispitivanja granice disharmoničnosti za negativna odstupanja frekvencija parcijala većeg zvona

#### IV. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni u ovom početnom istraživanju pokazali su da granica disharmoničnosti zvuka crkvenog

zvona kada se menja frekvencija jednog parcijala u njemu, varira u zavisnosti od toga na kom parcijalu su unete devijacije, kao i od apsolutne vrednosti njegove frekvencije. Generalno posmatrano, opadajući tok dijagrama sa Slika 1, 2, 3 i 4 pokazuje da se granica disharmoničnosti zvuka zvona smanjuje sa porastom frekvencije. Rezultati takođe pokazuju da postoji izvesna zavisnost veličine granice disharmoničnosti od toga da li je promena frekvencije parcijala uvedena naviše ili naniže u odnosu na idealnu vrednost.

Na osnovu svih dobijenih rezultata iz ovog eksperimenta može se zaključiti da se granica disharmoničnosti zvuka crkvenog zvona pri odstupanju frekvencije jednog parcijala nalazi u opsegu od oko 10-20 centi, bez obzira na smer promene frekvencije i njenu apsolutnu vrednost. Rezultati dobijeni u ovom eksperimentu mogu se razumeti i kao pokazatelji koji određuju granice tolerancije u preciznosti livenja zvona, s obzirom da taj proces uvek rezultuje konačnom tačnošću njihovih dimenzija. Zbog toga je u zvuku realnih zvona uvek prisutno odstupanje frekvencija svih parcijala od idealnih frekvencija dobro temperovanog sistema, ali odstupaju i njihove međusobne relativne relacije u odnosu na idealne muzičke intervale (oktava, terca i kvinta). Ta pojava predstavlja osnovu anomaliju koja se javlja u zvuku crkvenih zvona, ali je to i njihova imanentna karakteristika.

Dijagrami prikazani u radu pokazuju da na nekim parcijalima postoji odstupanje od opšteg trenda promene koji se može uočiti sa porastom frekvencije. To nameće zaključak da u narednim eksperimentima treba povećati broj ispitanika kako bi se povećala statistička regularnost dobijenih rezultata.

Na kraju treba istaći, da je eksperiment čiji su rezultati prikazani u ovom radu uvod u šire istraživanje koje će se baviti subjektivnim doživljajem zvuka crkvenih zvona. Sledeći korak u tom istraživanju biće analiza granice primetnosti odstupanja frekvencije pojedinih parcijala, uz iste uslove eksperimenta kao i u ovom eksperimentu. Nakon toga će biti analizirane granice primetnosti promene i granice disharmoničnosti sa zvukom zvona koji ima promenljive amplitude, u skladu sa njihovim realnim

tokom opadanja u vremenu. Najzad, predmet analize će biti i granice disharmoničnosti zvuka crkvenog zvona kada se istovremeno menjaju frekvencije dva ili više parcijala. Sve analize potrebno je izvršiti na dva načina: sa kompetentnim subjektima koji imaju muzičko obrazovanje i iskustvo, kao i sa slušaocima koji to obrazovanje i iskustvo nemaju i kao takvi predstavljaju prosečnog slušaoca.

#### REFERENCE

- [1] T. D. Rossing and R. Perrin: Vibration of bells, *Applied Acoustics* 20, 1987, pp 41-70
- [2] A. Lehr: Contemporary Duth bell-founding art, *Neth. Acoust. Soc. Publ.* 7, 1965, pp 20-49
- [3] H. F. Olson: Music, physics and engineering, 2nd ed. Dover Publications, Inc., 1967, pp 36-37
- [4] A. Lehr: The deinging of swinging bells and carillon bells in the past and present, Athanasius Kicher Foundation, 1987, pp 21-24
- [5] H. G. Rinker: Livenje zvona, rad u pripremi za štampanje
- [6] E. Terhardt and M. Seewann: Auditive und objective Bestimmung der Schlagtonhöhe von Historischen Kirchenglocken *Acustica* 54, 1984, pp. 129-144
- [7] T. J. W. Hill and I. R. Summers: Discrimination of interval size in short tone sequences, *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2007, pp. 2376-2383
- [8] M. Mellody and G. H. Wakefield: The time-frequency characteristics of violin vibrato: Modal distribution analysis and synthesis, *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 2000, pp. 598-611
- [9] F. Loosen: Intonation of solo violin performance with reference to equally tempered, Pythagorean, and just intonations, *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1993, pp. 525-539
- [10] J. C. Brown and K. V. Vaughn: Pitch center of stringed instrument vibrato tones, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 1996, pp. 1729-1735

#### ABSTRACT

Bells are very specific sound sources. They have distinct, but, unlike music instruments, inharmonic partials. These partials arise from modes of vibration of the bell and depend on dimensions and potential irregularities of the bell. Problems of analysis of such signal, including detecting partials and tracking their changes in time, and detecting potential irregularities, are described in this paper.

#### **SUBJECTIVE IDENTIFICATION OF IMPERFECTION IN CURCH BELLS SOUND – INITIAL RESEARCH**

Aleksandra Samolov, Miomir Mijić